



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
LABORATOIRE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR ET DE L'ALTEROLOGIE
Option : SCIENCES GEOTECHNIQUES ET HYDROTECHNIQUES

Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun.

Thèse présentée et soutenue publiquement

Le 03 février 2007

par

Gaston LIENOU

Matricule : 865461

Pour obtenir le grade de
Docteur Ph/D en Sciences de l'eau

Devant le jury composé de :

M. Georges Emmanuel EKODECK , Professeur, Université de Yaoundé I	Président
M. Félix TCHOUA , Professeur, Université de Yaoundé I	Rapporteur
M. Jean-Claude OLIVRY , Directeur de recherche Emérite, IRD, Montpellier	Rapporteur
M. Paul BILONG , Maître de Conférences, Université de Yaoundé I	Examineur
Mme Véronique KAMGANG K. B. , Maître de Conférences, Université de Yaoundé I	Examineur
M. Gil MAHE , Directeur de recherche, Hydrosiences, Montpellier	Examineur

à mes parents

à Séphora, ma fille

à Rose, ma femme

AVANT-PROPOS

Cette thèse est l'aboutissement de huit années de travail, depuis 1998, dans une collaboration informelle avec le Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé, essentiellement basée sur le volontarisme. Huit années difficiles, mais parfois captivantes, au cours desquelles une des satisfactions personnelles, au-delà de celle que me procure cette thèse, est d'avoir remis en place une banque de données de pluies et de débits sur le territoire camerounais, qui permet à nos jours de nouveaux travaux sur l'hydrologie du Cameroun. Ces données ont été obtenues à partir de la banque du laboratoire d'hydrologie de l'IRD-Montpellier. Messieurs Michel Molinier et Georges Emmanuel Ekodeck, respectivement représentant de l'IRD et directeur de l'IRGM ont entrepris les démarches administratives pour ce transfert de données. Pour ce qui est de la réalisation technique de ce transfert, je suis particulièrement reconnaissant à Nathalie Rouché et Patrick Raous, qui ont aidé, à distance, à la transformation de certaines données d'un format Hydrom à l'autre. Je remercie également Nelgar et Nadji Telro du DREM au Tchad, pour nous avoir fourni certaines données sur les parties camerounaises du bassin du lac Tchad. Nos remerciements vont également à l'ABN, pour certaines données de la Bénoué.

La seule disponibilité de ces données n'aurait pas suffi pour faire ce travail si je n'avais pas rencontré, en novembre 1999, dans le cadre du projet FRIEND-AOC du Programme Hydrologique International de l'UNESCO, l'équipe du programme VAHYNE de l'IRD.

A Monsieur Eric Servat, Directeur du laboratoire HydroSciences de Montpellier, je dois les grandes orientations pour l'élaboration d'un projet de recherche. Il a en suite œuvré à créer des conditions nécessaires et indispensables à la réalisation de mes travaux, en acceptant la lourde responsabilité de parrainer le projet de cette thèse au près des instances de l'IRD. Qu'il trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements.

Ce travail a pu être mené à bien grâce à l'encadrement scientifique et au suivi dont j'ai bénéficié auprès de Monsieur Gil Mahé. Je n'oublierai pas de si tôt l'enthousiasme, le dévouement et la rigueur scientifique dont il a fait preuve à toutes les étapes de ce travail, depuis l'élaboration du projet de recherche à la correction du manuscrit, en passant par sa

participation aux travaux sur le terrain. Je ne saurais trouver les mots justes pour lui exprimer mes remerciements.

Mes remerciements vont à l'endroit de Monsieur Jean-Emmanuel Paturel, pour les encouragements et les précieux conseils qu'il m'a prodigués aussi bien à Ouagadougou qu'à Montpellier. Il a ensuite accepté de porter ses observations sur mon manuscrit.

J'ai eu l'insigne honneur de bénéficier des conseils et encouragements de Jean-Claude Olivry dont les travaux de pionnier sur l'hydrologie du Cameroun ont servi de base aux analyses menées dans cette étude. Il a également accepté de relire mon manuscrit et me fait un grand honneur en acceptant de faire partie du jury de ce travail. Je lui dis merci pour cette importante contribution.

Je suis profondément reconnaissant à Monsieur Félix Tchoua, Professeur à l'université de Yaoundé I pour avoir accepté de superviser mes travaux. Il a su trouver du temps pour relire les manuscrits de ce travail à différentes étapes.

Depuis, le professeur Georges Emmanuel Ekodeck, s'est intéressé à mes travaux de recherche et m'a toujours réservé un chaleureux accueil dans son bureau à l'IRGM et à l'université de Yaoundé I. Il m'a fait l'insigne honneur de présider le jury de ce travail. Je tiens à lui exprimer ma plus vive gratitude.

Madame Kamgang, née Kabayene Beyala Véronique et Paul Bilong, Maîtres de Conférences à l'Université de Yaoundé I, m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury. Je leur suis reconnaissant pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite souligner à quel point j'ai apprécié d'avoir rencontré et côtoyé le Docteur Alain Laraque. La partie méthodologie de mesure de transport de matières de cette thèse a bénéficié de sa grande expérience dans les cours d'eau tropicaux d'Afrique centrale et d'Amérique du sud. Les discussions que j'ai eues avec lui ont été toujours intéressantes. Il a en suite accepté de porter ses observations sur les textes de ce mémoire.

Pour réaliser ce travail sur des bassins versants très éloignés les uns des autres, des missions de terrain ont été nécessaires. Si je conserve un excellent souvenir de ces tournées parfois rudes, c'est grâce au personnel du centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé. Je le remercie pour son précieux concours. Je pense en particulier à Jacob Nwalal et Issa dont l'inébranlable bonne humeur fut pour moi un puissant réconfort.

J'ai passé de longues et pénibles années auprès de Messieurs Luc Sigha-Nkamdjou et Daniel Sighomnou, chercheurs au CRH. Leurs apports pour moi vont au-delà de ce travail de thèse. Qu'ils trouvent en ces quelques mots un signe de ma reconnaissance.

Que toute l'équipe du programme VAHYNE du laboratoire HydroSciences de Montpellier veuille bien m'excuser pour tout ce temps où elle a dû me supporter, pendant qu'elle m'assurait des conditions optimales. Qu'elle soit assurée de ma gratitude pour son soutien et ses encouragements. Je pense aussi à Pierre Diello, Bamory Kamakate ..., mes compagnons de labeur du même bureau.

Qu'il me soit également permis de souligner la participation collective de beaucoup d'autres personnes : collaborateurs, frères et amis, trop nombreux pour être cités ici. Je leur sais gré des contributions multiformes qu'ils m'ont régulièrement apportées dans mes travaux et tout particulièrement dans la réalisation de cette étude et je tiens à dire à tous mes remerciements.

Je réserverais une mention spéciale aux familles Sikounmo et Choula. Puissent elles trouver ici un motif d'excuse pour de lourdes charges familiales que je leur ai souvent confiées lors de mes multiples déplacements.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	- 1
-----------------------------	-----

DEUXIEME PARTIE : DESCRIPTIONS GENERALES.....	- 13
---	------

CHAPITRE 1 : RAPPELS SUR LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE	- 15
---	------

INTRODUCTION	- 17
1. LA PRESENTATION GEOGRAPHIQUE	- 17
2. LES FACTEURS DU CLIMAT	- 19
3. LES VARIATIONS PLUVIOMETRIQUES	- 24
4. L'EVOLUTION DES ECOULEMENTS	- 29
5. LES CONSEQUENCES DE LA BAISSSE DE LA PLUVIOMETRIE ET DES ECOULEMENTS SUR LES RESSOURCES EN EAU	- 32
5.1. Eaux de surface ; exemple du lac Tchad au nord Cameroun	- 32
5.2. Eaux souterraines	- 37
6. CHANGEMENT CLIMATIQUE SIGNIFICATIF : PROBLEMATIQUE DES NORMES HYDROLOGIQUES	- 38
7. LES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX, ACTIVITES HUMAINES ET VARIABILITE CLIMATIQUE	- 39
7.1. A l'échelle du bassin versant	- 39
7.2. A l'échelle globale	- 40
8. LES SECHERESSES OBSERVEES AU COURS DU XX ^{eme} SIECLE SONT-ELLES EXCEPTIONNELLES ?	- 41
CONCLUSION	- 43

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES PROCESSUS D'EROSION SUR LES VERSANTS : ORIGINE DES MATERIAUX TRANSPORTES PAR LES RIVIERES	- 47
INTRODUCTION	- 49
1. LES FORMES DE L'EROSION	- 49
1.1 L'érosion mécanique sèche	- 49
1.2. L'érosion hydrique	- 50
1.2.1. L'érosion en nappe ou stade initial de l'érosion hydrique	- 50
1.2.2. L'érosion linéaire	- 51
1.2.3. L'érosion en masse ou glissement de terrain	- 52
1.3. L'érosion éolienne	- 53
2. LA MESURE DE L'EROSION ET DU TRANSPORT DES SEDIMENTS	- 55
2.1. Quelques définitions	- 56
2.2. Les techniques de mesures	- 58
2.3. Le calcul de la masse totale transportée	- 61
2.3.1. Les méthodes stochastiques ou des moyennes des concentrations	- 62
2.3.2. Les méthodes déterministes ou modèles de qualité	- 65
3. LA FIABILITE DES DONNEES RELATIVES AUX TRANSPORTS DES MATIERES EN SUSPENSION ET PERSPECTIVE VERS UNE SYNTHESE REGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE. -	66
CONCLUSION	- 72

DEUXIEME PARTIE : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE CAMEROUN - 73

CHAPITRE 3 : LE CAMEROUN : UN ESPACE PHYTOGEOGRAPHIQUE CONTRASTE - 75

INTRODUCTION	- 77
1. LE MILIEU NATUREL	- 77
1.1. Le relief	- 77
1.2. La géologie et la tectonique.....	- 80
1.3. Le sol	- 82

1.4. La végétation	- 83
2. LES UNITES CLIMATIQUES AU CAMEROUN	- 85
2.1. Les unités climatiques liées à l'extension en latitude du pays	- 85
2.2. Les unités climatiques liées aux particularités orographiques	- 88
3. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET LES REGIMES HYDROLOGIQUES	- 90
4. QUELQUES RESULTATS SUR LA VARIABILITE DES PLUIES ET DES ECOULEMENTS	- 95

**CHAPITRE 4 : CINQUANTE ANNEES DE MESURES DE MATIERES SOLIDES EN
SUSPENSION AU CAMEROUN : REVUE ET SYNTHESE DES
TRAVAUX**

INTRODUCTION	- 103
1. LES CARACTERISTIQUES DES BASSINS ETUDIES ET LES UNITES CLIMATIQUES CONCERNEES.	- 104
2. LES DONNEES DISPONIBLES	- 107
3. LES MATERIELS, LE PROTOCOLE DE MESURES ET LA METHODOLOGIE	- 114
3.1. Les matériels	- 114
3.2. Le protocole d'échantillonnage et méthode de calcul	- 115
4. LES REGIMES SAISONNIERS DES TRANSPORTS DE MATIERES EN SUSPENSION SUR LE TERRITOIRE CAMEROUNAIS	- 116
4.1. Les concentrations journalières	- 116
4.2. Les concentrations mensuelles	- 118
4.3. Les quantités de matériaux transportées	- 123
5. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES MATIERES SOLIDES EN SUSPENSION	- 126
5.1. Variation spatiale	- 127
5.2. Variation interannuelle	- 135
5.2.1. Les concentrations	- 135
5.2.2. Les flux	- 137
6. TRANSPORTS DE MATIERES ET ACTIVITES ANTHROPIQUES	- 140
6.1. Les zones agropastorales	- 141
6.2. Les aménagements	- 144
6.2.1. Les effets en amont (comblement des retenues)	- 145
6.2.2. Les effets en aval	- 149

6.3. Le charriage au Cameroun	- 151
7. COMPARAISONS AVEC LES BASSINS FLUVIAUX D'AFRIQUE TROPICALE	- 152
CONCLUSION	- 155

CHAPITRE 5 : ENVIRONNEMENT ET PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS ETUDIES - 157

INTRODUCTION	159
1. LA LOCALISATION ET LA JUSTIFICATION DU CHOIX DES BASSINS VERSANTS ETUDIES	- 159
2. LES CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET FACTEURS CONDITIONNELS DES ECOULEMENTS SUR LES BASSINS ETUDIES	- 162
2.1. Le bassin versant du Mayo Tsanaga	- 162
2.1.1 L'occupation de l'espace	- 164
2.1.2. Le relief et l'hydrographie	- 168
2.2. Le bassin versant du Lom	- 168
2.2.1. L'occupation de l'espace	- 168
2.2.2. Le relief et l'hydrographie	- 170
2.3. Les bassins versants forestiers (Ntem, Kienke, Nyong et Mungo)	- 171
2.3.1. L'occupation de l'espace	- 171
2.3.2. Le relief et l'hydrographie	- 175
3. LES REGIMES HYDROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS ETUDIES	- 176
3.1. Un régime tropical pur : le Mayo Tsanaga	- 176
3.2. Un régime tropical humide de transition (variante méridionale) : le Lom	- 177
3.3. Un régime tropical côtier de montagne : le Mungo	- 180
3.4. Un régime sub-équatorial: le Nyong	- 180
3.5. Les régimes équatoriaux pur : le Ntem et la Kienke	- 180
CONCLUSION	- 181

TROISIEME PARTIE : NOUVELLES MESURES ET DISCUSIONS - 183

CHAPITRE 6 : VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES ECOULEMENTS SUR LES BASSINS VERSANTS ETUDIES - 185

INTRODUCTION	- 187
1. LES DONNEES DE L'ETUDE	- 188
1.1. Collecte et inventaire	- 188
1.1.1. Les données hydrométriques	- 188
1.1.2. Données pluviométriques	- 190
1.2. Les critiques et les reconstitutions des données	- 192
1.2.1. Les principes de reconstitution des lacunes d'observation	- 192
1.2.2. La reconstitution des données manquantes	- 194
1.2.2.1. Le bassin du Lom à Bétaré Oya	- 194
1.2.2.2. Le bassin du Nyong Mbalmayo	- 196
1.2.2.3. Le bassin du Ntem à Ngoazik	- 196
1.2.2.4. Le Bassin de la Kienke à Kribi	- 197
1.2.2.5. Le bassin du Mungo à Mundame	- 198
2. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA VARIABILITE D'UNE SERIE CHRONOLOGIQUE	- 198
2.1. Représentation d'un indice centré et réduit.....	- 199
2.2. Les analyses statistiques	- 200
2.2.1. Test de corrélation sur le rang de Kendall	- 200
2.2.2. Test de Pettit	- 201
2.2.3. Procédure de segmentation	- 202
2.3. Le calcul des déficits (ou excédents)	- 203
3. LES PLUIES MOYENNES SUR LES BASSINS REPRESENTATIFS	- 204
3.1. Les pluies annuelles	- 207
3.2. Les pluies saisonnières	- 207
3.2.1. Les saisons des pluies	- 207
3.2.2. Les saisons sèches	- 211
3.2.3. Les irrégularités dans les répartitions mensuelle et saisonnière des précipitations.	- 212
4. VARIABILITE INTERANNUELLE DES PLUIES ET DES ECOULEMENTS : DU MENSUEL A L'ANNUEL.	- 213
4.1. La caractérisation d'une variabilité à l'échelle annuelle	- 213
4.1.1. La variabilité des précipitations	- 214

4.1.2. La variabilité des écoulements	- 215
4.2. La caractérisation d'une variabilité aux échelles saisonnière et mensuelle	- 219
4.2.1 La variabilité des pluies	- 220
4.2.1.1. Les pluies des saisons sèches	- 220
4.2.1.2. Les pluies des saisons des pluies	- 223
4.2.1.3. Variabilité des pluies et facteurs du climat	- 227
4.2.2. La variabilité des écoulements	- 228
4.3. Pluviométrie et déficit d'écoulement : fonctionnement hydroclimatique du mensuel au saisonnier en zone équatoriale camerounaise	- 234
4.4. Comparaison avec les fleuves gabonais	- 239
CONCLUSION	- 240

CHAPITRE 7: CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DES ANNEES ETUDIEES : PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS DE 2002 A 2004 SUR LES BASSINS VERSANTS ETUDIE

INTRODUCTION	- 245
1. DONNEES	- 245
1.1. Données de pluies	- 245
1.2. Mesures hydrométriques	- 246
1.2.1. Etalonnage des stations	- 246
1.2.2. Données de débits	- 251
2. PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS	- 251
2.1. Le bassin versant du Mayo Tsanaga (Extrême-nord Cameroun)	- 252
2.2. Le bassin versant de Lom (centre Cameroun)	- 258
2.3. Le bassin versant du Mungo (sud-ouest Cameroun)	- 265
2.4. Les bassins versants de la zone équatoriale (sud Cameroun)	- 268
3. QUELQUES OBSERVATIONS AVEC CERTAINS FLEUVES ET RIVIERES DE LA SOUS REGION AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE	- 278
CONCLUSION ET BILAN DES MODIFICATIONS DES REGIMES HYDROLOGIQUES AU CAMEROUN	- 280

**CHAPITRE 8 : REGIMES DE TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION SUR LES
BASSINS VERSANTS ETUDIES ; EVOLUTION DANS LE CONTEXTE
DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX**
..... - 285

INTRODUCTION	- 287
1. DESCRIPTIF DES STATIONS, PROTOCOLES DE MESURE ET DONNEES ANTERIEURES	- 288
1.1. Sud forestier : Ntem	- 289
1.2. Centre-Sud : Nyong	- 290
1.3. Sud côtier : Kienke	- 292
1.4. Sud-Ouest : Mungo	- 293
1.5. Centre-Est : Lom	- 293
1.6. Nord : Mayo Tsanaga	- 295
2. PROTOCOLE, MATERIEL DE PRELEVEMENT ET DE TRAITEMENT	- 299
2.1. Protocole, matériel de prélèvement sur le terrain	- 299
2.2. Protocole, matériel de traitement au laboratoire	- 301
3. VARIABILITE DES CONCENTRATIONS DANS LA SECTION JAUGEAGE ET CHOIX DES POINTS DE MESURES	- 302
3.1. Variabilité des concentrations dans la section jaugeage	- 303
3.2. Choix des points de prélèvement dans la section	- 308
4. FREQUENCE DES PRELEVEMENTS	- 311
5. VARIABILITE DES CONCENTRATIONS	- 315
5.1. Régimes des concentrations instantanées	- 316
5.2. Des régimes de concentrations régis par la couverture végétale	- 322
5.3. Relations entre les concentrations et les débits	- 325
5.3.1. Les bassins tropicaux dont les sols sont peu couverts	- 327
5.3.2. Les bassins dont les sols sont bien couverts	- 327
6. DETERMINATION DE LA CHARGE SOLIDE DES RIVIERES	- 328
7. FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION MESURES DE 2002 A 2004 ; BILAN DE PRODUCTION TOTALE DES SEDIMENTS SUR LE TERRITOIRE CAMEROUNAIS	- 334
7.1. Flux de matières en suspension mesurés de 2002 à 2004	- 334
7.2. Bilan de production totale des sédiments sur le territoire camerounais	- 341
8. VARIATIONS INTERANNUELLES DES MATIERES EN SUSPENSION	- 346
8.1. Le bassin versant du Mayo Tsanaga	- 347

8.1.1. Les variations des MES au cours des années 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Mayo Tsanaga	- 347
8.1.2. Comparaison des transports de MES au cours des années d'étude avec les résultats des travaux antérieurs	- 348
8.2. Le bassin versant du Ntem	- 352
CONCLUSION	- 353
<hr/>	
CONCLUSION GENERALE	- 355
<hr/>	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	- 363
<hr/>	
LISTE DES FIGURES	- 391
LISTE DES TABLEAUX	- 399
LISTE DES PHOTOS	- 405
ANNEXES	

RESUME

Dans le contexte connu de la diversité des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun, nous nous sommes intéressés à l'évolution récente de six bassins représentatifs des principales unités climatiques du pays. Les données traitées sont les pluies, les débits et les matières solides en suspension (MES), mesurés à différentes échelles de temps et d'espace. Le travail proposé vise à déceler les impacts des changements climatiques – à travers les pluies, les débits – sur le transport des matières en suspension.

Dans cette optique, la variabilité des pluies et des écoulements a été caractérisée aux échelles annuelle et mensuelle sur les bassins versants représentatifs par des méthodes statistiques de détection de rupture. En régime tropical (Mayo Tsanaga, Lom et Mungo), le fait marquant de la variabilité semble être le renforcement de la saison sèche, avec une importante diminution des pluies et des débits. La saison des pluies est marquée par un hydrogramme plus réduit, marqué par des pointes de crues souvent importantes. En zone équatoriale (Nyong, Ntem et Kienke), le régime des écoulements est modifié. Les écoulements de la première saison des pluies (mars à juin) sont désormais faibles, alors que ceux de la deuxième (septembre-novembre) sont relativement importants. Ceci est dû notamment à une augmentation des pluies de la petite saison sèche (Juillet-août) et une diminution de celles de la grande (décembre à février).

Des données brutes et des résultats des travaux sur les matières en suspension (MES) ont été recensés de façon aussi exhaustive que possible. Ils sont gérés dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), couplé à un Système d'Information Géographique (SIG), qui permet une vue d'ensemble des MES sur le territoire. Ces informations constituent une somme de connaissances mises en forme et exploitables par d'autres chercheurs dans le futur. Les relations entre les concentrations en MES et les débits varient suivant le type de climat. Les variations des transports de MES dans les rivières résultent d'une combinaison de plusieurs facteurs ; climatiques, morphologiques et anthropiques.

On aborde le régime des transports de MES sur les six bassins versants étudiés, sur la période de 2002 à 2004. Une comparaison de plusieurs méthodes de dépouillement de données de terrain est présentée, qui conclut que du fait de la variabilité importante de la répartition des concentrations dans la section de jaugeage, la qualité des calculs diminue rapidement si l'on n'applique pas le protocole utilisé dans l'étude qui est de 15 prélèvements régulièrement répartis dans la section. Sur la base des prélèvements journaliers d'une fréquence de 2 par semaine en saison sèche et de 4 par semaine en saison des pluies, les valeurs de concentrations journalières varient selon les rivières au cours des 3 années de mesures, de moins de 20 mg.l⁻¹ (Ntem) à plus de 11 000 mg.l⁻¹ (Mayo Tsanaga). Il n'existe pas au Cameroun des séries de données de MES continues sur plusieurs années. Mais la comparaison des récents résultats et les données anciennes montre qu'en zone tropicale sèche (Mayo Tsanaga), si les débits diminuent depuis la fin des années 1960, les concentrations en MES augmentent, traduisant probablement une dégradation importante du milieu, qui met à la disposition du ruissellement des quantités de matières plus importantes, à relier peut-être à une augmentation de la densité de population et des activités agro-pastorales associées. Par contre en zone équatoriale (Ntem), les données disponibles n'indiquent aucun changement dans le transport de matières.

Mots clés : Cameroun, climatologie, hydrologie, variabilité climatique, matières en suspension

ABSTRACT

In the context of the diversity of the climatic and hydrological modes of Cameroun, we were interested in the recent evolution of six representative basins of the principal climatic units of the country. The treated data are the rains, the flows and the suspended sediment, measured on various scales of time and space. Work suggested aims at detecting the impacts of the climatic changes and the anthropic activities - through the rains, the flows and surface qualities - on the transport of the suspended sediment.

Accordingly, the variability of the rains and the flows was characterized on the scales annual and monthly on the representative basins by statistical methods of detection of rupture. In tropical regimen (Mayo Tsanaga, Lom and Mungo), the fact marking of variability seems to be the reinforcement of the dry season, with an important reduction in the rains and flows. The rain season is marked by a more reduced hydrogramme, marked by points of raw often important. In equatorial zone (Nyong, Ntem and Kienke), the mode of the flows is modified. The flows of spring (March to June) are from now on weak, whereas those of Autumn are relatively important. This is due in particular to an increase in the rains of Summer (July-August) and a reduction in those of Winters (December at February).

Raw data and results of work on the suspended sediment were listed in an so exhaustive way. They are managed in a Data Base Management System (DBMS), coupled to a Geographical Information System (GIS), which allows to synthesize the suspended sediment on the territory. This information constitutes a sum of knowledge formatted and exploitable by other researchers in the future. The relations between the concentrations of suspended sediment and the flows vary according to the type of climate. The variations of suspended sediment in the rivers result from a combination of several factors; climatic, morphological and anthropic.

The regimen of suspended sediment transport on the studied six basins, is calculated during a period of 2002 to 2004. A comparison of several assessment theories of ground data is presented and leads to the conclusion that : the great variability of concentration distribution in the gauging section causes the rapid decrease of the quality of calculation if one does not apply the protocol used in the study which is : 15 sample takings regularly distributed in the section. On the basis of daily samplings and on a frequency of 02 samples per week during the dry season and 04 samples per week during the rainy season, we can notice that daily concentration values vary according to rivers that is : from less than 20 mg.l⁻¹ (Ntem) to more than 11000 mg.l⁻¹ (Mayo Tsanaga), during the 03 years period of measurements. In Cameroon, series of continuous data on suspended sediment over several years do not exist. However, comparison of recent results and ancient data shows that in the dry tropical zone (Mayo Tsanga), if flows decrease as from the end of the years 1960s, suspended sediment concentration increase, and this probably leads to an important deterioration of the environment, which causes a presence of more important quantity of sediment in the flowing. That can also be connected to the increase of the population density as well as related activities. On the contrary, in the equatorial zone (Ntem) data in our possession do not indicate any change in the suspended sediment transport.

Key words : Cameroon, climatology, hydrology, climatic variability, suspended sediment

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, son importance et son cycle

La terre est la seule planète du système solaire à disposer, grâce à sa position privilégiée, de l'eau liquide à sa surface. La molécule H₂O est indispensable pour le développement de la vie. Habitat d'une partie de la faune et de la flore, source de production d'hydro-électricité, élément indispensable en agriculture, élément vital d'alimentation, l'eau devient de plus en plus, avec l'accroissement de la population mondiale, une denrée convoitée. D'autant plus que l'eau douce, principal enjeu de convoitise, ne constitue que 3 % de la ressource en eau mondiale (le restant étant formé par les mers et les océans), dont les trois quarts sont stockés sous forme de glace (Jacques, 1996). Dans son ouvrage *La guerre de l'eau*, Cans (1994) dresse un tableau parfois alarmant de l'avenir de cette ressource. Sa répartition quantitative à l'échelle du globe est très hétérogène, et souvent très différente de la répartition des populations. Enjeu de vie, l'eau devient de plus en plus une question politique, source de tensions croissantes entre états. La variabilité de sa disponibilité est également source de problèmes : trop rare, elle entraîne des situations de pénurie, de désertification, d'exodes des populations ; trop abondante, elle est la cause d'inondations catastrophiques et rappelle à l'homme l'impossibilité d'en maîtriser les forces. Vecteur de matières, elle est le principal agent de l'érosion mécanique et de l'altération chimique, modifiant discrètement mais continuellement les paysages à la surface des continents.

L'eau de surface, érosion des sols et modifications environnementales

Au sein du cycle hydrologique (figure 0.1), les précipitations sont les principaux agents de mobilisation des particules terrigènes et génèrent le ruissellement qui en assure le transport, suivant les modifications des conditions locales et régionales de surface. Les pluies qui tombent sur les versants désagrègent et mettent en suspension les particules du sol par effet « splash ». Les eaux chargées de ces matières ruissellent en nappes, en rigoles puis dans des ravines avant de rejoindre les artères principales du réseau hydrographique, les dépressions continentales et les milieux marins. Cette mobilisation de la matière tend à niveler les surfaces à l'échelle du globe.

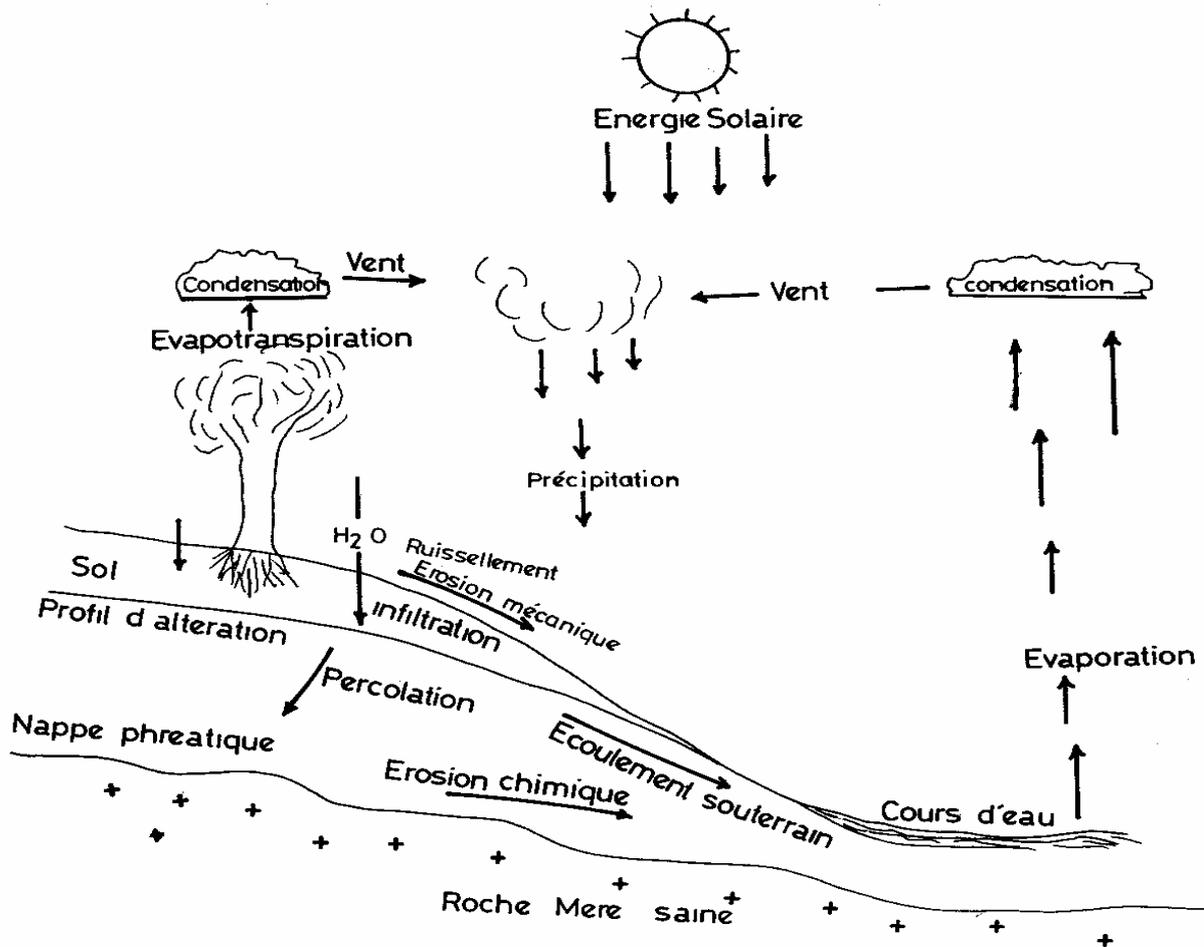


Figure 0.1 : Schéma simplifié du cycle hydrologique

Le milieu physique, notamment le couvert végétal, a une influence notable sur ce phénomène, en protégeant les sols contre les agressions diverses. Il joue ainsi un rôle essentiel sur le cycle hydrologique et le transport de matières. Mais les activités humaines telles que l'ouverture des routes, l'urbanisation, les pratiques agricoles et pastorales, tendent à meurtrir les formations végétales et à accélérer de fait la mobilisation des particules terrigènes. Les sédiments ainsi érodés, riches en éléments fertilisants, se déposent à différentes échelles de l'espace, dès que diminue la vitesse de l'agent de transport (Diallo, 2000), depuis le champ jusqu'au bassin fluvial.

Ces phénomènes ont pour conséquence la stérilisation, la disparition des terres fertiles et, comme corollaire, la baisse de la production agricole. Les exemples sont frappants : en Afrique, chaque hectare de terrain perd en moyenne par an 7,1 tonnes de terre, 7 tonnes pour

l'Amérique du Sud, 6,1 tonnes pour l'Asie, 4,5 tonnes pour l'Amérique de Nord et Centrale, 8,4 tonnes pour l'Europe (Solter, 1992).

Pour pallier à l'irrégularité des régimes des pluies, des réservoirs naturels ont été très tôt mis à profit. Mais, en précipitant une quantité importante de matières en suspension, la sédimentation dans ces retenues d'eau contrarie les apports en éléments nourriciers, destinés naturellement à certaines dépressions continentales (Liéno *et al.*, 2003). En outre, elle entraîne également le comblement des aménagements, augmente les risques d'eutrophisation et réduit de ce fait leur durée de vie.

La sécheresse en Afrique Occidentale et Centrale

La notion de sécheresse est généralement perçue différemment suivant les préoccupations des utilisateurs de l'eau. Elle est le plus souvent utilisée quand les besoins ne sont pas satisfaits. La sécheresse est de ce fait perçue beaucoup plus en terme d'effets que de genèse. Pour les agriculteurs, c'est une situation pendant laquelle la demande en eau des cultures n'est pas satisfaite. Les météorologues parlent de sécheresse quand les précipitations sont inférieures à une « normale », alors que les hydrologues s'intéressent plutôt aux ressources superficielles et souterraines. Le comité mixte UNESCO/OMM (1987) fait intervenir les notions de durée et d'étendue.

Les études sur les paléo-environnements et les paléoclimats africains (Servant, 1973 ; Pias, 1970 ; Maley, 1981) pour ne citer que ceux là, montrent amplement que la période historique n'est pas exempte d'alternances entre épisodes secs et humides. Toutefois ces études n'ont porté que sur des indices indirects des climats passés. Il y a alors un certain manque de précisions sur les datations, les quantifications et les extrapolations des résultats.

Les mesures directes de facteurs climatiques en Afrique Occidentale et Centrale commencent au milieu du XIX^e siècle. L'importance des précipitations pour les populations et les écosystèmes fait que la plupart des travaux portent sur ce facteur. Ces travaux identifient et évaluent les sécheresses successives au fur et à mesure qu'elles apparaissent. Trois principales

périodes sèches sont alors reconnues : 1911-1913, 1940-1943 et 1968 à nos jours (Sircoulon, 1976).

La plus récente et, évidemment la mieux documentée est la sécheresse qui dure depuis le début des années 1970. Les variabilités y sont quantifiées sur la base de mesures directes et étalonnées (Nicholson, 1986 ; Mahé, 1993 ; Olivry *et al.*, 1994 ; Paturel *et al.*, 1997a ; Servat *et al.*, 1999). La baisse des précipitations a globalement entraîné l'amenuisement des ressources en eau et la modification des écosystèmes naturels et des systèmes socio-économiques. Si cette sécheresse peut être considérée comme la plus importante du dernier siècle, en déficit, en étendue et en durée, elle n'est tout de même pas exceptionnelle à l'échelle historique, car des études visant à reconstituer quantitativement les écoulements depuis le début du dernier millénaire semblent bien montrer certaines périodes de sécheresse aussi remarquable (Servat, 1967 ; Maley, 1981 ; Sircoulon et Olivry, 1986).

Intérêt de l'étude

Par combinaison entre un effet anthropique et un effet climatique, la sécheresse en Afrique de l'Ouest et du Centre a des répercussions sur les régimes hydrologiques. Ces effets passent par des modifications des « états de surface » (disparition du couvert végétal, encroûtement, etc.). La persistance de la sécheresse depuis près de 35 ans entraîne un appauvrissement important des nappes souterraines alimentant les cours d'eau en période de tarissement. L'hydrogramme annuel, assez régulier sur certains grands cours d'eau, est divisé en plusieurs petites crues, de pointes fréquemment plus importantes que les crues antérieures. Les crues de récurrence exceptionnelle surviennent au cours des années normalement sèches et rappellent la grande disparité spatiale des impacts des phénomènes climatiques, dont la complexité est renforcée par les activités anthropiques. Certains travaux ont d'ores et déjà montré l'impact des modifications environnementales sur le régime des petits bassins sahéliens (Albergel et Valentin, 1986 ; Rodier et Ribstein, 1986 ; Pouyaud, 1987 ; Mahé *et al.*, 2002 et 2003). Par ailleurs, Brou Yao *et al.* (1998) ont noté en Côte d'Ivoire la concomitance entre la baisse de la pluviométrie dans le Sud forestier d'une part, la déforestation et la mise en culture d'autre part.

La modification de l'occupation des sols, l'intensification de leur occupation suite à l'accroissement démographique d'une part, et la modification des régimes hydrologiques d'autre part ont eu probablement des répercussions sur les flux de matières véhiculées par les rivières. Compte-tenu des connaissances déjà acquises sur la variabilité des pluies et des écoulements, notamment leur hétérogénéité spatiale, il est intéressant d'en faire à l'heure actuelle le bilan à partir d'un échantillon de bassins versants représentatifs des différents types de climat du Cameroun.

Objectifs de l'étude

Cette étude affiche trois principaux objectifs :

Premièrement : l'analyse des différents aspects de la variabilité climatique sur un échantillon de bassins versants représentatifs des facettes du climat du Cameroun.

L'une des caractéristiques de la récente sécheresse est son hétérogénéité spatiale (Mahé, 1993 ; Bigot *et al.*, 1998 ; Paturel *et al.*, 1998), notamment en Afrique dite humide, moins homogène que l'Afrique sahélienne du point de vue géographique (relief, couverture forestière) et également du point de vue des rythmes pluviométriques. Cette hétérogénéité semble plus prononcée en territoire camerounais que dans les autres pays concernés. En effet, les études régionales révèlent que plus de 50 % des cours d'eau d'Afrique centrale et occidentale, qui se sont révélés sans rupture significative dans les séries d'observations, se situent au Cameroun.

Une quantité importante de données hydropluviométriques a été collectée, incluant la décennie 1990. Il devient alors intéressant de compléter les études déjà réalisées qui se limitaient aux années 1980. A l'échelle des stations, la dispersion spatiale des pluies est souvent forte et variable d'une année à l'autre ; d'où notre option d'analyser les moyennes spatiales sur les bassins versants, qui estompent les disparités spatiales. Dans la zone équatoriale en particulier, il sera intéressant de voir de quelle manière la sécheresse a modifié le profil saisonnier des précipitations. A cette fin, on s'intéressera aux totaux mensuels et saisonniers des pluies et à leur variation temporelle. On comparera l'évolution des totaux

pluviométriques des quatre saisons : les deux saisons des pluies de printemps et d'automne boréaux (mars à juin et septembre à novembre), et des deux « saisons sèches » (juillet à août et décembre à février). L'impact de leur éventuelle modification sur les régimes hydrologiques sera ensuite analysé.

Deuxièmement : la constitution d'une base de données sur les matières en suspension (MES) dans les fleuves et rivières du Cameroun, synthèse et essai de détermination des facteurs conditionnels de l'érosion.

Des mesures de transport de matières en suspension ont été effectuées parfois depuis les années 1950, notamment par les hydrologues de l'ORSTOM. Celles-ci ont été très localisées et n'ont permis que de dégager quelques tendances qualitatives. Les travaux de synthèse datant de la fin des années 1970 ne sont basés que sur un nombre réduit de bassins pour lesquels les données étaient disponibles et généralement situés en zone tropicale. Au cours des décennies 1980 et 1990, d'autres travaux ont été réalisés, principalement dans les zones forestières, mais aussi en milieu tropical. L'ensemble de ces données sur le Cameroun et celles de quelques bassins des pays voisins seront rassemblées et gérées dans un Système de Gestion des Bases de Données (SGBD). A l'instar de la banque régionale qui existe par ailleurs pour les données hydroclimatologiques, la constitution d'une banque de données régionale sur les flux de matières s'avère être un des objectifs principaux du projet FRIEND AOC de l'UNESCO. En outre, compte tenu des conséquences des phénomènes d'érosion et de transport de matières sur les économies des pays africains à revenu essentiellement agricole comme le Cameroun, une synthèse de ces informations peut permettre d'appréhender l'intensité de l'érosion mécanique et des transports de matières dans les rivières, et d'en déterminer les principaux facteurs conditionnels.

Troisièmement : la mesure du transport de matières en suspension sur un échantillon de bassins versants représentatifs des unités climatiques du Cameroun et la comparaison des résultats avec des données anciennes et des facteurs environnementaux dans la perspective du changement climatique.

Les résultats des travaux effectués jusqu'alors au Cameroun, même s'ils permettent une approche de la compréhension des processus d'érosion et de transport (Olivry, 1977 et 1978 ; Liéno *et al.*, 2005a), sont assez disparates dans le temps et dans l'espace. Un des intérêts de

cette étude tient au fait qu'elle intègre pour la première fois un grand nombre de bassins versants, représentant les principales unités climatiques du pays, suivis simultanément, avec une fréquence de prélèvements très élevée et adaptée aux régimes hydrologiques.

En reprenant les mesures sur quatre bassins versants suivis antérieurement, ce travail vise à comparer les données actuelles aux anciennes, certaines datant d'avant la rupture climatique, dans la perspective d'une analyse de l'impact des changements environnementaux sur l'érosion (mécanique principalement). Par ailleurs, il complète le réseau de mesures de matières en suspension en intégrant les deux composantes de la zone côtière camerounaise, n'ayant pas jusqu'ici fait l'objet de mesures.

Plan du travail

Ce travail revêt un double aspect ; celui de la variabilité climatique et celui des processus d'érosion et de transport de matières en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun. Dans le souci d'amener à chaque fois les problématiques du contexte général de la région au cadre particulier de l'unité climatique et du bassin versant étudiés, afin de comparer les résultats de cette étude à ceux obtenus ailleurs, les huit chapitres de ce mémoire sont regroupés en trois parties :

LA PREMIERE PARTIE rassemble deux chapitres de synthèse de connaissances générales, sur l'hydroclimat et son évolution en Afrique intertropicale, et sur les transports de matières en suspension (MES) dans les rivières.

Parlant de la variabilité climatique, le territoire camerounais a déjà fait l'objet de nombreuses études. Il a paru intéressant de rappeler succinctement dans un **premier chapitre** quelques résultats acquis sur le sujet en les replaçant dans le contexte continental.

La compréhension de l'évolution des flux de matières en suspension mesurées dans les rivières ne peut se faire sans rappeler les différents processus qui conditionnent la production des sédiments sur les versants. Dans le **deuxième chapitre**, sont présentées brièvement les différentes formes d'érosion pouvant exister sur les versants et les facteurs mis en cause.

Quelques observations critiques sur les données de MES sont présentées, qui s'appuient sur les techniques d'acquisition et les différentes formules de calcul utilisées pour l'évaluation des flux.

Dans **LA DEUXIEME PARTIE**, les trois chapitres suivants présentent les connaissances sur le Cameroun ; son espace phytogéographique, une synthèse des travaux sur les MES et une description des six bassins versants à étudiés.

Le **troisième chapitre** résume quelques généralités sur le Cameroun, notamment son milieu naturel contrasté, ses facettes climatiques et les facteurs qui président à leur définition.

Dans le **quatrième chapitre**, sont présentées des informations concernant les MES mesurées dans les fleuves et rivières du Cameroun, parfois depuis une cinquantaine d'années, et l'organisation de la base de données telle qu'elle a été structurée. La synthèse qui suit présente la répartition spatiale des concentrations et des flux, quelques relations significatives avec les débits des cours d'eau et les conséquences sur les aménagements.

Le **cinquième chapitre** est consacré aux facteurs conditionnels des écoulements et aux régimes d'écoulement des rivières étudiées. Ici sont présentés, à l'échelle du bassin versant, les éléments de relief, de sol, de végétation et leur éventuelle évolution par rapport au climat et/ou aux actions de l'homme.

Les trois derniers chapitres regroupés dans **LA TROISIEME PARTIE** présentent les résultats des analyses effectuées sur les six bassins versants ; variabilité des plus et des écoulements et nouvelles mesures.

Le **sixième chapitre** porte sur l'analyse de la variabilité des pluies et des écoulements sur les bassins versants étudiés. Tout d'abord sont présentées les données qui ont servi aux analyses, les sources, les critiques et les méthodes utilisées pour reconstituer quelques valeurs manquantes. Par la suite, plusieurs méthodes - analyses statistiques, représentations graphiques, indices de variation et comparaisons des termes du bilan hydrologique - sont utilisées pour mettre en évidence différents aspects de la variabilité des précipitations et des écoulements sur les six bassins versants représentatifs sélectionnés, et ce, à différentes échelles de temps (mensuelle, saisonnière et annuelle).

Le **septième chapitre** est consacré à la caractérisation des précipitations et des écoulements des années 2002 à 2004 sur les bassins versants étudiés. Les valeurs annuelles, saisonnières et mensuelles sont situées dans le contexte de sécheresse actuel.

Le **huitième chapitre** présente une démarche critique de la méthodologie de détermination des flux de matières dans une rivière (échantillonnage dans la section et fréquence des mesures), avant d'exposer les résultats sur les matières en suspension mesurées sur les six bassins versants représentatifs. Ces nouvelles mesures, complétant celles issues du réseau ancien, permettent d'établir un bilan des flux de matières sur le territoire camerounais. Pour des stations qui disposent des données antérieures, les résultats obtenus sont comparés aux valeurs antérieures.

PREMIERE PARTIE :
DESCRIPTIONS GENERALES

CHAPITRE 1 :

RAPPELS SUR LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

INTRODUCTION

L'objectif de ces rappels est de présenter la mémoire du savoir acquis sur le contexte déficitaire actuel de la ressource en eau en zone intertropicale africaine, notamment tributaire de l'océan atlantique. Aucune définition universelle n'existe pour le terme sécheresse. Les ingénieurs hydrauliciens, les agriculteurs, ou les citoyens la perçoivent différemment. Cependant, on peut admettre qu'elle correspond à toute période sèche qui dure plus longtemps que la normale, et entraîne des pertes mesurables, comme les récoltes endommagées ou les pénuries d'eau, la défaillance des aménagements hydrauliques. La sécheresse qui sévit en Afrique occidentale et centrale depuis plus de trois décennies, tel un thème lancinant, a préoccupé de nombreux auteurs hydrologues, climatologues, environnementalistes et autres. La tentation de "prévoir le futur dans les archives du passé", pour quelques-uns, et, pour tous, la volonté de faire progresser la connaissance, expliquent, sans aucun doute, les nombreuses contributions que le sujet a suscitées.

Ce chapitre reprend quelques points essentiels des travaux d'ores et déjà menés sur ce sujet en Afrique Occidentale et Centrale, tout en essayant d'adopter une démarche chronologique dans l'évolution des idées sur les sécheresses du XX^e siècle, avant de les comparer à certaines situations historiques. Les aspects liés à l'Afrique Centrale sont principalement abordés.

1. LA PRESENTATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'intérêt des nombreuses contributions est constituée par les régions équatoriales et soudano-sahélienne d'Afrique, comprises entre le bassin du fleuve Sénégal et celui du fleuve Congo, et soumise au flux de mousson atlantique (figure 1.1). La principale caractéristique climatique est le déplacement du front intertropical des alizés, sec au nord (harmattan) et humide au sud (Mousson). La limite Est, assez mobile, est marquée par le front de l'alizé indien. Les données hydropluviométriques y sont disponibles parfois depuis le début du siècle. La situation de la ressource en eau y est particulièrement contrastée. On trouve des régions forestières aux précipitations abondantes, autour du golfe de Guinée et des régions soudano-sahéliennes où les précipitations, faibles et très irrégulières, diminuent graduellement à l'approche du désert (figure 1.2).



Figure 1.1 : Afrique Occidentale et Centrale : la façade atlantique intertropicale de l'Afrique ; zone d'intérêt de nombreuses contributions.

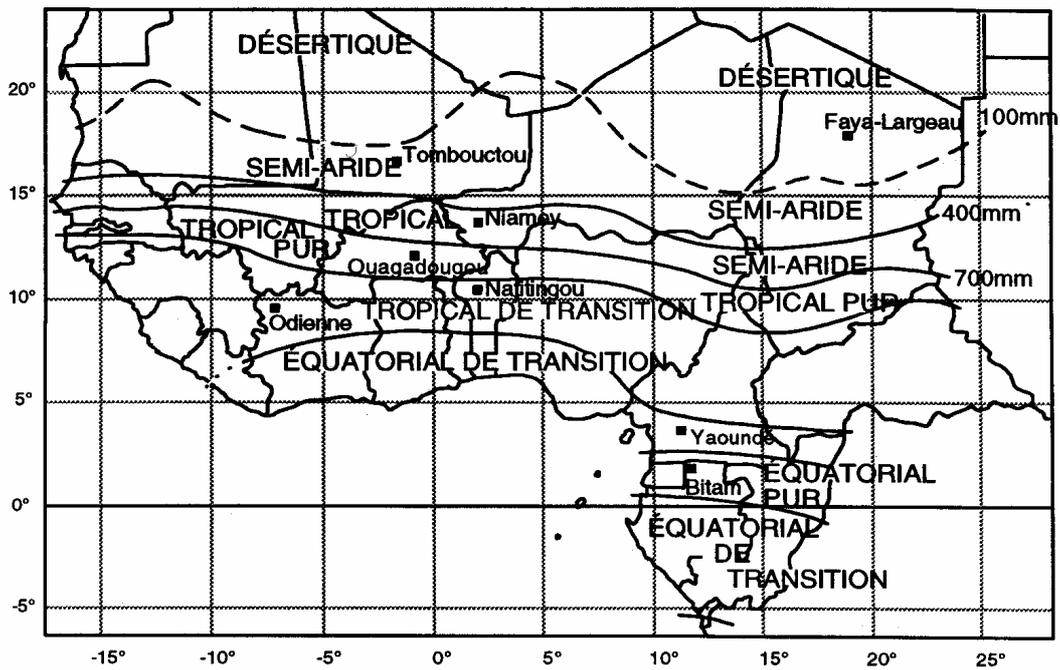


Figure 1.2 : Répartition géographique des types de climats en Afrique de l'Ouest et du Centre (L'Hôte *et al.*, 1995).

2. LES FACTEURS DU CLIMAT

La zone intertropicale constitue une entité assez caractéristique sur le plan de la circulation des « masses d'air » en présence. Cette circulation intervient en partie dans la définition du climat d'une région, et constitue ainsi non seulement le facteur dominant de la mise en place des paysages, mais aussi le facteur dominant des régimes hydro-climatiques.

La répartition énergétique dans le système Terre – Océan - Atmosphère n'est pas uniforme : le bilan est excédentaire aux basses latitudes et déficitaire au-delà du 50^{ème} parallèle. On peut considérer que ce système est composé d'une source chaude située dans les régions intertropicales et de deux sources froides situées dans l'atmosphère, l'une vers 300 hPa entre 0° et 10° de latitude, l'autre vers 800 hPa entre 50° et 80° de latitude. Cette répartition différentielle du bilan radiatif (amplification du gradient méridien de température aux latitudes moyennes et du gradient vertical aux basses latitudes) provoque la mise en mouvement de l'atmosphère et se traduit dans les régions intertropicales par le développement des circulations méridiennes cellulaires de type Hadley, transférant l'énergie vers le haut et vers les pôles (Dhonneur, 1985 ; in Mahé, 1993).

Les circulations de type Hadley ont une évolution saisonnière marquée avec un déplacement estival en direction du pôle nord et une intensification de la cellule de l'hémisphère d'hiver. La zone de convection commune à ces circulations entourant le globe est appelée Zone de Convergence Inter-tropicale (ZCIT) ou Equateur Météorologique (EM). C'est une zone de concentration de la vapeur d'eau, advectée par les alizés dans les basses couches, et de libération de chaleur latente par ascendance et condensation. C'est aussi le lieu où l'énergie reçue par l'atmosphère est maximale. Ses caractéristiques sont très liées aux conditions de surface et cette zone suit au cours de l'année les lieux de températures maximales, en liaison avec le mouvement apparent du soleil, en marquant quatre à huit semaines de retard.

Cependant la répartition énergétique du système Terre – Océan - Atmosphère n'est pas uniforme zonalement. Dans les régions équatoriales, les océans dont l'inertie thermique (capacité calorifique et mélange turbulent) est importante, emmagasinent plus d'énergie que les continents qui eux restituent rapidement l'excès d'énergie reçue à l'atmosphère. C'est pourquoi on peut observer le long de l'équateur des circulations zonales quasi-permanentes et quasi-stationnaires de type Walker (figure 1.3) (et plus généralement des circulations

divergentes est-ouest (Krishnamurti, 1971)) avec des zones d'ascendance convective au dessus des continents et de la partie ouest des océans, plus chaude, et des zones de subsidence au dessus de la partie est des océans, plus froide (Wyrтки, 1979).

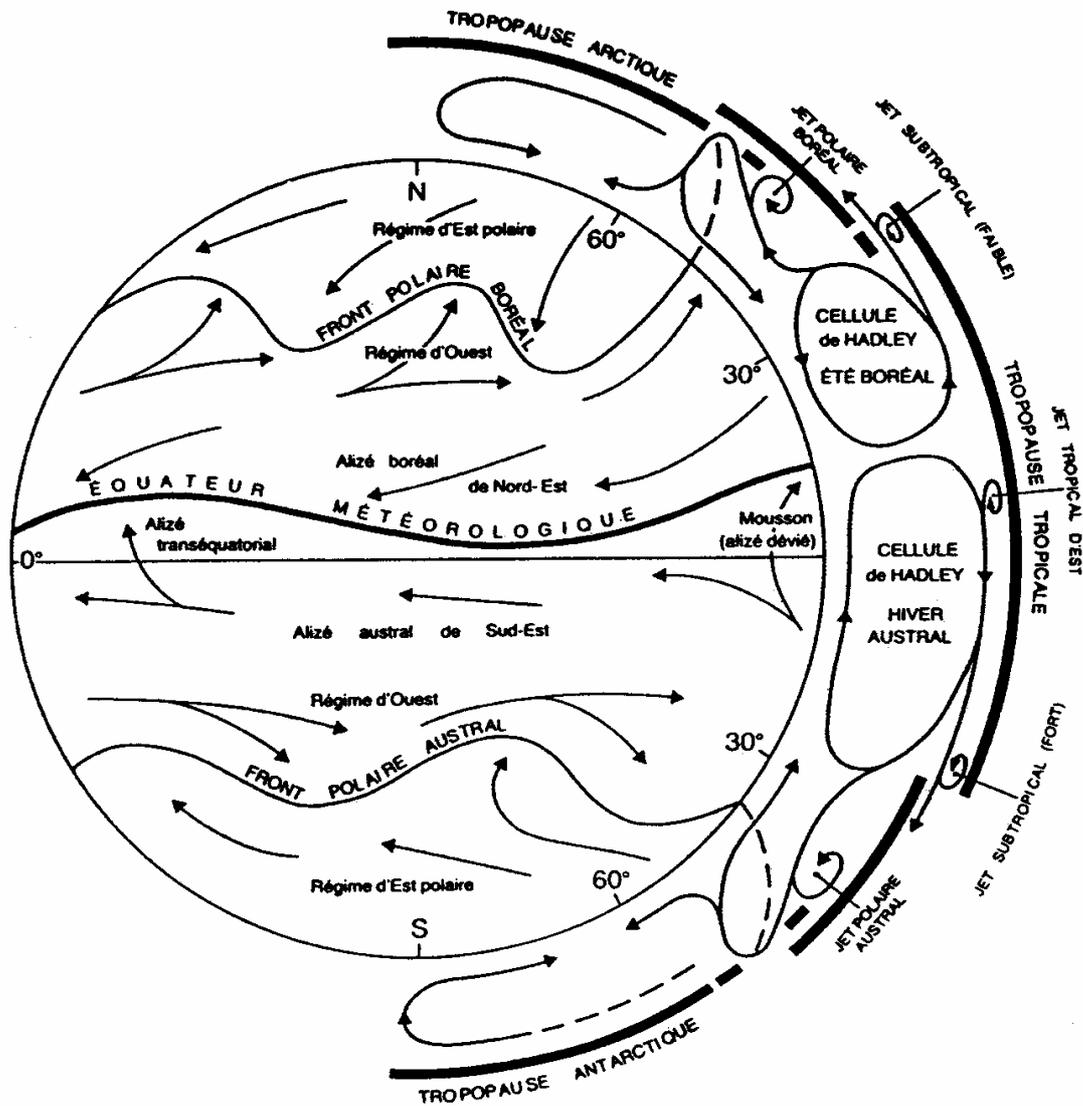


Figure 1.3 : Modèle de base de la circulation générale selon Palmen (1950), (d'après Dhonneur, 1985 ; cité par Mahé, 1993).

En été boréal (juillet et août), au dessus de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, le mouvement vers le nord de la ZCIT est amplifié par un important gradient méridien de pression dans les basses couches de la troposphère, résultant de la mise en place d'une forte dépression thermique de surface au-dessus du Sahara (figure 1.4). Les alizés de l'hémisphère Sud se

chargent en vapeur d'eau au dessus ou golfe de Guinée, remontent alors loin vers le nord en Afrique de l'Ouest, s'inclinant vers le sud-ouest sous l'effet de la force de Coriolis. C'est le moment du plein développement de la mousson en Afrique occidentale et centrale (Leroux, 1980).

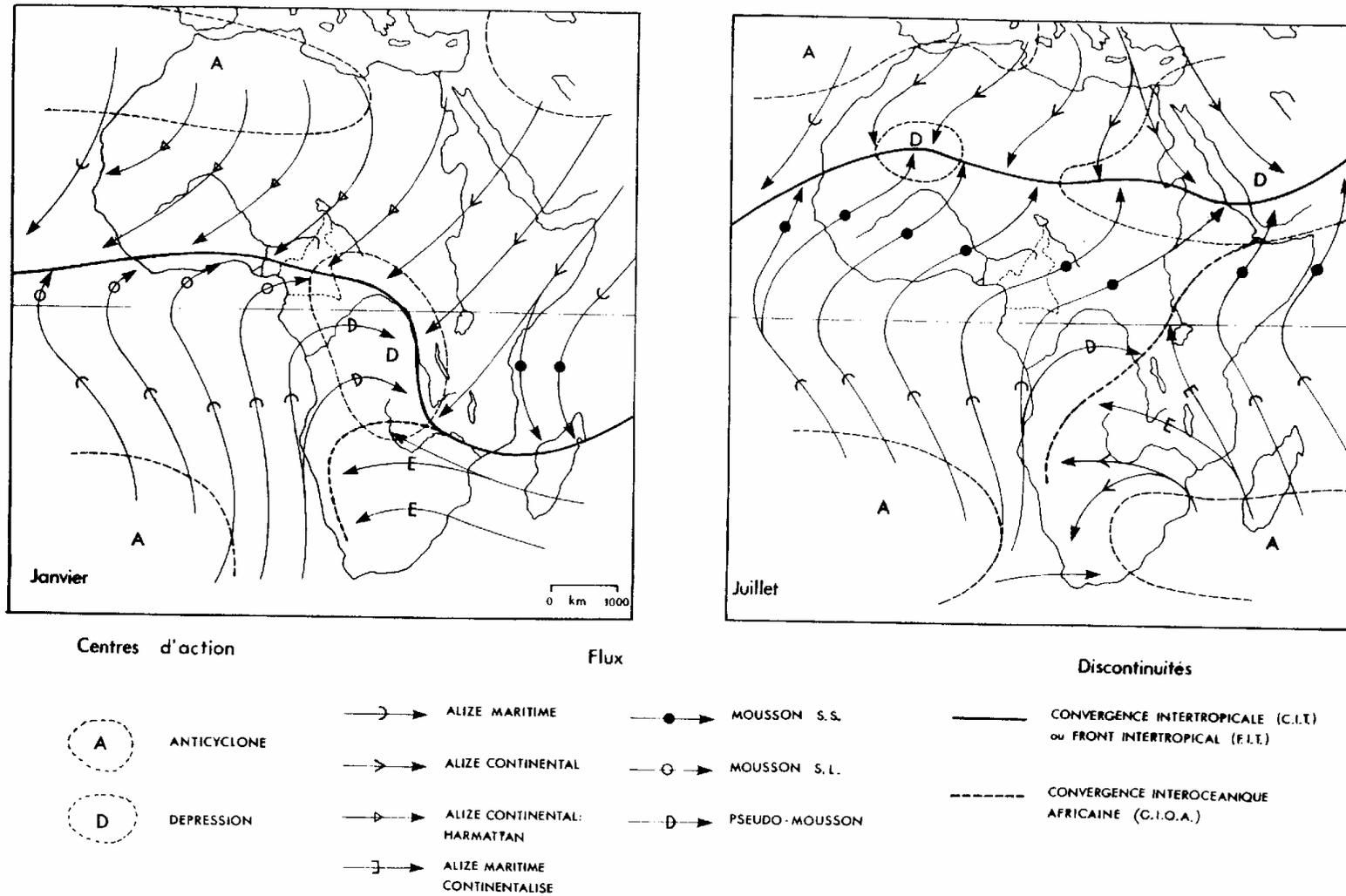


Figure 1.4 : Centres d'action atmosphérique (Suchel, 1987).

En altitude, le champ de vent en Afrique de l'Ouest est caractérisé par un flux d'Est généralisé avec deux axes de vents forts (Cadet et Guillot 1991). Entre 200 et 100 hPa, le jet d'Est tropical (JET ; 16 à 20 m.s⁻¹ en moyenne) a pour origine le fort dégagement de chaleur latente lié à la mousson indienne d'été boréal, auquel s'ajoute le contexte orographique des massifs montagneux du Tibet plaçant la source chaude de l'atmosphère à un niveau moyen d'altitude de 4500 mètres. Par contre, le Jet d'Est Africain (JEA ; 8 à 10 m.s⁻¹ en moyenne entre 700 et 500 hPa) a pour origine le fort gradient méridien de température existant entre l'air chaud du Sahara et le flux de mousson Ouest-africain issu de l'Atlantique Sud plus frais.

Au sein de l'EM (figure 1.5), les conditions dynamiques et thermodynamiques (fort réchauffement solaire en surface, flux de vapeur d'eau convergeant dans les basses couches, libération de chaleur latente en moyenne troposphère) sont favorables au développement de la convection.

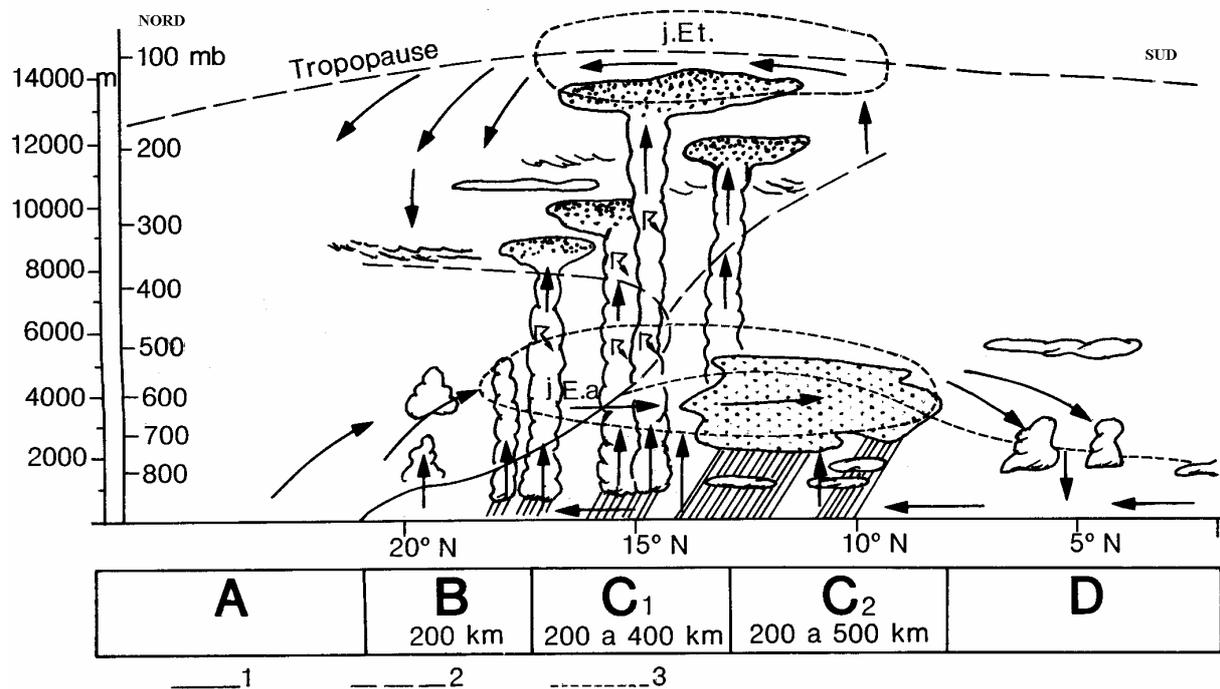


Figure 1.5 : Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine. 1. Front Intertropical (FIT). 2. Limite inférieure de l'air équatorial d'altitude. 3. Limite supérieure de la mousson. j.E.a. Jet d'Est Africain (AEJ). J.E.t. Jet d'Est Tropical (TEJ). Les principales zones de temps : A, zone sans pluies. B, zones avec des orages isolés. C1, zones où dominent les lignes de grains. C2, zones 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 subsidence des masses d'air (d'après Detwiller, 1965 ; Flohn, 1965 ; Leroux, 1970 ; Burpee, 1972 et Dhonneur, 1974 ; cités par Maley, 1981, et Olivry, 1986).

Au Sahel (bordure Sud du Sahara entre environ 15° N et 20° N), celle-ci se traduit en été boréal majoritairement par la formation de lignes de grains. Se déplaçant de l'Est vers l'Ouest à une vitesse moyenne d'environ 15 m.s⁻¹, elles peuvent être décrites comme des entités à méso-échelle, consistant en l'agglomération dans une direction nord-sud jusqu'à 1000 km d'extension méridienne de nuages de type cumulonimbus fortement convectifs, suivis par des nuages stratiformes à l'arrière (300 à 500 km d'extension zonale). Les lignes de grains sont responsables d'au moins 80 % du total annuel des précipitations au Sahel.

3. LES VARIATIONS PLUVIOMETRIQUES

Les premières mesures de précipitations en Afrique tropicale, notamment dans la partie ouest, remontent au milieu du XIX^e siècle. Certaines stations ne sont suivies qu'à partir de 1920 et il faut attendre 1940 pour voir se constituer un réseau pluviométrique dense. La variation des précipitations représente le facteur le plus important du climat tant pour les habitants que pour les écosystèmes. Ce qui explique la résonance exceptionnelle que prennent les anomalies qui affectent ce paramètre.

Les premiers indices de la sécheresse actuelle apparaissent dans la région sahélienne, définie par Rodier (1964) comme la bande de pluviométrie comprise entre 300 mm et 750 mm. L'Hôte *et al.* (1995) préfèrent le terme tropical semi-aride à cette même bande. La littérature sur la sécheresse commence en général en 1968, mais on peut trouver cette thématique chez Lamb dès 1966. A partir des cumuls annuels de précipitations sur quelques stations de l'Afrique de l'Ouest, cet auteur indique que l'on peut observer plusieurs types de champs d'anomalies pluviométriques sans toutefois décrire les états déficitaires. Sircoulon (1976) pense aussi que ce phénomène qui concerne d'abord la zone soudano-sahélienne commence en 1965 dans certaines régions.

Par la suite, la plupart des recherches diagnostiques, tout en cherchant à établir des états déficitaires, s'attachent à replacer la première phase de sécheresse sahélienne (années 1968, 1972, 1973) dans la variabilité climatique du XX^{ème} siècle. Pour cela, l'ORSTOM a mis en place une importante banque de données quotidiennes débutant en 1854. Sircoulon (1976)

indique ainsi que 1972 constitue le point culminant de la sécheresse et que celle-ci s'est étendue de l'atlantique au Soudan. Dans le tableau 1.1, on constate que les déficits sont parfois importants. Déjà apparaît ici le caractère irrégulier dans l'espace de cette sécheresse qui sera développé ultérieurement par d'autres auteurs. L'année 1975, avec sa pluviométrie excédentaire fait spéculer sur un retour aux conditions de précipitations normales. Ce qui pousse Sircoulon (1976) à évaluer à 15-20 ans l'intervalle de retour d'une telle séquence sèche.

Tableau 1.1: Totaux pluviométriques annuels (en mm) et écarts à la normale (en %) Mauritanie (Sircoulon, 1976).

Station	Normale ASECNA 1931-1960	1968		1972		1973		1974	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Nouakchott	138	63	-54	98	-29	84	-39	36	-74
Akjoujt	106	107	+ 1	(31)	-71	53	-50	20	-81
Aleg	265	273	+ 3	—	—	(162)	-39	290	+ 9
Atar	104	90	-13	(36)	-65	38	-63	39	-62
Boghe	332	285	-14	116	-65	220	-34	312	- 6
Boutilimit	203	132	-35	46	-77	42	-79	223	+10
Chinguetti	64	70	+ 9	33	-48	9	-86	64	0
Kaedi	410	175	-57	130	-68	—	—	420	+ 2
Kiffa	351	201	-43	119	-66	176	-50	274	-22
Mederdra	251	102	-59	86	-66	128	-49	373	+49
Moudjeria (1)	236	153	-35	65	-72	176	-25	442	+87
Nema	315	259	-18	251	-20	220	-30	182	-42
Nouadhibou	34	27	-21	(2)	-94	14	-59	4,5	-87
Rosso (1)	290	190	-34	53	-82	166	-43	129	-56
Selibaby	620	413	-33	290	-53	444	-28	435	-30
Tidjikja	142	176	+24	66	-54	70	-51	62	-56
Timbedra	388	217	-44	314	-19	—	—	159	-59

L'analyse des données de quelques stations au début du siècle permet d'identifier d'autres périodes précédemment sèches (1910 à 1916, 1940 à 1949). La sécheresse 1910-1916 semble avoir été la plus intense, l'année 1913 étant plus sèche que 1972 et 1973 (Sircoulon, 1976 ; Le Borgne 1990). Certaines stations situées aussi bien en zone sahélienne qu'en zone humide ouest-africaine présentent des déficits de l'ordre de 30 à 60 % (Le Borgne 1990). La sécheresse 1940-1949, plus documentée que la première, a été moins intense, mais son extension a atteint l'Afrique centrale.

Le début des années 1980 marque un tournant important. Plusieurs travaux de Nicholson (1980, 1981, 1986) fournissent une première vision de l'ensemble de la variabilité spatio-temporelle des précipitations en insistant sur la régionalisation et la persistance de la récente sécheresse. Les années 1982 à 1984 enregistrent des précipitations encore plus faibles que celles de 1972-1973.

L'ampleur de ce phénomène pousse le CIEH (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) à organiser en 1986 à Ouagadougou (Burkina Faso) un colloque international consacré à la problématique des normes hydrologiques, au cours duquel de nombreux scientifiques présentent plusieurs aspects locaux et régionaux de ce qu'on commence à considérer comme la sécheresse du siècle.

Dans les études qui ont suivi, il est mis en exergue la notion de changement de climat ou de rupture dans l'homogénéité statistique des séries pluviométriques. Ainsi, Grégory (1982) montre que la séquence pluviométrique 1970-1980 est statistiquement différente de la séquence 1931-1969 sur l'ensemble du Sahel. La persistance de la sécheresse fait naître une nouvelle voie de recherche. Hubert et Carbonnel (1987), Demarée et Nicolis (1990), Lubès *et al.* (1995) analysent l'évolution chronologique des données non plus en terme d'évolution progressive et linéaire d'une situation excédentaire vers une autre déficitaire, mais en terme de transition brusque d'un état climatique vers un autre. Ces auteurs mettent en évidence une transition majeure autour de l'année 1970, par application de tests statistiques de détection de rupture dans des séries chronologiques.

Considérant dès lors les séries pluviométriques comme divisées en deux séquences (une avant la rupture et l'autre après), les auteurs se sont attardés sur des aspects quantitatifs, en évaluant les déficits d'une période ou d'une année par rapport à une situation précédente (Sircoulon et Olivry, 1986 ; Mahé et Olivry, 1991 ; Mahé, 1993 ; Olivry *et al.*, 1994 ; Bricquet *et al.*, 1995 ; Servat *et al.* ; 1998 ; Servat *et al.*, 1999). La phase sèche actuelle se distingue des précédentes par sa **persistance**, son **extension** et son **intensité**. Elle se fait ressentir dans les régions plus humides, situées en bordure du golfe de Guinée à partir de la décennie 1980, mais à un moindre degré (Olivry *et al.*, 1994 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Paturel *et al.*, 1995 ; Paturel *et al.*, 1997a ; Servat *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1999). Les déficits pluviométriques sont régulièrement supérieurs à 20 % (tableau 1.2 in Servat *et al.*, 1999) entraînant une migration des isohyètes vers le sud sur la région figure 1.6 (in L'Hôte et Mahé, 1996).

Tableau 1.2 : Déficit pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture (in Servat *et al.*, 1999).

Pays	Déficit (en %)	Période de rupture
Bénin	19	1968-1970
Burkina Faso	22	1968-1971
Cameroun	16	1969-1971
Centrafrique	17	1968-1969
Côte d'Ivoire	21	1966-1971
Ghana	19	1968-1969
Guinée	20	1969-1970
Guinée Bissau	22	1967-1969
Liberia	25	(*)
Mali	23	1967-1970
Nigeria	19	1967-1970
Sénégal-Gambie	25	1967-1969
Sierra Leone	13	(*)
Tchad	20	1970-1971
Togo	16	1968-1970

(*) : nombre de stations insuffisant pour définir la période de rupture la plus probable

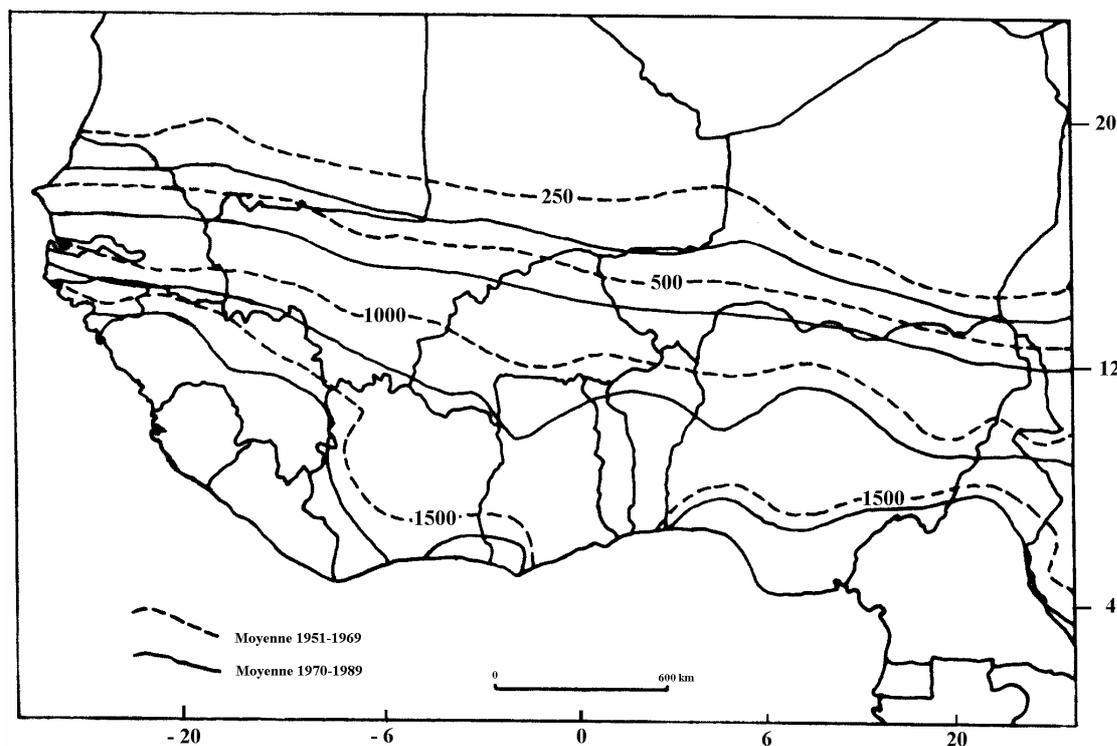


Figure 1.6 : Déplacement vers le Sud des isohyètes, périodes 1951-1969 et 1970-1989 (extrait de L'Hôte et Mahé, 1996).

Ce phénomène présente toutefois une forte hétérogénéité spatio-temporelle (Paturel *et al.*, 1998 ; Laraque *et al.*, 2001). A l'échelle temporelle, la décennie 1980 est considérée globalement comme la plus déficitaire (Servat *et al.*, 1996 ; Mahé *et al.*, 2001). Quelques travaux intégrant la décennie 1990, généralement peu documentée, indiquent une amélioration

des conditions pluviométriques au cours de cette dernière (L'Hôte *et al.*, 2002 et 2004). Mais, les niveaux des décennies 1950 et 1960 ne sont cependant pas encore atteints (Paturel *et al.*, 2002, Ardoin *et al.*, 2003). La pluviométrie des années 1990 se situe au Sahel au niveau de celle des années 1970 (L'Hôte *et al.*, 2004).

L'hétérogénéité spatiale est surtout remarquable en zone côtière et en Afrique centrale (Bigot, 1997 ; Bigot *et al.*, 1998 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2002). Cette hétérogénéité est d'autant plus élevée dans les zones à relief que les versants au vent et sous le vent d'un massif présentent des variabilités différentes des précipitations (Mahé, 1993). Dans la partie sud du Nigeria en particulier et dans le fond du golfe de Guinée, la baisse de la pluviométrie semble ne pas être décelable (Adejuwon *et al.*, 1990 ; Mahé, 1993 ; Mahé et Citeau, 1993, Paturel *et al.*, 1997a). Cette même observation est également faite à l'extrême ouest de la Côte d'Ivoire (Paturel *et al.*, 1997a) et le Sud d'Est de la Guinée (Mahé et Citeau, 1993).

Les explications du phénomène de sécheresse en Afrique tropicale sont restées au stade de simples hypothèses.

Certains, tels Tanaka *et al.* (1975) suggèrent deux explications : une position plus méridionale de l'EM, qui limiterait l'apport de vapeur d'eau ; ou une diminution de la convection malgré une position « normale » de l'EM, cette situation entraînant une diminution de l'intensité de la saison des pluies. Cette deuxième hypothèse sera d'ailleurs reprise par Nicholson (1986), Shinoda (1990).

Fontaine *et al.* (1998) et Moron (1994) soulignent quant à eux l'influence, au moins en partie, des températures de surface de l'océan (El Niño et Oscillation australe).

Enfin, pour d'autres, la végétation pourrait jouer un rôle car elle réinjecte localement dans l'atmosphère de la vapeur d'eau (Monteny *et al.*, 1985 ; Fontaine, 1990 ; Bigot, 1997), notamment en Afrique équatoriale « guinéenne ». Ce recyclage peut atteindre, dans la forêt tropicale de la Côte d'Ivoire, les 2/3 de l'eau précipitée (Fontaine, 1990).

4. L'ÉVOLUTION DES ÉCOULEMENTS

Le réseau hydrométrique des pays de l'Afrique occidentale et centrale ne date que du début des années cinquante. Seules quelques stations situées sur des grands cours d'eau tropicaux tels que le Sénégal, le Niger et le Congo remontent au début du siècle et permettent de faire des suppositions concernant les deux premières sécheresses du siècle (Sircoulon, 1976). Pour ce qui est des analyses sur l'évolution des apports des cours d'eau de l'Afrique tropicale, le constat est général : la baisse prolongée des précipitations a eu des incidences parfois graves sur les écoulements. Plusieurs auteurs (Olivry *et al.*, 1992 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Mahé et Olivry, 1999 ; Paturel *et al.* 1997c, Servat *et al.*, 1999 ; Mahé *et al.*, 2000 ; Laraque *et al.*, 2001), présentent les mêmes bilans. Le phénomène est concomitant avec celui observé en pluviométrie. Les fleuves de la zone humide connaissent une légère remontée des débits après la première phase de la sécheresse de 1972-1974, que Laraque *et al.* (1997) décrivent plus localement sur le fleuve Congo, avant d'être significativement affectés à partir des années 1980. Ceux de l'Afrique sèche n'ont pas connu de décalage entre les diminutions répit à la sécheresse depuis le début des années 1970 (figure 1.7).

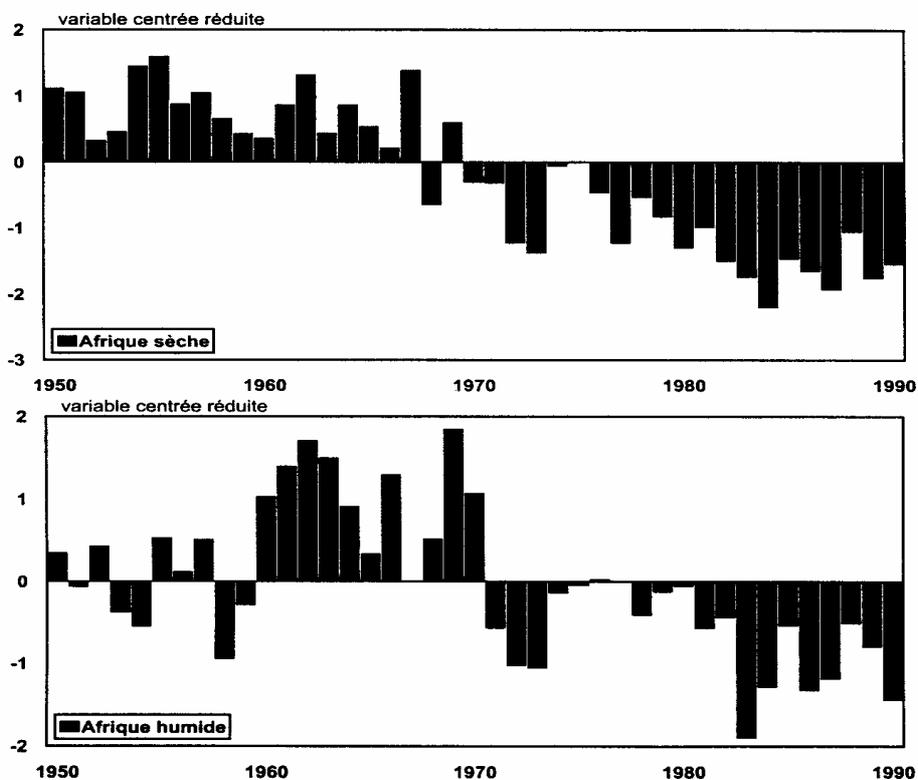


Figure 1.7 : Variation de l'hydraulicité (variable centrée réduite) depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha) (in Bricquet *et al.*, 1997a).

Les résultats des tests statistiques identifient dans les chroniques des débits une phase de discontinuité statistique autour de l'année 1970 (Hubert *et al.*, 1989 ; Lubès *et al.*, 1995), qui coïncide avec la rupture pluviométrique. En terme de déficit, les valeurs relatives sont situées entre 30 % et 50 %, et parfois plus (tableau 1.3). Celles ci traduisent un véritable effondrement des ressources en eau en Afrique. C'est alors à juste titre que Olivry *et al.* (1992) adopte le terme de « fleuves malades d'Afrique ». Il faut noter que les déficits sont plus significatifs en valeurs relatives dans la zone soudano-sahélienne mais plus significatifs en valeurs absolues en « Afrique humide ».

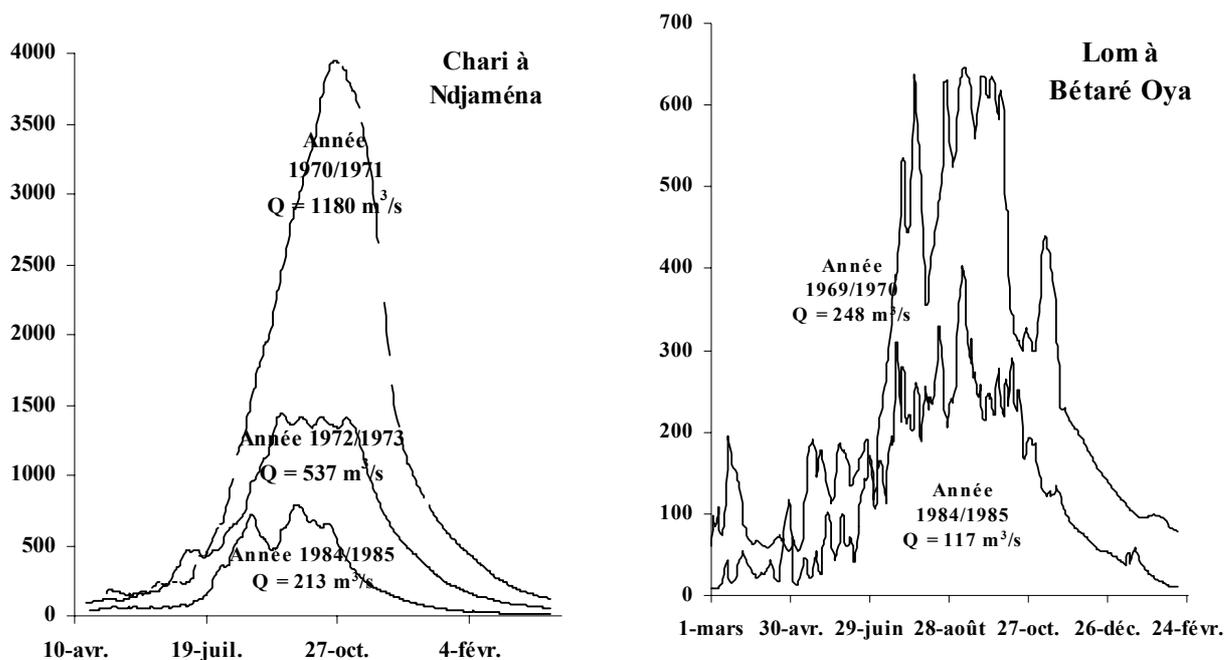
Tableau 1.3 : Ordres de grandeurs (en %) de certains déficits d'écoulement annuel calculés depuis la date de rupture observée dans les séries chronologiques par rapport à la période de référence 1950-1989 (Paturel *et al.* 1997c).

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

L'amplification des déficits des écoulements comparativement aux déficits pluviométriques est due à un « effet mémoire de la sécheresse » qui est apparu dans les écoulements à la suite des effets cumulatifs des déficits pluviométriques successifs. L'analyse des basses eaux des fleuves tropicaux (Pouyaud, 1986 ; Olivry, 1987 ; Olivry, 1996 ; Mahé et Olivry, 1999 ; Liéno *et al.*, 1999a) montre de ce fait une faiblesse quasi générale des débits d'étiage, avec une tendance à la baisse régulière qu'accompagne une accélération du tarissement. Ce phénomène traduit un amenuisement des réserves souterraines des bassins fluviaux suite à une réduction de leur alimentation, conséquence d'une succession d'années de pluviométrie faible, souvent aggravée par des perturbations d'origine anthropique.

Les hautes eaux montrent une évolution pratiquement calquée sur celle des écoulements annuels. L'affaiblissement des maximums des crues s'accroît au cours des décennies 1970 et 1980. Les coefficients de crue (Pardé, 1933) ont été divisés par 2,2 sur le Niger, 4 sur le Bani, 5 sur le Sénégal mais seulement 1,7 pour l'Oubangui et 1,2 pour le Congo (Olivry, 1993).

Cette baisse généralisée des variables caractéristiques des régimes hydrologiques est à l'origine des modifications de la forme des hydrogrammes annuels qui prennent des formes plus tronquées, qui viendraient du fait que les apports souterrains diminuent (Olivry *et al.*, 1993). L'unique pointe de crue annuelle se divise progressivement en plusieurs pointes (figure 1.8), correspondant à des averses de plus en plus isolées.



5. LES CONSEQUENCES DE LA BAISSSE DE LA PLUVIOMETRIE ET DES ECOULEMENTS SUR LES RESSOURCES EN EAU

5.1. Eaux de surface ; exemple du lac Tchad au nord Cameroun

Les conséquences de cette diminution de volumes d'eau écoulée en surface sont évidentes au regard de l'importance de cette ressource. L'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique, entre autres, en sont durement pénalisées. L'écoulement a cessé d'être pérenne en saison sèche dans certains fleuves comme le Niger et le Sénégal en 1984. Si la situation ne revenait pas à la normale, à la faveur d'une succession d'années de pluviométrie excédentaire, d'autres cours d'eau méridionaux pourraient aussi voir leur écoulement s'arrêter au cours des années à venir (Liéno *et al.*, 1999a). Une baisse des cultures de décrue, des ressources halieutiques et les transformations environnementales s'en ait suivi. Les économies des pays de la zone concernée, essentiellement à dépendance agricole, en ont donc pâti. 21 pays africains sur 50 ont ainsi été déclarés sinistrés en 1985. Par ailleurs, lorsque les ressources sont limitées, les demandes peuvent devenir conflictuelles, donnant parfois lieu à des confrontations entre les utilisateurs.

Les zones humides continentales (plaines inondables et lacs) réagissent aussi aux variations du climat et sont de précieux indicateurs des fluctuations à diverses échelles. Le fonctionnement hydrologique de la cuvette du lac Tchad (figure 1.9) illustre ce lien.

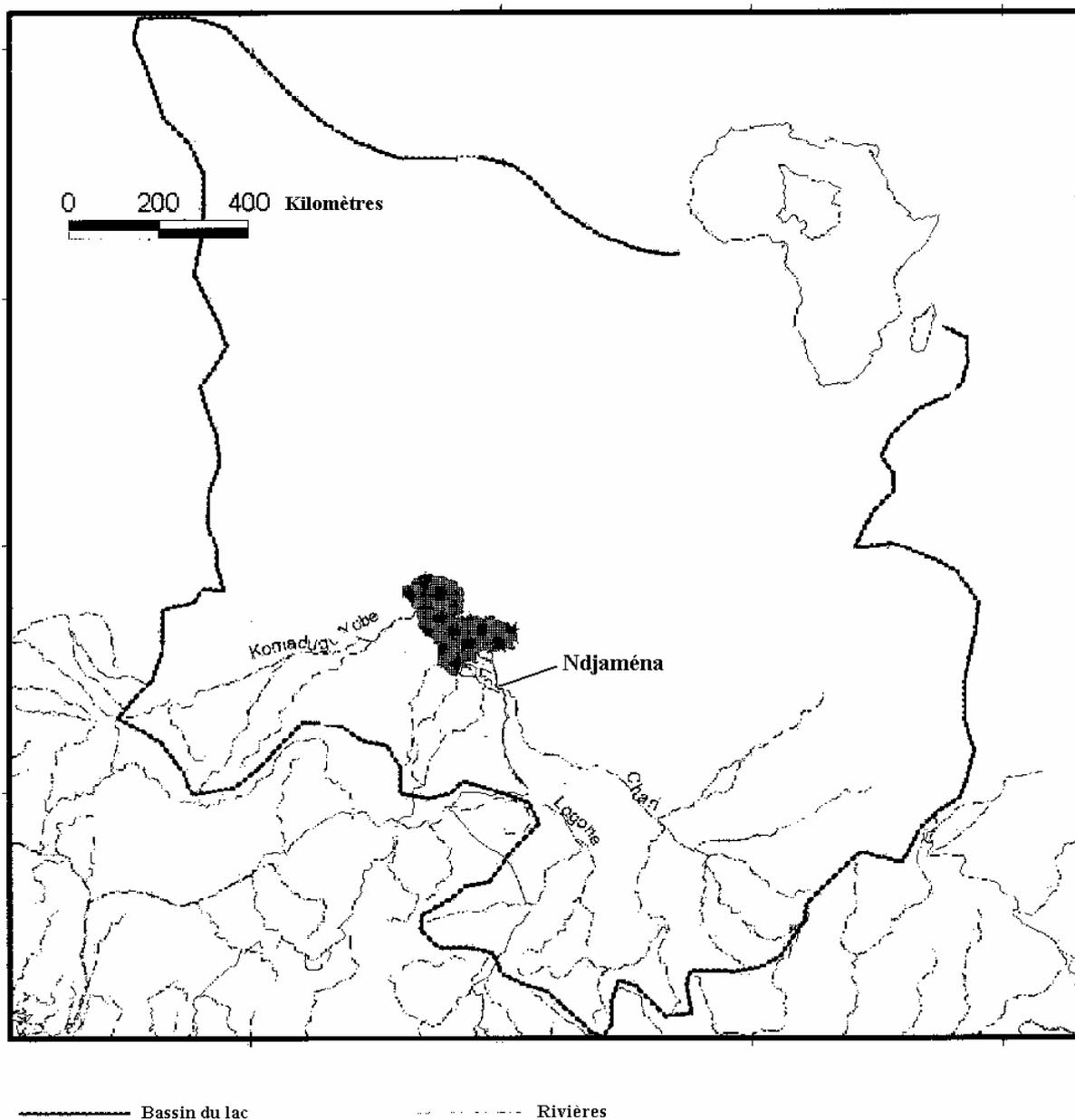


Figure 1.9 : Bassin du lac Tchad.

Les variations des surfaces inondées au maximum de la crue dans la cuvette nord (figure 1.10) montrent la rigueur climatique des années 1982 à 1987. Les situations des années 1984, 1986 et 1987, où les débits du Chari, principale source d'apport en eau au lac, ont été les plus faibles (figure 1.11) sont bien identifiées. Le lac couvre alors à peine le delta du fleuve dans la cuvette sud ; la partie nord est restée complètement sèche. Entre 1982 et 1990, les eaux n'ont atteint la cuvette nord qu'en 1988, année d'écoulement à nouveau important du fleuve Chari à Njaména.

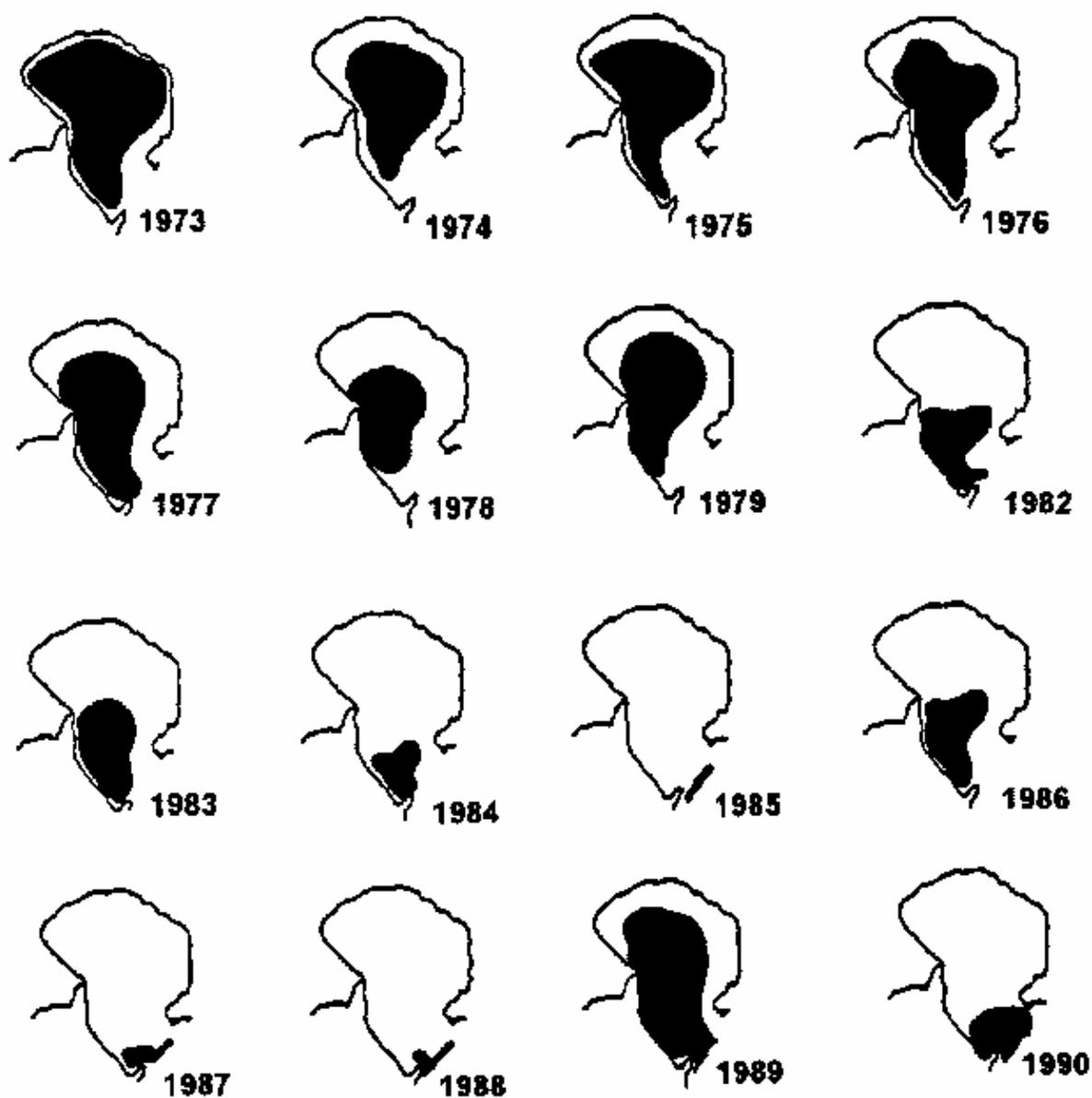


Figure 1.10 : Les surfaces inondées de la cuvette nord du lac Tchad à la fin de janvier de chaque année (in Olivry *et al.*, 1996). NB : la crue du lac étant en janvier et février, la surface inondée d'une année reflète les écoulements du Chari de l'année précédente.

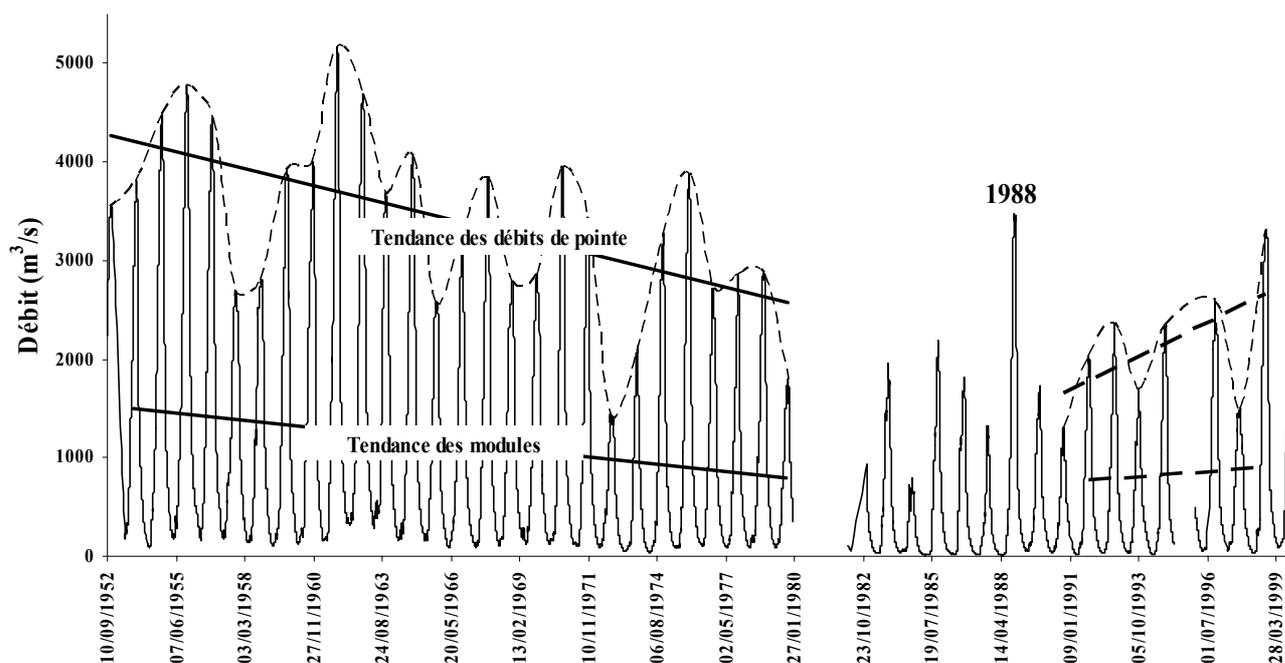


Figure 1.11 : Evolution des débits du fleuve Chari à Ndjaména.

Le lien entre la dynamique du lac Tchad et les conditions climatiques est si étroit qu'après le paroxysme de la sécheresse de la décennie 1980, l'évolution de la surface du lac reflète assez fidèlement la relative amélioration de la pluviométrie, constatée sur les écoulements du fleuve Chari au courant de la décennie 1990 (figure 1.11). On constate sur les images mensuelles des étendues du lac retracées par Leblanc (2002) (figure 1.12), que depuis le début de la décennie 1990 et de façon quasi permanente depuis 1995, les eaux atteignent la cuvette nord et y restent presque toute l'année.



Figure 1.12 : Variation mensuelle de la superficie du lac Tchad au cours des deux dernières décennies (Leblanc, 2002) : le maximum de la crue du lac est en janvier ; noter la présence et l'extension de l'eau dans la cuvette nord depuis le milieu de la décennie 1990.

5.2. Eaux souterraines

Les données sur les nappes souterraines sont assez rares et de courte durée. L'exploitation de quelques chroniques disponibles, notamment en zone soudano-sahélienne, a permis de retracer l'évolution de la ressource. Des fluctuations annuelles dues à l'infiltration pendant la saison des pluies indiquent des remontées du niveau des nappes au cours de quelques années de pluviométrie excédentaire (Liéno *et al.*, 1999c ; Mahé *et al.*, 2000). Toutefois, la tendance générale suit une évolution à la baisse continue (figure 1.13), comparable à celle des pluies et des écoulements (Martin et Thiery, 1986 ; Bichara, *et al.*, 1989 ; Mahé *et al.*, 2000).

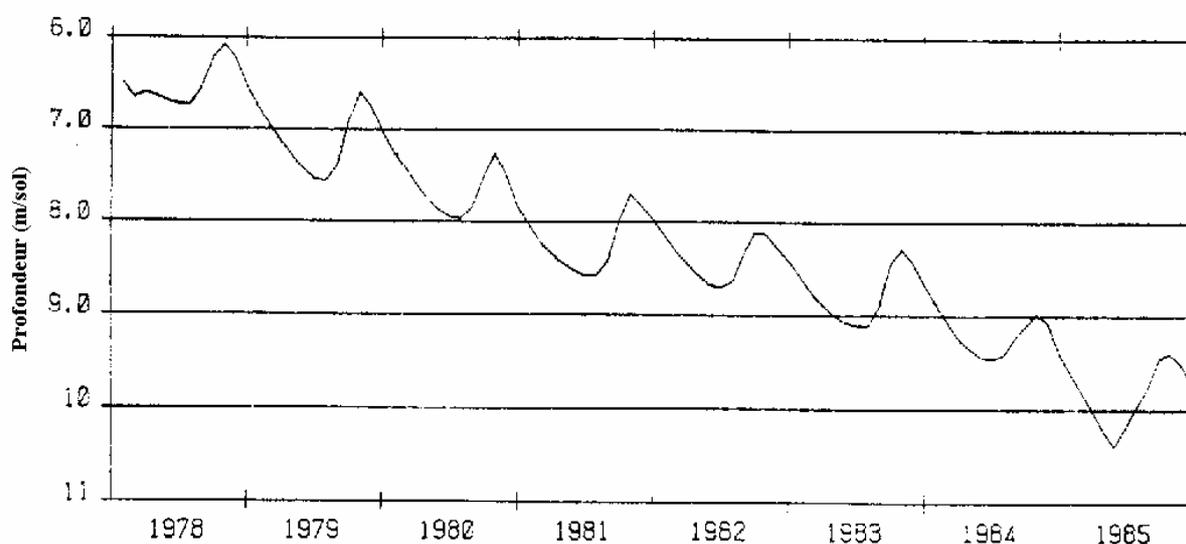


Figure 1.13 : Evolution du niveau d'une nappe dans les altérites superficielles au Burkina Faso (Martin et Thiery, 1986).

Cette baisse des ressources en eau souterraine, notamment des nappes phréatiques, a une double conséquence hydrodynamique. L'approfondissement de leur toit diminue les potentialités de leur réalimentation par des infiltrations déjà amoindries du fait de la baisse de la pluviométrie et, par ailleurs, plus sollicitées par l'évaporation. Leur vidange plus rapide entraîne une réduction des débits de basses eaux et une augmentation de la vitesse de tarissement qui ont été à l'origine de l'arrêt des écoulements de certains grands cours d'eau des zones concernées (Olivry, 1987 ; Olivry *et al.*, 1992, Olivry *et al.*, 1993).

6. CHANGEMENT CLIMATIQUE SIGNIFICATIF : PROBLEMATIQUE DES NORMES HYDROLOGIQUES

La rupture climatique, intervenue principalement entre 1968 et 1970 traduit un changement dans les lois de distribution des variables hydropluviométriques, l'hypothèse de stationnarité des séries hydropluviométriques n'étant plus vérifiée. On doit alors considérer, pour une série, deux populations différentes, une avant la rupture et l'autre après.

Que se soit d'une part, lors des études des étiages et de l'écoulement annuel où l'évaluation du risque se situe en termes de potentialités des ressources en eau et d'autre part, pour la prédétermination des crues s'intéressant à l'évaluation du risque de forts événements, les études antérieures se sont avérées obsolètes pour les futurs projets d'aménagement (Paturel *et al.* 2003).

Pouyaud (1986) en étudiant les apports des deux Volta, montre que l'intégration de quelques années de sécheresse modifie significativement la loi de distribution des modules annuels avec un changement des valeurs de récurrence donnée. Albergel (1986) trouve pour certaines stations pluviométriques du Burkina Faso qu'un risque de sécheresse qui avait une occurrence décennale (en moyenne 1 fois tous les 10 ans) dans la période antérieure à 1969, apparaît 5 fois en seize ans pour la période 1969-1984.

La détermination des nouveaux paramètres statistiques des variables hydroclimatiques (moyenne, médiane, valeurs liées à des périodes de retour) devient dès lors d'actualité. Mais les nouvelles études statistiques se heurtent au choix de la période de référence. Un nouveau courant de recherche en hydroclimatologie se développe alors, ayant pour principal objectif la recherche d'une période représentative des conditions récentes, d'où la notion **de normes hydroclimatiques**.

Olivry (1993) évalue entre 24 et 35 % la sous estimation des débits pour les cours d'eau soudano-sahéliens (Sénégal et Niger) et 9 à 14 % pour les cours d'eau méridionaux (Oubangui et Congo), lorsque les estimations des risques de crues exceptionnelles sont basées seulement sur la période actuelle.

Ouedraogo (2001) en étudiant les normales liées à une période de retour de certaines variables hydroclimatiques (pluies annuelles, débits moyens annuels, paramètres de basses et de hautes eaux), sur des périodes de références 1951-1980, 1971-1997 et 1950-1997, aboutit à des conclusions similaires. Les normales sur l'ensemble de la série, puis sur la seule séquence après la rupture présentent des taux de variation compris entre -10 % et -20 % et parfois plus dans les séries de pluies. L'étude des modules montre des taux de variation souvent supérieurs à -30 %.

Devant cette difficulté de choix d'une période de référence pour une gestion prévisionnelle des ressources en eau, face à un contexte climatique changeant, la modélisation pluie-débit spatialisée semble être une voie intéressante à explorer. Mais les analyses ultérieures nous montreront la difficulté d'adapter des modèles à des contextes climatiques différents et, l'intérêt de la prise en compte dans les modèles des modifications des états de surface, eux aussi en perpétuelle évolution.

7. LES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX, ACTIVITES HUMAINES ET VARIABILITE CLIMATIQUE

7.1. A l'échelle du bassin versant

L'impact des transformations des états de surface rend encore plus difficile la compréhension des relations pluies-écoulements déjà complexes. Albergel et Valentin (1986), Pouyaud (1987), lient l'augmentation des coefficients d'écoulement sur des petits bassins sahéliens à une transformation des états de surface (destruction de la couverture végétale et encroûtement des couvertures pédologiques superficielles). Rodier et Ribstein (1986) en concluent que la récente sécheresse n'a guère modifié les apports moyens annuels sur les petits bassins versants, car la péjoration pluviométrique et l'augmentation du taux de ruissellement, due à l'augmentation des surfaces imperméables, agissent de façon contradictoire.

Les études plus récentes (Mahé *et al.*, 2002) mettent également en évidence un accroissement des coefficients d'écoulement sur un bassin de taille plus importante, le bassin versant du Nakambé à Wayen dont la superficie est voisine de 20 000 km² (Burkina Faso). Les auteurs pensent que le phénomène est tributaire des aléas climatiques mais aussi, et surtout, des

activités anthropiques (destruction du couvert végétal naturel, augmentation des surfaces cultivées, augmentation des superficies des sols dénudés et réduction de la capacité en eau des sols).

Les augmentations progressives des débits de la crue d'été du Niger à Niamey, issue principalement de ses affluents de la rive droite, ont encore poussé Mahé *et al.* (2003) à mener des analyses sur dix sous-bassins de ce fleuve. Il en ressort que l'extension spatiale du phénomène est limitée : seuls les résultats pour les bassins situés au nord de l'isohyète 700 mm sont identiques à ceux obtenus sur la Nakambé, les crues sont avancées d'1 mois et présentent des maximums nettement plus élevés. Au sud de l'isohyète 700 mm, on ré observe une baisse concomitante de la pluviométrie et des écoulements.

A noter que ces dernières observations posent un réel problème pour les études de prédétermination des risques des crues, déjà rendues difficiles par la non-stationnarité des séries hydrométéorologiques.

Les particularités locales de la variabilité des écoulements affectent aussi les nappes d'eau souterraines. Le ruissellement accru sur certains bassins sahéliens alimente parfois des dépressions endoréiques qui dans certains cas peuvent être des zones d'alimentations privilégiées des eaux souterraines, où une hausse du niveau piézométrique s'observe, elle aussi à l'inverse de la diminution de la pluviométrie (Leduc *et al.*, 2001 ; Martin-Rosales et Leduc, 2003).

7.2. A l'échelle globale

L'action réciproque entre le climat et la végétation, notamment en Afrique équatoriale, est évoquée depuis longtemps ; même si les modifications extrêmement complexes du climat dans cette partie du continent sont encore mal comprises (Bigot, 1997). Les caractéristiques physiques du milieu résultent d'un équilibre entre continent et atmosphère tant bien que les fluctuations climatiques sont les agents naturels les plus à même d'entraîner des modifications importantes de la végétation, elles-mêmes responsables de forçages régionaux par le biais de rétroactions bioclimatiques, et de changements de la température de surface terrestre (Monteny, 1986 ; Dixon *et al.*, 1994). Selon Hulme et Kelly (1993), durant les 50 prochaines

années, en zones tropicales humides, ce sont plus les changements de couverture qui vont déterminer les variations substantielles du climat régional. Mais les perturbations climatiques antérieures, mises en évidence par les données de la géologie (Servant, 1967) et de la végétation (Maley, 1996) ne peuvent être imputées à l'homme, celles-ci ayant eu lieu bien avant l'apparition de l'homme, ou du moins avant l'explosion industrielle.

Durant le Quaternaire récent, l'extension des milieux ouverts a été mise en relation avec les changements du climat dus aux variations des températures marines (Sultan *et al.*, 2001), bien avant le développement des civilisations humaines. Mais la récente sécheresse intervient au moment où les activités humaines augmentent de façon considérable. Les destructions de forêts et les émissions de gaz à effet de serre sont souvent évoquées pour expliquer l'accroissement de la température (Dunglas, 1993). Dans les zones forestières où l'activité atmosphérique a une origine continentale, des travaux plus récents se sont focalisés sur la déforestation et les fluctuations climatiques. Brou Yao (1998) établit dans la zone de forêt dense humide de la Côte d'Ivoire un parallélisme entre la baisse de la pluviométrie, la déforestation et l'augmentation des activités humaines.

Il apparaît donc que l'évolution à long terme du climat et les changements environnementaux à l'échelle globale sont influencés par les variations naturelles et les perturbations anthropiques. Si, à l'échelle séculaire, les études sur les paléoclimats privilégient l'impact des cycles naturels par rapport à l'action de l'homme, il est encore difficile, à la période actuelle, de distinguer l'ampleur des effets directs du climat de ceux dus à l'action anthropique.

8. LES SECHERESSES OBSERVEES AU COURS DU XX^{eme} SIECLE SONT-ELLES EXCEPTIONNELLES ?

Les études palynologiques, sédimentologiques, géologiques et géomorphologiques ont retracé le paléoclimat de l'Afrique tropicale sèche. Nous citerons plus particulièrement celles se rapportant à l'Afrique centrale et notamment au bassin du lac Tchad. Servant (1973), Maley (1972) et Pias (1970) ont décrit, au cours du Quaternaire récent, une alternance de périodes humides (caractérisées par des transgressions) et sèches (caractérisées par des régressions) (figure 1.14).

L'histoire climatique de la cuvette tchadienne commence à l'Oligo-Miocène (25 m.a) après les dernières phases de dépôt des formations du continental terminal. Même si de petites différences existent au niveau des datations, les auteurs identifient, entre 39500 ans B.P. et 1800 ans B.P., six épisodes sédimentaires qui se sont succédés, correspondant à des états climatiques différents.

En zone forestière, notamment en Afrique centrale, les analyses palynologiques dans les lacs (Maley et Brenac, 1998 ; Richards, 1986 ; Reynaud-Farrera *et al.*, 1996 ; Elena *et al.*, 1994) ont identifié une phase de destruction massive de la forêt pendant l'Holocène (10 000 à 1000 BP), qu'ils expliquent par un assèchement du climat. Cette phase d'ouverture de la forêt serait d'ailleurs une des principales causes de la migration des Bantou vers le sud du domaine forestier (Schwartz, 1992 ; Lavachery *et al.*, 1996).

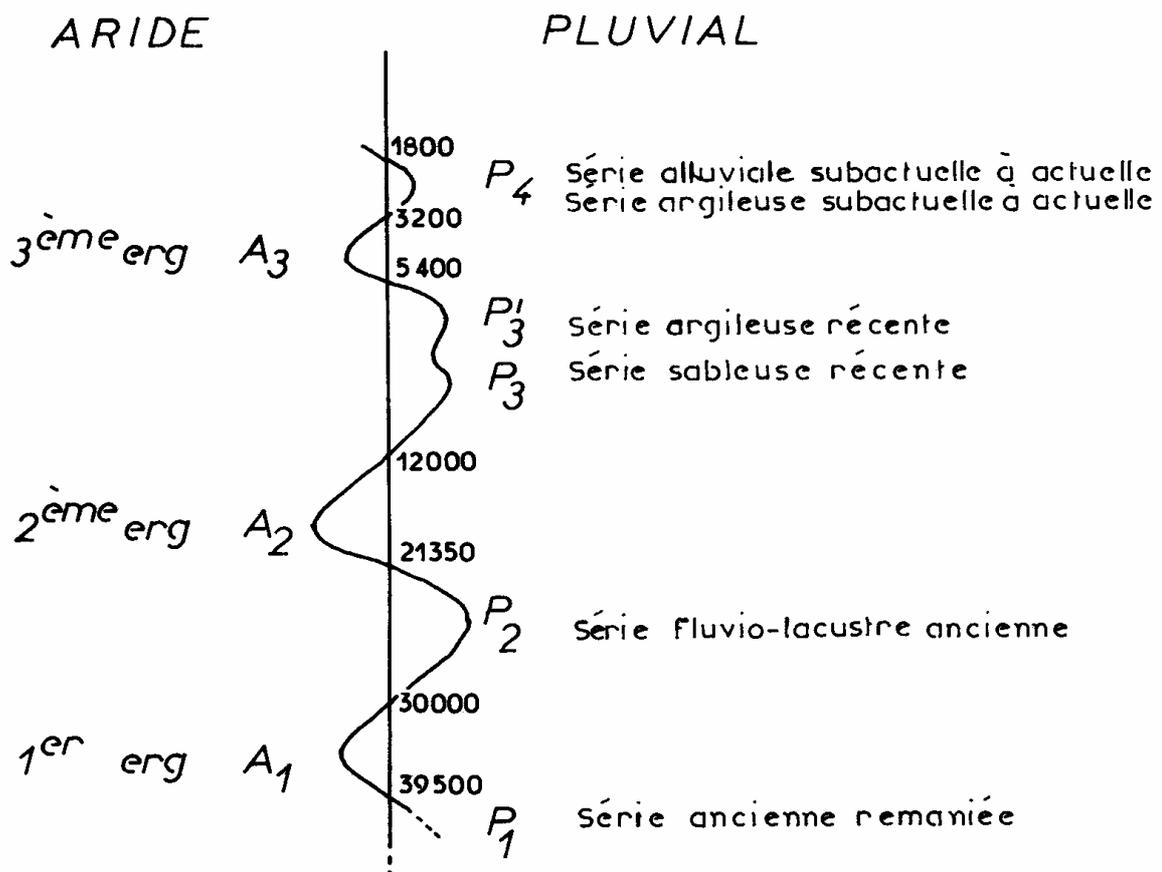


Figure 1.14 : Fluctuations climatiques déterminées à partir de la sédimentation fluviale et fluviolacustre et du remaniement éolien au cours du Quaternaire récent dans le bassin du lac Tchad (Servant, 1967 et Pias, 1970).

Ces fluctuations climatiques se sont poursuivies au cours du dernier millénaire. En effet, au fur et à mesure que l'on se rapproche d'aujourd'hui, les datations sont de plus en plus précises à des échelles de temps beaucoup plus réduites. C'est ainsi que Maley (1981 et 1989), sur la base des documents des premiers explorateurs, de nombreuses données historiques et, surtout, de la tradition orale marquée par les conséquences sociales des assèchements et des retours catastrophiques du lac Tchad, a retracé les fluctuations lacustres depuis environ un millénaire (figure 1.15). Tous ces auteurs pensent que la situation climatique du XVe siècle, dont on retrouve des indices dans le Moyen-Niger et plus au sud, en zone forestière, autour du lac Bosumtwi au Ghana, paraît comparable à l'actuel. L'assèchement aurait duré plus de 100 ans et aurait été encore plus marqué que la situation que nous connaissons et qui perdure depuis 1970 (Maley, 1981).

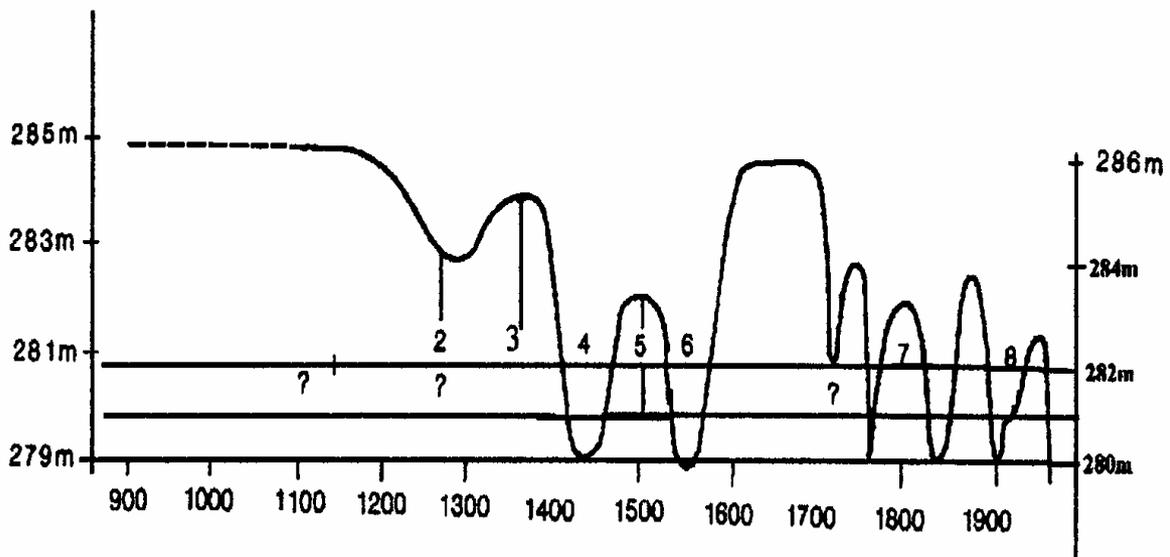


Figure 1.15 : schéma des variations du niveau du lac Tchad au cours du dernier millénaire (Maley, 1981).

CONCLUSION

La sécheresse qui sévit en Afrique centrale et occidentale depuis un peu plus de trois décennies a préoccupé de nombreux auteurs hydrologues, climatologues, environnementalistes et autres. Plusieurs travaux concordent pour attester de l'ampleur de la variabilité des précipitations et de la gravité des conséquences sur les ressources en eau, et sur les activités humaines.

Depuis le début de la décennie 1970, l'ensemble des pays de l'Afrique soudano-sahélienne connaît une sécheresse chronique dont les années les plus catastrophiques ont été 1972-1974 et 1983-1984. La réalité de la persistance de la sécheresse depuis 1969-70 définit une « phase climatique » caractérisée par :

- la forte diminution des quantités d'eau apportées par les précipitations,
- la migration vers le sud des isohyètes pour la décennie 1970-1980 de presque deux degrés (soient près de 180 kms), entraînant une « sahélistation » des zones soudaniennes,
- la concentration des années exceptionnellement sèches depuis 1970.

La phase de sécheresse qui dure depuis 1969 se singularise des autres sécheresses connues dans la région (1913-1914 et 1939-1941) par **sa durée, son intensité et son extension**. Les analyses statistiques ont mis en évidence une rupture dans les séries hydropluviométriques située autour de l'année 1970. Cette singularité soulève le problème de l'adéquation des ajustements statistiques. Le phénomène est observé en zone soudano-sahélienne dès le début des années 1970. Mais c'est au début des années 1980 qu'il atteint significativement les régions d'Afrique dites humides, où son hétérogénéité spatiale est notable.

On a observé une tendance à l'amélioration des conditions pluviométriques au cours de la décennie 1990. Mais les mêmes remarques faites par le passé pour les années 1974-1975 et 1985 qui ont ramené de brefs espoirs parmi les populations durement touchées, suscitent une grande modération quant à l'évolution future du climat. Et même si on atteignait les conditions pluviométriques des années 1960 (ce qui n'est pas le cas), on devrait s'attendre encore à une persistance dans les débits de « l'effet mémoire » de la succession d'années sèches (Olivry *et al.*, 1993), comme le montrera le chapitre 6 de ce mémoire.

Quelque soit l'origine de la sécheresse, l'impact socio-économique est désastreux. Elle semble avoir affecté plus de personnes que tout autre type de catastrophe. La sécheresse affecte l'approvisionnement en eau, la production agricole et met en péril les ressources naturelles et l'environnement, et provoque des migrations massives des populations rurales vers les villes.

Les travaux de Favreau (2000), Leduc *et al.* (2001), Mahé *et al.* (2002), Mahé *et al.* (2003) soulignent la complexité du phénomène de sécheresse et de ce fait, la difficulté d'en mesurer les conséquences. **L'impact des activités humaines se révèle comme le point le plus sensible et la source des plus grandes incertitudes, face à des réseaux d'observations de moins en moins bien suivis.**

La modélisation hydrologique paraît être une voie intéressante à explorer, dans la mesure où elle pourrait permettre de simuler différents scénarios d'évolution des ressources en eau en fonction de l'évolution du climat. Mais là encore, elle se heurte à la disponibilité des données actualisées sur les états de surface et leur évolution, et les incertitudes sur les réserves en eau du sol.

Pourtant de nombreuses recherches en paléoclimatologie et en géologie montrent qu'à l'échelle des ères géologiques, la sécheresse survenue depuis la fin des années 1960, malgré les préoccupations qu'elle a attiré, n'aurait pas un caractère exceptionnel. Chamard (1976) soulignait déjà que cette sécheresse n'est pas un événement anormal dans l'évolution climatique depuis la fin du pluvial holocène.

Le développement de la technologie (acquisition des données, leur traitement informatique), mais aussi et surtout l'apport des médias ont contribué à sensibiliser l'audience internationale sur la sécheresse. L'homme, par ses multiples activités dont, les émissions de gaz à effet de serre et la destruction des couverts végétaux, contribue à apporter des artéfacts à un phénomène bien plus ancien que son existence. Il faudrait alors à l'avenir compter, malgré les nombreuses projections des chercheurs (climatologues et hydrologues notamment), que les changements futurs s'inscrivent forcément dans une variabilité historique naturelle du climat séculaire, qui a connu d'autres événements de même ampleur.

CHAPITRE 2 :

**GENERALITES SUR LES PROCESSUS D'EROSION SUR LES
VERSANTS : ORIGINE DES MATERIAUX TRANSPORTES PAR
LES RIVIERES**

INTRODUCTION

Les particules transportées dans les rivières sous forme de matières en suspension sont issues de la mobilisation des matériaux sur les versants des bassins. Suivant les agents dynamiques mis en jeu, certaines techniques permettent de décrire et de hiérarchiser les différentes formes d'érosion. Plusieurs travaux se sont intéressés à caractériser depuis les parcelles expérimentales jusqu'au bassin versant, en passant par les versants, les différents processus impliqués dans le phénomène d'érosion (Roose, 1973 ; Mietton, 1988 ; Heusch, 1988 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Planchon, 1991). Ce chapitre rappelle les grandes lignes pour deux raisons : 1) comprendre l'origine des matières mesurées dans les rivières ; 2) mieux appréhender l'influence d'éventuelles transformations des versants sur la qualité des transports en suspension dans les rivières. Les techniques de mesure et les procédures d'évaluation des masses de matières en suspension y sont également présentées. Un commentaire sur la représentativité des résultats conduit à une réflexion sur la constitution des bases de données de matières en suspension.

1. LES FORMES D'EROSION

1.1. L'érosion mécanique sèche

Dans ce type d'érosion, il n'y a pas intervention de l'eau. Des masses de terre des horizons superficiels des hauts de pente et de la rupture de pente sont poussées par gravité ou par les instruments aratoires, vers le bas de la toposéquence, où elles s'accumulent soit en talus, soit en colluvions, de texture peu différente des horizons d'origine. Cette forme d'érosion est favorisée notamment par le labour. Mais la pente et l'orientation du travail du champ l'intensifient. Des auteurs préfèrent le terme d'érosion aratoire pour faire allusion au roulement des mottes de terre qu'il entraîne. C'est la forme d'érosion la plus mobilisatrice des matériaux terrigènes. Elle atteint $4000 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ au Rwanda et au Burundi (Roose et Bertrand, 1991) et dépasse $13000 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en Algérie (Roose, 1991).

1.2. L'érosion hydrique

1.2.1. L'érosion en nappe ou stade initial de l'érosion hydrique

Cette forme d'érosion appelée encore érosion aréolaire (ou *sheet erosion* par les anglo-saxons) résulte principalement de l'énergie des gouttes de pluies qui s'applique à toute la surface du sol. Les gouttes de pluie tombant de très haut désagrègent les agrégats du sol en fines particules qui sont dispersées à de courtes distances par effet *splash*, d'où le terme *splash erosion* utilisé par certains auteurs. Les fines particules mobilisées sont ensuite transportées par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de l'érosion hydrique. Elle n'est pas visible d'une année sur l'autre, et les signes les plus connus sont les plages de sols squelettiques avec un fort pourcentage de particules grossières à la surface. On observe dans certaines régions des remontées de cailloux en surface, qui poussent les paysans à croire que « les cailloux poussent ».

Ellison (1944) montre que la cause de l'érosion en nappe est la force de battance des pluies sur les sols dénudés. L'énergie d'arrachement des particules de terres est celle des gouttes de pluies qui tombent, tant et si bien que même les pluies qui ne génèrent pas de ruissellement favorisent la formation à la surface du sol d'une croûte peu perméable. Le ruissellement, quand il existerait, n'est même pas assez fort pour cisailer la base de petites mottes de terre coiffées par des objets résistants à l'attaque des gouttes de pluies (Photo 2.1).

L'érosion en nappe est sélective vis-à-vis des nutriments et des colloïdes qui font l'essentiel de la fertilité des sols : si l'énergie du ruissellement est aussi trop faible pour déplacer les particules grossières, à cause de la rugosité du sol, seules des matières légères comme la matière organique, des argiles et des limons sont évacués.



Photo 2.1 : Erosion en nappe ; « micro-falaises » formées par des monticules de terre protégés contre les gouttes de pluies. (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire ; Cliché Roose).

1.2.2. L'érosion linéaire

Lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, il se forme d'abord les flaques ; ensuite les flaques communiquent par des filets d'eau. A la faveur de la pente, les filets d'eau s'organisent et acquièrent une énergie qui va créer une érosion limitée dans l'espace par les lignes d'écoulement. Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique du ruissellement augmente et peut être supérieure à celle des gouttes de pluie. Le ruissellement initialement en nappe s'organise et creuse des formes de plus en plus profondes, classées suivant leur dimension (photo 2.2). On parle de **griffes** lorsque les canaux ont quelques centimètres de profondeur, de **rigoles** lorsqu'ils dépassent 10 cm, enfin de **ravines** lorsque ceux-ci atteignent plusieurs dizaines de cm (généralement plus de 50 cm) (Heusch, 1988). Dans cette forme d'érosion, l'énergie de cisaillement des sols et des roches, et d'arrachement des particules est l'énergie cinétique du ruissellement.



Photo 2.2 : Rigoles et ravines créées par l'érosion linéaire. (Cap, Afrique du sud ; Cliché Roose).

1.2.3. L'érosion en masse ou glissement de terrain

Elle concerne un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. L'origine est une rupture d'équilibre entre d'une part, la masse du sol concerné, l'eau qui s'y trouve stockée et les végétaux qui la protègent et, d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle sous-jacent en pente, suivant un plan de discontinuité structurale. Les plans de glissement peuvent se mettre en place progressivement au cours des processus d'altération des sols du fait de l'accumulation des particules fines dans certains horizons.

Le déséquilibre peut être brutal et causé soit par des secousses sismiques, soit par des averses intenses et orageuses. L'homme peut augmenter la fréquence de ces mouvements en modifiant la géométrie externe des versants par terrassement, surcharge par des remblais, modification des écoulements naturels etc.

Cette forme d'érosion engendre le plus souvent le transport de quantités exceptionnelles de matières en suspension, difficilement mesurable dans les rivières. Toutefois, elle reste parfois longtemps marquée dans les mémoires du fait des dégâts causés. Les exemples sont nombreux : la crue de la Mejerda en Tunisie en mars 1973 (Colombani *et al.*, 1984), les

glissements de terrains emportant des habitations et entraînant des pertes humaines qui surviennent fréquemment dans les périphéries de certaines villes du Cameroun où les populations s'installent de façon non contrôlée sur des versants instables (Tchotsoua et Bonvallot, 1999), les écoulements boueux de cendres gorgées d'eau depuis les flancs des escarpements autour de la ville de Limbé (sud-ouest Cameroun).

Les différents processus d'érosion hydrique peuvent se succéder dans le temps et/ou dans l'espace. A partir du moment où l'érosion en nappe crée des pellicules de battance et des croûtes de sédimentation résistant à l'infiltration, il se forme un ruissellement qui, devient abondant, se hiérarchise et développe une énergie cinétique suffisante pour attaquer le fond et les bordures de son lit. L'érosion en nappe se combine à l'érosion linéaire pour former l'érosion en nappe et rigoles, très dévastatrice, que les anglo-saxons désignent par *rill and interill erosion* (Roose, 1994). Celle-ci évolue très rapidement en griffes, en rigoles puis en ravines. Les ravines en s'agrandissant, entaillent le terrain, le séparant ainsi en blocs de terre isolés. Leurs horizons profonds peuvent alors s'humecter et constituer des plans de glissement potentiels qui favorisent la formation des écoulements boueux ou des glissements de terrain, dans des conditions favorables comme des pluies exceptionnelles, des secousses sismiques, et/ou des aménagements maladroits déséquilibrant les versants.

1.3. L'érosion éolienne

Le facteur de l'érosion ici est le vent. Ce type d'érosion est très intense dans des zones arides, où la saison sèche s'étend sur plus de la moitié de l'année et où la végétation clairsemée laisse de larges espaces de sol nu. Le vent ne rencontre pas d'obstacle à la surface du sol et peut donc prendre des vitesses considérables. Lorsque celle-ci dépasse 15 km.h^{-1} à 25 km.h^{-1} (Heusch, 1988), les particules libres du sol sont mises en mouvement (figure 2.1). Les matériaux éolisés proviennent souvent des particules détachées préalablement par l'érosion hydrique ou pulvérisées par les techniques de préparation du sol.

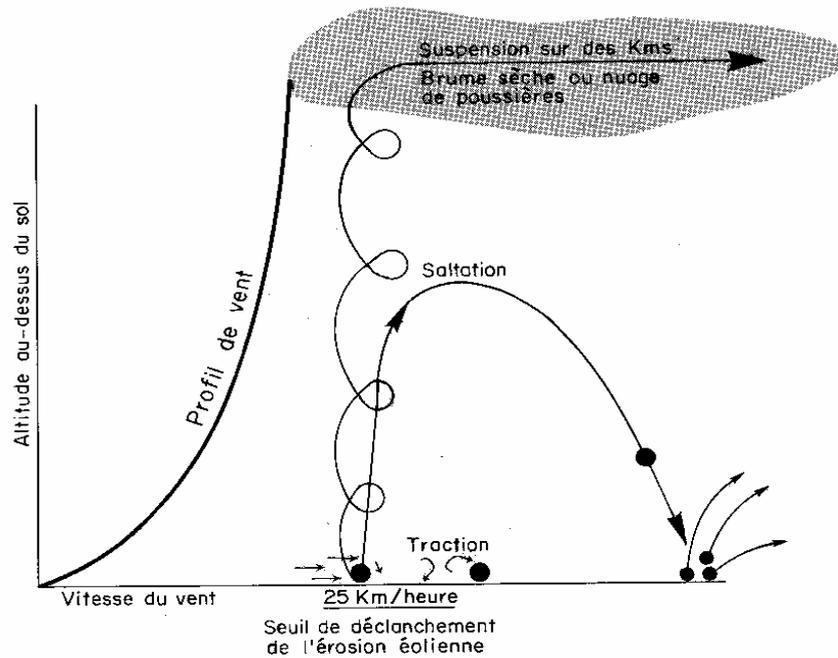


Figure 2.1 : processus d'érosion éolienne (in : Roose, 1994).

Les particules plus grossières et lourdes sont roulées et entraînées par reptation ou traction à la surface par les composantes horizontales du vent, quand elles parviennent à vaincre le poids de la particule et la rugosité du sol.

Les particules moyennes (0,1 à 0,5 mm) sont soulevées par saltation sur plusieurs dizaines de mètres et se déposent au sol en nappes de sable ridées, ou en petites touffes piégées dans des touffes de végétation.

Les particules plus fines (argiles, limons et matières organiques) sont aspirées dans les tourbillons, parfois jusqu'à plusieurs kilomètres d'altitude, pour être ensuite dispersées sous forme de brume sèche, ou circulent sous forme de nuage sur plusieurs milliers de kilomètres (Photo 2.3). Ainsi, les poussières du Sahara parviennent fréquemment jusqu'au nord de la méditerranée, et parfois plus au nord encore.



Photo 2.3 : Nuage de poussières se déplaçant sur de grandes distances (Déou, Burkina Faso ; cliché Ségala).

2. LA MESURE DE L'EROSION ET DU TRANSPORT DES SEDIMENTS

Le rythme accéléré de l'aménagement des ressources en eau et l'intensification des recherches qui lui est associée (hydrologie, génie civil, socio-économie, etc.) ont donné naissance à des besoins de connaissance sur l'érosion et le transport de matières. Il y a une nécessité croissante de mesures et de données, en vue de faire le point sur des problèmes tels que ceux des pertes en sol, de la dégradation des terres et de la sédimentologie dans les réservoirs, par exemple en vue de mettre au point des projets d'ouvrages hydrauliques efficaces ou en vue de fournir des informations nécessaires sur le transfert des matériaux depuis la surface du globe jusqu'aux océans. En outre, le rôle des sédiments dans le transport des substances nutritives et des produits contaminants à travers les écosystèmes terrestres et aquatiques et dans les cycles globaux géochimiques, génère de nouvelles demandes pour une collecte encore plus importante de données. Plus récemment, la prise en compte indéniable de l'évolution des états de surface dans les modifications observées sur les régimes de certaines rivières, notamment en milieu sahélien anime l'envie de savoir quel serait le signal de ces changements environnementaux sur les matières en suspension.

Ces besoins croissants de données et de connaissance entraînent des progrès méthodologiques dans les procédures de quantification des matières en suspension mobilisées. Les stratégies et les techniques diffèrent suivant la très grande variété des conditions naturelles et d'échelles de mesures.

Certaines mesures intéressent les **zones de détachement**, les versants, sur lesquels des parcelles de dimensions variées sont délimitées, et dont l'exutoire est équipé pour piéger les sédiments chargés dans les eaux de ruissellement, sur lesquels sont effectués plusieurs traitements (pesées, granulométrie, chimie, etc.). D'autres visent les **zones de dépôt**, plus particulièrement des bassins de décantation et des barrages, dans lesquels des sondages permettent de déterminer le volume de matières déposées. Entre les deux, de nombreux hydrologues interviennent dans des **zones de transport**, les rivières, où ils estiment l'érosion à partir des mesures des matières transportées.

Ces différents domaines ne sont évidemment pas indépendants puisque liés dans le fonctionnement du bassin versant. Plusieurs thalwegs se rejoignant forment un ruisseau qui, avec d'autres, va constituer une rivière. L'ensemble de ces cours d'eau constitue un réseau hydrographique hiérarchisé qui transporte des sédiments, ou pour le moins une partie de ceux-ci, érodés dans des zones situées plus à l'amont, sur les interfluves. Ainsi, pour analyser la charge solide dans le cours d'eau, toutes les données relatives aux modifications ou perturbations de l'occupation des sols sur les versants, ou des écoulements dans le réseau hydrographique, doivent être prises en compte.

2.1. Quelques définitions

Il est important avant de parler des techniques de mesures et des méthodes de calcul, de préciser les sens de certains termes qui seront utilisés dans ce mémoire.

Les matériaux transportés par les cours d'eau se trouvent sous forme liquide et solide. Ce mémoire est consacré essentiellement à la forme solide. Suivant le poids et la taille des particules, la forme solide comprend trois phases (figure 2.2) :

- **le charriage ou charge de fond** (*bed load* des anglo-saxons) ; c'est le transport des particules grossières qui restent en permanence au contact du lit. Leur mouvement se fait par roulage,
- **la suspension** (*suspended load*); C'est la fraction de particules qui reste en permanence en suspension au cours du transport. La taille et la densité de ces matériaux leur permettent, dans certaines conditions d'écoulement, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Ce sont en général des argiles et des colloïdes.
- **la saltation** ; cette phase est constituée des particules qui, au cours du transport, passent alternativement entre la suspension et le charriage. Leur déplacement se fait par des bonds successifs,

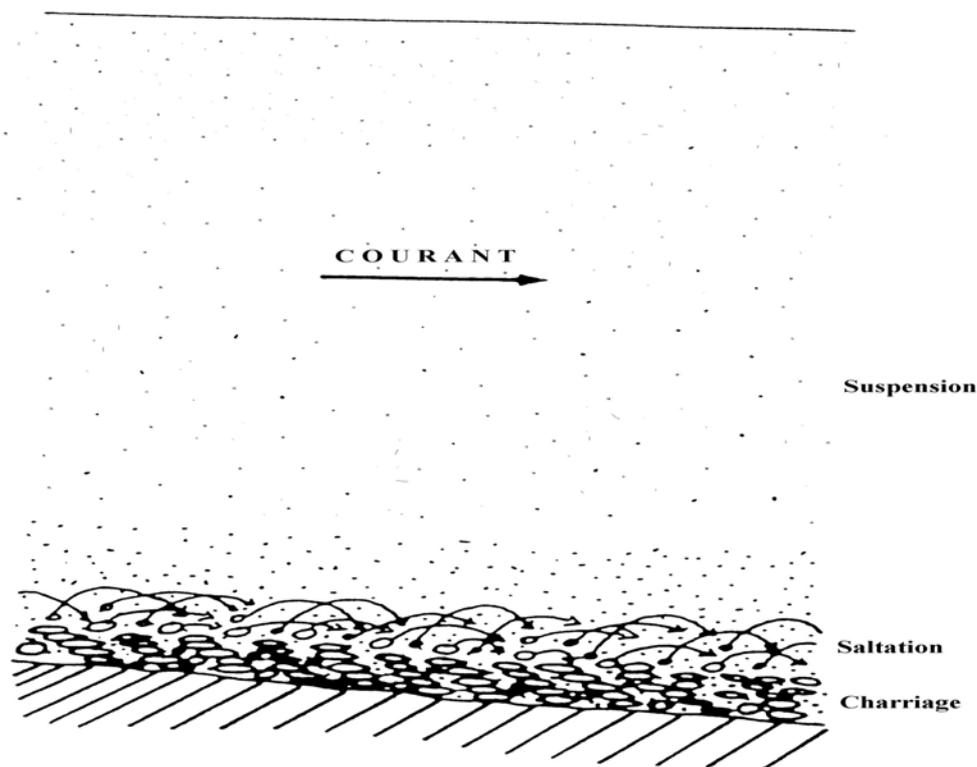


Figure 2.2 : Les différentes phases de transport des matières solides : In Nouvelot (1992).

Nous ne prendrons pas en compte le transport de fond (charriage). En fait, dans le cas des bassins versants que nous étudions, en dehors peut être de celui du Mayo Tsanaga, cette tranche représente une très faible part des matériaux. Les concentrations des matériaux sont faibles à proximité du fond. Même si à l'échelle des parcelles on peut constater que ces matériaux grossiers sont effectivement arrachés des champs, la densité de la végétation sur les

versants les empêcherait d'atteindre les cours principaux des rivières. Le terme **Matières En Suspension (MES)** dans cette étude ne représente de ce fait que les particules (organiques ou minérales) restant en suspension dans l'eau et de diamètre supérieur à 0,45 μm . Dans la très grande majorité des cas, et surtout pour les bassins versant à couvert végétal dense, la charge en suspension représente quantitativement un pourcentage très important du transport solide global (*sediment budget* de ICCE¹).

Le **transport solide** (ou débit solide) correspond à la quantité de matériaux transportés par un cours d'eau à travers une section par unité de temps. On l'exprime généralement en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. C'est l'équivalent débit liquide exprimé en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Le terme **charge solide ou masse totale transportée** désigne la masse des MES drainée pendant un temps quelconque t (jour, mois, saison ou année). C'est donc la quantité (généralement exprimée en tonne) des matériaux transités en un point du réseau hydrographique, pendant le temps considéré. Pour comparer plus aisément ces chiffres, on les rapporte le plus souvent à la surface du bassin en amont du point de mesure. On les désigne alors par le **flux de matière ou taux de transport solide**, exprimé en $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$, qui est l'équivalent du débit spécifique pour les écoulements d'eau. Le sens du terme **érosion** le plus souvent utilisé par les hydrologues pour désigner ces flux n'a évidemment rien à voir avec celui des agronomes ou des pédologues. Les chiffres avancés ici ne sont qu'indicatifs de l'érosion au sens de la dégradation des sols, mesurée sur des parcelles.

2.2. Les techniques de mesures

L'une des principales difficultés pour quantifier les matières solides en suspension véhiculées par une rivière est la nécessité d'un échantillonnage abondant afin de suivre les variations de la concentration des matières dans l'espace (section de la rivière) et dans le temps (prélèvements réguliers).

Les chercheurs ont essayé de résoudre ces problèmes, par le développement d'équipements et appareillages capables d'enregistrer automatiquement des concentrations en continu. Pour ce,

¹ International Commission on Continental Erosion

ils utilisent les propriétés du rayonnement électromagnétique (sonde à absorption, sonde à rétro-diffusion et sonde de radioactivité naturelle). Mais la difficulté pour ces appareils demeure, d'une part, liée à leur étalonnage qui se fait au laboratoire et, d'autre part, à la relation entre la concentration au point de mesure et la concentration moyenne dans la section.

D'autres méthodologies basées sur l'exploration du champ de concentration dans la section de l'écoulement, par des prises d'échantillons à divers points ont été élaborées par les chercheurs de l'ORSTOM (Colombani, 1967 ; Billon, 1968 ; Nouvelot, 1969 et 1972c). Considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L, chaque verticale peut être définie par son abscisse l comptée sur L, et par sa profondeur P.

Si en un point d'une verticale, situé à la profondeur p, sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration des matériaux en suspension c, le débit liquide sur un élément de surface dS de la section S à proximité de la surface est donné par la relation :

$ql = v \cdot dS$, le débit solide sur le même élément de surface s'écrit :

$$qs = c \cdot ql = c \cdot v \cdot dS \quad (2.1)$$

Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Qs = \iint_S qs = \iint_S c \cdot v \cdot dS = \iint_S c \cdot v \cdot dl dp \quad (2.2)$$

Le débit liquide total est donné par l'expression :

$$Ql = \iint_S v \cdot dS \quad (2.3)$$

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport :

$$C_m = Qs / Ql \text{ exprimée en } \text{mg.l}^{-1} \quad (2.4)$$

Cette méthode appelée jaugeage complet des débits solides permet d'estimer avec la meilleure précision la concentration moyenne des matières en suspension dans la rivière. Toutefois, sa pratique quotidienne représente une très lourde charge tant sur le plan de la mobilisation du personnel nécessaire que sur le plan du traitement des échantillons au laboratoire. A cela

s'ajoute la contrainte de la rapidité des opérations liées aux variations rapides des concentrations lors des crues violentes sur les petits bassins versants. Pour alléger la durée des opérations de terrain et les charges de laboratoire, tout en suivant raisonnablement les variations de concentrations des matières en suspension dans le temps, Nouvelot (1972a) a mis au point, dans les rivières camerounaises, une méthodologie qui consiste à prélever des échantillons témoin à une fréquence élevée en un point de la surface. Les concentrations ponctuelles C_i obtenues lors de ces prélèvements témoins sont corrigées par des jaugeages complets, plus espacés, par une relation qu'on établit entre C_i et la concentration moyenne dans la section de mesure C_m (figure 2.3).

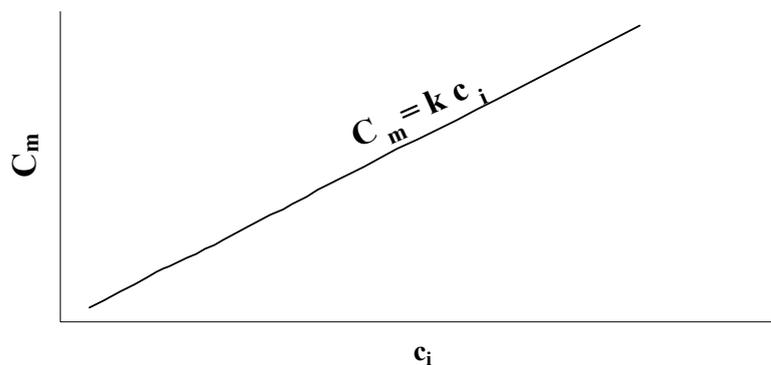


Figure 2.3 : Correction entre la concentration d'un échantillon témoin et la concentration moyenne.

L'ORSTOM a acquis une forte expérience dans l'application de cette méthode pour la collecte de données sur les matières en suspension dans les fleuves et rivières d'Afrique intertropicale. Des développements ont été apportés à l'occasion de plusieurs programmes : PIRAT² sur le bassin du fleuve Congo (Olivry *et al.*, 1988 ; Moukolo *et al.*, 1993 ; Laraque et Olivry, 1996) ; EQUANIS³, sur le bassin du fleuve Niger (Olivry *et al.*, 1995 ; Briquet *et al.*, 1997 b ; Picouet, 1999).

Ainsi, dans les cas où la turbulence des rivières est jugée suffisante pour homogénéiser la concentration dans la section de mesure, les écarts entre les concentrations ponctuelles et les moyennes dans les sections sont inférieurs à l'erreur de mesure. Le facteur k est alors généralement proche de 1, et un seul point de prélèvement permettra de suivre les variations

² PIRAT : Programme Inter-disciplinaire de Recherche : Géodynamique des Milieux Intertropicaux périallantique

³ EQUANIS : Environnement et Qualité des apports du Niger au Sahel

dans le temps du transport en suspension. Cette méthode a été utilisée dans plusieurs cas pour évaluer les matières en suspension (Boeglin et Probst, 1996 ; Ndam-Ngoupayou, 1997).

2.3. Le calcul de la masse totale transportée

L'objectif principal des mesures de concentrations de matières solides en suspension sur un bassin versant est d'établir des bilans des apports et des transferts d'éléments sous forme particulaire, à partir des concentrations des MES C et des débits Q , deux grandeurs qui varient dans le temps.

D'une manière générale, pour obtenir une charge des MES M entre les temps t_1 et t_2 , on peut écrire :

$$M = \int_{t_1}^{t_2} C(t) Q(t) dt \quad (2.5)$$

Cette équation résulte de l'hypothèse simplificatrice que sur la période de temps considérée, on puisse disposer d'un très grand nombre de couples d'observations simultanées (C , Q). Or on se retrouve le plus souvent dans des situations où l'information sur l'une ou l'autre des composantes du flux n'est pas suffisante pour se livrer à ce genre de calcul. Les observations ne sont pas toujours continues pour les mesures de concentrations par exemple, et les couples d'observations (C , Q) peuvent présenter une grande dispersion.

Aussi, la plupart des études sur les matières en suspension se basent sur des échantillons plus ou moins espacés dans le temps. De ce fait, certains auteurs (Meybeck, 1970 ; Haubert, 1975 ; Walling et Webb, 1981 ; Balland, 1983 ; Etchanchu, 1988) ont passé en revue diverses méthodes de quantification des matières sur une période donnée. Le choix de la méthode est conditionné par la prise en considération, essentiellement, de la nature et de la quantité de l'information disponible.

Ces méthodes de calcul peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes stochastiques basées sur l'utilisation des moyennes des concentrations, et les méthodes déterministes utilisant les modèles de qualité ajustés aux relations débit - concentration.

2.3.1. Les méthodes stochastiques ou des moyennes des concentrations

Ces méthodes sont adaptées aux cas où l'on dispose de séries de concentrations et/ou de débits peu nombreuses. Dans ces méthodes, la concentration des matières en suspension C_i correspondant à celle d'un prélèvement instantané est considérée comme représentative de la période qui sépare deux prélèvements.

Méthode n°1

C'est la méthode la plus simple. Elle utilise les moyennes arithmétiques des concentrations sur une période donnée (mois, saison, année). L'équation qui donne la masse totale exportée pour une période donnée est la suivante :

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i}{n}, \quad (2.6)$$

M est la masse totale, δt est l'intervalle de temps, Q_m est le débit moyen pour δt , C_i est la concentration instantanée et n le nombre d'échantillons.

Cette méthode manque de précision car les concentrations ne sont pas pondérées par les débits. Ainsi, elle peut sous-estimer les flux de MES. Néanmoins, elle a donné des résultats comparables à ceux des autres méthodes dans le bassin du Congo à Brazzaville (Laraque et Olivry, 1999).

Méthode n°2

Les concentrations instantanées sont pondérées par les débits. La formule s'écrit :

$$M = \delta t \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{n} \quad (2.7)$$

M est la masse totale, δt l'intervalle du temps, C_i et Q_i les concentrations et les débits instantanés, n le nombre d'échantillons.

Cette méthode tient compte de la distribution des débits. Elle peut alors sous-estimer ou surestimer les flux selon que le nombre de prélèvements est important en période de crue, ou en période d'étiage. En revanche, elle peut donner des résultats satisfaisants si la fréquence des prélèvements est élevée et constante sur la période (plusieurs prélèvements par jour). Elle a été utilisée par Probst (1983) dans le bassin de la Garonne, par Probst *et al.* (1992) pour l'estimation du flux annuel de la matière minérale soluble sur le Congo à Brazzaville à partir des prélèvements mensuels. Elle a aussi donné de bons résultats pour les matières en suspension (Laraque et Olivry, 1999).

Méthode n°3

La somme des concentrations instantanées est pondérée par la somme des débits instantanés. La masse totale s'obtient par la formule :

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i} \quad (2.8)$$

M est la masse totale, δt l'intervalle de temps, Q_m le débit moyen pour la période considérée (δt), Q_i et C_i sont les débits et les concentrations instantanés, n le nombre d'échantillons.

C'est la méthode la mieux adaptée à un échantillonnage limité à quelques prélèvements par an (un par mois par exemple). Les bilans calculés ici seront d'autant plus précis que la fréquence des prélèvements sera élevée. En général, les flux calculés par cette méthode sont plus précis que dans le cas des deux méthodes précédentes, dans la mesure où elle prend en compte le débit moyen et les concentrations pondérées par les débits. Cette méthode a été utilisée par Boeglin et Probst (1996) pour estimer les flux de matières du Niger à Bamako entre 1990 et 1993, à partir d'un échantillon de prélèvements bi-mensuels, par Probst *et al.* (1992) pour l'estimation du flux annuel de la matière inorganique dissoute sur le Congo à Brazaville à partir des prélèvements mensuels.

Méthode n°4

Elle est basée sur la détermination d'intervalles de temps pendant lesquels la concentration varie très peu, ou peut être considérée comme constante et représentative (Meybeck, 1970 ; Balland, 1983). La masse totale résulte de la somme des flux partiels :

$$M = \sum_{p=1}^{p=n} \delta t_p \cdot Q_{mp} \cdot C_{mp} \quad (2.9)$$

M est masse totale, δt_p la durée de chaque période p , Q_{mp} et C_{mp} les débits et les concentrations moyennes partielles de chaque période, n nombre de prélèvement déterminés. Cette méthode donne, en général, de bons résultats mais, en pratique, elle est relativement lourde et, donc, rarement utilisée (Meybeck, 1970 ; Haubert, 1975 ; Balland, 1983 ; Probst, 1983 ; Etchanchu, 1988).

Méthode n°5

Cette méthode est applicable lorsque l'on ne dispose que d'un prélèvement par jour. La concentration instantanée journalière est considérée comme représentative de la journée :

$$M = \delta t \cdot \sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_{mj} \quad (2.10)$$

M est masse totale, C_i concentration instantanée, Q_{mj} les débits moyens journaliers, δt l'intervalle de temps, n le nombre de jour.

Cette méthode peut donner des bilans relativement précis dans des cas où les débits et les concentrations varient beaucoup dans le temps. Mais elle nécessite un échantillonnage très fréquent. Néanmoins, elle est largement utilisée dans des études hydrochimiques des bassins versants de petite taille.

2.3.2. Les méthodes déterministes ou modèles de qualité

Ces méthodes sont basées sur la modélisation des apports particuliers à partir des modèles de qualité chimique d'une rivière. L'application de ces méthodes implique la détermination des relations $C = f(Q)$ les mieux ajustées aux relations entre les débits et les concentrations en MES (Allen, 1979 ; Walling et Webb, 1981 ; Balland, 1983).

D'une manière générale, le principe de calcul de ces méthodes obéit à la formule suivante :

$$M = \int_{t_1}^{t_2} Q_j \cdot \{f(X)\} \cdot dt \quad \text{avec, } C_i = f(X) \quad (2.11)$$

M est la masse totale, t le temps, Q et C sont respectivement les débits et les concentrations, l'indice j se rapporte aux valeurs journalières, X paramètre mesuré en continu.

Lorsqu'il s'agit d'un débit mesuré à partir des relations débit - concentration, la concentration moyenne journalière est estimée à partir du débit.

Une autre méthode couramment utilisée est la méthode des bilans partiels (Meybeck, 1970 ; Probst, 1983 ; Boeglin et Probst, 1996, Probst *et al.*, 1992).

Cette méthode estime le tonnage des matériaux par tranche de débits :

$$T_{\Phi} = Q_{\Phi} \cdot t_{\Phi} \cdot C_{\Phi} \quad (2.12)$$

T_{Φ} ; tonnage des matériaux exportés, dans l'intervalle Φ , Q_{Φ} est le débit moyen de l'intervalle Φ , t_{Φ} durée totale des périodes de débits comprises dans l'intervalle Φ , C_{Φ} concentration moyenne de l'intervalle de débit Φ .

Les intervalles de débit sont déterminés à partir de l'étude hydrologique ; ils représentent toujours des phases hydrologiques homogènes caractérisant soit une période de ruissellement superficiel, soit une période d'écoulement hypodermique, soit encore une période de vidange de nappes.

Cet inventaire (non exhaustif) des procédés de calcul de flux de matières dans des rivières, rend compte de leur diversité et de leurs multiples conditions d'utilisation, qui dépendent des pas de temps des données disponibles en débits et en concentrations. Pour notre part, nous utiliserons, pour les bassins versants que nous étudierons, 3 méthodes stochastiques (équation 2.1, 2.2 et 2.3), et nous comparerons les résultats obtenus (voir chapitre 8). Celles-ci sont les mieux adaptées aux régimes hydrologiques que nous étudions et à la fréquence de nos mesures.

3. LA FIABILITE DES DONNEES RELATIVES AUX TRANSPORTS DES MATIERES EN SUSPENSION ET PERSPECTIVE VERS UNE SYNTHESE REGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

L'investigation scientifique sur les origines, les facteurs et la quantification de l'érosion par la mesure des matières en suspension est une vieille pratique, qui a débuté au début du 20^e siècle, mais, en Afrique, les premières mesures n'ont été effectuées qu'une cinquantaine d'années plus tard. Depuis les travaux de Fauck (1954), Fournier (1960) sur des parcelles et plus tard de Colombani (1967), Billon (1968), Vuillaume (1969) et Nouvelot (1969), sur des petits bassins versants et les grands fleuves, plusieurs cours d'eau d'Afrique ont fait l'objet de mesures de matières en suspension. Certains ont été étudiés à des périodes distinctes par divers auteurs utilisant des méthodologies différentes. L'examen des résultats obtenus, souvent pour le même bassin, montre de remarquables dispersions.

Ainsi, le flux annuel de matières en suspension pour l'Amazonie à Obidos est estimé par Gibbs (1967) à 499.10^6 tonnes, basé sur des résultats de deux campagnes en hautes eaux. Meade *et al.* (1979a) obtiennent 820.10^6 tonnes, à partir de deux nouvelles campagnes en hautes eaux, alors que Meade *et al.* (1985) en utilisant de nombreux résultats basés sur un échantillonnage par intégration dans la section, situent de nouveau ce flux dans un intervalle de $1100-1200.10^6$ tonnes. Le résultat obtenu par (Nkounkou, 1989), 1174.10^6 tonnes, est très comparable aux valeurs de Meade *et al.* (1985). Pourtant Bordas *et al.* (1988) proposent la valeur de 600.10^6 tonnes, proche du résultat de Gibbs. Le constat que nous pouvons faire est donc que ces valeurs peuvent varier du simple à plus du double, et cela pour le même fleuve. A partir d'une série d'échantillonnage décadaire, de 1995 à 2003, calibrée par les résultats de 18 campagnes de jaugeages complets réalisés ($4,8.10^6$ km²), Guyot *et al.* (2005) proposent un flux moyen de 810.10^6 tonnes par an, pour un débit de 172.000 m³.s⁻¹ à Obidos

Le même constat peut être fait sur les calculs du flux sédimentaire du fleuve Congo à Brazzaville : 48.10^6 tonnes (Nkounkou et Probst, 1987), 26.10^6 tonnes (Nkounkou, 1989) et 34.10^6 tonnes (Moukolo *et al.*, 1993).

Par contre, pour le Mayo Tsanaga à Bogo : 327.10^3 tonnes en 1968 et 1969 (Nouvelot, 1972a), 272.10^3 tonnes en 1973 (Olivry, 1976) et 284.10^3 tonnes en 1985 et 1986 (Naah, 1990), nous semblent, en écart moyen, assez proches les uns des autres.

Ces disparités induisent très souvent des différences considérables dans des synthèses régionales, et peuvent influencer de façon notable des éléments de prise de décisions proposés par divers auteurs, tel qu'il apparaît sur la figure 2.4.

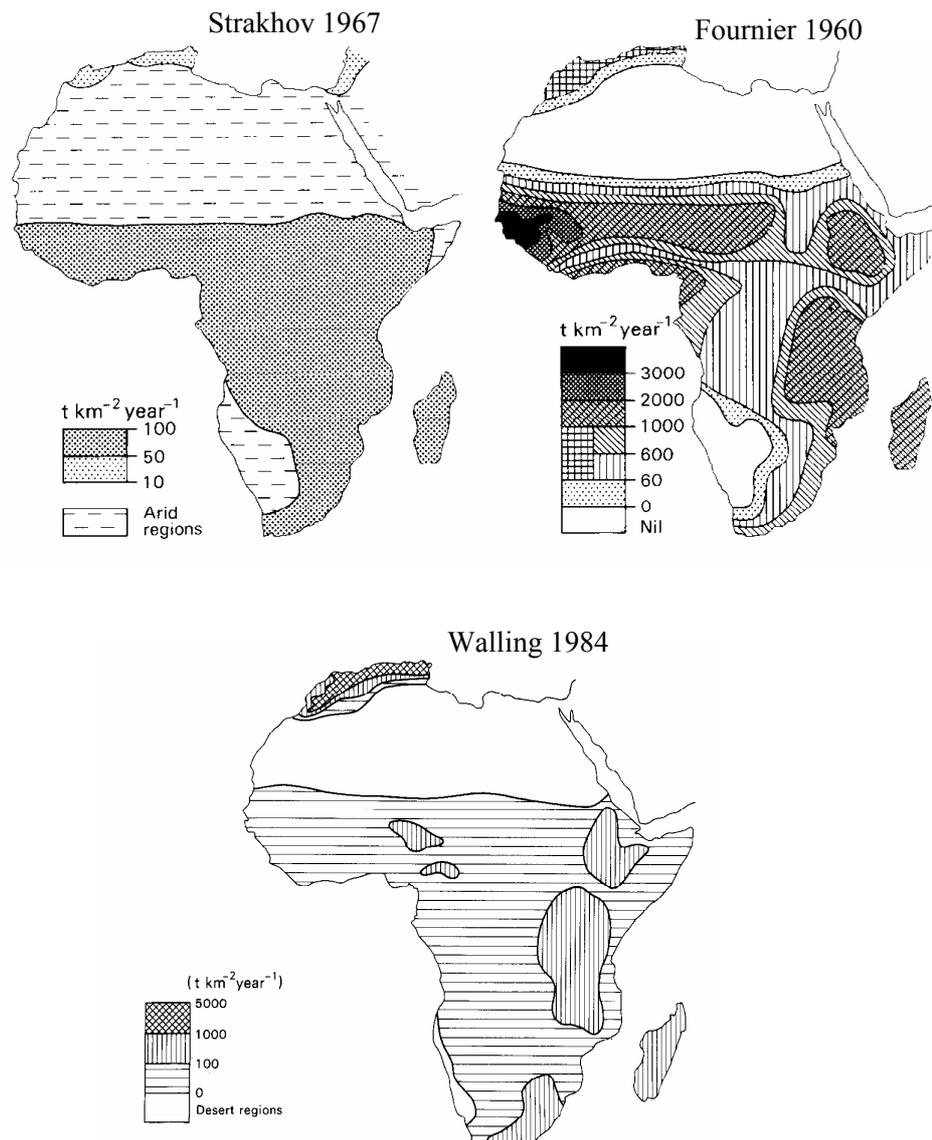


Figure 2.4 : Différentes cartes de valeurs de transport de matières en suspension proposées par trois auteurs pour l'Afrique : In Walling (1984).

Les raisons de cette forte variabilité des calculs de transport de MES peuvent être diverses : la fréquence spatiotemporelle de l'échantillonnage, le matériel de prise d'échantillons, les techniques de traitement et la méthode de calcul des masses sur une période. Certaines catégories d'incertitudes ont été évaluées. Ainsi, Roose (1977) pense qu'on ne peut espérer une précision de moins de 20 % sur les parcelles expérimentales. Nouvelot (1972c) estime entre 5 % et 10 %, avec un maximum à 20 %, les erreurs liées aux traitements d'échantillons pour les rivières camerounaises. Probst *et al.* (1992), en appliquant trois méthodes de calcul

des masses transportées aux mêmes échantillons de données du fleuve Congo à Brazzaville et de son affluent l'Oubangui à Bangui, trouvent des résultats tout à fait semblables.

Cependant il semble que les imprécisions dues aux faibles densités spatiotemporelles des données, qui obligent à faire des extrapolations ou des interpolations sur des périodes ou des espaces non observées, sont à la base des erreurs les plus remarquables. Ces imprécisions ont déjà attiré l'attention des auteurs tels que Walling et Webb (1981) qui évoquent plusieurs cas dans le monde, dont celui des fleuves Neo-zealandais, où des chiffres extrêmement différents de $275 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et $13\,300 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sont proposées par deux auteurs, à partir des mêmes échantillons de données de concentrations.

L'hétérogénéité spatiale se révèle ainsi être une caractéristique des flux de matières en suspension. Bolline (1982) observe sur les loess du Brabant en Belgique que le transport spécifique ($\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) diminue quand la taille du bassin augmente. L'analyse factorielle effectuée sur les données de transport de matières au Cameroun (Liéno *et al.*, 2005a) corrobore ces observations et souligne que les flux de matières en suspension ($\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) à l'exutoire des grands bassins versants ($S > 60000 \text{ km}^2$) ne reflètent plus les caractéristiques physiques des versants (pentes, végétation, sols, etc.). Les résultats obtenus par Diallo (2000) sur le bassin de Djitiko (104 km^2) au Mali, indiquant que plus de 90 % des sédiments sont piégés dans les buttes et micro-dépressions, vont encore dans le même sens.

En revanche, de l'avis de Colombani *et al.* (1984), les charges solides élevées des puissants écoulements lors des années humides résultent en bonne partie de la reprise dans le lit des matériaux déposés par les faibles écoulements au cours des années moins humides, incapables d'évacuer les apports des versants. De ce fait, les transports solides peuvent être très élevés dans les ravines dans certaines régions, 100 à $200 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Olivry et Hoorelbecke, 1989), alors que les pertes de terre sur les champs cultivés sont faibles, $0,1$ à $15 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Arabi et Roose, 1989). Ces observations montrent que l'on peut rencontrer des cas exceptionnels où les flux de matières en suspension deviennent plus importants à une plus grande échelle.

Ces résultats mettent en évidence d'une part une importante sédimentation et d'autre part une mobilisation tout aussi considérable des sédiments sur les versants, dans les ravines et les lits des rivières. Ces processus sont des témoins de la complexité des mécanismes de production et de transport des sédiments, qui rend difficile le passage des matières en suspension

mesurées dans le réseau hydrographique à l'érosion effective sur les versants, à l'échelle d'un seul événement pluvieux ou d'une seule année.

Comme pour les précipitations et les écoulements, **il est alors nécessaire que l'on considère des flux moyens sur une période suffisamment longue, de façon à espérer atteindre un état d'équilibre dynamique entre les processus de dépôt et de reprise des sédiments lors des événements pluvieux et/ou des années successifs.** Or cet exercice se heurte notamment pour les pays africains à deux problèmes essentiels. Le premier est lié au fait que les transports de matières ne sont pas suivis de façon continue sur plusieurs années et les données disponibles sont très fragmentaires. Le second est relatif à l'absence d'une banque de données organisée et centralisée, regroupant les résultats des mesures qui ont été effectuées, parfois depuis les années 1950. Cette idée de banque de données est un des objectifs premiers du thème Dynamique de Flux de matières (DynaFlux) du projet FRIEND-AOC.

Les synthèses régionales des connaissances sur les transports de matières nécessitent de mettre en place de bases de données aux échelles nationale (Liéno *et al.*, 2002) et régionale, à l'instar de celles qui existent par ailleurs pour les précipitations et les écoulements.

Dans le cadre de cette thèse, des données brutes et des résultats des travaux sur les transports de matières en suspension ont été recensés de façon aussi exhaustive que possible sur le territoire camerounais, comme en témoigne la densité des points sur la figure 2.5. La figure 2.5 n'indique que les sites des travaux portés à notre connaissance, même si l'inventaire n'a pu être que très sommaire dans les pays autres que le Cameroun. Cette carte a quand même le mérite de présenter un aperçu du travail à poursuivre.

Les informations collectées ont été rassemblées, organisées et sont actuellement gérées dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), que nous avons couplé à un Système d'information Géographique (SIG). Nous reviendrons plus en détail sur la structure de cette banque au chapitre 4.

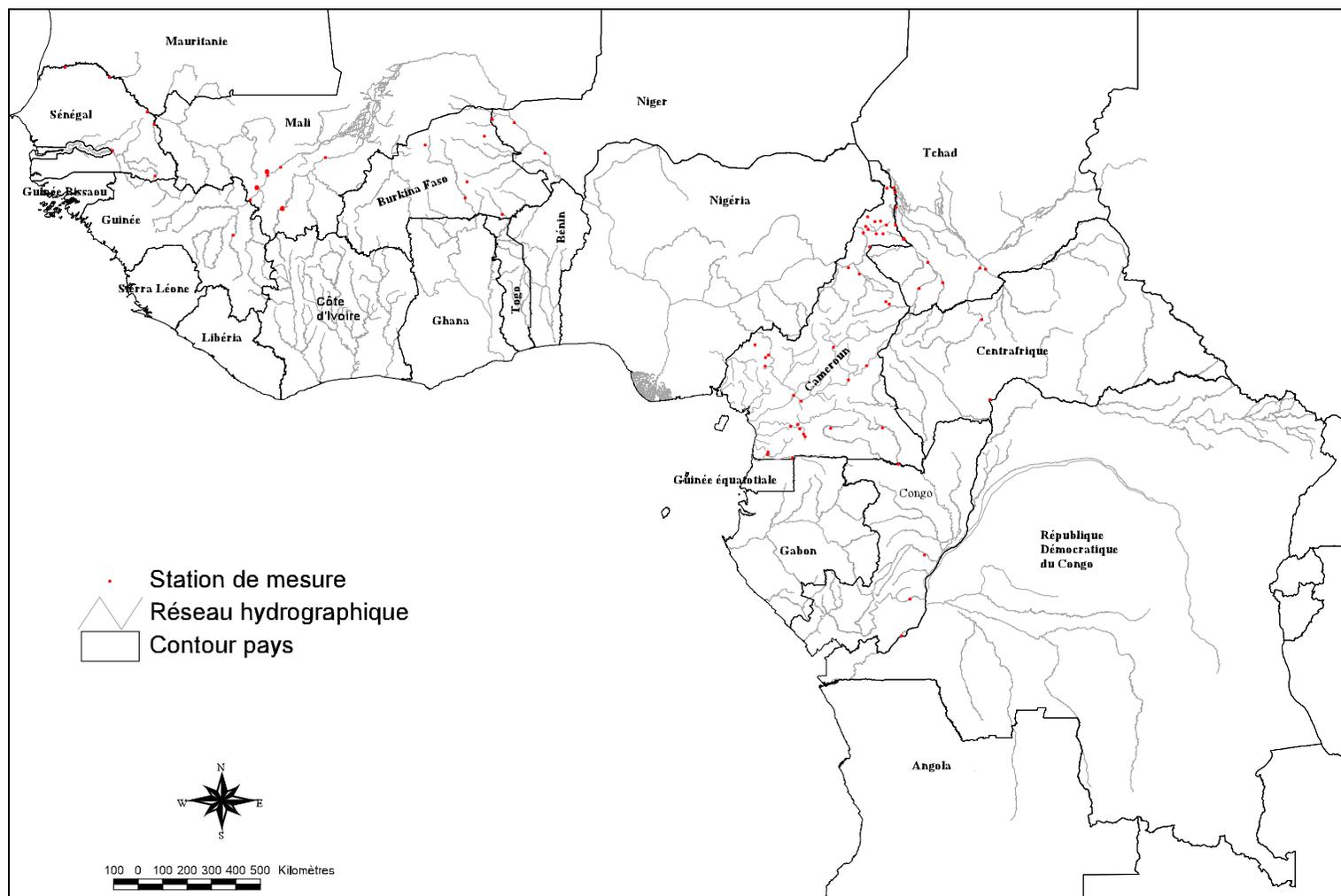


Figure 2.5 : quelques sites des travaux sur les matières en suspension en Afrique de l'ouest et du centre.

CONCLUSION

Les précipitations et leur ruissellement sur le sol constituent les causes fondamentales de l'érosion mécanique. Les autres facteurs (pente, nature du sol, couverture végétale, actions anthropiques) interviennent pour limiter ou accélérer le processus. Néanmoins d'autres phénomènes peuvent parfois avoir un impact non négligeable. C'est le cas du vent, du gel, des éruptions volcaniques, des tremblements de terre etc.

Le transport de ces particules solides par les rivières se fait sous plusieurs formes et il existe une multitude de techniques et d'appareillages pour l'évaluer. Mais une incertitude subsiste quant à la précision des résultats, due à plusieurs causes : la modification des caractéristiques de l'écoulement superficiel de l'amont vers l'aval, qui rend difficile le passage de l'érosion sur les versants au transport solide à l'échelle des bassins versants moyens à grands ; la grande diversité des techniques de mesure; la faible densité spatiotemporelle des données existantes.

C'est pourquoi plusieurs chercheurs et aménageurs s'intéressant au phénomène d'érosion et de transport en suspension, que se soit à l'échelle de la parcelle, du versant, du bassin hydrographique, ou mesurant le comblement des lacs et retenues, s'accordent pour affirmer que les flux mesurés dans les rivières ne donnent que des informations globales sur les quantités effectivement érodées sur les versants. Les résultats dépendent de l'efficacité de l'équipement pour la prise d'échantillons, des techniques de laboratoire, de la méthode de calcul de la concentration en sédiment et du flux total exporté.

Toutefois, les mesures, certes imprécises, permettent de se faire une idée des processus d'érosion et de transport. On doit supposer que quelles que soient leurs imprécisions, les résultats doivent pour le moins être des indicateurs utiles pour les spécialistes.

Enfin, **les éléments déjà existants en Afrique de l'Ouest et du centre méritent, telle les données de pluie et de débit, d'être regroupés et centralisés dans une banque de données.** Ce travail de thèse est promoteur de cet outil qui devrait permettre de développer les recherches du groupe FRIEND-AOC de l'UNESCO sur le domaine en Afrique de l'Ouest et Centre.

DEUXIEME PARTIE

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE CAMEROUN

CHAPITRE 3 :

LE CAMEROUN : UN ESPACE PHYTOGEOGRAPHIQUE CONTRASTE

INTRODUCTION

Situé à la charnière de l’Afrique de l’ouest et de l’Afrique centrale, dans la zone de flexure entre le craton du Congo et le craton ouest africain, le territoire camerounais recèle plusieurs facettes de géologie et de relief qui se sont mises en place au cours des temps géologiques. Celles-ci se combinent avec son exposition aux flux de mousson atlantique pour présider à la mise en place des sols, de la végétation et à la définition des climats et des régimes hydrologiques.

Les facteurs biotiques et abiotiques propres à chaque bassin représentatif seront développés plus loin. La présentation du milieu naturel du Cameroun, de ses climats et de ses régimes hydrologiques, dans leur grande diversité ne fait pas ici l’objet de longs développements. Ces caractères sont présentés de manière beaucoup plus détaillée dans les ouvrages de Letouzey (1958), Olivry (1986), Suchel (1987). Mais il a paru intéressant d’en extraire quelques grandes lignes, afin que la description qui sera faite de chaque bassin versant soit mieux perçue dans son unité climatique et par rapport aux unités climatiques voisines. Quelques résultats de variabilité pluviométrique et hydrologique liés au territoire camerounais sont aussi présentés, qui permettent de mieux situer dans le cadre régional du phénomène, les analyses présentées sur les bassins versants camerounais étudiés.

1. LE MILIEU NATUREL

1.1. Le relief

L’élément dominant du relief du Cameroun est la mégastucture tectonique plutono - volcanique appelée « Ligne Volcanique du Cameroun » (LVC) ou « Dorsale Camerounaise ». Elle s’étire sur plus de 1600 km pour 100 km de large en moyenne, du golfe de Guinée jusqu’au lac Tchad, suivant la direction N30°E.

La région sud-ouest présente une physionomie particulière, marquée par les hauts sommets de l’axe volcanique. Les altitudes supérieures à 1 000 m couvrent de vastes étendues (figure 3.1), tandis que les sommets atteignent fréquemment 2 000 et 3 000 m (Manengouba, Bambouto,

Mbam et Oku). En dehors de ces cratères aux pentes abruptes, ce sont de lourds plateaux basaltiques, entre 1 000 et 2 000 m d'altitude, présentant de vastes plaines marécageuses (Mbo, Nkouefou et Ndop), qui dominant. A l'Ouest de cet ensemble et au nord du massif cristallin des monts Roumpi, le cirque de Manfé, région sédimentaire et parfois couverte d'épanchements basaltiques, oriente entre 100 et 300 m d'altitude les eaux de la Cross River vers le Nigeria.

Le Mont Cameroun, point culminant de toute l'Afrique centrale et occidentale, se détache de cette structure, dans la même direction, et se dresse au-dessus de la mer du golfe de Guinée à l'altitude de 4095 m.

Aux environs du 7^e parallèle, apparaît une ramification Est, formant le bastion de l'Adamaoua, vaste horst orienté N70°E, au centre du Cameroun et solidement soudé à la structure précédente. De la frontière nigériane jusqu'au bassin de l'Ouham en République Centrafricaine, s'étalent à une altitude moyenne de 1 200 m, et sur une largeur méridienne ne dépassant pas 300 km, de lourds plateaux au-dessus desquels s'élève, par endroits, une topographie plus accidentée.

L'ensemble constitué par la *Dorsale Camerounaise* et le plateau de l'Adamaoua forme un énorme accident en forme d'arc qui divise grossièrement le pays en deux régions de caractéristiques différentes.

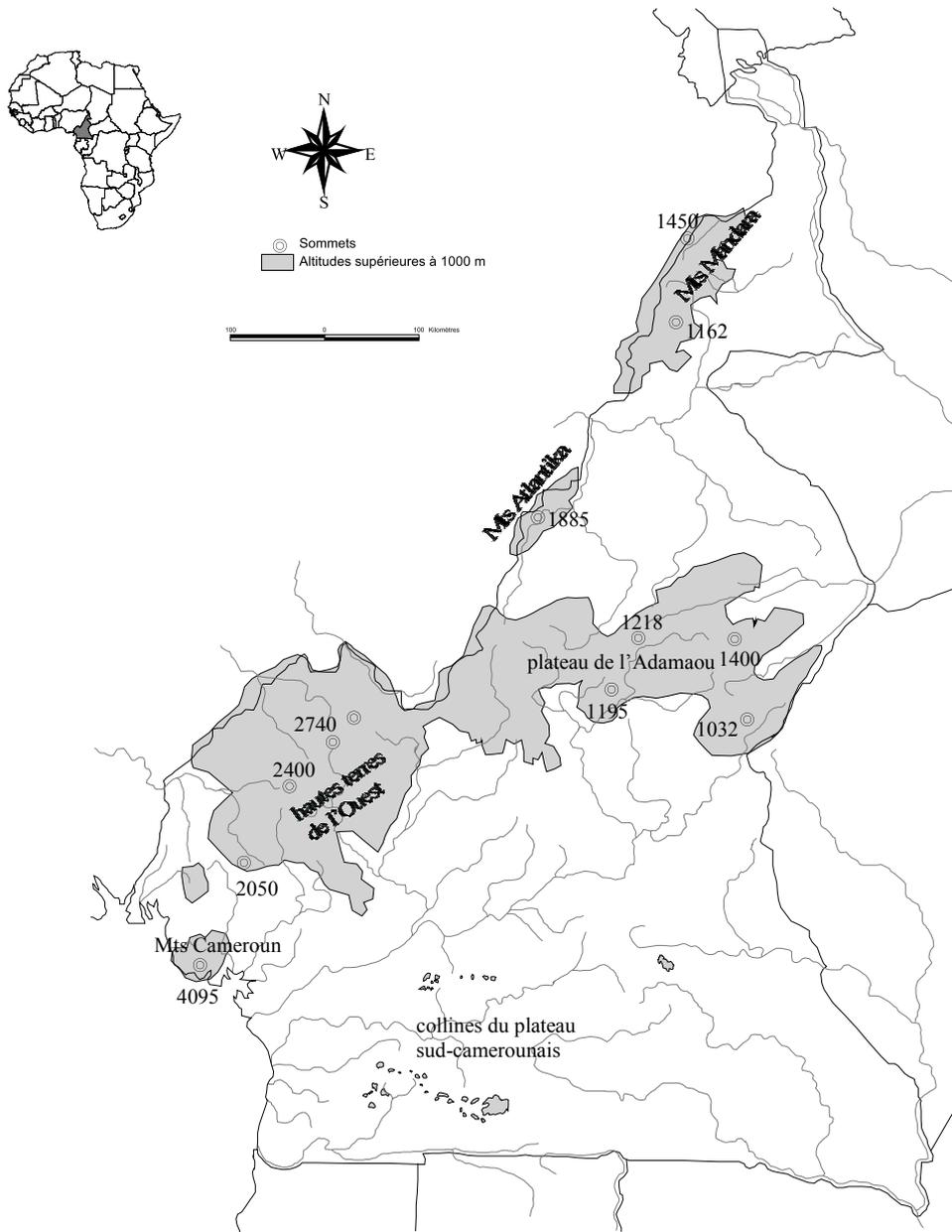


Figure 3.1 : Grands traits de l'oro-hydrographie du Cameroun

Au Nord de cet arc s'étend la plaine de la Bénoué où le fleuve coule à 200 m d'altitude et celle de Maroua-Diamaré, qui s'incline vers le Logone et le lac Tchad dont le plan d'eau est à 280 m d'altitude. Les Monts Atlantika (1500 à 1800 m) et Mandara (1300 à 1400 m) dominent ces plaines et marquent la frontière Nord-Ouest entre le Cameroun et le Nigeria. Le fait morphologique marquant de cette partie septentrionale est l'escarpement sur une distance d'environ 300 m, entre le plateau central et la plaine de la Bénoué, couramment appelé falaise de la Bénoué, dont l'altitude atteint 1000 m.

Au sud du plateau de l'Adamaoua, les altitudes décroissent progressivement vers le plateau sud - Camerounais. La morphologie est marquée par une succession de nombreuses collines en « demi-orange », caractéristiques dans la région équatoriale. Les altitudes sont comprises entre 900 m et 500 m. La pente générale en direction de la cuvette congolaise au Sud-Ouest oriente les cours de la Kadeï et du Dja. Mais en son centre, les lignes de relief de Yaoundé (1300 m) et du Ntem (1400 m) orientent les cours du Nyong et du Ntem vers le sud-ouest.

La limite occidentale du plateau central est très nette. Le passage à la plaine côtière se fait par de véritables escarpements formés sur les rebords du plateau centre-sud. Les cours d'eau y passent par des séries de ressauts qui définissent des chutes et des rapides. La plaine de la façade maritime, comprise entre l'estuaire de la Cross-River à Calabar (Nigeria) et celui du Ntem à Campo, est couverte de dépôts sédimentaires d'origine marine et fluviale. Ces dépôts s'étendent vers l'intérieur du pays sur 80 à 150 km et supportent une végétation de mangrove qui remonte les biefs maritimes des fleuves. A 100 m d'altitude environ, ils sont à peine ondulés et échanrés aux estuaires des fleuves qui y aboutissent.

1.2. La géologie et la tectonique

Les formations géologiques rencontrées sur le territoire camerounais sont essentiellement d'âge précambrien (Complexe de base), issues de la remobilisation du socle archéen, sur lequel reposent les « Séries intermédiaires » et la « Formation du Dja » (Bessoles, 1969).

La figure 3.2 présente l'essentiel des formations géologiques sur le territoire camerounais, décrites par Soba (1989), Toteu (1990), Nzenti (1994), Ngako (1999) et Nzolang *et al.* (2003). La partie camerounaise du Craton du Congo appelée « Complexe du Ntem » d'âge archéen et paléoproterozoïque couvrent le Sud du pays. Elle composée essentiellement de tonalites, de trondjémites, de granites, de granulites et de roches vertes.

Les principales formations géologiques appartenant à la Chaîne Panafricaine couvrent globalement le reste du pays. Elles sont constituées de micaschistes, de gneiss, de migmatites et de granites. Les groupes de Poli et du Lom y forment des entités affectées par un métamorphisme plus faible. Les dépôts volcano-sédimentaires de Mangbéï marquent la fin de l'évolution tectono-métamorphique panafricaine au Cameroun. Ils font partie d'un ensemble

régional dont les affleurements dans la région du Lac de Léré, près de Mangbéï et à Hoye près de Poli.

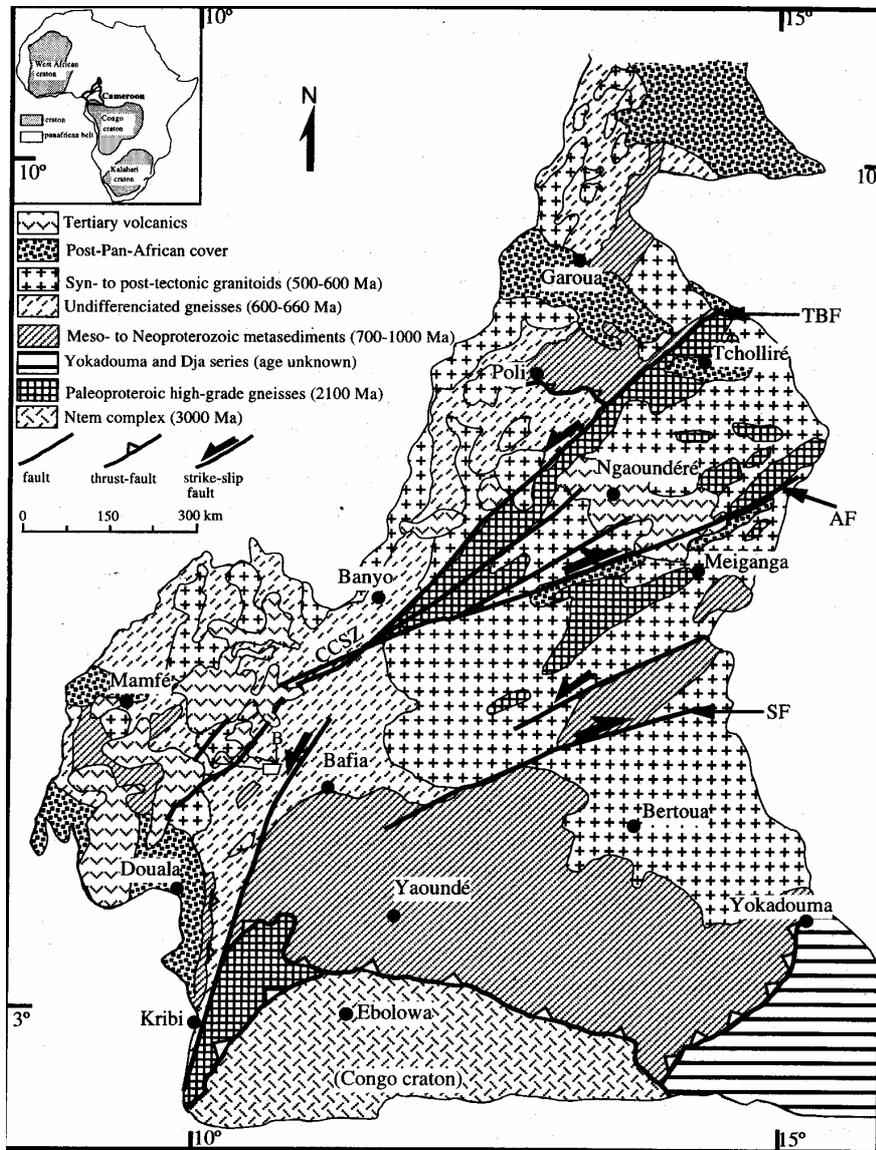


Figure 3.2 : Esquisse géologique du Cameroun (Nzolang *et al.*, 2003),

Les bassins sédimentaires forment des zones de subsidence relativement peu étendues, dans la région côtière (bassins de Douala et de Mamfé), le nord (bassin de la Bénoué), et le Sud du Tchad :

- Le bassin sédimentaire côtier situé en bordure du Golfe de Guinée correspond à une fosse subsidante formée à partir du Crétacé et s'approfondissant progressivement en

direction de l'océan. Les principales formations sont essentiellement des marnes et argiles noires ainsi que des sables gréseux.

- Le bassin de la Bénoué est constitué des sédiments détritiques d'âge Crétacé et Quaternaire qui reposent directement sur le socle cristallin. Le Crétacé est représenté par les grès à l'Ouest de Garoua, les argiles consolidées et les calcaires gréseux. Le quaternaire forme les terrasses en bordure des cours d'eau et les comblements argilo-sableux des zones inondables.
- Le bassin de l'extrême-nord est une partie de la cuvette tchadienne. C'est une zone d'épandage d'alluvions tertiaires, quaternaires et actuelles. Les formations sont essentiellement de type sableux, argileux à argilo-sableux, gréseux, et gréso-calcaire.

Les premières manifestations volcaniques importantes sont attribuées à une époque située entre le Crétacé terminal et l'Eocène supérieur ; elles ont donné naissance aux épaisses formations qui recouvrent les hauts plateaux de l'Ouest et de l'Adamaoua. Dans le sud-ouest, ces laves se sont intercalées dans le bassin de Douala.

En relation avec la fracture de l'ouest, de nouvelles manifestations volcaniques à caractère acide ont donné naissance, au Néocène terminal, à des massifs (Manengoumba, Bamboutos, Nkogam, Mbapit, Mbam), ainsi qu'à quelques petits massifs dans le nord.

Le seul volcan encore en activité est le Mont Cameroun dont les éruptions historiques sont aussi nombreuses et variées. Des sept éruptions les mieux documentées du XX^e siècle, trois ont eu lieu au cours des vingt dernières années (1982, 1999 et 2000). En dépit des dégâts divers, ces éruptions, par les quantités de cendres volcaniques et de pouzzolanes déposées, contribuent à l'extraordinaire fertilité des sols de la région et apportent des matériaux pour le génie civil.

1.3. Le sol

La différenciation des sols au Cameroun se trouve sous l'influence du climat (chaud et humide ou chaud et sec) sur un substratum géologique divers (roches métamorphiques, sédimentaires

ou volcaniques et leurs variantes). Les facteurs biotiques, notamment le couvert végétal (forêt, savane ou steppe), et les facteurs anthropiques (feu de brousse, culture, coupe de bois et élevage) y jouent également un rôle déterminant. Les cartes pédologiques du Cameroun ont été établies suivant la classification française qui est basée sur la notion de profil-type (Humbel, 1972).

Dans le domaine forestier, domine un grand type de sol zonal, le sol ferrallitique, qui couvre l'ensemble des interfluves, soit plus de 9/10 de la superficie. On y rencontre aussi les sols azonaux, minéraux bruts et peu évolués sur les fortes pentes et massifs et les sols hydromorphes dans les bas-fonds et les vallées.

Sur les bordures nord et ouest du domaine forestier, les sols ferrallitiques que l'on peut y retrouver diffèrent nettement des précédents par trois caractères principaux : le rajeunissement, l'accumulation humifère et l'extension des sols rouges à pseudo-sables.

Les sols du Nord-Cameroun présentent une grande diversité qui contraste avec l'uniformité du domaine ferrallitique. Les sols à sesquioxydes sont considérés comme les sols caractéristiques de ces régions soudano-sahéliennes mais ils sont loin d'y occuper les mêmes pourcentages de superficie que les sols ferrallitiques dans leur domaine sud-Camerounais. Ils sont très souvent associés aux sols peu évolués, minéraux bruts, hydromorphes et sodiques. Dans la plaine d'inondation de l'extrême-nord, les sols développés sur les alluvions sont recouverts d'une couche argileuse "Karal", imperméable et présentant de larges fentes de dessiccation en saison sèche.

1.4. La végétation

La forêt ombrophile est caractérisée notamment par sa structure étagée. Les grands arbres aux fûts verticaux, souvent munis à la base de contreforts, étalent de vastes frondaisons en étages supérieurs. Un feuillage dense forme l'étage moyen. Les arbustes de la strate inférieure forment le sous-bois où les plantes abrasées sont rares. On rencontre par endroits des formations secondaires plus ou moins jeunes, plus claires, issues des actions anthropiques (exploitation forestière, cultures). A des altitudes plus élevées, on distingue des formations

d'altitude constituées par des forêts montagnardes et des prairies afro-alpines bien connues sur les monts Cameroun et Oku.

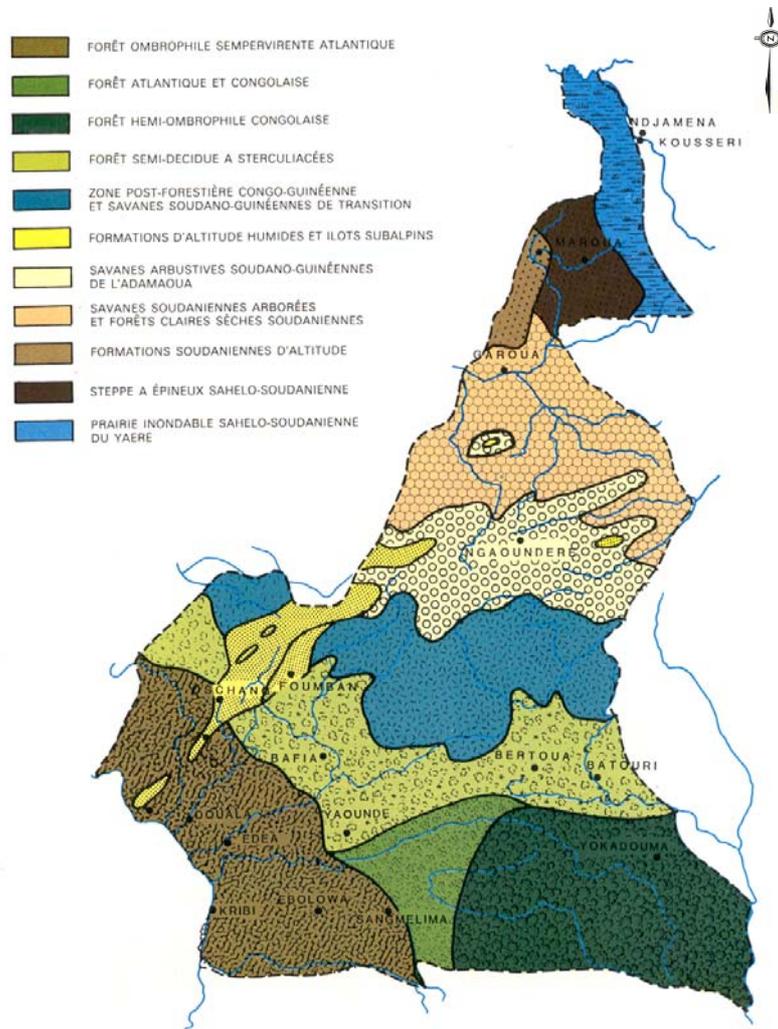


Figure 3.3 : Schéma phytogéographique du Cameroun (Olivry, 1986).

Entre le 4^e et le 6^e parallèle, se situe la limite nord de la forêt *sensu stricto*. Cette limite est constituée d'une juxtaposition de zones de forêts et de savane à graminées. C'est la zone de forêt dégradée, avec les recrûs secondaires. La pression semble ici beaucoup plus anthropique (défrichement, abattage et brûlage aux fins de cultures), que climatique ou édaphique.

Les plateaux de l'Adamaoua sont couverts par les savanes arbustives soudano - guinéennes à graminées et arbustes à lièges épais, résistants aux feux. De nombreuses galeries forestières, soumises à des défrichements agricoles importants, s'étirent au fond des ravins. De

l'Adamaoua au lac Tchad, les éléments ligneux disparaissent progressivement au profit des formations herbacées. On observera successivement des zones de forêts claires et sèches soudaniennes, des savanes soudaniennes arborées et boisées puis des steppes sahéliennes à épineux.

Dans la cuvette tchadienne, la nature du sol différencie le couvert végétal. Ainsi, les grandes plaines herbeuses (Yaéré) correspondent, le long du Logone, à la zone des argiles noires, inondée en période des crues. Les buttes, plus élevées, restent couvertes par des steppes. Des galeries forestières se maintiennent à la faveur des bourrelets sableux le long des rivières.

Ce schéma de la phytogéographie du Cameroun (figure 3.3), décrit par Letouzey (1958) est de nos jours profondément modifié, du fait de la pression anthropique. Les formations primaires, longtemps soumises aux activités anthropiques et sous les effets des changements climatiques, ont évolué de manière quasi-irréversible. Elles ne subsistent que sous forme d'îlots dans des immenses étendues de couverts secondaires et de paysages culturels, en équilibre avec de nouvelles conditions climatiques d'une part, et avec les agents anthropiques récurrents (feux, coupe de bois, pâturage, exploitation industrielle etc.), d'autre part.

2. LES UNITES CLIMATIQUES AU CAMEROUN

La répartition des climats sur le territoire camerounais est liée à l'extension du pays en latitude et à ses particularités orographiques, définies essentiellement par les hautes terres.

2.1. Les unités climatiques liées à l'extension en latitude du pays

Au cours de ses oscillations saisonnières (figure 1.4 du chapitre 1), la ZCIT entraîne successivement les zones de temps A, B, C et D (figure 1.5 du chapitre 1), de caractéristiques pluviogènes différentes. Le passage de ces zones de temps sur le Cameroun entraîne, dans l'année, une répartition différente des précipitations suivant les latitudes (figure 3.2). Au cours de la montée de la ZCIT, la zone C, pluviogène, traverse les parties sud du Cameroun au printemps (mars à juin) (bassins versants du Ntem, Kienke et Nyong). Ce qui correspond à la première saison des pluies.

Au maximum de la position septentrionale de la ZCIT, la zone C dépasse la latitude de Maroua entre juillet et septembre et engendre l'unique saison des pluies à l'Extrême-nord Cameroun (bassin versant de Mayo Tsanaga). Pendant la même période, plus précisément en juillet et août, la zone D à pluies réduites couvre les latitudes sud du Cameroun et induit la saison sèche d'été ou « petite saison sèche » (figure 3.4). Au centre du pays (Bassin du Lom), la ZCIT reste en permanence d'avril à octobre, d'où la longue saison des pluies.

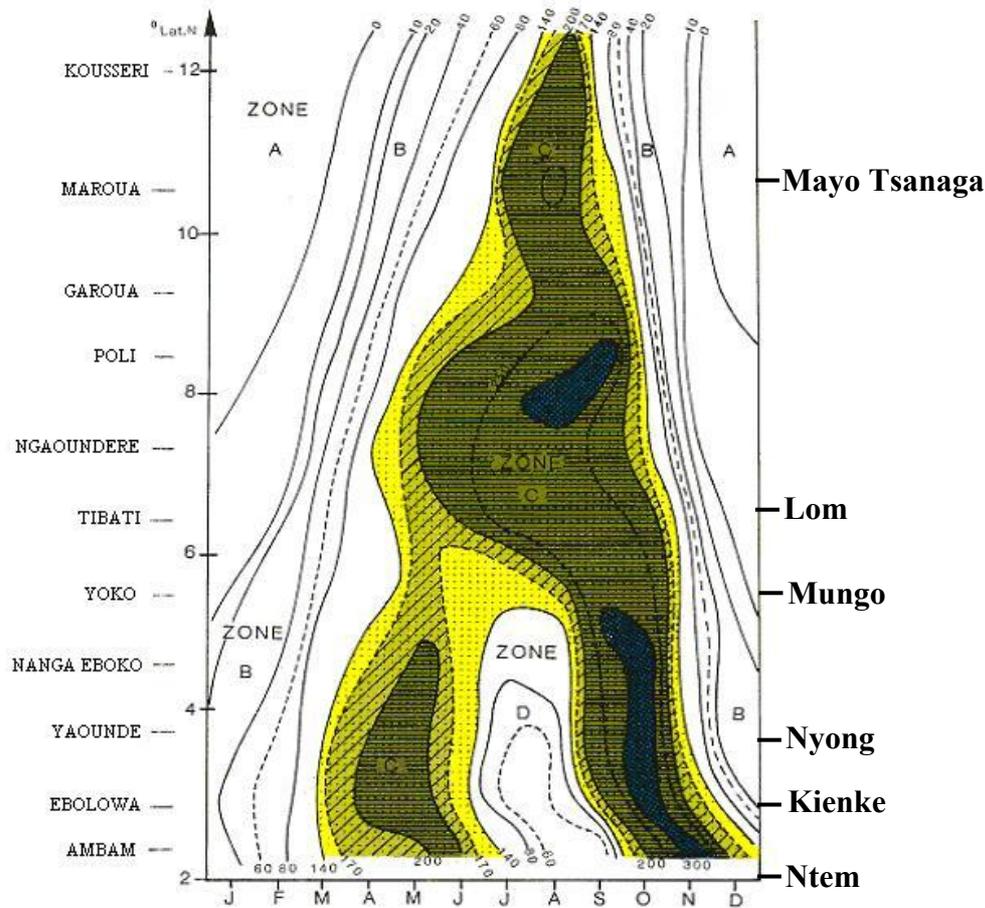


Figure 3.4 : Variations latitudinales des précipitations mensuelles moyennes au Cameroun (Olivry, 1986). Les positions latitudinales de l'exutoire des bassins versants étudiés sont indiquées sur l'axe droit.

Au cours de sa descente, la ZCIT passe pour la seconde fois dans l'année sur les parties sud du pays et engendre la seconde saison des pluies de septembre à novembre. Le reste de l'année (décembre à février), le centre et le nord du pays sont en permanence couverts par la zone A sans pluies, alors que les parties sud du pays reçoivent des légères pluies. Ces pluies

sont dues à des remontées sporadiques de la zone B qui se situe près de la frontière sud et à la thermo - convection dues aux formations forestières.

Il découle de ce qui précède une zonalité latitudinale des régimes pluviométriques sur le territoire camerounais. Les régions au nord de 5°30' connaissent une seule saison des pluies généralement centrées en août et de durée décroissante vers le nord, définissant le climat tropical. Les régions au sud de 5°30' connaissent un climat équatorial à deux saisons des pluies (mars à juin et septembre à novembre), correspondant aux deux passages de la ZCIT, et deux saisons sèches (juillet à août et décembre à février).

Le découpage climatique du Cameroun peut être décrit en grands traits suivant des bandes latitudinales à travers une classification à l'échelle régionale basée sur le régime des pluies (L'Hôte *et al.*, 1995), qui reprend celles de Rodier (1964) et de Dubreuil *et al.* (1975) (figure 3.5).

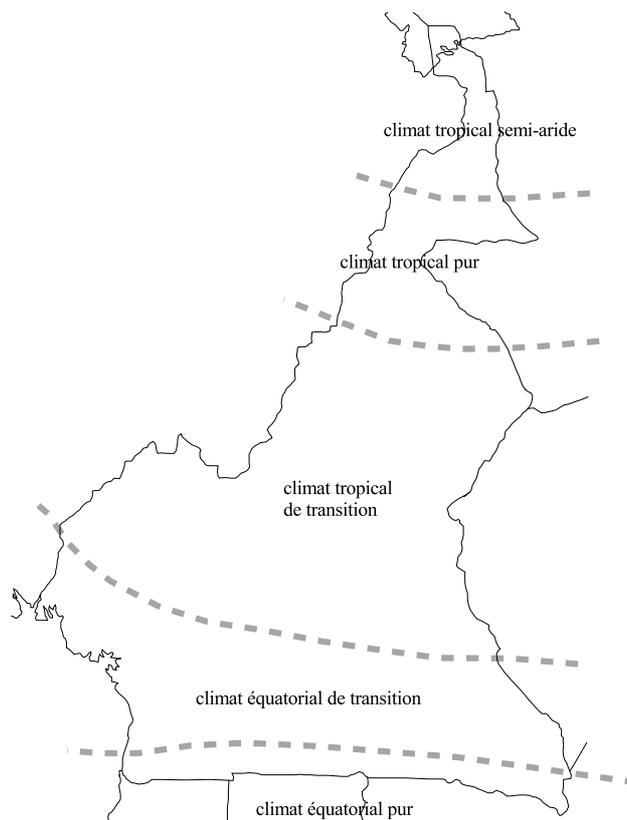


Figure 3.5 : Les grands traits de l'organisation zonale des climats sur le Cameroun, extrait de L'Hôte *et al.* (1995).

2.2. Les unités climatiques liées aux particularités orographiques

Le relief du Cameroun, marqué principalement par la mégastucture tectonique plutono-volcanique centrale de l'Adamaoua, et son exposition aux flux de mousson atlantique associent à la zonalité du climat décrite précédemment, des nuances maritimes et/ou montagnardes.

Le découpage climatique du pays est alors beaucoup plus complexe dans le détail. Une analyse descriptive des unités climatiques du Cameroun à des échelles réduites, à l'échelle du bassin versant par exemple, relèverait du domaine plus particulier de la climatologie, dans la mesure où des versants opposés d'une montagne, les gouttières des cours d'eau au pied des montagnes, les vastes plaines et marais formeraient autant d'entités climatiques qu'il en existe sur le territoire camerounais.

Des auteurs, intéressés au climat de la partie Sud-Ouest du Cameroun, ont remarqué la double influence de la mousson et du relief. Ce qui a supprimé le fléchissement estival des précipitations qui, à ces latitudes devrait exister en juillet et août. Les diverses classifications privilégient l'influence équatoriale ou tropicale selon les tendances. Génieux (1958) lui attribue le régime tropical de montagne. En admettant que l'absence de la « petite saison sèche » soit une perturbation du schéma zonal, Dogmo (1981) donne à ce climat l'attribut de pseudo-tropical. Frécaut (1982) préfère l'appellation de « climat tropical fortement humide de type côtier ». Aubreville (1959) le considère plutôt comme un climat équatorial guinéen forestier. Le terme tropical adopté par Génieux, Dogmo et Frécaut nous semble plus approprié pour le climat de cette région, en raison de l'unicité de la saison des pluies.

Olivry (1986), s'inspirant des travaux de Génieux (1958), reprend les subdivisions proposées par des géographes, sur la base de la répartition saisonnière des précipitations et de leur importance et propose le schéma de la figure 3.6, qui définit sur le territoire camerounais huit principales unités climatiques :

- **le climat équatorial** : il couvre le centre-sud du pays. Les précipitations sont réparties en quatre saisons bien distinctes. C'est le climat type qui règne sur le bassin versant du Ntem. Le bassin versant du Nyong en est un autre représentant, mais se trouve à la limite nord de ce domaine ;

- **le climat équatorial type côtier sud** : il intéresse la partie sud de la zone côtière camerounaise. Ici, les quatre saisons, marquant le domaine équatorial, y sont encore nettement définies. Mais les hauteurs de pluies plus élevées en font un type particulier. Il concerne le bassin versant de la Kienké ;

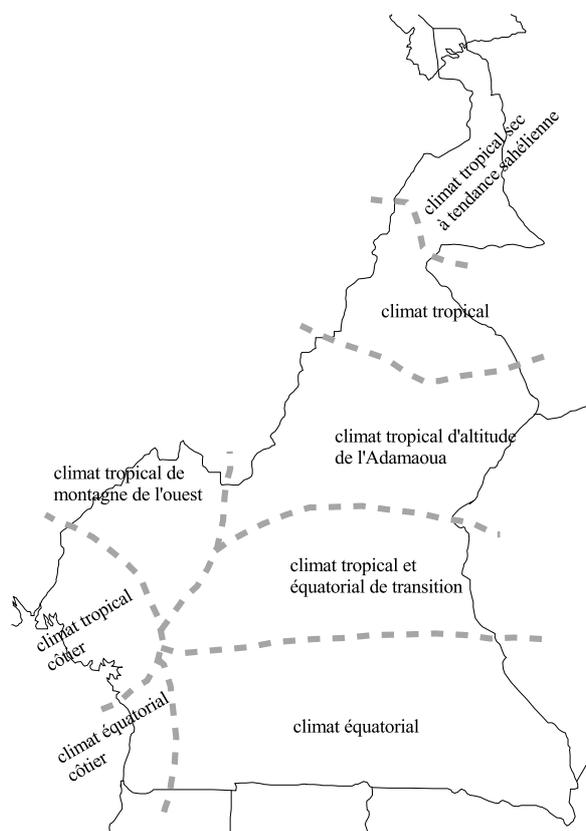


Figure 3.6 : Les régions climatiques au Cameroun (in Olivry (1986), modifié)

- **le climat tropical type côtier** : ce climat intéresse la partie nord de la zone côtière camerounaise. C'est dans ce domaine que se situe le paroxysme pluviométrique africain de Debundscha (9 740 mm en moyenne annuelle). La répartition saisonnière des pluies y est pourtant monomodale, avec une seule saison des pluies et une seule saison sèche. Mais les précipitations y sont très abondantes. En fait, pendant que tout le sud du Cameroun est couvert par la zone D en juillet et août, on note, dans la région sud-ouest (de Douala à la frontière nigériane), une inflexion vers le sud du FIT, bloqué dans son mouvement vers les latitudes nord par les hautes terres, qui laisse la région encore sous influence de la zone C ;
- **le climat tropical et équatorial de transition** : la remontée de la zone D provoque une chute des précipitations ou tout au moins un palier en juillet/août, qui n'est pas une véritable saison sèche ;

- **le climat tropical de montagnes de l'ouest** : semblable au climat côtier nord, les précipitations sont beaucoup plus faibles et les températures nettement plus basses qu'à l'intérieur du pays ;
- **le climat tropical d'altitude de l'Adamaoua** : les précipitations sont encore abondantes. La saison sèche est plus longue (4 mois) ;
- **le climat tropical** : ce domaine intéresse le nord du pays, de la falaise de l'Adamaoua jusqu'au nord de Guider. La saison des pluies dure 5 à 7 mois. Les températures y sont élevées et marquent une transition brutale avec l'Adamaoua. La cuvette de la Bénoué s'individualise en une bande, au pied de la falaise, au sein de laquelle les températures sont beaucoup plus fraîches ;
- **le climat tropical sec à tendance sahélienne** : de Maroua jusqu'au bord du lac Tchad, le caractère tropical devient de plus en plus sec et tend vers le sahélien, avec un gradient pluviométrique méridien plus homogène. Dans la partie ouest, les températures sont plus basses et les précipitations plus élevées, dues aux hautes terres (monts Mandara).

Ces subdivisions, décrites bien avant les années 1980, sont susceptibles de subir quelques modifications, surtout dans les régions nord, du fait de la baisse des précipitations, qui a entraîné notamment, une migration des isohyètes vers le sud. Il n'est donc pas exclu qu'il soit apparu au nord de Maroua un climat typiquement sahélien.

3. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET LES REGIMES HYDROLOGIQUES

L'orientation des principaux axes du réseau hydrographique en territoire camerounais est ordonnée par l'orographie (figures 3.1 et 3.7). Ainsi, on peut distinguer deux directions préférentielles des cours d'eau qu'il est possible de rattacher aux orientations tectoniques. L'une SSW-NNE concorde avec la « ligne du Cameroun » et l'autre, NW-SE, dominée par la partie sud de la Bénoué et les affluents du Congo.

Au nord, les rivières issues principalement du versant septentrional de l'Adamaoua et des monts Mandara convergent vers deux principaux drains :

- la Bénoué, formée de ses trois principaux affluents (Bénoué supérieure, Mayo Kébi et Faro), est orientée vers le Nigeria dans le fossé qui prend son nom ;

- le Logone formé de ses principaux bras la Vina et la Mbéré au Cameroun et la Pendé au Tchad, draine la limite nord-est de l'Adamaoua. Il traverse l'ancienne zone de capture dans la localité de Bongor et entre dans la plaine tchadienne où les faibles pentes lui confèrent un réseau caractéristique du Sahel jusqu'à sa confluence avec le Chari à Kousséri.

Sur les flancs nord-est et est des monts Mandara, descendent des cours d'eau torrentiels (les Mayos : cours d'eau temporaires en peulh) qui disparaissent par la suite dans les dunes de sable et les vases de la plaine de la cuvette tchadienne. L'un de ces Mayos, le mieux étudié, est le Mayo Tsanaga, choisi dans cette étude comme représentatif de la zone nord Cameroun.

Dans la partie sud, les versants du plateau sont drainés principalement par le Lom et le Djerem, formant la Sanaga supérieure, et le Mbam, recevant le Noun issu des hauts plateaux de l'ouest. Les axes d'écoulement suivent d'abord approximativement la direction nord-sud sur les hauts sommets. Cette direction s'infléchit à la rencontre de la faille de la Sanaga. Cet accident impose au cours principal de la rivière la direction N30°E, parallèlement à celle de la ligne du Cameroun, qu'elle suit jusqu'à son embouchure dans la plaine littorale. Le relief du centre du plateau sud camerounais définit une ligne de partage des eaux qui oriente à l'Est la Kadei et l'ensemble Boumba-Dja vers le bassin du Congo. Les rivières de la côte sud, dont les principales sont le Nyong et le Ntem coulent vers l'océan. A cet ensemble appartient aussi la Kienké.

Dans la partie sud-ouest du pays, la chaîne de sommets formant la dorsale camerounaise oriente vers le Nigeria la Cross River et vers la côte nord, le Wouri et le Mungo.

1535 : Superficie du bassin versant en km²

1966-1988 : Période de référence

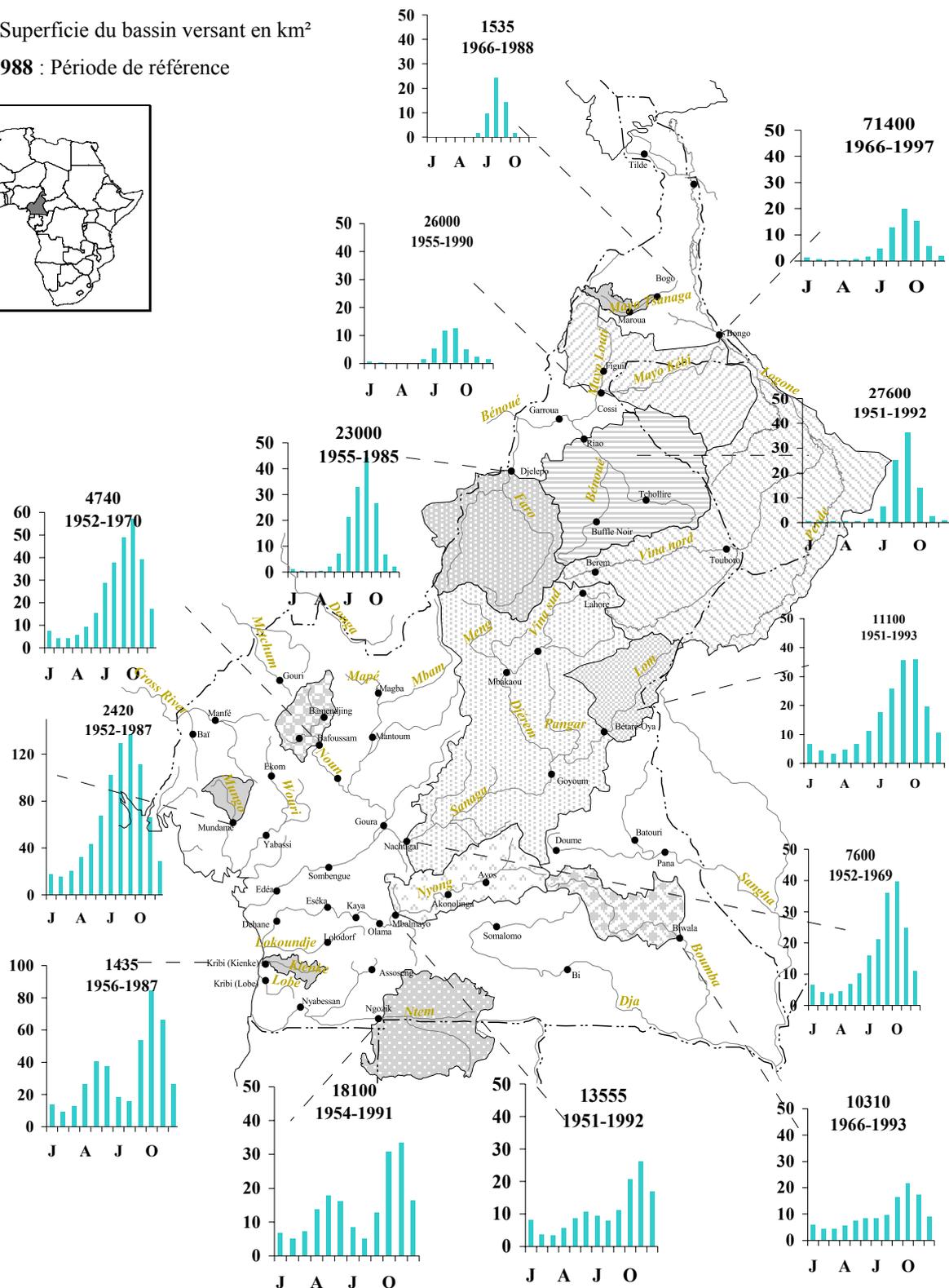
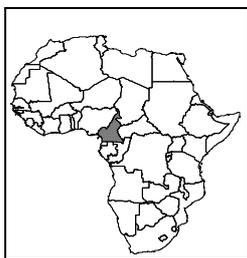


Figure 3.7 : Régimes hydrologiques naturels du Cameroun : production spécifique mensuelle en l.km⁻².s⁻¹.

Dire que les régimes hydrologiques sont calqués sur la répartition des précipitations relèverait de l'évidence. Les caractéristiques discordantes inhérentes aux bassins versants (végétation, substratum, pentes etc.) interviennent aussi pour définir l'importance et la répartition des écoulements. Plusieurs monographies ont été réalisées sur les fleuves et rivières du Cameroun (Dubreuil *et al.*, 1975 ; Olivry, 1986), qui détaillent les différents régimes.

Les histogrammes montrant la répartition mensuelle de l'écoulement annuel, dans les différentes régions climatiques sont présentés sur la figure 3.7. Le schéma latitudinal indique, dans les régions tropicales pures, une seule période de hautes eaux, plus longue vers le sud, correspondant à l'été boréal, et, aux basses latitudes, le domaine équatorial caractérisé par deux périodes de hautes eaux. La région côtière se singularise par des écoulements relativement abondants toute l'année, montrant un fléchissement en été austral. En analysant certains paramètres du régime (lame écoulée, module spécifique, coefficient d'écoulement et irrégularité interannuelle), Olivry montre que ce schéma zonal le plus souvent admis est plus complexe (figure 3.8). Le Cameroun présente ainsi deux zones principales distinctes :

- l'une, au nord de l'Adamaoua, caractérisée par de fortes variations en latitude des paramètres avec, diminution des écoulements suivant les précipitations et une forte augmentation de l'irrégularité interannuelle ;
- l'autre, plus complexe, correspondant à l'Adamaoua et à tout le Cameroun humide. On y sépare nettement les régions situées entre les parallèles 5° et 7°30' N, aux écoulements relativement abondants et à une irrégularité interannuelle faible, des régions équatoriales aux écoulements plus faibles et à une irrégularité interannuelle plus forte, en dépit des précipitations plus abondantes. La région côtière et d'altitude se distingue par les écoulements les plus abondants du pays et directement liés à l'abondance des précipitations.

Les cours d'eau dont les bassins couvrent plusieurs zones climatiques (Logone et Sanaga en particulier) présentent plusieurs régimes suivant les unités climatiques traversées.

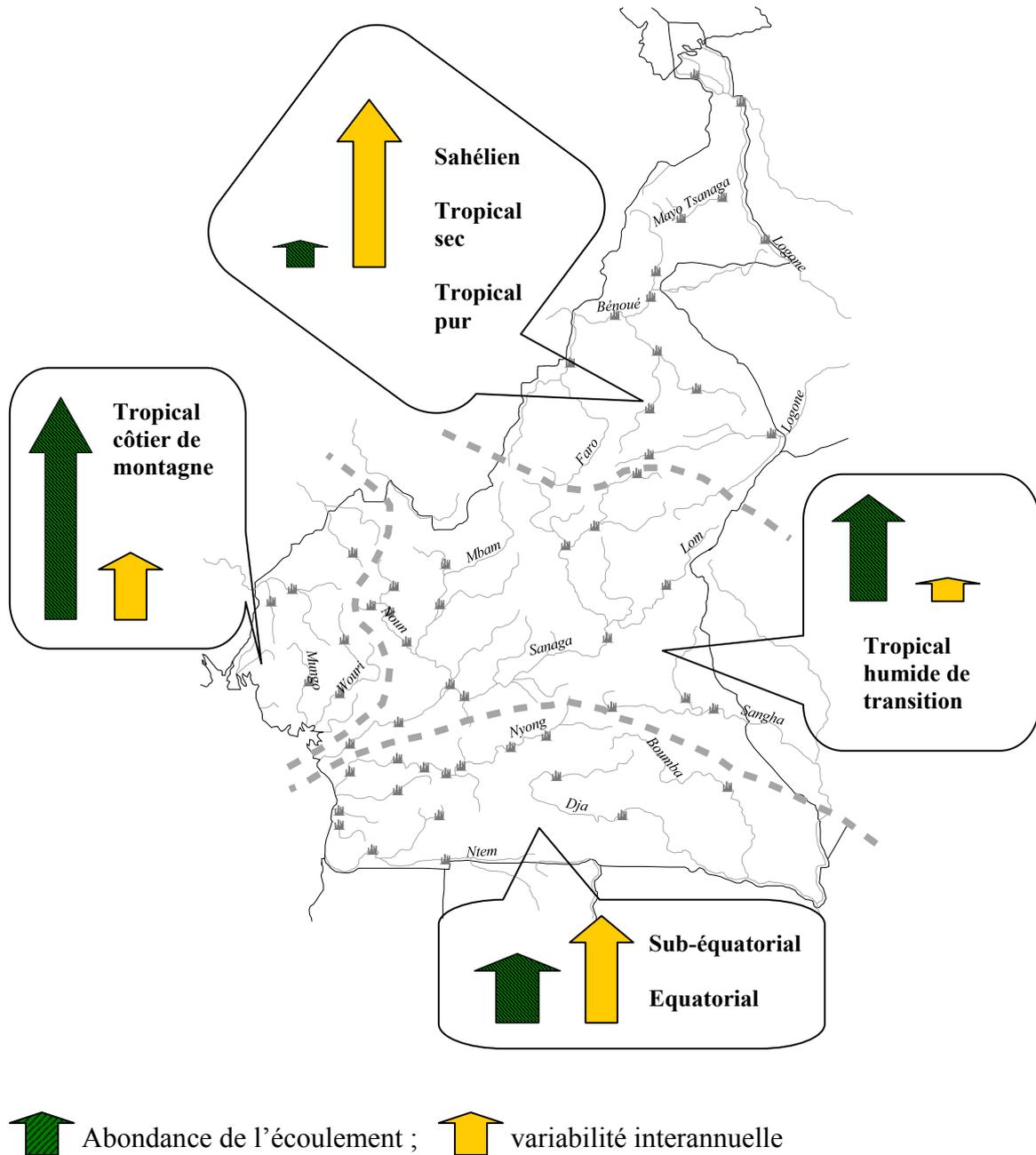


Figure 3.8 : Régimes des écoulements au Cameroun ; inspiré des subdivisions de Olivry (1986).

Il n'est pas exclu que certains de ces régimes soient sensiblement modifiés depuis le début de la récente sécheresse. En effet, la diminution des débits d'étiage est particulièrement prononcée dans la partie nord (Liénu *et al.*, 1999a) en accord avec le reste de l'Afrique tropicale (Olivry, 1996). Ce phénomène s'accompagne de l'allongement de la saison sèche. Cette situation peut, si elle perdure, entraîner une sahélianisation des régimes tropicaux plus humides, c'est-à-dire une tendance à un passage des régimes tropicaux purs vers des régimes tropicaux secs, puis sahéliens, avec des interruptions fréquentes des écoulements pour des

rivières par le passé pérennes. Les régimes équatoriaux ont aussi subi d'importantes modifications, comme nous le montrerons dans le sixième chapitre de ce mémoire.

4. QUELQUES RESULTATS SUR LA VARIABILITE DES PLUIES ET DES ECOULEMENTS

Les données hydropluviométriques du Cameroun ont été prises en compte dans des études à l'échelle régionale et/ou sous-régionale dont nous avons fait une synthèse aux paragraphes précédents. Les résultats du programme ICCARE (Identification et Caractérisation des variabilités climatiques en Afrique occidentale et Centrale) (Servat, 1994 ; Servat *et al.*, 1998) y mettent en évidence une hétérogénéité spatiale de la variabilité des écoulements. En fait, parmi la centaine de bassins versants étudiés dans 16 pays d'Afrique occidentale et centrale, les séries chronologiques de modules annuels de 24 bassins se sont révélés sans rupture significative, dont plus de la moitié ont leur bassin sur le seul territoire camerounais. Un seul bassin, la Lokoundjé à Lolodorf, également au Cameroun, a connu une rupture avec augmentation de module pour la série considérée. Les six bassins sur lesquels est focalisée notre étude ont aussi été pris en compte dans ce programme ICCARE. La figure 3.9 présente les résultats obtenus pour les chroniques alors étudiées, 1951-1980 pour la plupart.

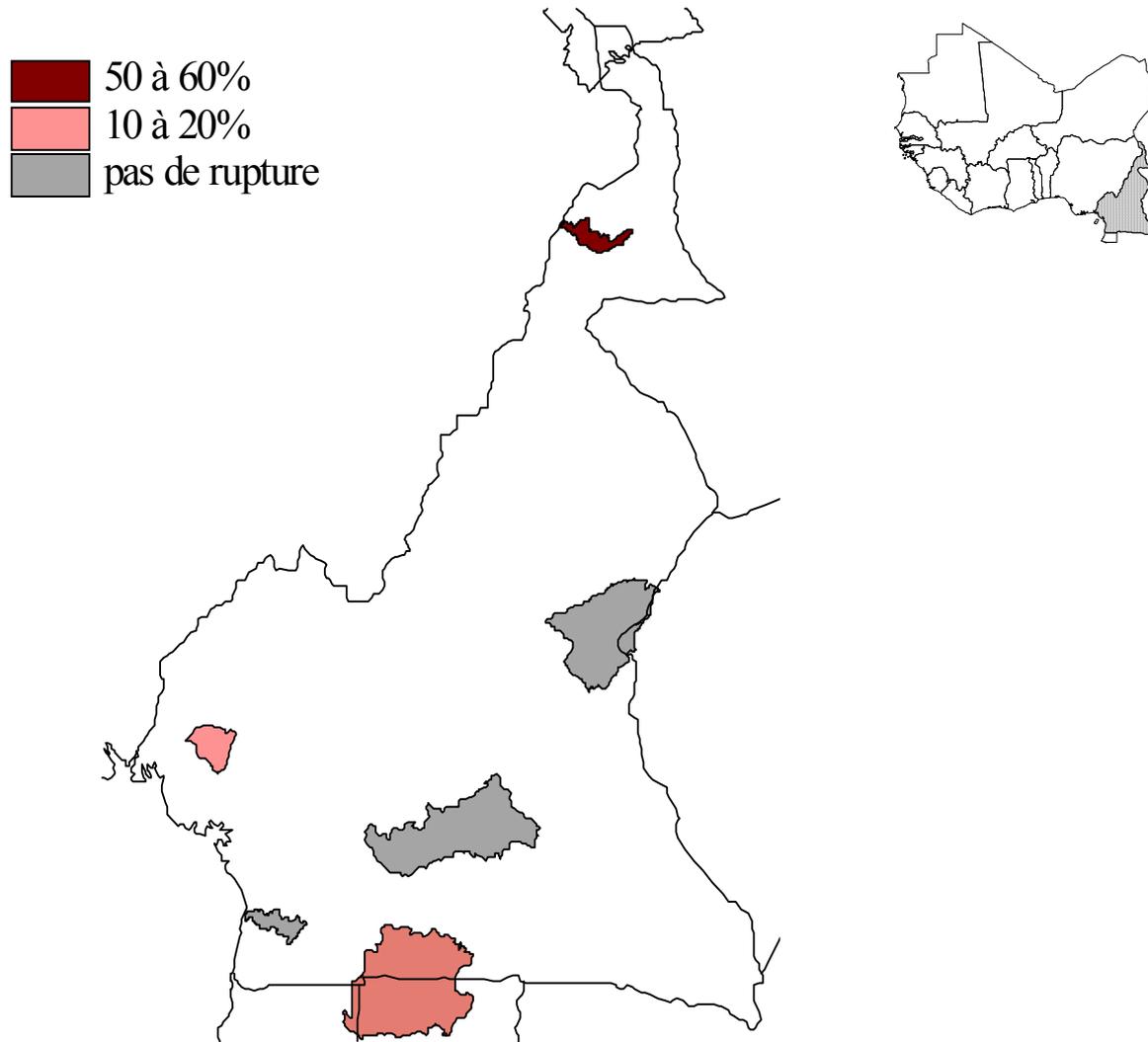


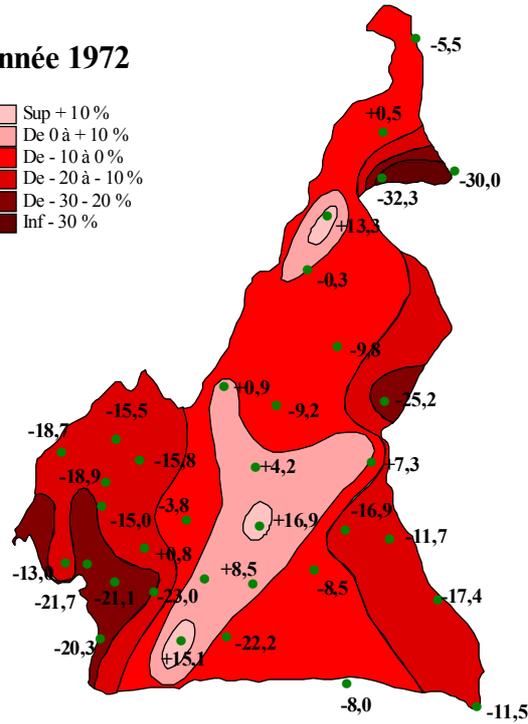
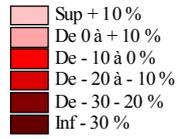
Figure 3.9 : Déficit observé sur les modules annuels des Bassins étudiés pour la période 1951-1980 (d'après les résultats de Paturel *et al.*, 1998).

D'autres études, s'intéressant plus particulièrement au Cameroun, font ressortir des particularités liées aux caractéristiques oro - climatologiques de ce pays.

Olivry (1974), en analysant les données d'un grand nombre de stations hydropluviométriques, dresse un bilan du premier paroxysme (années 1972-1973) de la sécheresse actuelle. La figure 3.10 présente, pour les principales stations, les écarts de cette phase par rapport à la normale pluviométrique. Elle met en évidence une complexité spatiale du phénomène, découlant des interactions multiformes entre nombreux facteurs tels que la latitude, la continentalité, les conflits des masses d'air, le relief, l'orientation des pentes etc.



Année 1972



Année 1973

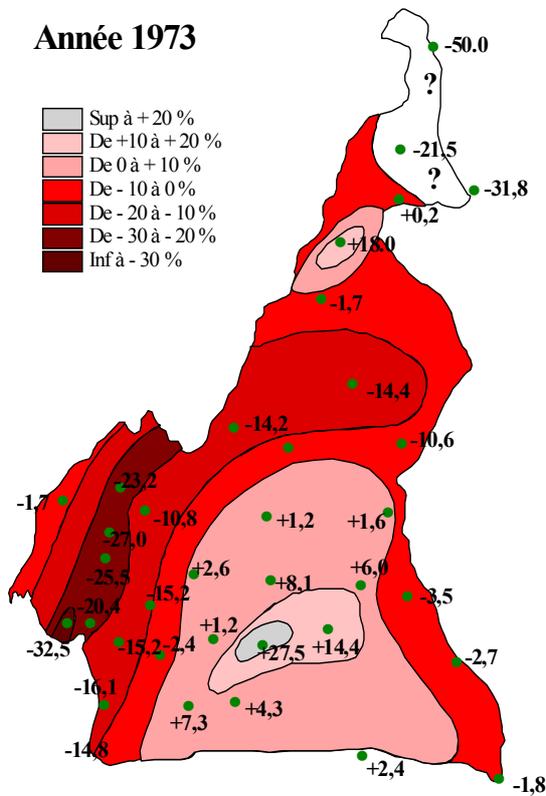
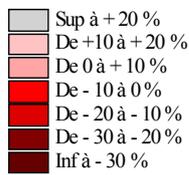


Figure 3.10 : Ecart de la pluviométrie des années 1972 et 1973 par rapport à la normale (Olivry,1974 ; modifiée).

On note au centre-sud du pays un domaine de pluviométrie excédentaire. Une poche subsiste également dans la localité de Garoua, au nord. Les déficits les plus importants sont situés à l'Est et à l'Ouest, notamment dans le littoral atlantique et dans la zone montagneuse, où les valeurs relatives atteignent celles observées dans les zones soudano-sahéliennes.

Les répercussions de la baisse des pluies sur les écoulements sont aussi semblables à ce qu'on relève, dans l'ensemble en zone sahélienne, notamment lors des phases aiguës de la sécheresse. Les déficits d'écoulements sont plus importants.

Tableau 3.1 : Déficit hydrologiques de certains cours d'eau camerounais au cours de la première phase de sécheresse (1972-1973) (Olivry, 1974).

	Ecart à la normale en %	
	1972-1973	1973-1974
Dja à Somalomo	-30,8	-23,5
Nyong à Akonolinga	-24	-4,3
Nyong à Eséka	-14,6	-5,7
Nkam à Mélong	-34,9	-39,1
Noun à Bafoussam	-20,8	-24,5
Mbam à Goura	-28,5	29,3
Lom à Bétaré Oya	-31,2	-31,8
Vina à Lahoré	-27,5	-31,8
Benoué à Garoua	-56,4	-25,8

Nous avons récemment analysé les longues séries hydropluviométriques en définissant trois principaux domaines pluviométriques (Liéno *et al.*, 1999b). Les variations des régimes hydrologiques (figure 3.11) s'inscrivent dans l'évolution globale du phénomène dans la sous-région. La décennie 1950 est globalement moyenne en zone équatoriale, alors qu'elle est humide en zone sahélienne. Depuis le début de la décennie 1980, les écoulements n'ont plus atteint la moyenne de la série en zone soudano-sahélienne sauf en 1988. La zone équatoriale a été aussi concernée. Mais le phénomène ne prend pas un caractère continu. Aussi, après la séquence sèche, certaines années ont enregistré d'assez bonnes hydraulicités. Dans la zone de

transition (Adamaoua), les écoulements suivent une évolution pseudo-cyclique depuis le début des observations avec une tendance continue à la baisse.

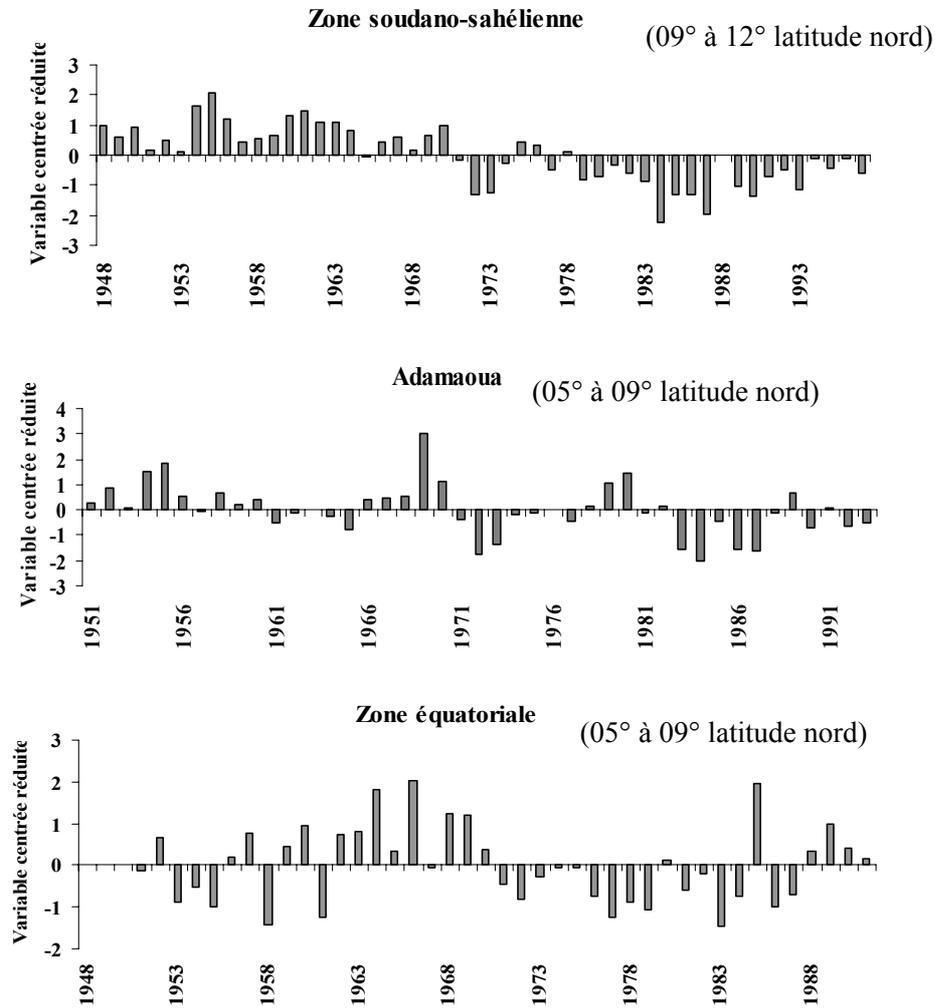


Figure 3.11 : Evolution des écoulements dans les trois principales zones climatiques du Cameroun (Liénu *et al.*, 1999b).

CHAPITRE 4 :

**CINQUANTE ANNEES DE MESURES DE MATIERES
SOLIDES EN SUSPENSION AU CAMEROUN :
REVUE ET SYNTHESE DES TRAVAUX**

INTRODUCTION

L'une des principales conséquences de l'érosion continentale est la perte de terres cultivables. De grandes étendues de terres sont, au fil des années, transformées en cuirasses latéritiques incultivables. Dans certaines régions, le comblement des grands aménagements par les matériaux issus de l'érosion réduit considérablement leur durée de vie. Ces phénomènes ont de graves conséquences sur les économies et sur l'environnement en général. La dégradation des sols est un processus progressif au fil des années. Par contre, le constat n'est, le plus souvent, fait qu'à des étapes très avancées où la restauration nécessite de lourds investissements pendant un temps assez long. Pourtant, des mesures continues de la charge des cours d'eau permettraient de caractériser ces mobilisations de matières et de lutter contre l'érosion au moment où des procédés moins coûteux et faciles à mettre en œuvre sont applicables. Plusieurs auteurs (pédologues, géographes et hydrologues) se sont intéressés à l'étude de l'érosion à différentes échelles, dans les différents écosystèmes au Cameroun. Cette synthèse se limitera aux volets relatifs aux matières en suspension dans les rivières et fleuves camerounais.

Les premières mesures des transports solides au Cameroun ont été réalisées dans la partie nord en 1955/1956. Celles-ci avaient permis de dégager quelques tendances qualitatives du phénomène d'érosion. Vers la fin des années 1960, les hydrologues de l'ORSTOM-Yaoundé, notamment Cadier, Lefèvre et Nouvelot, ont mis au point une méthodologie appropriée à l'étude des transports solides en suspension dans le contexte climatique camerounais. Quelques campagnes de mesures ont alors été effectuées, principalement sur les bassins versants de la Sanaga, du Mbam (domaine tropical de transition) et du Mayo Tsanaga (domaine tropical pur). Les résultats ont fait l'objet de plusieurs publications (Nouvelot, 1969 ; 1972a, 1972b, 1972c ; Olivry *et al.*, 1974 ; Olivry et Hoorelbecke, 1975 ; Olivry, 1976, 1977, 1978). Les mesures qui ont suivi ont été réalisées à l'occasion de projets d'aménagement tels que le barrage hydroélectrique de Menve'ele sur le Ntem (Boum *et al.*, 1983), l'adduction d'eau de 25 centres urbains (Boum *et al.*, 1983), le barrage hydroélectrique de Gulli sur la Mentchum (Tanyileke, 1988), le projet grand Yaéré (Naah, 1990) et la retenue d'eau de Lom-Pangar sur le Lom (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998b). D'autres mesures ont pu être réalisées, notamment en zone méridionale, dans le cadre de programmes régionaux tels que PEGI (Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale) (Sigha-Nkamdjou, 1994),

DYLAT (Dynamique des couvertures LATéritiques) (Ndam Ngoupayou, 1997), CAMPUS (Coopération Africaine et Malgache pour la Promotion Universitaire et Scientifique) et actuellement ORE (Observatoire Régionale de l'Environnement).

Ce chapitre présente l'état actuel des connaissances sur les transports de matières en suspension au Cameroun. Les précédentes synthèses (Nouvelot, 1972a ; Olivry, 1976 et 1977) relatives aux régimes des transports solides en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun sont exposées et complétées. Par une approche globale, on tente d'appréhender l'intensité de l'érosion mécanique et d'en déterminer les principaux facteurs conditionnels à l'échelle des principales unités climatiques du pays.

1. LES CARACTERISTIQUES DES BASSINS ETUDIES ET LES UNITES CLIMATIQUES CONCERNEES

Les mesures des matières en suspension ont été effectuées sur un ensemble de bassins versants camerounais depuis les années 1955. Certaines mesures se sont limitées à des prélèvements ponctuels et limités dans le temps. Nous n'avons retenu pour cette synthèse que les stations ayant fait l'objet d'au moins une année d'observation de matières en suspension, durée qui nous semble nécessaire pour estimer correctement le flux à l'échelle annuelle. Le réseau des stations est relativement hétérogène sur le territoire camerounais (figure 4.1). Dans le tableau 4.1 figurent les caractéristiques physiques des bassins versants concernés. Les superficies des bassins varient de 0,58 km² (bassin expérimental de Mengong à Nsimi) à 85 000 km² (bassin versant du Logone à Kousseri).

Les analyses spatiales d'ores et déjà réalisées (Nouvelot, 1972a ; Olivry, 1976 et 1977) se sont appuyées sur les données disponibles avant 1975 et se sont limitées à la zone tropicale. Plusieurs autres travaux ont été réalisés par la suite, notamment dans la partie méridionale, mais aussi concernant des bassins septentrionaux (figure 4.1). Ces stations sont classées en deux ensembles : un premier concerne celles pour lesquelles les mesures existaient avant 1975, qui ont servi de base aux derniers travaux de synthèse sur les matières en suspension au Cameroun (Nouvelot, 1972a ; Olivry, 1976 et 1977) et, le deuxième ensemble concerne les stations pour lesquelles des mesures ont été réalisées ultérieurement. Ces récents travaux

justifient en partie notre synthèse qui reprend et complète les précédentes. Dans le tableau 4.1 figurent les caractéristiques physiques des bassins versants concernés.

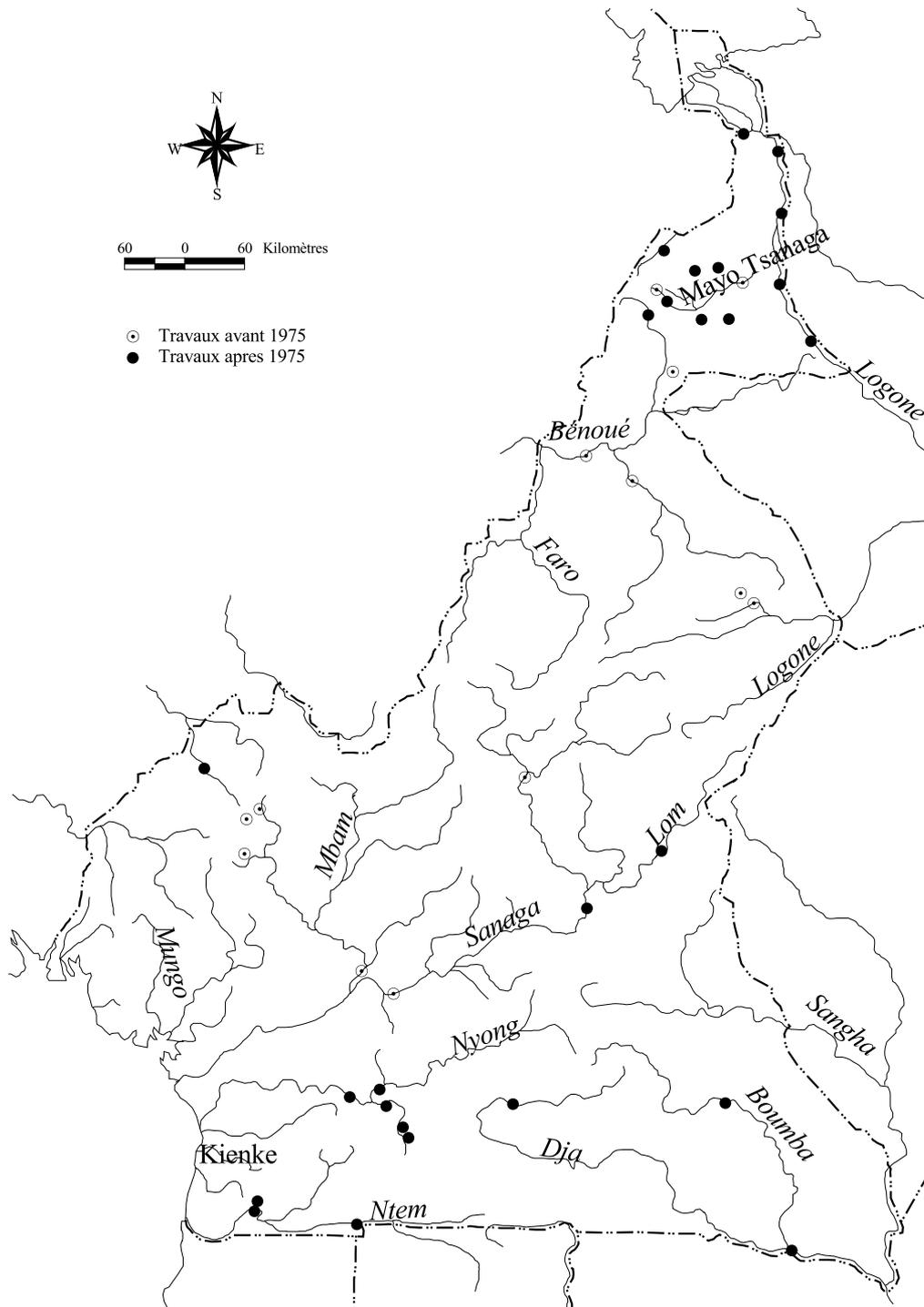


Figure 4.1 : Stations ayant fait l'objet d'études de matières solides en suspension au Cameroun

Tableau 4.1 : Mesures des matières solides en suspension au Cameroun : caractéristiques physiques de quelques bassins étudiés

Rivière	Station	Super. (km ²)	L (km)	l (km)	Kc	Ip	Ig (%)	H (m)
Ntem	Nyabessan	26350	210	125	1,16			792
	Ngoazik	18100	161	112	1,14		0,48	868
Ndjo'o	Abem	373						
Ngoko	Mouloundou	67075	678	99	1,68	0,0222	0,34	675
Dja	Somalomo	5473	126	43	1,32		1,4	682
Boumba	Biwala	10310	216	48	1,38		1,9	613
Nyong	Olama	18510	233	77	1,29	0,0263	0,37	
	Mbalmayo	13555	224	61	1,37	0,0255	0,41	682
So'o	Pont So'o	3070	75	40	1,17	0,0478	2,09	696
Mesam	Awout	206	28	7	1,39	0,0484	1,98	673
Mengong	Nsimi	0,58	1,18	0,30	1,1	0,218	28	685
Sanaga	Nachtigal	77000	555		1,42	0,042	1,06	835
	Goyoum	50500	370		1,27	0,049	1,29	925
Lom	Bétaré Oya	11000	128	86,7	1,15	0,061	9,48	336
Mifi-sud	Bamougoum	306	26,1		1,22	0,147	19	1537
Mbam	Goura	42300	250		1,15	0,081	4,37	980
Monkié	S1	25	10,1	2,4	1,46	0,268	66	1500
	S2	181	58,4		1,22			
Mayo Beleng	Fosse	0,98						
Metchum	Gouri	2116						
Djerem	Makaou	20200	315		1,50	0,051	1,92	1059
Rao	Foumban	1345						
Risso	S3	33						
Bénoué	Lagdo	30650						
Bénoué	Garoua	64000						
Mayo Oulo	Douva	118	23,2	5	1,46	0,125	12,7	860
Mayo Kereng	Figuil	4						
Logone	Bongor	71400						
	Pouss							
	Kousseri	85000						
Mayo Ngansawé	Limani	1030						
Mayo Mangafé	Dobwol	268						
Mayo Raéo	Petté	435						
Mayo Motorsolo	Fadaré	877						
Mayo Boula	Dargala	1517						
Mayo Tsanaga	Bogo	1535	120	12,8	1,91	0,074	3,91	545
	Douvar	49	12,8	3,9		0,182	25,8	800
	Minglia	575						
El Beid	Meinari							

L : longueur du rectangle équivalent ; l : largeur du rectangle équivalent ; Kc : coefficient de compacité ; Ip : indice de pente de Roche ; Ig : indice de pente globale ; H : hauteur moyenne du bassin versant.

2. LES DONNEES DISPONIBLES

Très tôt après l'installation des stations hydrométriques, les hydrologues de l'ORSTOM, en particulier, ont entrepris les mesures des matières en suspension. Celles-ci concernent aussi bien les parcelles et les bassins versants expérimentaux, que les grandes unités hydrographiques. Les mesures ont débuté à des dates différentes et elles ont le plus souvent été interrompues à la fin des programmes menés ou par suite de la mise en eau, en amont, de grandes retenues d'eau.

Certaines mesures se sont limitées à quelques prélèvements ponctuels, généralement un par saison, qui ne permettent pas un bilan annuel des transports. D'autres échantillons ont été collectés sans débits correspondants. Néanmoins, plusieurs bassins ont fait l'objet d'un suivi régulier au cours de périodes d'observations plus ou moins longues. Mais, les études n'ayant pas toujours eu les mêmes objectifs, les protocoles d'échantillonnage et les méthodologies de calcul de flux sont parfois différents.

Toutefois, ces données réunies constituent une importante masse d'informations nécessaires pour diverses analyses à l'échelle du Cameroun. Les plus longues chroniques atteignent cinq années d'observations plus ou moins continues (Mbam à Goura, Mayo Tsanaga à Bogo). Un réseau de stations dans le bassin du Nyong est suivi depuis 1994 dans le cadre des programmes successifs DYLAT, CAMPUS et actuellement ORE. Enfin, nous avons dans le cadre de cette thèse repris des mesures de matières en suspension et des débits sur quatre bassins anciennement suivis (Mayo Tsanaga, Lom, Nyong et Ntem), et deux bassins forestiers qui n'avaient jamais fait l'objet, jusque là, de mesures en matières solides en suspension (Kienké et Mungo). Le tableau 4.2 présente les bassins étudiés, les caractéristiques des observations et les auteurs.

Tableau 4.2 : Mesures des matières solides en suspension au Cameroun : Bassins versants, périodes des observations et auteurs

Nom du fleuve	Station	Années d'observation	Fréquence des prélèvements	Auteur	unité climatique
Ntem	Nyabessan	1981-1883	journalier	Boum <i>et al.</i> (1983)	climat équatorial
	Ngoazick*	1981-1883	Journalier	Boum <i>et al.</i> (1983)	
Ndjo'o	Abem	1982-1883	journalier	Boum <i>et al.</i> (1983)	
Ngoko	Mouloundou	1989-1992	journalier	Sigha-Nkamdjou (1994)	
Dja	Somalomo	1989-1992		Sigha-Nkamdjou (1994)	
Bomba	Biwala	1989-1992		Sigha-Nkamdjou (1994)	
Nyong	Olama	Depuis 1994	Bi-mensuel	Etude en cours	
	Mbalmayo*	1994-1996	Bi-mensuel	Ndam Ngoupayou (1997)	
So'o	Pont So'o	Depuis 1998	Bi-mensuel	Etude en cours	
Mesam	Awout	Depuis 1998	Bi-mensuel	Etude en cours	
Mengong	Nsimi	1994-1996	Bi-mensuel	Ndam Ngoupayou (1997)	
Kienké	Kribi	Depuis 2002	Bi-hebdomadaire	Cette étude	
Mungo	Mundame	Depuis 2002	Bi-hebdomadaire	Cette étude	
Sanaga	Nachtigal	1967-1968	hebdomadaire	Nouvelot (1969)	
		1995-1996	mensuels	Ndam Ngoupayou (1997)	
	Goyoum	1997-1998	saisonnier	Sigha-Nkamdjou <i>et al.</i> (1998b)	
Lom	Bétaré Oya *	1997-1998	saisonnier	Sigha-Nkamdjou <i>et al.</i> (1998b)	
Mbam	Goura	1966-1967	hebdomadaire	Nouvelot (1969)	
		1970-1974	journalier	Olivry <i>et al.</i> (1974)	
		1995-1996	mensuels	Ndam Ngoupayou (1997)	
Monkié	S1	1968-1971		Nouvelot <i>et al.</i> (1971)	climat tropical de montagne de l'ouest
	S2	1969-1971		Nouvelot <i>et al.</i> (1971)	
Mayo Beleng	Fosse	1959	journalier	Guiscafre (1959)	climat tropical d'altitude
Methum	Gouri	1986-1987	journalier	Tanyileke (1988)	
Djerem	Makaou	1967		Nouvelot (1969)	
Rao	Foumban	1967		Nouvelot (1969)	
Risso	S3 ²	1967	journalier	Nouvelot (1969)	climat tropical
Bénoué	Lagdo	1971		Nouvelot (1969)	
Bénoué	Garoua	1955		Nouvelot (1969)	climat tropical
Mayo Kereng	Figuil	1957		Pelleray (1957)	
Mayo Oulo	Goloza	1981-1983	journalier	Naah (1984)	climat tropical sec à tendance sahélienne
Logone	Bongor	1970-1974		Gac (1980)	
	Pouss	1985		Naah (1990)	
	Kousseri	1970-1974		Gac (1980)	
Mayo Ngansawé	Limani	1985-1986	journalier	Naah (1990)	
Mayo Mangafé	Dobwol	1985-1986	journalier	Naah (1990)	
Mayo Raéo	Petté	1985-1986	journalier	Naah (1990)	
Mayo Motorsolo	Fadaré	1985-1986	journalier	Naah (1990)	
Mayo Boula	Dargala	1985-1986	journalier	Naah (1990)	
Mayo Tsanaga	Bogo *	1968-1969	journalier	Nouvelot (1969)	
		1973	journalier	Olivry <i>et al.</i> (1974)	
		1985-1986	journalier	Naah (1990)	
	Mokolo	1975	journalier	Olivry et Hoorelbecke (1975)	
	Minglia	1977	journalier	Naah (1978)	
El Beid	Tilde	1985-1986	journalier	Naah (1990)	

* Stations reprises dans cette étude

Les données de base qui ont été utilisées dans ce chapitre concernent les mesures des matières solides en suspension réalisées sur le territoire camerounais depuis le début des observations (1955). Ces données étaient restées très disparates et ne permettaient pas une approche spatiale du phénomène de transport de matières. A l'instar des banques de données hydroclimatologiques, la mise en place d'une base de données s'est avérée nécessaire. Nous avons commencé par établir une liste d'inventaire des bassins étudiés. Par la suite, la collecte des informations de base a parfois nécessité de contacter certains auteurs des travaux^a. Toutes les informations assez exhaustives sur les transports de matières en suspension au Cameroun sont rassemblées, organisées et gérées dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), que nous avons couplé à un Système d'Information Géographique (SIG).

La structure de la banque de données (tableau 4.3) présente des tables dans lesquelles une étude est un enregistrement constitué de dix champs :

- les quatre premiers champs sont des caractéristiques de la station d'étude (nom, coordonnées géographiques et superficie du bassin versant),
- le champ « Unité hydrographique » fait référence au grand bassin versant auquel le bassin étudié appartient,
- la zone climatique renseigne sur l'unité climatique dans laquelle le bassin est situé,
- un champ précise la ou les périodes exactes de mesures (en année),
- le champ type d'échantillon différencie les prélèvements de surface et ceux par jaugeages complets,
- dans le champ « fréquence » est précisée la périodicité des mesures,
- dans un dernier champ est indiqué le cadre dans lequel l'étude a été effectuée.

Ces données disponibles constituent une quantité importante d'informations, support privilégié pour les perspectives de recherches ultérieures.

Il existe très peu de zones dans le monde tropical où apparaissent, sur une superficie aussi réduite (475 000 km²), une répartition de climats et de régimes hydrologiques aussi riches en contrastes. C'est par la combinaison d'un certain nombre d'éléments tels que son étalement en

^a Jean-Claude Olivry nous a en particulier remis de nombreux documents contenant l'essentiel des données. Qu'il en soit remercié.

latitude, le passage de l'influence océanique à l'influence continentale, son relief très diversifié, que le Cameroun exprime sa diversité climatique.

Tableau 4.3 : Organisation de la base de données en matières solides en suspension (MES) ; table des caractéristiques de quelques stations.

Nom	Latitude	Longitude	superficie	Unité hydrographique	zone climatique	Périodes	Type échantillon	Fréquence	projets
Awou à Batchenga	4,283	11,666	534	Sanaga		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Bamo à Nguélémendouka	4,4	12,933	56	Nyong		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Boumba à Biwala	3,216	14,916	10310	Congo	équatoriale		Prélèvements	Ponctuels	PEGI
Boumba à Mouloundou-Bac	2,05	15,166	27260	Congo	équatoriale		Prélèvements	Ponctuels	PEGI
Choumi à Banock	5,466	10,283	325	Mbam		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Dja à Bi	2,8	13,35	19516	Congo	équatoriale		Prélèvements	Ponctuels	PEGI
Dja à Mouloundou-SOTREF	2,033	15,15	39715	Congo	équatoriale		Prélèvements	Ponctuels	PEGI
Dja à Somalomo	3,383	12,733	5473	Congo	équatoriale		Prélèvements	Ponctuels	PEGI
Djin à Ndjéré	5,433	12,3	86	Mbam		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
El Beid à Tildé	12,15	14,733	3500	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Ja à Mbem	6,45	11,5	18	Bénoué		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Koumou à Nyemeyong	3,216	11,216	85			1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Leb Mbasse à SNEC (Edéa)	3,8	10,15	40	Sanaga-Mbam		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Logone à Logone-Birni	10,833	15,083	76000	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Logone à Pouss	11,766	15,1	72700	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Lom à Bétaré Oya	5,666	14	11100	Sanaga			Jaugeages	Ponctuels	(SONEL)
Lom à Lom-Pangar	5,366	13,483	19610	Sanaga			Jaugeages	Ponctuels	(SONEL)
Lom confluence	5,35	13,516	13420	Sanaga			Jaugeages	Ponctuels	(SONEL)
Long-mafok à Messamena	3,766	12,816	615	Nyong		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Mabombé à Mabombé	4,916	10,266	48			1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Makénéné à Makénéné	4,866	10,816	181	Mbam		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Maloko à Bindalima	4,483	11,633	599	Sanaga		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Mapé à Magba	5,983	11,266	3924	Mbam		1982/1983	Prélèvements	Ponctuels	25 Centres
Mayo Balda à Balda				Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Kalliao à Maroua			356	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Mangafé à Mangafé	10,916	14,266	279	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Motorsolo à Godola				Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Ngassawé à Limani	11,233	14,15	1093	Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Sava				Lac Tchad	Tropical pur	1985/1986	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Tsanaga à Bogo	10,733	14,6	1535	Lac Tchad	Tropical pur	?	Jaugeages	Continus	Réseau
Mayo Tsanaga à Douvar (Mokolo)	10,783	13,8	48,9	Lac Tchad	Tropical pur	1975 ?	Prélèvements	Continus	Yaérés
Mayo Tsanaga à Maroua	10,566	14,283	845	Lac Tchad	Tropical pur	?	Prélèvements	Ponctuels	Yaérés
Mayo Tsanaga à Minglia	10,616	14,066	575	Lac Tchad	Tropical pur	1977 ?	Prélèvements	Continus	Yaérés

Les études sur les transports de matières en suspension au Cameroun n'ont pas eu pour objectif une analyse comparative suivant les différentes unités climatiques et les caractéristiques d'états de surface et d'occupation du sol. Mais l'analyse globale montre que les bassins étudiés sont assez régulièrement répartis dans les unités climatiques. Un regroupement des bassins versants étudiés suivant les grandes zones climatiques (tableau 4.4) montre que seuls les climats côtiers, équatorial de la côte sud et tropical de la côte nord, n'ont pas encore fait l'objet d'observations, même ponctuelles, des matières solides en suspension, d'où l'un des intérêts du travail que nous menons dans cette partie du pays.

Tableau 4.4 : Répartition des bassins étudiés suivant les zones climatiques.

zone climatique	nbre bassins étudiés
équatorial	11
équatorial de la côte sud	0
tropical de la côte nord	0
tropical et équatorial de transition	4
tropical de montagne de l'ouest	4
tropical d'altitude de l'Adamaoua	3
tropical de la vallée de la Bénoué	3
tropical sec de l'extrême nord	12

Il n'est pas possible de présenter ici l'ensemble des requêtes qu'il est possible de sortir de cet ensemble de données, pour des analyses multivariées et spatiales. Nous avons jugé utile de représenter une sortie (figure 4.2), qui montre un des aspects de l'hétérogénéité des données. Le réseau de mesures est différencié en stations jaugées, non jaugées et les bassins versants élémentaires. Les stations jaugées sont celles pour lesquelles des mesures dans la section de la rivière ont permis de valider les prélèvements de surface. Dans l'ensemble des stations non jaugées sont regroupées celles pour lesquelles seuls des prélèvements en surface ont été effectués, et les bassins élémentaires sont des petits bassins sur lesquels des études beaucoup plus fines ont été réalisées, certaines parfois sur des parcelles ou sur des unités de végétation différentes.

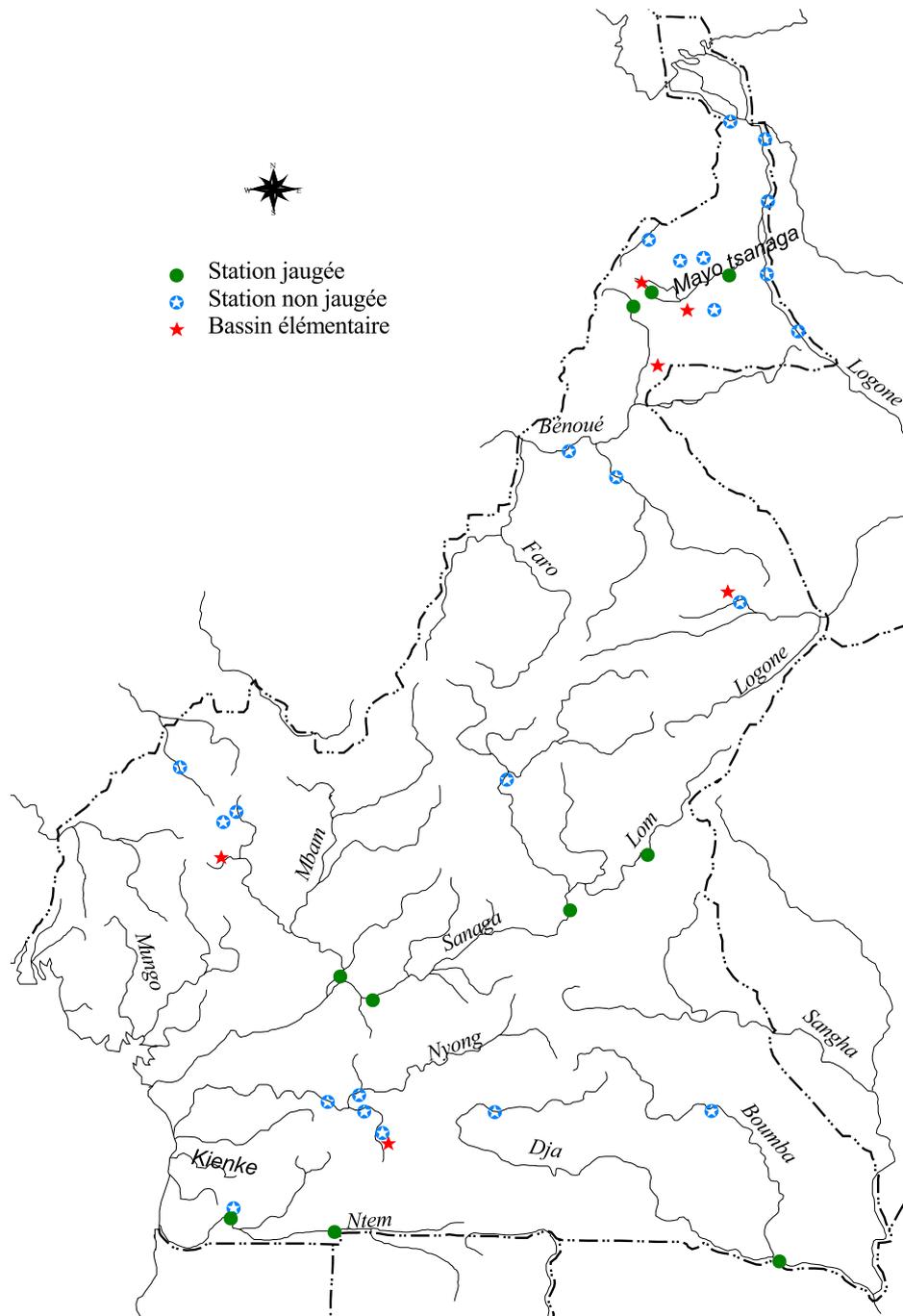


Figure 4.2 : Présentation des stations suivant les modes d'échantillonnage.

On remarque que seules 10 stations sur une quarantaine étudiées sont effectivement jaugées. Pour les autres stations, seuls des prélèvements de surface ont été effectués. Les concentrations sont alors pondérées par les débits pour estimer les flux. Six bassins seulement ont fait l'objet d'études expérimentales à petite échelle. Il faut signaler ici que cet inventaire ne tient pas compte des travaux des pédologues et des hydro-pédologues sur les parcelles

représentatives, tournées vers les analyses du ruissellement, de la productivité et de la conservation des sols, qui ne rentrent pas dans nos objectifs.

Par ailleurs, est également rassemblé dans cette base de données un inventaire le plus exhaustif possible de toutes autres mesures de matières en suspension allant d'un unique prélèvement effectué au passage, à des séquences d'observations atteignant quelques mois, mais jugées insuffisantes pour établir un bilan annuel de flux de matières. Ces données ne sont donc pas traitées dans ce travail, du fait que nous nous intéressons seulement aux stations pour lesquelles au moins une année hydrologique a été couverte.

3. LES MATERIELS, LE PROTOCOLE DE MESURES ET LA METHODOLOGIE

Il ressort des paragraphes précédents que les données sur les MES rassemblées résultent de programmes pas toujours simultanés, assez limités dans le temps et utilisant des méthodologies diverses. Il semble alors nécessaire de présenter, pour ceux dont les informations sont disponibles, les protocoles d'échantillonnage et les méthodologies utilisées par certains auteurs.

3.1. Les matériels

Le matériel utilisé pour les mesures de débits solides est sensiblement le même que celui utilisé couramment en hydrologie. Il est composé d'un équipement d'embarcation ou, éventuellement, sur les petites rivières, d'une passerelle à laquelle on associe un équipement de mesure des vitesses. A ceci viennent s'ajouter une pompe JAPY ou un seau et un lot de jerricans de 10 litres en plastique. Quelques mesures effectuées sur la Bénoué au site de Lagdo ont été réalisées à l'aide des « bouteilles de Delf » type DF1 et DF2. Certains prélèvements sont effectués au seau. En fait, Nouvelot (1972c) montre, à la station de Mbam à Goura, qu'il n'y pas de différence significative entre les concentrations des prélèvements de surface faits à la pompe JAPY et celles des échantillons pris directement au seau. Dès 1989, la charge et la durée des mesures sont rendues moins fastidieuses, les jerricans étant remplacés par des flacons de 1 litre. Les études réalisées à partir de la fin des années 1990 utilisent, à la

place de la pompe JAPY, une bouteille océanographique en PVC de 1,5 litre appelée *NISKIN Sampling*. Les échantillons d'eau sont conservés alors dans des flacons de 1 litre en plastique.

3.2. Le protocole d'échantillonnage et méthode de calcul

Le protocole d'échantillonnage varie suivant les régimes hydrologiques, le degré de brassage des eaux dans la section, qui n'est connu qu'après plusieurs échantillonnages, les moyens matériels et le personnel.

En raison de la diversité des régimes des fleuves et rivières du Cameroun, il était paru nécessaire d'élaborer des protocoles d'échantillonnage des eaux en vue des études hydrogéochimiques. C'est ainsi que le Mayo Tsanaga à la station de Bogu, la Sanaga à la station de Nachtigal et le Mbam à la station de Goura ont fait l'objet d'un suivi intensif de 1967 à 1969 (Nouvelot, 1969). Chaque bassin étudié constitue un cas d'espèce. Mais à défaut d'élaborer un protocole de mesures pour chaque bassin, deux protocoles principaux ont été mis sur pied, un pour les grands cours d'eau où la cote varie très lentement (Sanaga à Nachtigal et Mbam à Goura) et un autre pour les petites rivières où les cotes varient très rapidement.

Pour la Sanaga à Nachtigal, les cotes variant très lentement, il est possible de faire un jaugeage complet avant d'entreprendre les prélèvements d'eau. Pour le calcul des débits moyens journaliers liquides, on se contente d'une lecture journalière de la cote et la courbe d'étalonnage permet de calculer les débits. En ce qui concerne le poids des matières transportées, le problème est plus complexe puisqu'à une cote donnée ne correspond pas une seule turbidité. Il aurait donc fallu une mesure tous les jours. Etant donné qu'il est fastidieux de faire quotidiennement une série de prélèvements, les auteurs ont couplé chaque série de prélèvements à une prise d'échantillon de surface au même endroit et dans les mêmes conditions. Le point de prélèvement étant choisi suffisamment dans le courant et pas trop près des berges. L'essai de corrélation avec les concentrations moyennes permet de corriger les concentrations des échantillons de surface qui sont considérées alors comme des concentrations moyennes journalières.

Dans le cas des petites rivières, le problème est encore plus complexe. Les variations de cotes et donc de vitesses étant plus rapides, il n'est pas possible de réaliser une mesure complète de vitesse avant les prélèvements. De plus, pour chaque crue, un minimum de trois séries de mesures est nécessaire : une à la montée de crue, une proche du maximum et une à la décrue. En absence de variations rapides de la cote, les prélèvements peuvent être espacés. Par la suite, la masse de matières transportée annuellement est obtenue en faisant la somme des masses de matières transportées par chaque crue.

4. LES REGIMES SAISONNIERS DES TRANSPORTS DE MATIERES EN SUSPENSION SUR LE TERRITOIRE CAMEROUNAIS

En relation avec les divers régimes hydrologiques, nous présenterons les variations des matières en suspension (concentrations et flux) au cours du cycle hydrologique annuel, et leurs relations avec les débits.

4.1. Les concentrations journalières

Certains bassins versants camerounais ont fait l'objet de prélèvements quotidiens plus ou moins continus qui permettent d'analyser, à l'échelle journalière, les régimes de transport des matières en suspension. La figure 4.3 présente les variations des débits moyens journaliers et celles des concentrations moyennes journalières des matières en suspension pour des bassins représentatifs de certains domaines climatiques camerounais.

Pour les rivières des régions tropicales et tropicales de transition, les concentrations les plus élevées sont enregistrées au début de la saison des pluies (figure 4.3 A et B). Ce phénomène est très marqué dans la zone tropicale sèche de montagne (Mayo Tsanaga), où les premières crues, quelque soit leur importance, transportent les charges en matières en suspension les plus élevées de la saison. Ces concentrations élevées sont dues à la mobilisation des sols, rendus pulvérulents par la longue saison sèche, et par le piétinement prolongé des animaux.

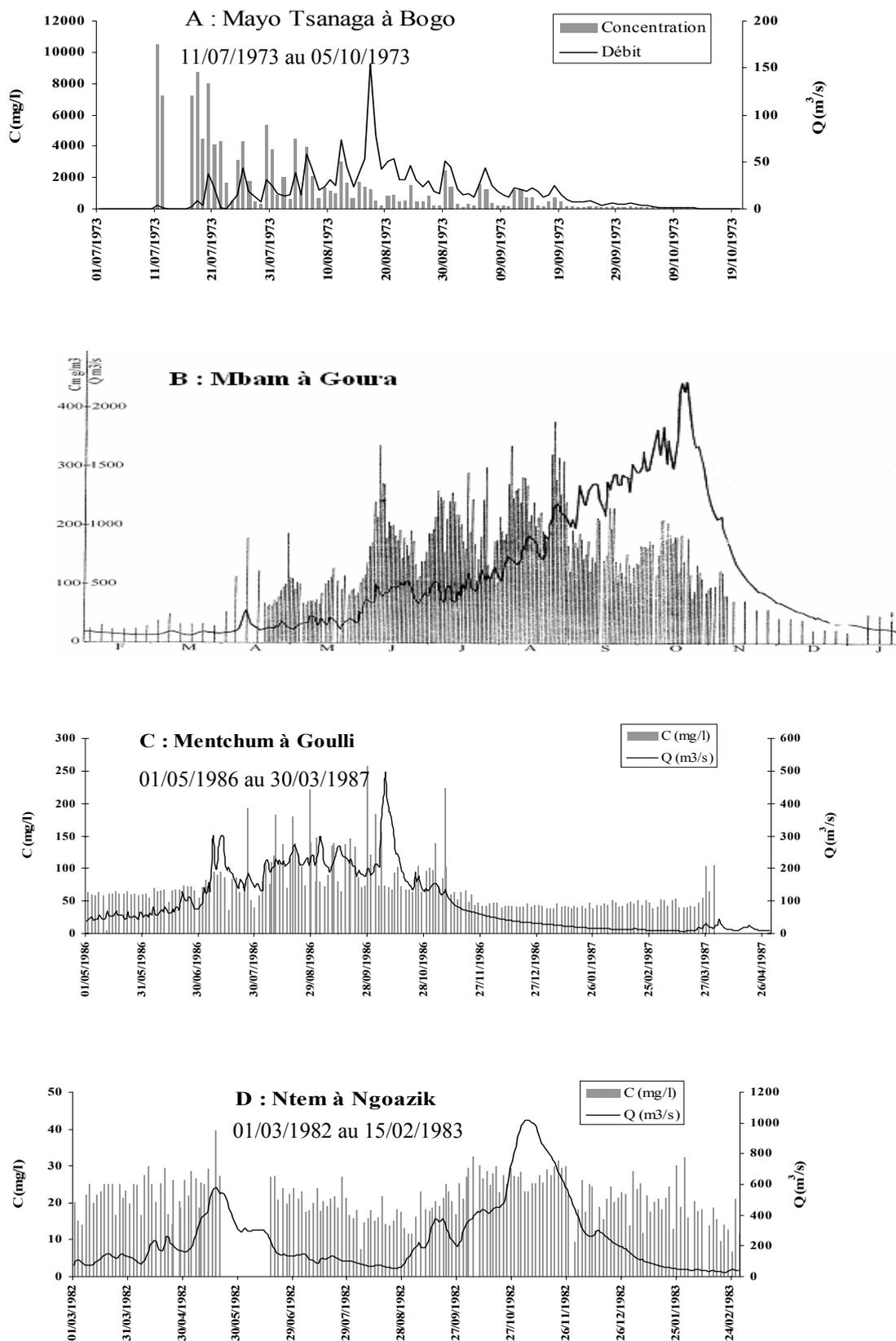


Figure 4.3 : Variations des concentrations et des débits journaliers sur quelques bassins versants.

Par la suite, les concentrations diminuent progressivement au cours du reste de la saison des pluies, du fait, entre autres, du développement de la végétation qui joue son rôle protecteur, à la diminution de la proportion des particules prêtes à être arrachées aux sols et à l'effet de dilution suite à un apport excessif d'eau de pluie. Les concentrations moyennes journalières, en milieu tropical sec sont de l'ordre de 8 000 mg.l⁻¹ à 10 000 mg.l⁻¹ en début de la saison des pluies, contre 50 mg.l⁻¹ à 100 mg.l⁻¹ en fin de saison. Ainsi, les écarts-types pour les concentrations moyennes journalières sont de l'ordre de 1 950 mg.l⁻¹ en zone tropicale sèche et de 6 mg.l⁻¹ en zone tropicale de transition.

Dans les zones tropicales de montagne et les zones équatoriales (figure 4.3 C et D), les concentrations moyennes journalières augmentent régulièrement avec les débits moyens journaliers et les valeurs maximales coïncident avec les maxima de crue. Les valeurs de concentrations varient, au cours de la saison, entre 150 mg.l⁻¹ et 50 mg.l⁻¹ en zone tropicale de montagnes, alors qu'elles sont comprises entre 30 mg.l⁻¹ et 10 mg.l⁻¹ en zone équatoriale. Ces faibles valeurs de concentrations et les écarts entre les concentrations extrêmes ont été observés également sur le Congo, fleuve de la zone équatoriale (Moukolo, 2000). Ces phénomènes sont dus au rôle protecteur que jouent les forêts équatoriales. Celles ci retiennent d'abord des gouttes de pluies sur leurs différentes strates, réduisant ainsi considérablement leurs vitesses cinétiques, avant de les laisser tomber sur des débris de feuillages qui, en constituant le dernier rideau de protection contre les gouttes de pluies, s'opposent également, avec les racines, au ruissellement direct et aux transports de matières.

Signalons que le type de sols et le relief interviendraient, de façon primordiale, pour expliquer les valeurs relativement élevées des concentrations des matières en suspension sous les forêts tropicales de montagnes. Dans ces domaines, les fortes pentes accroissent considérablement l'énergie du ruissellement sur des sols juvéniles de structure grumeleuse, formés sur un matériau volcanique récent, très sensible à l'érosion.

4.2. Les concentrations mensuelles

De nombreux auteurs (Orange, 1992 ; Sigha Nkamdjou, 1994 ; Bricquet *et al.*, 1997) ont décrit les caractéristiques des régimes des matières en suspension dans les cours d'eau tropicaux. Il en ressort que les concentrations les plus élevées correspondent au début de la

saison des pluies. Elles diminuent plus ou moins rapidement vers la période des basses eaux, pendant laquelle le transport solide devient négligeable. L'essentiel du transport a de ce fait lieu en saison humide, sous l'effet des précipitations et du ruissellement sur les versants. Bricquet *et al.* (1997) distinguent (figure 4.4), trois phases au cours de la saison dans le processus de transport de matières en suspension : (i) première phase pendant laquelle les concentrations croissent avec les débits, (ii) une deuxième phase pendant laquelle les concentrations décroissent pendant que les débits continuent à augmenter et (iii) une dernière phase où les concentrations diminuent en même temps que les débits.

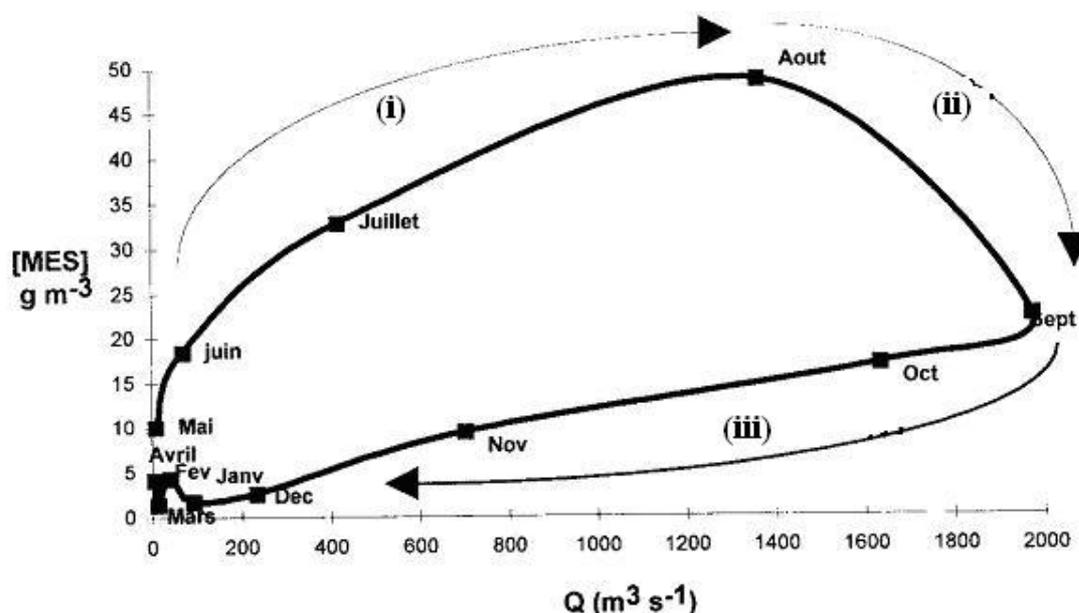


Figure 4.4 : Exemple de relation Concentration -Débits proposée pour le Niger à Koulikoro (Bricquet *et al.*, 1997, modifié).

Les hystérésis de la relation concentrations - débits pour certains fleuves et rivières du Cameroun, font apparaître, malgré la globalité du schéma décrit ci-dessus, de nombreuses nuances dans l'évolution saisonnière des concentrations moyennes mensuelles. On distingue le régime tropical (figure 4.5), du régime équatorial (figure 4.6). Nous avons retenu les schémas pour deux fleuves de la sous - région pour comparaison. Il s'agit du Congo à Brazzaville^b et du Logone à Lai^c.

^b Les données du fleuve Congo à Brazzaville sont tirées de Moukolo (2000)

^c Les données du fleuve Logone à Lai sont tirées de Gac (1980)

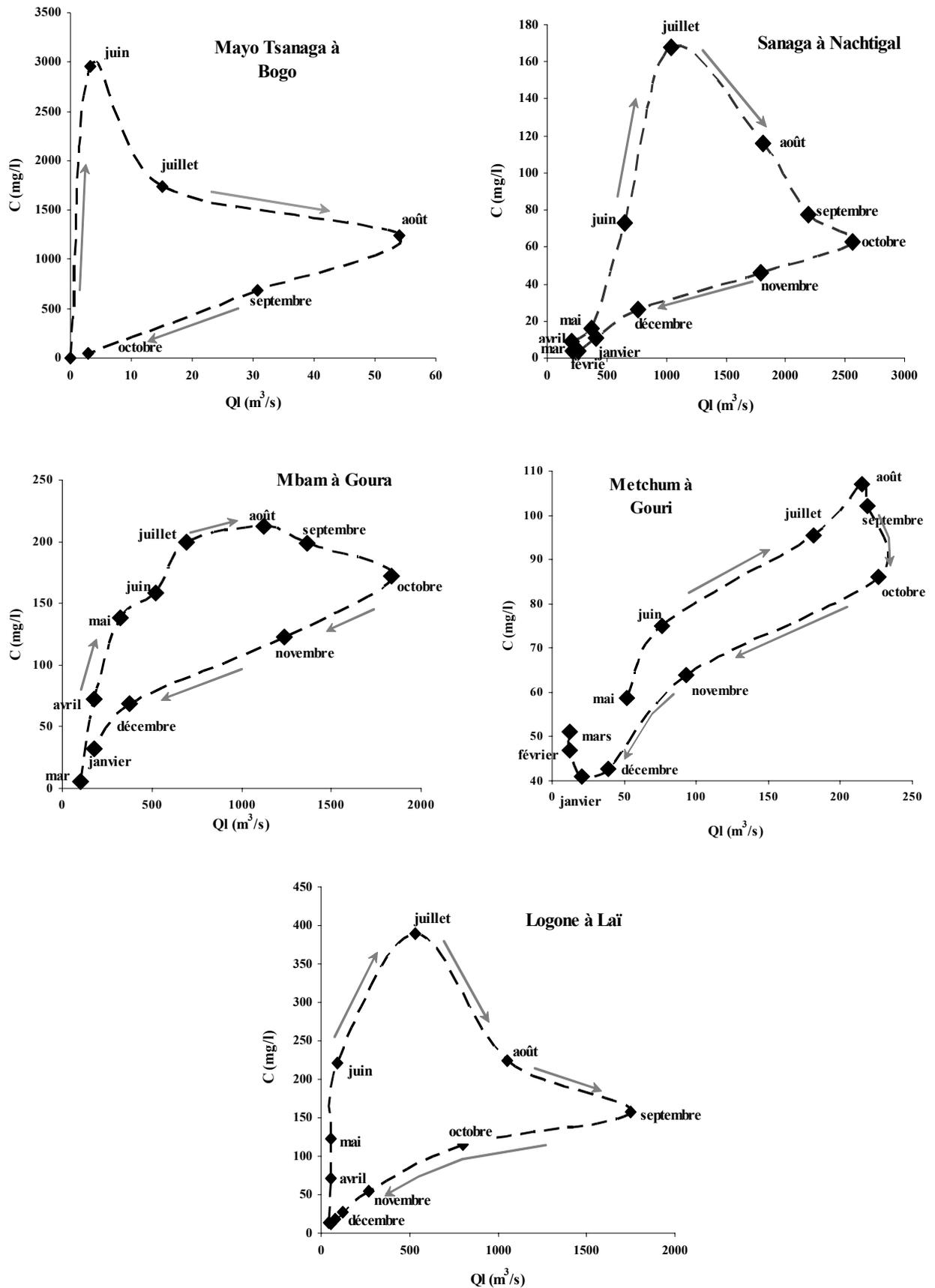


Figure 4.5 : Variation des concentrations avec les débits en zone tropicale au cours du cycle hydrologique.

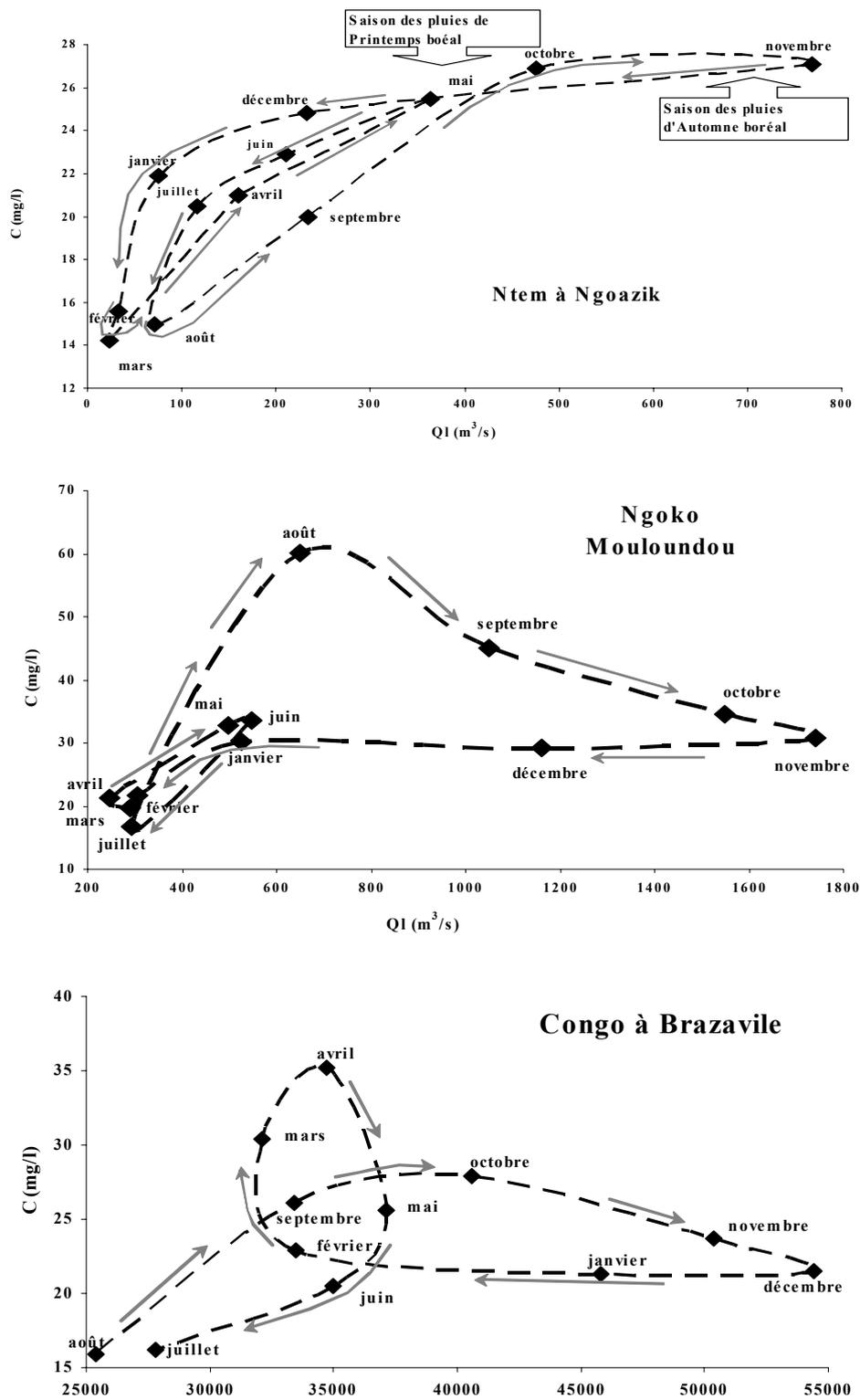


Figure 4.6 : Variation des concentrations avec les débits en zone équatoriale au cours du cycle hydrologique.

Tous les bassins versants tropicaux montrent l'évolution classique des concentrations qui décrit trois phases assez distinctes :

(a) en début de saison, il y a une phase de croissance des concentrations jusqu'au maximum de l'année, très rapide dans les zones soudaniennes et tropicales de transition (Mayo Tsanaga, Logone et Sanaga), assez modérée en zone tropicale de montagne (Mbam et Metchum). Dans les régions tropicales sèches, elle correspond, comme nous l'avons déjà dit plus haut, à une phase de mobilisation des sols pulvérulents, libérés par les actions érosives et destructrices des troupeaux et des vents pendant la longue saison sèche. Ce phénomène est d'autant plus important dans les régions sèches que les pluies sont mal réparties, et surtout quand leur démarrage est tardif (Olivry, 1976) ;

(b) pendant la saison des pluies, notamment l'Automne boréal, en milieu équatorial, les concentrations en matières en suspension baissent régulièrement au moment où les débits liquides tendent vers leur maximum. Cette phase dure environ trois mois dans toutes les unités climatiques. Les auteurs se sont basés sur plusieurs phénomènes pour expliquer cette diminution de la turbidité au cours de la saison des pluies, et tendent à la rattacher à un ralentissement de l'action érosive des précipitations et du ruissellement : développement du couvert végétal jouant un rôle protecteur, diminution de la proportion des particules pouvant être arrachées aux sols. En fait, quand on compare l'évolution des concentrations et celle des flux (figure 4.7), on observe que la production des sédiments continue à augmenter. L'érosion reste de ce fait croissante pendant une partie encore de la saison des pluies, au moment où les concentrations diminuent. Cette phase s'apparenterait beaucoup plus à une phase de dilution, suite à des apports d'eau plus importants ;

(c) pendant la décrue, fin août à octobre pour le Mayo Tsanaga, septembre à décembre pour le Logone, octobre à décembre pour le Mbam, la Sanaga et la Mentchum, et novembre à janvier pour les cours d'eau forestiers, les concentrations diminuent dans le même sens que les débits et l'érosion spécifique. Les débits diminuant, les cours d'eau perdent leur capacité de transport et les particules se déposent dans les lits ou les plaines inondées. Cette phase dure jusqu'à la période d'étiage, où la turbidité des rivières ne représente plus que l'érosion des berges, l'essentiel des apports d'eau étant issus des nappes phréatiques.

Sur les bassins versants équatoriaux, les cycles d'érosion indiquent bien les deux saisons des pluies, d'importance inégale, principalement pour la Ngoko. Il est assez complexe pour le

Congo à Brazzaville, probablement en rapport aux divers régimes de ses affluents, situés de part et d'autre de l'équateur.

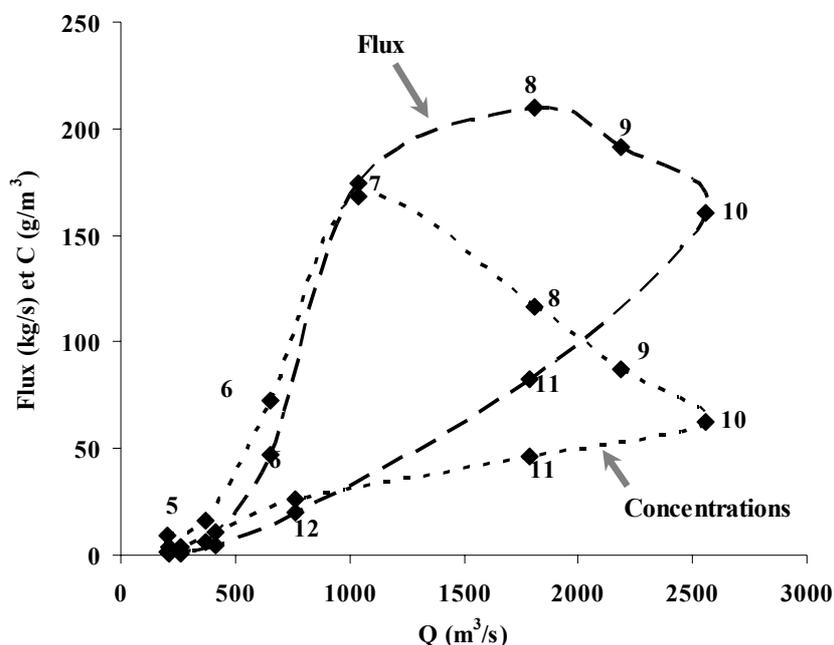


Figure 4.7 : Evolution comparée au cours du cycle hydrologique de la concentration et du flux de matières en suspension en fonction du débit (Sanaga à Nachtigal – régime tropical).

4.3. Les quantités de matériaux transportées

Les hystérésis de la relation concentration en matières en suspension - débits ont montré toute la complexité qui existe entre les débits d'un cours d'eau et les concentrations de matières qu'il véhicule. Mais la charge solide d'un cours d'eau, à un moment donné, n'a qu'un aspect qualitatif. En terme d'érosion, les quantités réelles de matériaux érodés sur les versants et destinées à être déposées plus ou moins loin en aval, sont obtenues en pondérant les concentrations par les débits liquides suivant la formule :

$$Q_s = C_m \times Q_l \quad (4.1)$$

Q_s : débit des matières en suspension ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_m : concentration moyenne des matières en suspension ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ou $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q_l : débit du cours d'eau ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Comme pour les concentrations, nous avons cherché s'il pouvait exister des relations significatives entre les flux de matières solides en suspension et les débits. Les différentes corrélations à l'échelle mensuelle sont présentées par les figures 4.8 et 4.9. A l'inverse des concentrations, les modèles de régression entre les quantités de matières transportées et les débits moyens mensuels donnent, pour certaines régions climatiques, des équations linéaires assez significatives.

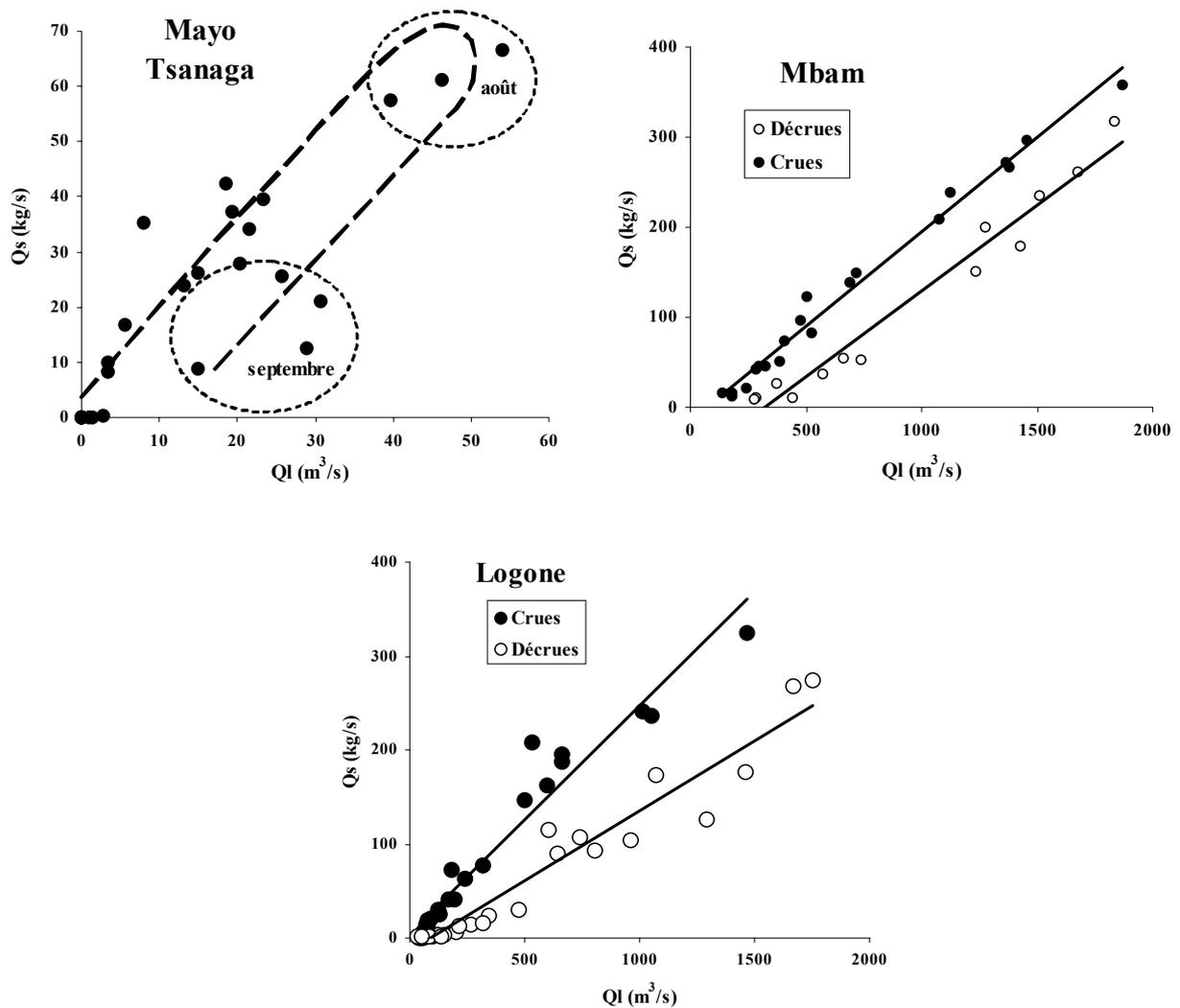


Figure 4.8 : Relations entre les flux des matières en suspension et les débits en zone tropicale.

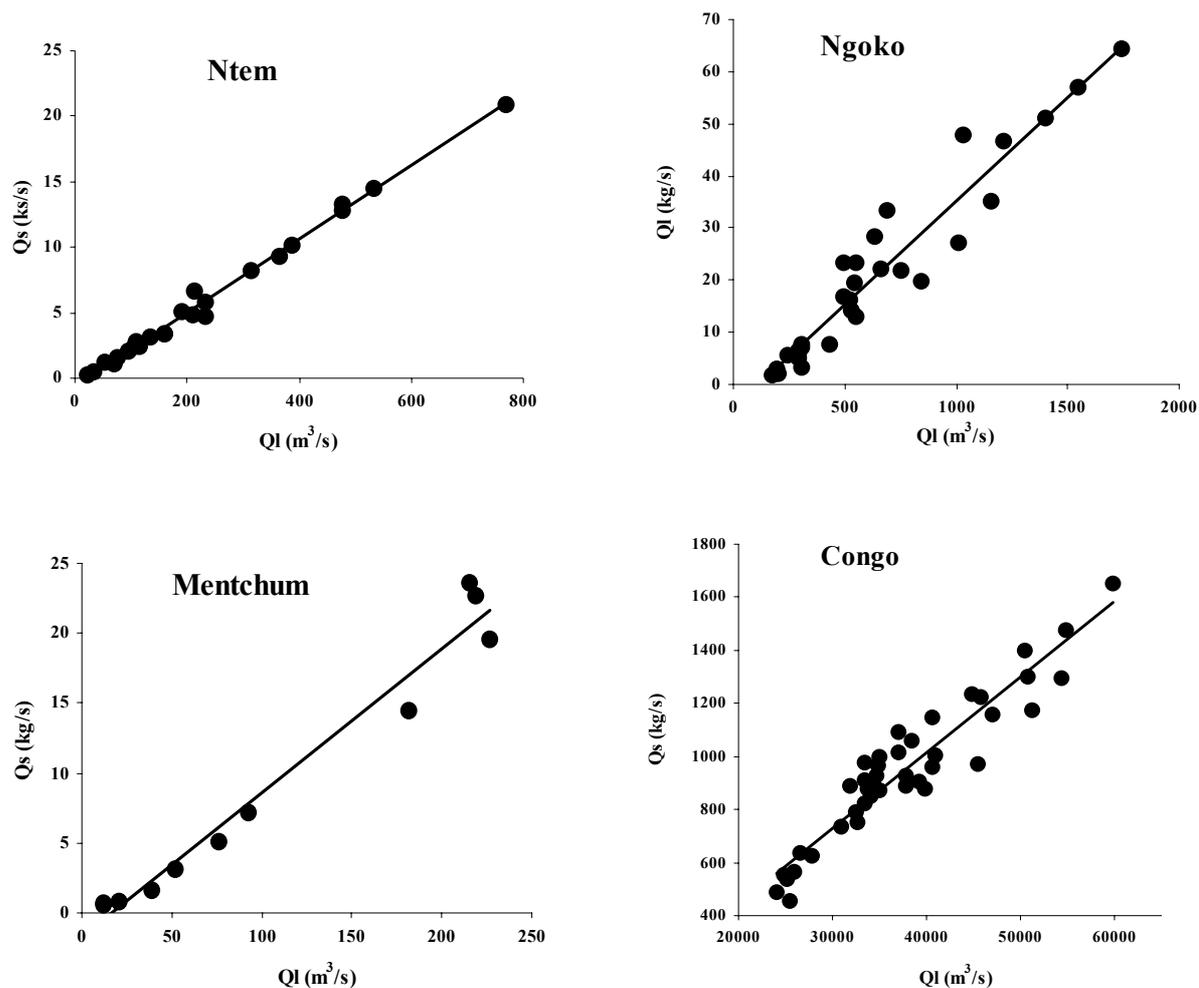


Figure 4.9 : Relations entre les flux des matières en suspension et les débits en zone forestière.

L'examen de ces régressions montre toutefois une distinction nette entre les bassins du domaine de la forêt et ceux du domaine de la savane. En zone de savane (Logone et Mbam), la corrélation change entre la période de montée des eaux et celle de la décrue. Ceci montre un changement dans le processus dynamique d'érosion et de transport dans des bassins versants au cours des deux phases d'écoulement (crue et décrue), qui traduit nettement la modification du couvert végétal. La droite en décrue reste toujours en dessous de celle en crue (figure 4.8), ce qui s'explique par une baisse de la compétence des agents érosifs (pluie et ruissellement notamment).

En revanche, sous les forêts équatoriales (Ntem, Ngoko et Congo) et les forêts d'altitude (Mentchum), en toute saison, une relation stable et unique existe entre le débit et le flux des matières solides en suspension. Elle traduit la constance du couvert des bassins en toute

saïson. Les corrélations entre les débits solides (Q_s) et les débits liquides (Q_l) sont très significatives. Les coefficients de détermination (R^2) sont généralement supérieurs à 0,9 et les erreurs moyennes résiduelles, d'autant plus importantes que les flux sont faibles, sont généralement inférieures à 20 % (tableau 4.5). Elles peuvent permettre pour certains projets d'estimer des quantités de matières qui peuvent être transportées à partir des seules mesures des quantités d'eau écoulées, données relativement plus accessibles.

Tableau 4.5 : Expressions mathématiques de l'ajustement de la relation entre le débit (Q_l en $m^3.s^{-1}$) et le flux (Q_s en $kg.s^{-1}$).

Bassin versant		Equations	n	R^2	E_r (%)
Logone	Crués	$Q_s = 0,241 \times Q_l + 5,84$	22	0,94	24
	Décrués	$Q_s = 0,1488 \times Q_l - 13,70$	33	0,94	26
Mbam	Crués	$Q_s = 0,2096 \times Q_l - 14,93$	23	0,98	9
	Décrués	$Q_s = 0,1979 \times Q_l - 65$	13	0,98	17
Mentchum		$Q_s = 0,1028 \times Q_l - 1,66$	10	0,96	23
Ntem		$Q_s = 0,0281 \times Q_l - 0,61$	24	0,99	8
Ngoko		$Q_s = 0,0399 \times Q_l - 4,61$	30	0,92	18
Congo		$Q_s = 0,0284 \times Q_l - 119,12$	41	0,89	7

n, nombre de couple (Q_s , Q_l) ; R^2 , coefficient d'évaluation ; E_r , erreur résiduelle moyenne

5. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES MATIERES SOLIDES EN SUSPENSION

Les concentrations et les flux de matières annuelles obtenues dans les différentes régions du pays sont comparés, en essayant de dégager à chaque fois les facteurs conditionnels. Pour les bassins qui ont connu quelques années de mesures, nous regardons comment les concentrations et les flux ont varié au cours de ces années.

5.1. Variation spatiale

Des travaux sur parcelles expérimentales (Roose, 1977 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Boli et Roose, 1973) et les petits bassins versants (Thébé, 1987 ; Chevallier, 1988 ; Droux, 1999 ; Diallo, 2000 ; Karambiri, 2003) ont montré que l'intensité de l'érosion dépend des états de surface et en particulier, du couvert végétal et de la nature des sols. A l'échelle saisonnière, les analyses ont montré (paragraphe 4 ci-dessus) que la turbidité des cours d'eau est influencée par le développement du couvert végétal au cours de la saison humide. Cet effet est beaucoup plus ressenti en milieu tropical, où les espèces végétales, généralement à cycle annuel, modifient considérablement les conditions de ruissellement. Dans les régions agricoles, les cultures étendues sur toute la saison sur des sols meubles et profonds entretiennent des turbidités élevées dans les cours d'eau.

A l'échelle des grands écosystèmes camerounais, la dégradation latitudinale du couvert végétal semble être bien corrélée avec la charge solide des cours d'eau. La figure 4.10 présente la relation entre les latitudes des exutoires des bassins et les concentrations des matières en suspension. On remarque qu'au gradient de végétation se superpose du sud au nord un gradient de concentration, avec des valeurs de 20 à 40 g.m^{-3} en milieu forestier, 80 à 100 g.m^{-3} en zones de transition et 150 à 160 g.m^{-3} en région tropicale sèche.

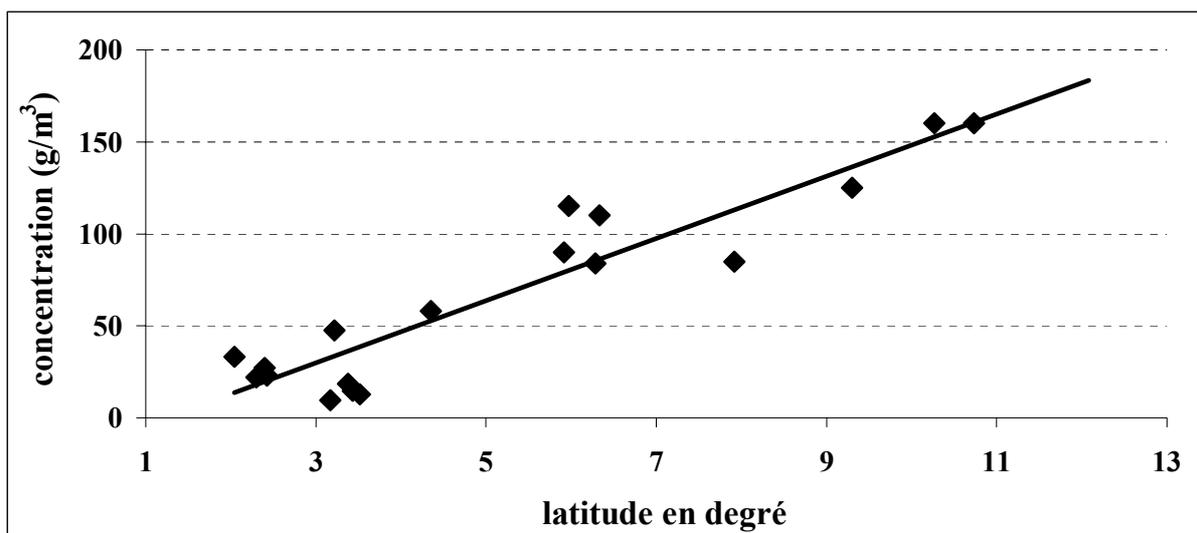


Figure 4.10 : Evolution de la charge solide des cours d'eau en fonction de la position latitudinale du point de prélèvement.

En terme de transport spécifique (flux de matière ramené à l'unité de superficie du bassin versant), la répartition spatiale est beaucoup plus complexe. La liaison avec la taille du bassin versant semble beaucoup plus forte qu'avec le couvert végétal et l'environnement climatique. L'allure générale indique une diminution des flux spécifiques au fur et à mesure que la taille des bassins augmente (figure 4.11). Une analyse plus poussée montre que les bassins de petite à moyenne taille (inférieur à 10 000 km²) forment deux pôles. A superficies égales, les bassins forestiers présentent des flux spécifiques plus faibles que ceux des bassins tropicaux.

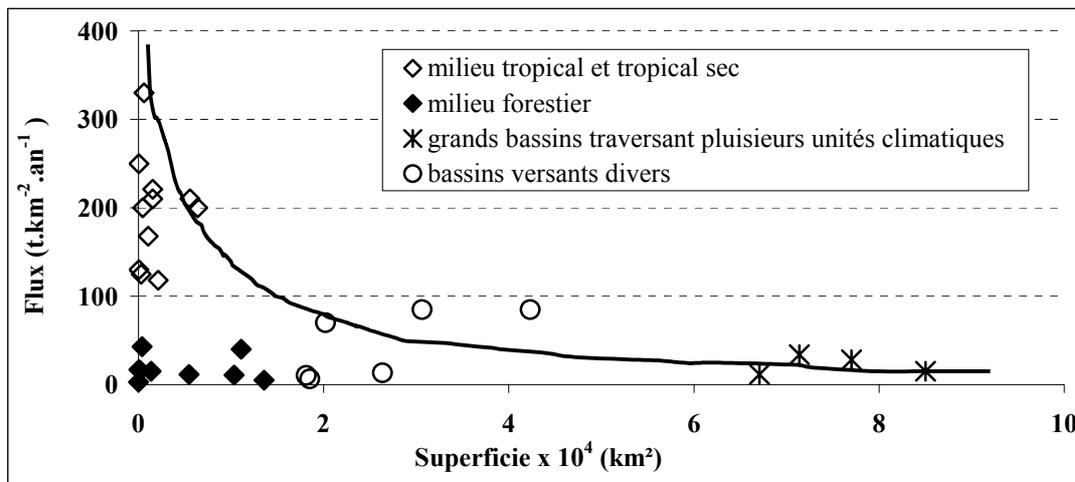
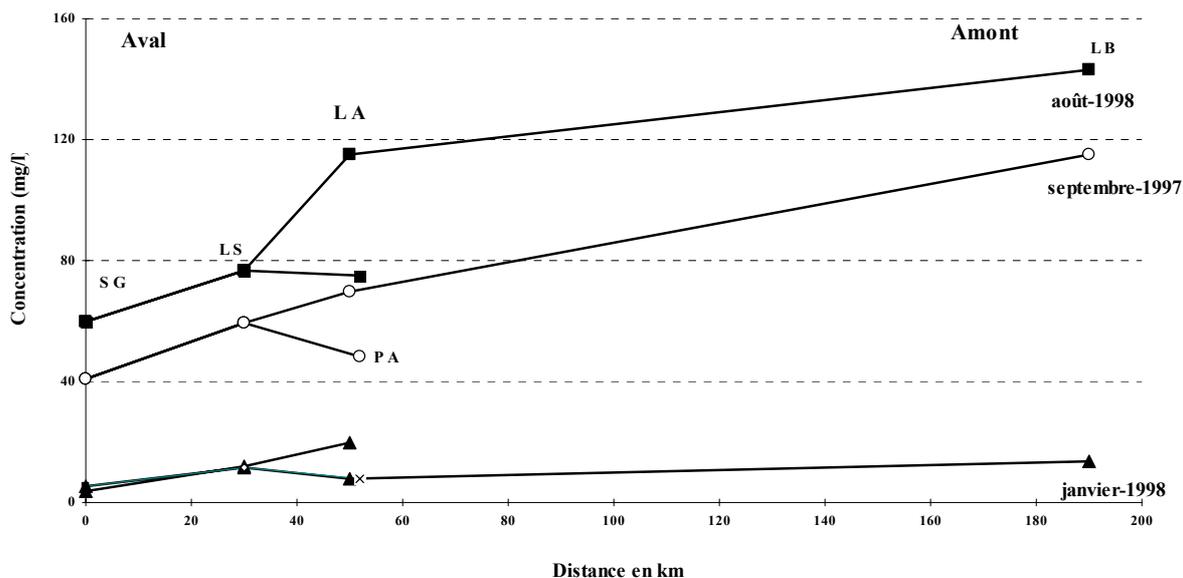


Figure 4.11 : Flux de matières en suspension à l'exutoire des bassins.

L'analyse des résultats obtenus à différentes échelles d'espace peut permettre de mieux comprendre les processus qui président au transport des particules depuis les versants jusqu'à l'exutoire des grandes unités hydrographiques.

Roose (1973, 1977) et Diallo (2000) soulignent que les chiffres mesurés au niveau de la parcelle, ne sont pas applicables à l'échelle du bassin versant. Selon eux, une grande partie des sédiments (les plus grossiers) arrachés par l'érosion sont déposés avant d'arriver à l'exutoire. Roose (1977) pense que, schématiquement, l'exportation des sédiments à l'exutoire d'un bassin versant ne représenterait que 5 % de l'érosion effective. Diallo (2000) montre sur le bassin versant de Djitiko (103 km²) au Mali que seulement 7 % des matériaux érodés sur une superficie de 1000 m² de versant arrivent à l'exutoire d'un bassin. Lamachère (2000) fait les mêmes observations sur un petit bassin versant de 44,5 km² au nord-ouest du Burkina Faso, où il obtient 40 t.km⁻².an⁻¹ à l'exutoire, 5 fois plus faible que la valeur de 200 t.km⁻².an⁻¹, mesurée sur une parcelle de 3000 m².

Des travaux effectués dans des unités hydrographiques plus grandes, soulignent également une diminution des matières en suspension vers l'aval. Ainsi, Sigha-Nkamdjou *et al.* (1998) trouvent (figure 4.12) que la Sanaga perd, en hautes eaux (août et septembre), plus de 60 % de sa charge solide en 200 km de parcours ; alors que la charge solide varie très peu de l'amont en aval en basses eaux (janvier). La même observation est faite par Gibbs (1967) sur le bassin versant de l'Amazone.



S G : Sanaga Goyoum ; L S : Lom site du barrage ; L A : Lom avant la confluence ; P A : Pangar avant la confluence ; L B : Lom à la station de Bétaré-oya

Figure 4.12 : Profil des concentrations d'amont en aval dans le bassin supérieur de la Sanaga.

A l'échelle des bassins versants de taille plus grande, les dégradations mesurées ne donnent alors que des estimations globales, et par défaut, de l'érosion locale des sols sur les versants. Une partie parfois importante des matériaux érodés se dépose sous forme de colluvions dans les bas de pentes et les dépressions, suite à la baisse de la puissance de transport des sédiments par les écoulements. Par endroits, l'étalement des fleuves en véritables lacs ou plaines alluviales réduit considérablement les vitesses du courant et amène les matériaux en suspension à se déposer. Nouvelot *et al.* (1971) pensent ainsi que l'essentiel des apports solides du bassin supérieur du Noun se décantent dans les marais du Nkouefou ou du lac Vomaloum en amont du barrage de retenue de Bamendjing.

Tableau 4.6 : Quelques valeurs de flux de matières particulaires dans des cours d'eau camerounais.

Bassin	Superficie (km ²)	Période de mesures	Débit (m ³ .s ⁻¹)	Région climatique	Erosion (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Références
Sanaga à Nachtigal	77000	1968-1969	1236	tropical de transition	28	(1)
Nyong à Mbalmayo	13555	1994-1996	-	équatorial	5,2	(2)
Mengong à Nsimi	0,58	1994-1996	5,85	équatorial	2,9	(2)
Ntem à Ngoazik	18100	1981-1983	232	équatorial	10,6	(3)
Ngoko à Mouloundou	67075	1989-1992	757	équatorial	11,5	(4)
Dja à Somalomo	5473	1989-1992	70	équatorial	11,5	(4)
Boumba à Biwala	10310	1989-1992	121	équatorial	10,8	(4)
Mbam à Goura	42300	1966-1967 1970-1973	837 574	tropical de transition	60 à 90 67	(1) (5)
Mifi-sud à Bamougoum	306	estimation	-	tropical de montagne	2000	(6)
Metchum à Gouri	2116	1987/1988	-	tropical de montagne	118	(7)
Risso (S ₃)	33	1967	-	tropical	17	(1)
Rao	1345	1967	-	tropical	15	(1)
Mayo Tsanaga à Bogo	1535	1968-1969	8,4	tropical sec	213	(1)
		1973	5,3		177	(5)
		1985-1986	5,8		185	(8)
Mayo Tsanaga à Douar	575	1977	-	tropical sec	330	(9)
Mayo Boula à Dargala	1517	1985-1986	5,2	tropical sec	221	(8)

* Les valeurs des débits et des flux de MES sont mesurées au cours de l'année d'étude ou sont les moyennes sur la période.

(1) Nouvelot (1969) ; (2) Ndam Ngoupayou, (1997) ; (3) Boum *et al.* (1983) ; (4) Sigha-Nkamdjou (1994) ; (5) Olivry *et al.* (1974) ; (6) Olivry (1976) ; (7) Tanyileke (1988) ; (8) Naah (1990) ; (9) Naah (1978)

Ainsi, l'érosion paraît conditionnée par un ensemble de facteurs qui impliquent aussi bien les paramètres climatiques que les caractéristiques physiques des bassins versants. Ces facteurs peuvent intervenir simultanément ou se succéder dans le temps et/ou dans l'espace. Dans des bassins de très grande taille ($S > 60\ 000\ \text{km}^2$), qu'ils soient en milieu équatorial ou tropical, il y aurait une intégration des caractéristiques géomorphologiques, phytogéographiques, pédologiques et anthropiques hétérogènes en caractéristiques moyennes, qui ne rendrait plus compte des influences locales des milieux sur le transport solide.

Quelques valeurs de flux de matières particulaires sur le territoire camerounais sont représentées dans le (tableau 4.6). Les débits qui les ont véhiculés y sont aussi indiqués. Il a

été évoqué plus haut les différences entre les périodes d'observation et les tailles très réduites des séries d'observations.

L'observation du tableau 4.6 fait ressortir une très grande variation de taille des bassins étudiés, de débit mesurés et de flux de matières véhiculés. La taille des bassins varie de quelques hectares à plus de 70 000 km², pour des modules de quelques mètres cube par seconde à plus de 1 000 m³.s⁻¹ et des transports spécifiques de quelques tonnes par kilomètre carré par an à environ 2 000 t.km⁻².an⁻¹.

Pour une illustration plus discernable de la répartition spatiale des transports de matières (concentrations et productions des sédiments), qui puisse être comparée à des facteurs physiques et humains en particulier, les concentrations en g.m⁻³ (figure 4.13) et les productions spécifiques en t.km⁻².an⁻¹ des sédiments (figure 4.14) sont cartographiées pour l'ensemble des bassins versants étudiés, en adoptant la méthode suivante : les valeurs moyennes annuelles sur les périodes d'étude sont calculées à l'exutoire de chaque bassin. Les résultats sont attribués, soit à la surface du bassin contrôlé par la station jusqu'à la station immédiatement en amont, dans le cas des bassins emboîtés, soit à la totalité du bassin dans le cas contraire. Les classes de valeurs que nous avons retenues ne sont pas homogènes, par ce que liées à la distribution très hétérogène des échantillons disponibles.

En dehors des plateaux de l'ouest et des monts Mandara, régions très anthropisées sur lesquelles nous reviendrons plus loin, les concentrations varient de 10 g.m⁻³ à environ 500 g.m⁻³ pour des flux de 10 t.km⁻².an⁻¹ à 200 t.km⁻².an⁻¹.

Il semble s'organiser autour de l'Adamaoua, dans une direction Sud-ouest/Nord-est, deux bandes de productions quasi homogènes de sédiments. Une première où l'érosion est plus élevée (entre 50 t.km⁻².an⁻¹ et 100 t.km⁻².an⁻¹), concerne les versants septentrionaux du plateau (bassin de la Bénoué et le bassin supérieur du Logone) et le bassin du Mbam. La seconde comprend les bassins moyens du Logone et de la Sanaga où l'érosion est comprise entre 25 t.km⁻².an⁻¹ et 50 t.km⁻².an⁻¹. Cette distinction entre des zones de couvert végétal (les savanes) et d'occupation humaine (densité de population) identiques, peut être vraisemblablement liée à la différence de pente.

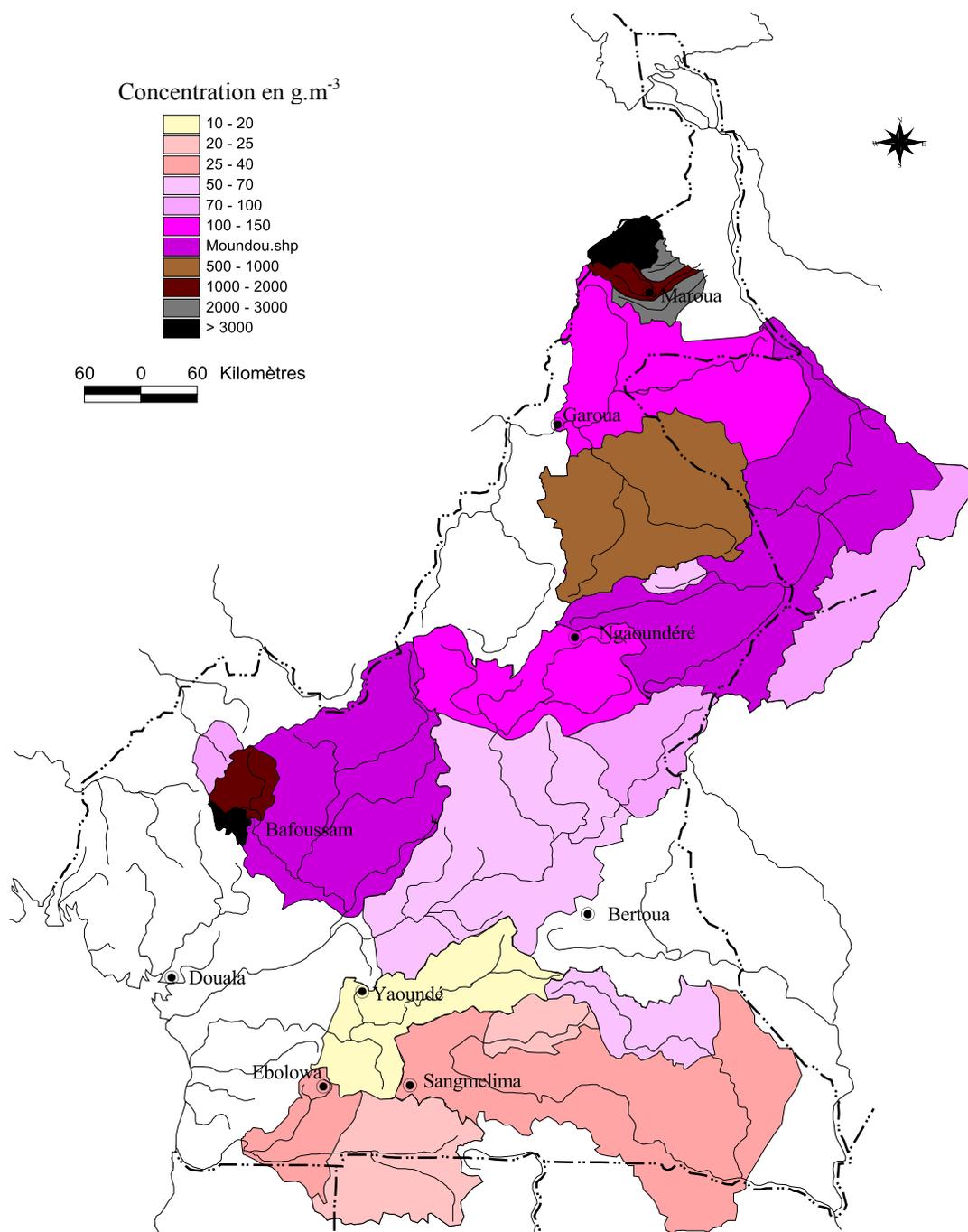


Figure 4.13 : Répartition comparée des concentrations moyennes annuelles des MES.

En effet, Les affluents méridionaux de la Bénoué drainent de l'Est à l'Ouest les flancs des monts *Ngay*, *Gourmoné* et *Tchabal ganbada* auxquels la falaise fait suite. Cette topographie est à comparer à celle du bassin du Mbam qui draine les hauts sommets de la *ligne du Cameroun*, avec principalement les monts *Bambouto*, *Gotel* et *Chabal Ndao*. En revanche, le bassin moyen de la Sanaga présente des pentes plus adoucies, comparables à celles du bassin moyen du Logone, avant d'entrer dans la cuvette du lac Tchad.

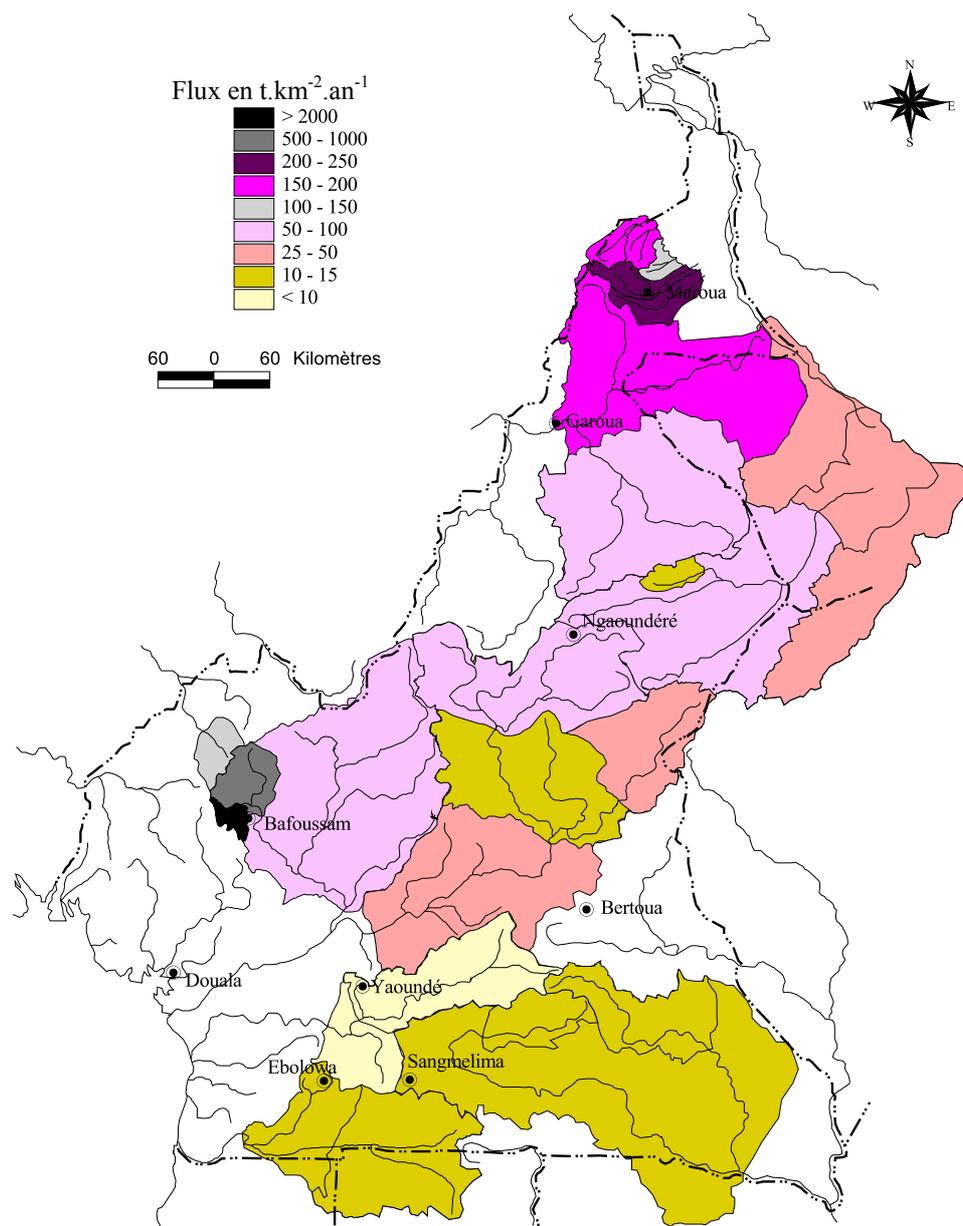


Figure 4.14 : Répartition comparée des productions moyennes annuelles des sédiments.

Ces observations corroborent celles de Roose (1977 et 1994) qui trouve en climat tropical humide (Côte d'Ivoire, Adiopodoumé, 2 100 mm), mais avec des pentes de 7 %, une érosion sur parcelles cultivées plus forte (2 000 à 13 000 t.km⁻².an⁻¹) ; alors qu'elle n'est que de 300 à 2 000 t.km⁻².an⁻¹ en climat soudanien (Burkina Faso, Siara, 830 mm), sur pentes plus faibles (0,7 %).

La zone de forêt a un taux d'érosion plus faible, inférieur à 15 t.km⁻².an⁻¹. L'érosion dans le bassin versant du Nyong semble beaucoup plus faible, inférieurs à 5 t.km⁻².an⁻¹. Ceci est lié à

la physionomie particulière du bassin, caractérisée par la présence de large prairies inondées dans lesquelles sont filtrées une partie des MES.

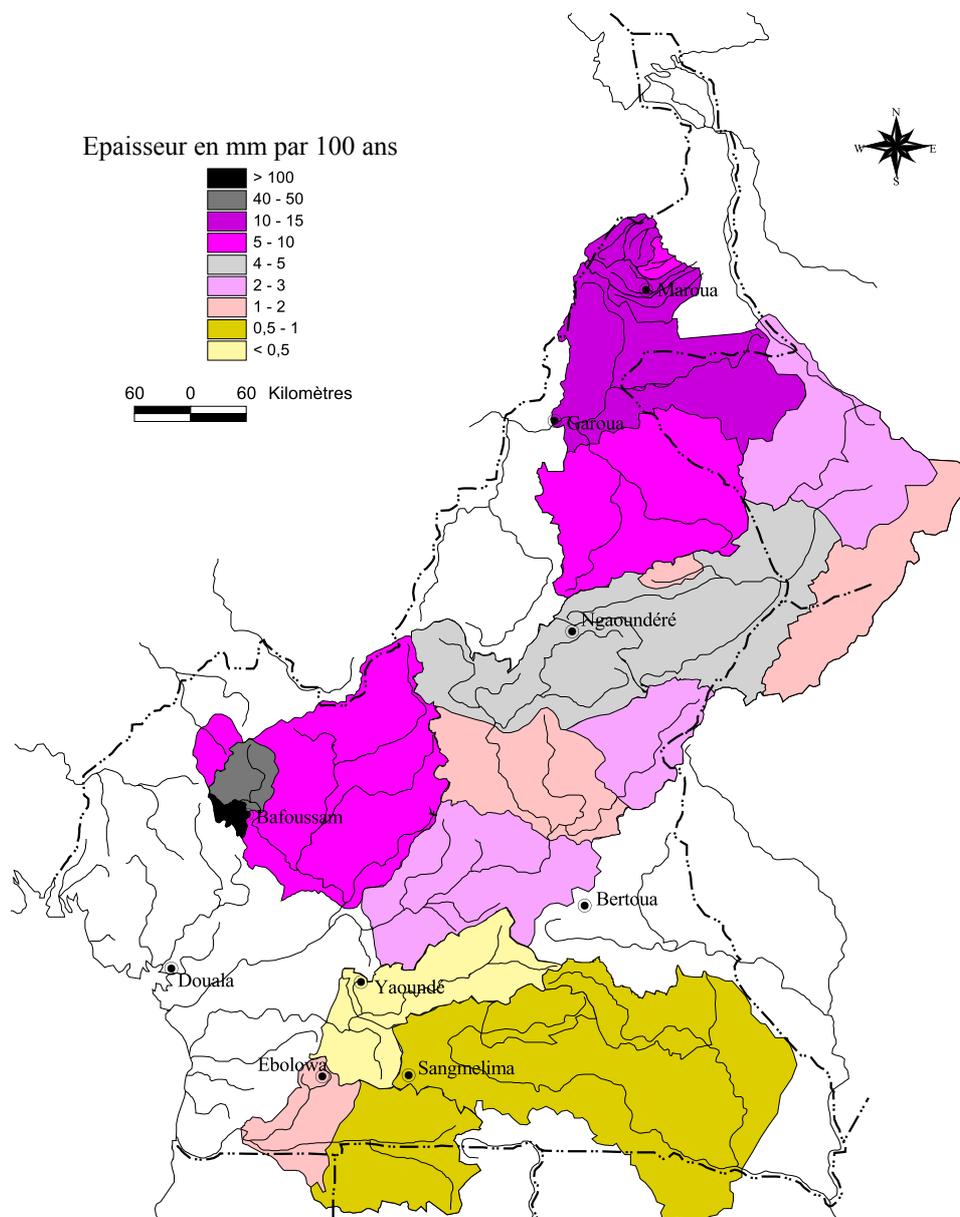


Figure 4.15 : Répartition comparée des épaisseurs moyennes de sols susceptibles d'être érodés en 100 ans.

Un des effets les plus graves, mais les moins perceptibles du phénomène d'érosion et du transport de matières est la perte de la fertilité des sols. On peut la caractériser ici par des épaisseurs moyennes de sols décapés. La figure 4.15 montre la répartition comparée de l'épaisseur moyenne des sols décapés, estimée pour 100 ans sur la base des flux moyens de matières en suspension disponibles.

Les lames de sols érodées n'ont évidemment pas grande signification d'un point de vue pratique, ceci pour deux raisons que nous avons évoquées au chapitre précédent. La première est que les bassins, même de petite taille, sont très hétérogènes, comportant des zones rocheuses relativement résistantes et des glacis plus érodables. La seconde est que toutes les particules arrachées aux versants ne parviennent pas au réseau hydrographique, qui peut subir lui-même des modifications : érosion des berges et du lit ou, au contraire, alluvionnement plus ou moins localisé dans certains biefs. Il y a donc une grande hétérogénéité spatiale de ce qu'on appelle efficacité de l'érosion « *sediment ratio* », due à la grande variété des propriétés des sols et des agents ou des combinaisons d'agents érosifs. On peut néanmoins supposer que ces résultats aussi imparfaits soient-ils, doivent pour le moins être des indicateurs pour permettre une étude comparative de la vulnérabilité des sols à l'érosion.

Les processus d'érosion sont des cycles régressifs de destruction, s'opposant aux cycles pédogénétiques progressifs de formation des sols. L'épaisseur des sols en un lieu sera alors la résultante des deux cycles opposés. Or si l'on considère les résultats sur l'altération des roches, on se rend compte par exemple, qu'il suffit d'une perte de terre de 100 mm en 100 ans pour dépasser la vitesse d'altération de granite en conditions tropicales humides, estimée à 1 m en 20 à 100 000 ans (Leneuf, 1965).

5.2. Variation interannuelle

Les données disponibles sur les transports des matières solides en suspension sont très fragmentaires. Pour aucune station, on ne dispose donc d'une chronique continue suffisamment longue. Toutefois, les observations faites sur des périodes séparées peuvent permettre d'avoir une idée des variations des concentrations et des flux en relation avec les écoulements et les pluies.

5.2.1. Les concentrations

Les bassins versants du Mbam à Goura et celui du Mayo Tsanaga à Bogu sont ceux qui ont fait l'objet du plus grand nombre d'années de mesures ; quatre années pour le Mbam (de 1970 à 1973) et cinq années pour le Mayo Tsanaga (1968 et 1969, 1973, 1985 et 1986).

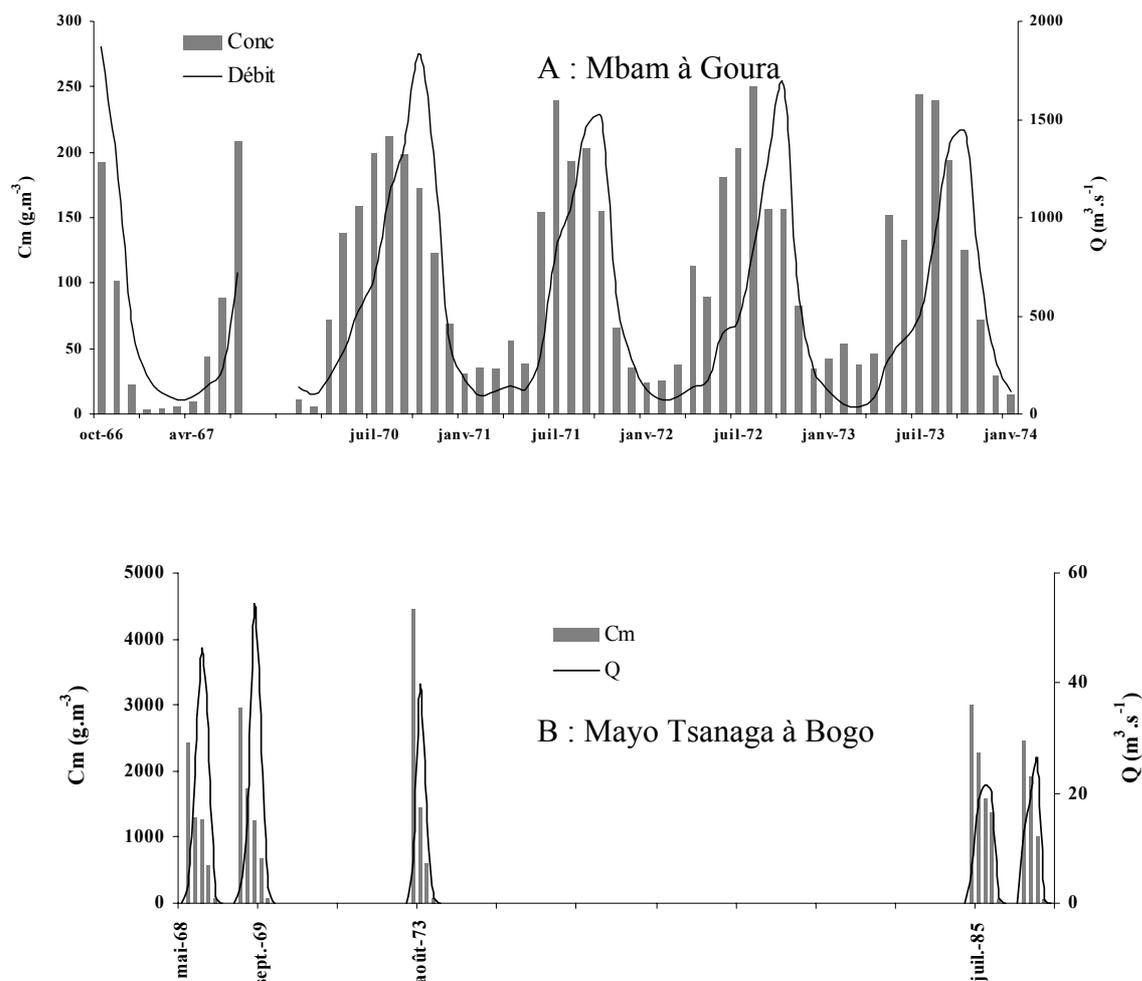


Figure 4.16 : Concentrations (g.m^{-3}), pluies (mm) et débits ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) moyens mensuels sur les bassins versants du Mbam et du Mayo Tsanaga.

Les profils de variations des concentrations moyennes mensuelles, avec les débits (figure 4.16), font apparaître le phénomène bien connu du maximum des concentrations précédant celui des pluies et des débits. Sur le bassin versant du Mbam, aucune évolution temporelle des écoulements ou des concentrations de matières en suspension n'est perceptible sur les quatre années d'observations. En revanche, pour le bassin du Mayo Tsanaga, on observe entre les trois périodes d'observations une diminution des écoulements alors que les concentrations ne varient guère.

5.2.2. Les flux

En ce qui concerne les flux, nous avons cherché à voir si leur évolution allait dans le même sens que celle des concentrations. La figure 4.17 montre tout d'abord, qu'à l'échelle saisonnière, les maximums de flux mensuels coïncident avec ceux des précipitations et des débits. Ce qui atteste de ce que malgré les valeurs élevées de concentrations en début de saison, le moment où l'érosion est la plus active correspond au maximum des pluies et des écoulements.

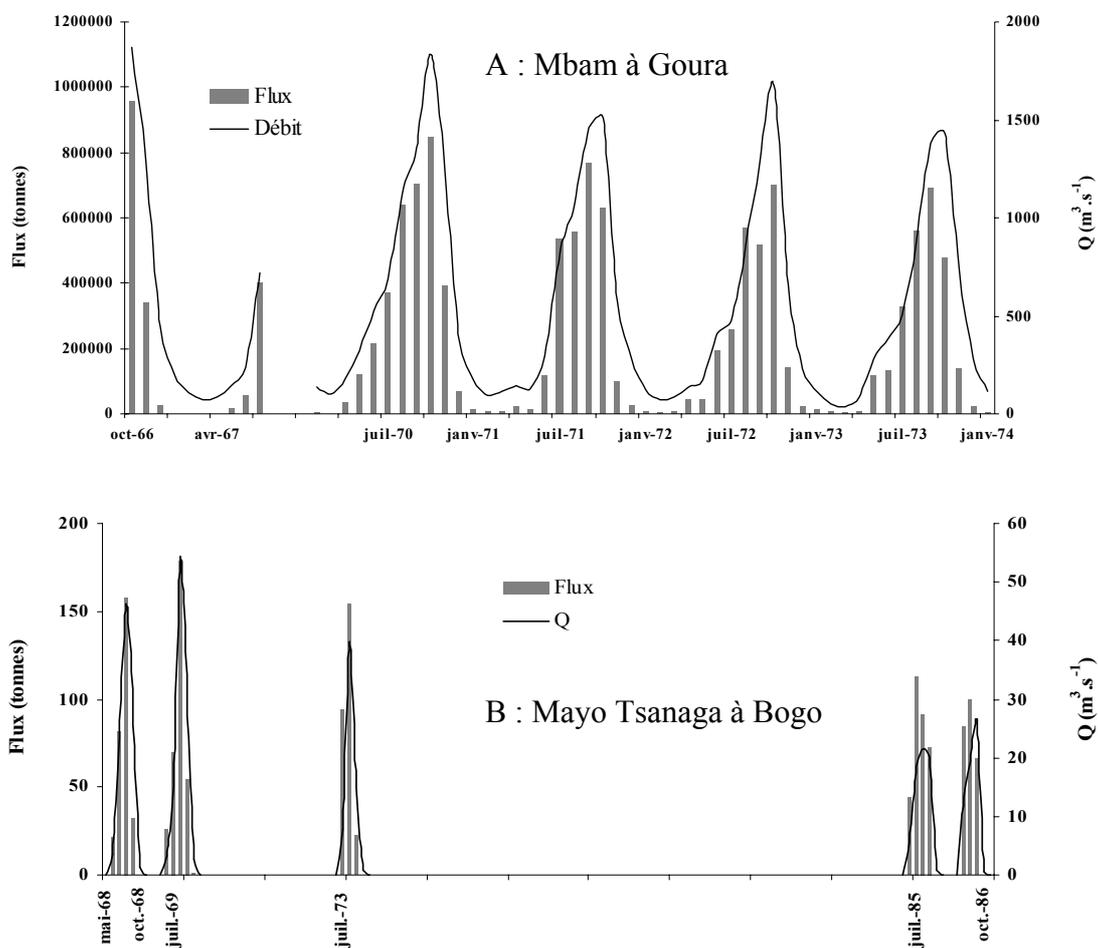


Figure 4.17 : Flux (kg.s^{-1}), pluies (mm) et débits ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) moyens mensuels sur les bassins versants du Mbam et du Mayo Tsanaga.

On peut observer que les flux mensuels sont devenus plus faibles à la station de Bogo sur le Mayo Tsanaga, pour les mesures les plus récentes (1985 et 1986). Ces observations signifieraient que pour les mêmes valeurs de débits, les flux de matières en suspension

diminuent pour des concentrations moyennes mensuelles qui ont peu varié (figure 4.16 B et figure 4.17 B).

Ces variations différentes des concentrations et des flux nous amènent à examiner dans le détail les résultats des cinq campagnes réalisées sur le Mayo Tsanaga, années 1968 et 1969, 1973, 1985 et 1986 (tableau 4.7). Les saisons des pluies 1973 et 1986 ont été marquées par un démarrage tardif. Les premiers écoulements sont observés en mi-juillet. Les modules des années 1973, 1985 et 1986 sont assez identiques et connaissent une baisse d'environ 40 % par rapport à ceux des années 1968 et 1969.

Tableau 4.7 : Bassin du Mayo Tsanaga ; caractéristiques des années hydrologiques 1968, 1969, 1973, 1985 et 1986.

	1968	1969	1973	1985	1986
Pluie moyenne (mm)	884,5	990	753,7	746,6	809,9
Module ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	8,6	8,8	5,3	5,2	5,0
Coefficient d'écoulement (%)	23	20	14	14	14
Date du premier écoulement	12 juin	17 juin	11 juillet	12 juin	16 juillet
Concentration journalière maximum ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	5310 12 juin	4750 17 juin	10500 11 juillet	6325 12 juin	9870 16 juillet
Concentration moyenne annuelle ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	1038	1138	1590	1876	1595
Flux spécifique ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$)	191	214	178	209	163

Sur le plan du bilan annuel des transports solides, les années 1968 et 1969 sont voisines. Malgré des précipitations plus fortes en 1969, le coefficient d'écoulement n'est que de 20 % contre 23 % en 1968. Ceci peut déjà laisser supposer que l'année 1969 a été marquée par d'avantage de petites pluies dites « agricoles », pas très favorables au ruissellement. La saison 1985 qui a commencé plus tôt (12 juin) a enregistré une pluviométrie comparable à celles de 1973 et 1986, avec des coefficients d'écoulements identiques, et connaît une érosion mécanique proche de celle de 1968 et 1969, mais avec une concentration moyenne plus élevée. Ceci laisse présager qu'un autre paramètre est à prendre en compte, pour décrire l'intensité de l'érosion dans ce bassin versant, c'est la date de démarrage de la saison des pluies, car les premières crues sont très chargées quand le démarrage est tardif, ($10,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ en 1973 et $9,87 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ en 1986).

Bien que la pluviométrie de 1969 soit plus élevée que celle de 1968, les quantités de matières transportées sont identiques. A un volume d'écoulement supérieur correspond une concentration moyenne annuelle plus faible et inversement, d'où une dégradation spécifique identique pour les deux années. De même, des hydraulicités semblables en 1985 et 1986 produisent, pour la deuxième année une érosion qui ne représente que 85 % de la première.

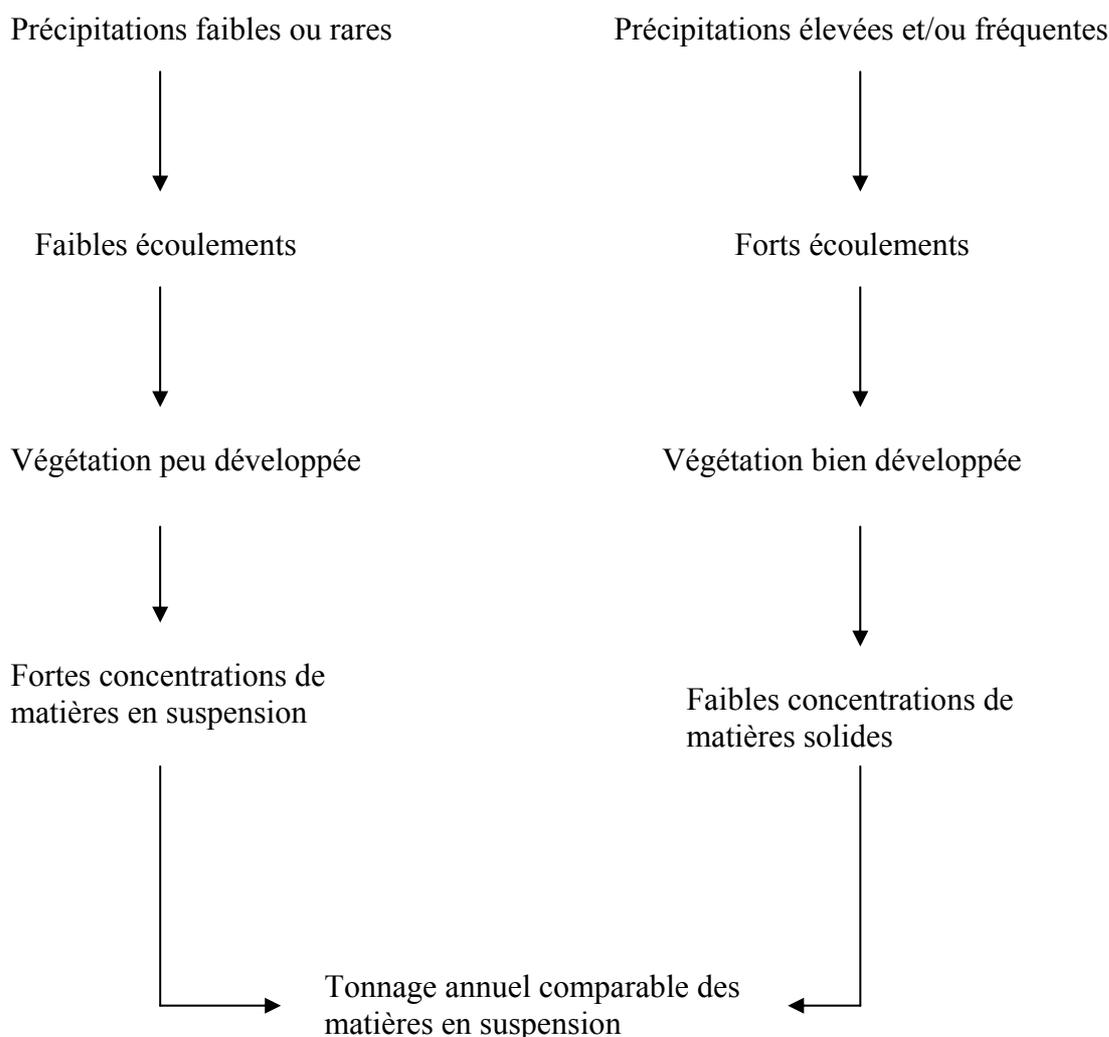


Tableau 4.8 : Schéma décrivant les processus de production des matières en suspension sur le Mayo Tsanaga (Olivry *et al.*, 1974).

Ainsi, dans le bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo, la hauteur annuelle de précipitation et le volume d'eau écoulé n'expliquent pas à eux seuls les transports de matières en suspension. La date de démarrage de la saison des pluies et la répartition des averses au cours de la saison interviennent pour modifier les relations entre les écoulements et les flux de matières. Pour

certaines années, un équilibre semble réalisé dans le processus de l'érosion suivant le schéma proposé par Olivry *et al.* (1974) (tableau 4.8).

Sur le Mbam, à l'exception de 1966/1967, où les mesures de transport solide ont été réalisées sur seulement une partie de l'année, les quatre autres années se situent en période déficitaire. Pour ces années de mesures, le transport des matériaux en suspension évolue dans le même sens que les débits. Ainsi, le cycle 1971/1972 accuse un déficit de 18 % par rapport à l'année précédente et enregistre le même déficit en transport solide. Les années 1972/1973 et 1973/1974 sont sèches (28 % de déficit par rapport à la période humide). Elles enregistrent des hydraulicités et des taux d'érosion identiques (tableau 4.9).

Tableau 4.9 : Mbam à Goura : débits moyens annuels et érosion mécanique.

	1966/1967	1970/1971	1971/1972	1972/1973	1973/1974
Module ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	837	670	549	508	514
Concentration moyenne annuelle ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	105 à 160	158	158	152	150
Erosion ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$)	60 à 90	81	66	59	59

Cette liaison entre les débits et les matériaux transportés sur le Mbam peut s'expliquer d'une part par le régime des précipitations. Les pluies de la région sont de type mousson, continues sur une période assez longue et d'intensité constante. D'autre part, les labours toute l'année maintiennent des sols meubles et mettent ainsi en permanence à la disposition du ruissellement des matériaux à transporter, d'où les concentrations constantes du ruissellement toute la saison des pluies.

6. TRANSPORTS DE MATIERES ET ACTIVITES ANTHROPIQUES

Nous avons dans les paragraphes 4 et 5, présenté de façon assez exhaustive, les facteurs naturels conditionnels de l'érosion et du transport de matières en suspension, aux échelles de temps mensuelle, saisonnière, annuelle et inter-annuelle. Ces facteurs sont pour la plupart liés à l'environnement physique des bassins versants, mais aussi aux conditions climatiques.

L'érosion est un processus naturel qui façonne les paysages. La pression démographique est croissante. Les activités de l'homme contribuent à la transformation du milieu physique des bassins versants : modification du couvert végétal, mise en culture des sols, urbanisation, etc. Il semble que ces modifications tiennent aussi une part importante dans l'évolution du climat. L'essor démographique accroît progressivement la pression de l'homme sur des milieux de plus en plus fragilisés par les conditions climatiques changeant rapidement. De plus, l'inégale répartition du peuplement, liée aux conditions historiques et à l'inégale répartition des ressources, crée de forts contrastes. Les zones de fortes concentrations de la population sont les plus vulnérables.

6.1. Les zones agropastorales

Beaucoup d'auteurs soulignent que « densité de population » et « dégradation des sols » se trouvent très souvent corrélées. L'examen des taux de l'érosion spécifique sur le territoire camerounais (figure 4.14) montre que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les Mayo de l'extrême-nord (érosion comprise entre 200 et 400 t.km⁻².an⁻¹) et dans le bassin du Mbam (érosion comprise entre 60 et 2 000 t.km⁻².an⁻¹). Quelle que soit la taille des bassins versants, on enregistre des taux d'érosion supérieurs à ceux observés dans d'autres bassins de même superficie. Ces cours d'eau drainent respectivement les régions des monts Mandara et les hauts plateaux Bamiléké et Bamoun. Ces régions marquent, de ce fait, des contrastes locaux dans la distribution latitudinale des flux des matières en suspension.

La comparaison des caractéristiques physiques de ces bassins montre (tableau 4.10) qu'il existe de très grandes dissemblances. Les seules convergences remarquables sont leur densité de population et les pentes assez élevées. L'explication la plus vraisemblable des valeurs élevées de dégradation est à rechercher du côté des activités humaines.

Tableau 4.10 : Caractéristiques des bassins versants du Mbam et des monts Mandara.

	Pays Bamiléké et Bamoun	Monts Mandara
Pluviométrie annuelle	2 000 à 3 000 mm	700 à 1 000 mm
Régime climatique	Tropical de montagne	Soudanien d'altitude
Sous-sol	Formations précambriennes (migmatites) et volcaniques (basaltes et syénites)	Massifs et inselbergs granitiques, roches détritiques meubles
Sols	Sols ferrallitiques et sols noirs d'origine volcanique	Sols minéraux bruts et sols peu évolués sur alluvions
Végétation	Formations d'origine anthropique (haies vives et cultures)	steppe à épineux et cultures de graminées
Pentes	Assez fortes	Fortes pentes en amont des bassins versants
Coefficient d'écoulement	32 %	20 %
Écoulement spécifique	17,1 l.s ⁻¹ .km ⁻²	6 l.s ⁻¹ .km ⁻²
Densité de population	100 à 200 habitants.km⁻² (parfois plus)	100 à 200 habitants.km⁻²

Les statistiques de la population (recensements 1966, 1975 et 1987) indiquent que ces régions sont parmi les plus densément peuplées. Mais la densité de la population ne semble pas suffisante à elle seule pour justifier les valeurs d'érosion aussi élevées. La pression démographique en milieu rural s'accompagne d'une généralisation des pratiques culturales intensives. Une étude comparée (Rishirumuhirwa, 1993) décrit des phénomènes identiques sur des pentes densément peuplées où les populations pratiquent des cultures intensives au Burundi, au Rwanda et dans l'Est du Zaïre.

Quelques travaux sur bassins versants expérimentaux ont montré que la mise en culture des sols est un facteur déterminant pour la déstabilisation et le transport des particules terrigènes. Roose (1977) trouve sur le plateau central du Burkina Faso, des valeurs d'érosion spécifique de 2 000 t.km⁻².an⁻¹ pour des champs de coton en culture sèche mécanisée contre 30 t.km⁻².an⁻¹ en zone de savane non cultivée. Guiscafne (1959) obtient, pour trois mois de la saison des pluies, des valeurs très contrastées de 12 000 t.km⁻² sur parcelle nue avec billons dans l'axe de la pente contre 20 t.km⁻² en savane non cultivée, sur les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun.

La comparaison des résultats obtenus sur les bassins versants représentatifs de Mokolo et Mouda (extrême-nord), Risso (Adamaoua), Beleng (hauts plateaux de l'Ouest) a également montré que le phénomène érosif est principalement lié à la mise en culture des sols et aux systèmes culturaux, puis à la couverture végétale et à la nature des sols. Les valeurs faibles de dégradation spécifique (15 à 17 t.km⁻².an⁻¹) obtenues dans la région de Touboro (Risso et Riao) traduisent localement une très faible érosion mécanique sur des petits bassins bien protégés par la savane arborée.

Une réflexion menée par Olivry (1976) dans le but de comprendre le contraste entre l'érosion sur le Mbam (85 t.km⁻².an⁻¹) et la Sanaga (28 t.km⁻².an⁻¹), bassins versants en milieu tropical et aux régimes hydrologiques semblables, a abouti à la conclusion selon laquelle les matières en suspension sur le Mbam sont déterminées par la région montagneuse et volcanique des pays Bamiléké et Bamoun. Bien que ne représentant que 10 % de la superficie du bassin du Mbam (soit 4 000 km²), cette région drainée par la Mifi sud principalement suffit à expliquer la turbidité élevée dans le Mbam.

Il est intéressant de souligner qu'à la station de Bamendjing qui contrôle le bassin versant du Noun supérieur, Nouvelot *et al.* (1971) ont obtenu des concentrations très faibles en matières en suspension. Ce qui leur a permis de supposer que la totalité, ou presque, de la charge solide mobilisée par les affluents de la Monkié serait décantée dans les marais de Bamendjing. D'autre part, en attribuant à la partie du bassin du Mbam qui draine l'Ouest de l'Adamaoua, très peu habitée et de physionomie similaire, une érosion comparable à celle de la Sanaga (28 t.km⁻².an⁻¹), on estime que les plateaux de l'Ouest auraient une dégradation spécifique de 600 t.km⁻².an⁻¹, avec des valeurs envisageables de 2 000 t.km⁻².an⁻¹ sur le bassin de la Mifi sud (figure 4.18).

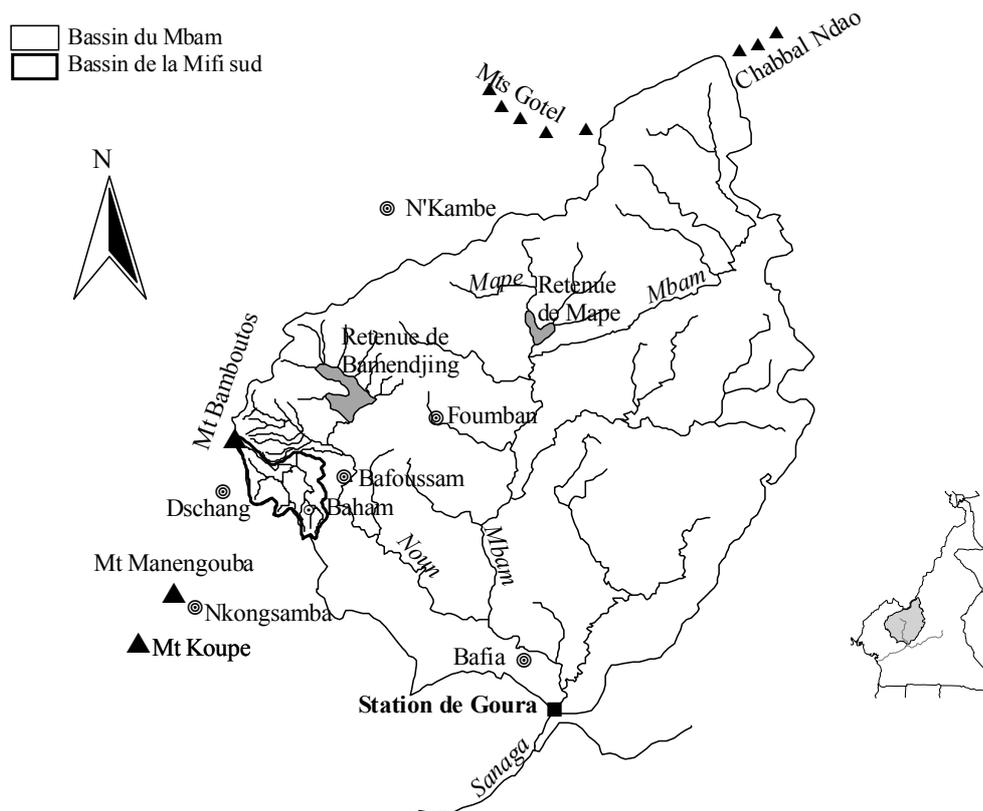


Figure 4.18 : Situation du bassin versant de la Mifi sud, affluent du Noun : Il représente près de 5 % de la superficie du Mbam, et pourtant contribue à élever considérablement la charge du Mbam par rapport à la Sanaga.

6.2. Les aménagements

Face à l'appauvrissement des ressources en eau lié à la sécheresse et aggravé par l'explosion démographique, les populations aménagent des retenues d'eaux de surface. Les projets d'aménagements hydrauliques visent pour la plupart à stocker de l'eau à diverses échelles pour des usages planifiés : production d'hydro-électricité, irrigation des zones agricoles ou adduction d'eau potable. Certains petits aménagements sont aussi réalisés à des fins de conservation de l'eau et de la fertilité des sols. Dans ce deuxième cas, les aménagements ont pour but de protéger des terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement. Qu'ils aient pour but de planifier la gestion de la ressource en eau, d'améliorer la productivité des sols et la stabilité des versants, ces ouvrages retiennent tout ou partie de la charge solide du ruissellement et des conséquences peuvent exister aussi bien en amont qu'en aval.

6.2.1 Les effets en amont (comblement des retenues)

En raison de son relief accidenté et de son réseau hydrographique dense, le Cameroun recèle d'importantes potentialités hydroélectriques et hydroagricoles. Dès 1953, la première centrale hydroélectrique est construite dans la localité d'Edéa. Cette centrale au fil de l'eau avait pour objectif de transformer l'énorme potentiel hydrique de la Sanaga en hydroélectricité. La demande croissante en électricité due à l'essor démographique et au développement industriel, a entraîné la construction de nombreuses autres retenues. Aujourd'hui, 9 retenues sont construites sur l'ensemble du réseau hydrographique camerounais, avec des capacités allant de 0,005 à $8 \times 10^9 \text{ m}^3$ (figure 4.19). Les potentialités de plusieurs autres sites sont étudiées : Kaya sur le Nyong, Mvelé sur le Ntem, Gulli sur la Mentchum et Lom Pangar sur le Lom.

Les données rassemblées sur les transports solides en suspension nous ont permis de voir le risque que représentent ces matériaux pour la longévité des retenues aménagées sur les cours des fleuves et rivières du Cameroun. La masse de sédiments annuellement déposée dans une retenue est obtenue en multipliant le flux spécifique en $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ par la superficie de son bassin versant. Pour le calcul des volumes, une incertitude demeure sur l'évaluation de la densité apparente des sédiments, qui dépend de leur nature, de leur taille et de l'état de consolidation de la vase.

Les densités des sols estimées au Cameroun et en Afrique centrale varient entre 1,3 et 1,6. Certains auteurs ayant travaillé sur ce sujet ont donné quelques valeurs pour les densités des sols. Olivry *et al.* (1974) admettent la valeur de 1,3 pour les sols ferrallitiques du Cameroun. La même valeur est utilisée par Olivry et Hoorelbecke (1975) pour les sédiments provenant du haut bassin du Mayo Tsanaga. Naah (1978) considère 1,37 pour le bassin du Mayo Tsanaga en amont de Minglia (extrême-nord Cameroun). La densité apparente des sols est estimée à 1,5 dans le bassin versant de Mouda (Thebe, 1987). Enfin Nkounkou (1989) utilise le chiffre de 1,6 pour calculer la pénélplanation du bassin du Congo. Grésillon et Reeb (1981) *in* Mietton (1988) supposent une densité de sédiment égale à 1,2 dans les barrages autour de Ouagadougou, Burkina Faso. Pour l'estimation des taux de comblement, la valeur moyenne de 1,4 est admise pour l'ensemble des bassins versants.

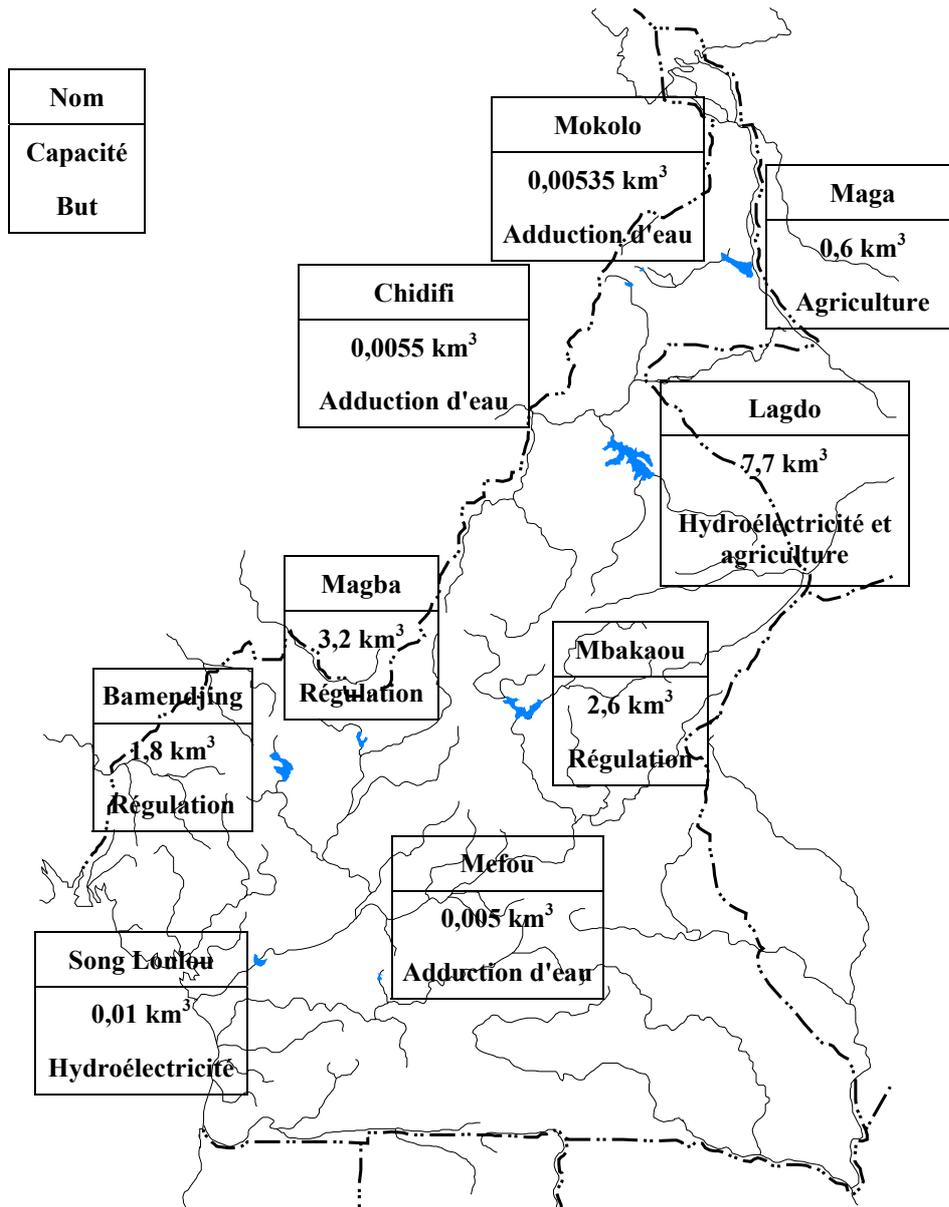


Figure 4.19 : Principaux barrages de retenues d'eau du Cameroun (aménagement différents des lacs naturels).

Par ailleurs, il est admis généralement que les dépôts effectifs dans un barrage de retenue concernent l'ensemble du charriage et environ 2/3 des transports en suspension. Compte tenu du manque de données sur le charriage dans plusieurs fleuves et rivières du Cameroun, et étant donné que ce phénomène semble important en zone soudano-sahélienne (Olivry et Hoorelbecke, 1975 ; Olivry, 1976), on a supposé que l'ensemble des matières en suspension se dépose dans les barrages. Ceci est en réalité exagéré, mais peut peut-être compensé les dépôts des particules charriées non comptabilisés ici. On calcule l'envasement comme le pourcentage annuel de la capacité de chaque retenue (tableau 4.11).

Tableau 4.11 : Principales retenues d'eau et leur taux de comblement.

Cours d'eau	Site	Année de mise en eau	Sup. B. V. (km ²)	Capacité (10 ⁹ de m ³)	Erosion (t.km ⁻² .an ⁻¹)	comblement annuel (%)
Mayo Tsanaga et Boula	Maga	1979	3720	0,6	210	0,15
Mayo Tsanaga	Mokolo	1979	49	0,00535	291	0,2
Bénoué	Lagdo	1983	30480	7,7	85	0,03
Djerem	Mbakaou	1969	20200	2,6	70	0,04
Mape	Magba	1987	4020	3,2	28	0,003
Noun	Bamendjing	1974	2160	1,8	130	0,012
Sanaga	Song Loulou	1980	-	0,01	-	-
Mefou	Usine des eaux	-		0,005	-	-
Mayo Oulo	Chidifi	1985	58	0,0055	85	0,064

Les valeurs sont assez faibles comparativement aux résultats obtenus par ailleurs. De Boissezon (2000) donne de 0,1 à 0,5 % pour les retenues du plateau central au Burkina Faso alors que Descroix *et al.* (2000) situent entre 0,11 % et 0,12 % par an l'envasement du barrage d'El Palmito (nord-ouest du Mexique). En considérant la date de mise en eau des retenues, on pourrait estimer quelle est approximativement aujourd'hui le volume de vase déposé et son influence sur la capacité de la retenue (figure 4.20).

Les matériaux déposés dans les retenues, en intégrant parfois plus de 25 années d'exploitation, sont encore faibles. Ils atteignent à peine 5 % de leur capacité et ne représentent donc pas encore un problème pour l'exploitation de ces barrages. Néanmoins, n'oublions pas que les matériaux charriés peuvent, dans certains cas, représenter un pourcentage considérable des dépôts, notamment dans la partie nord du pays.

Par ailleurs, il est nécessaire, après plus de 25 années d'exploitation, d'envisager des mesures de surveillance au niveau des bassins versants et au niveau des aménagements, pour une approche plus exacte de la sédimentation effective. Ceci afin de comparer les résultats à ceux qui ont servi à leur construction, dans le contexte des changements climatiques et environnementaux, liés ou non aux activités humaines.

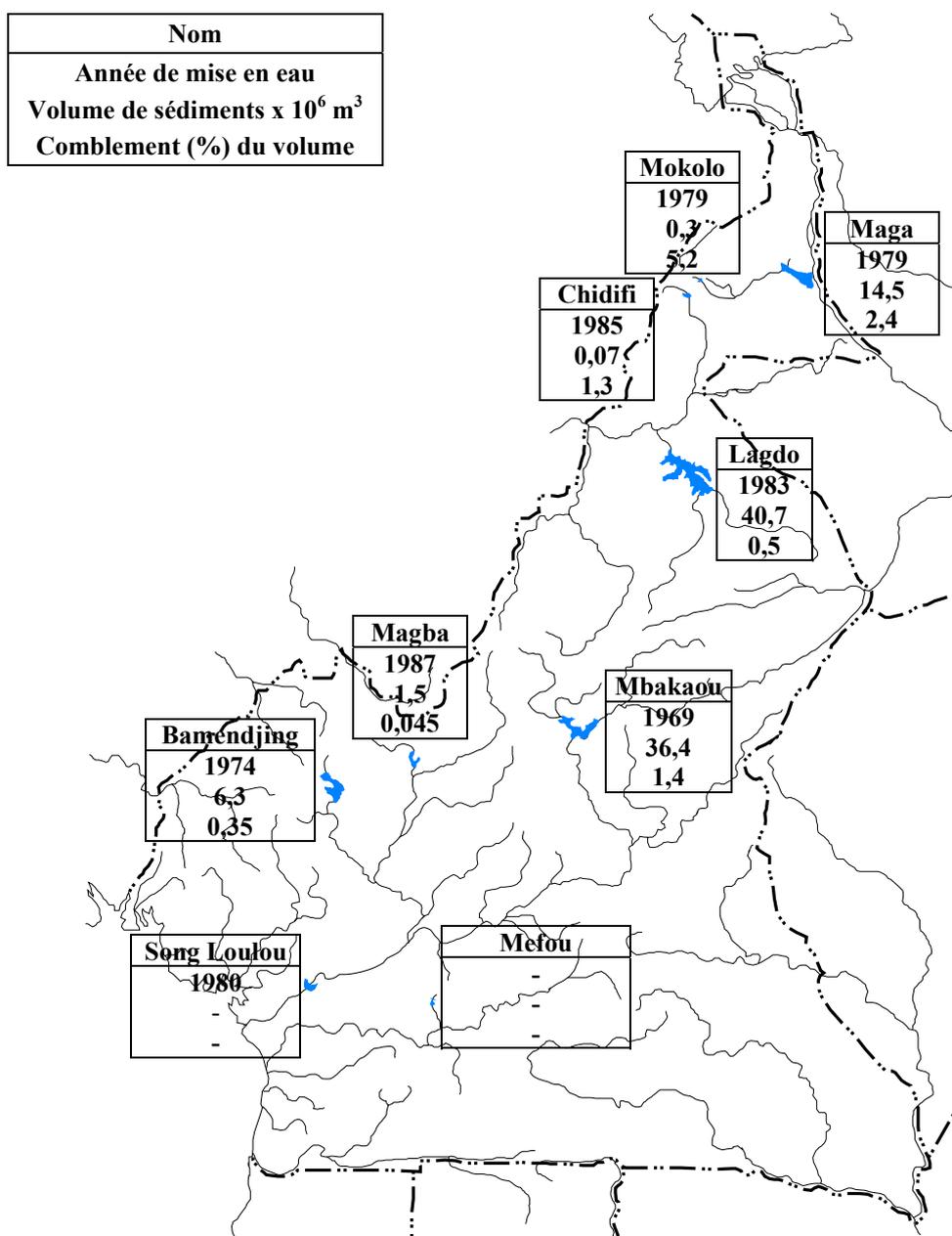


Figure 4.20 : Estimation des volumes de sédiments déposés dans les barrages depuis leur mise en eau à aujourd'hui et des pourcentages de comblement par rapport à leur capacité.

On ne peut à partir de la charge du fleuve Sanaga estimer la sédimentation dans le barrage de la centrale hydroélectrique de Song Loulou. La retenue de Song Loulou ne reçoit qu'une déviation du fleuve. L'ensemble des matériaux issus des sous bassins de ce fleuve se chiffre à $5,8 \cdot 10^6$ tonnes par an. Le Mbam ($42\,300 \text{ km}^2$ à Goura), soutenu par des zones agricoles des plateaux de l'Ouest apporte $85 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ($3,6 \cdot 10^6$ tonnes par an). Les apports de la Sanaga ($77\,000 \text{ km}^2$ à Nachtigal), $28 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sont de l'ordre de $2,2 \cdot 10^6$ tonnes par an. L'estimation

des dépôts des sédiments dans cette retenue reste donc assujéti à la connaissance de la quantité d'eau qui transite effectivement par la retenue. Mais il ne semble pas exclu que la retenue de Song Loulou reçoive des quantités importantes de sédiments qui conduiraient à un risque de défaillance.

6.2.2. Les effets en aval

La rétention des sédiments dans les retenues d'eau aménagées, soustrait une partie de la charge à l'aval du bassin versant. Cette rétention peut être mise en évidence en aval des retenues, comme l'exemple donné à la station de Goyoum, dans le bassin supérieur de Sanaga (figure 4.21).

Quatre campagnes de mesures ont été effectuées à cette station (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998) ; deux en basses eaux et deux en hautes eaux. Pour chaque campagne, des mesures de concentration sont réalisées sur trois verticales : rive droite, milieu et rive gauche, et à différentes hauteurs : près de la surface, à mi-profondeur et près du fond. Les concentrations par verticales sont obtenues en faisant les moyennes arithmétiques.

On constate, pendant les hautes eaux, de plus faibles concentrations sur la rive alimentée par le Djerem (30 à 52 g.m⁻³) que sur celle alimentée par le Lom (52 à 73 g.m⁻³). Or les régimes hydrologiques de ces deux rivières sont identiques. Les bassins versants sont soumis au même climat tropical de transition. La végétation, la couverture géologique et le relief sont tout à fait comparables. Les faibles concentrations en rive droite ne paraissent donc dues qu'à la rétention dans le barrage de Mbakaou d'une partie de la charge solide du Djerem. Cette incidence du barrage apparaît encore nettement entre les flux de matières mesurés à la station de Nachtigal, plus en aval de la station de Goyoum, avant le barrage de Mbakaou, 28 t.km⁻².an⁻¹ (Nouvelot, 1969) et après le barrage, 18 t.km⁻².an⁻¹ (Ndam Ngoupayou, 1997).

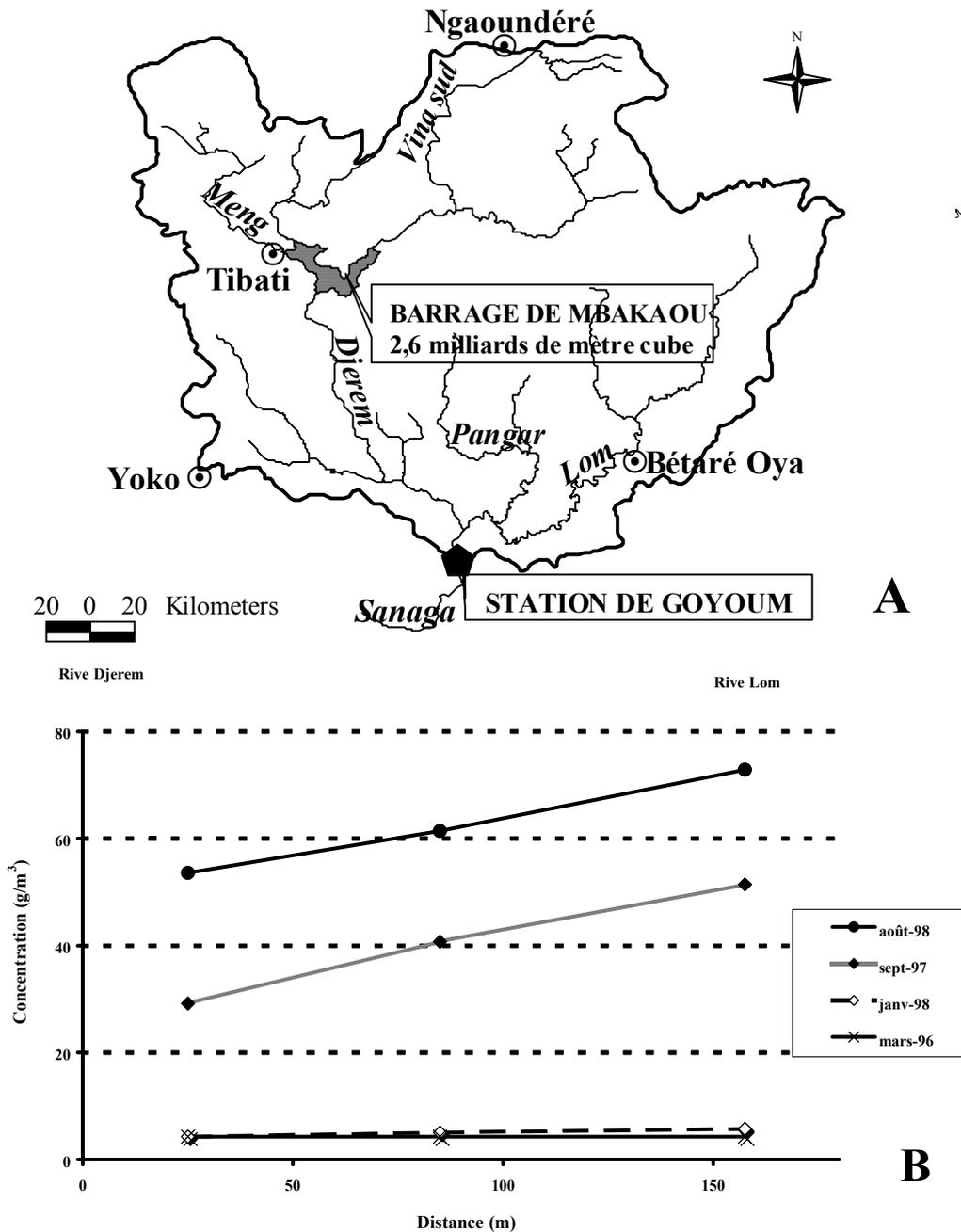


Figure 4.21 : Influence de la retenue de Mbakaou sur le transport solide : bassin versant supérieur de la Sanaga.

En réduisant la charge des cours d'eau, la sédimentation dans les barrages contrarie les apports en éléments nutritifs dans les zones alluviales en aval. Ainsi, les matériaux solides transportés depuis les zones de cultures des peuplements « Kirdi » des Monts Mandara sont évalués en moyenne à $210 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. On y mesure des valeurs maximales pouvant dépasser $1\ 000 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, surtout en début de saison des pluies. Ceci représente en année moyenne

1,6.10⁶ tonnes de matériaux fins qui traversent le cordon dunaire et se répandent dans les « Yaérés » (plaine d'inondation du fleuve Logone). Depuis la fin des années 1970, la retenue de Maga piège environ 0,716 tonnes par an de ces matériaux fins (tableau 4.12), soit l'essentiel de la charge du Mayo Tsanaga et du Mayo Boula. Cette rétention, au delà de son effet de comblement du lac, peut avoir un impact non négligeable sur la baisse de la productivité observée et les transformations socio-économiques et environnementales, dommageables pour la plaine (Liéno *et al.*, 2003).

Tableau 4.12 : Bilan des apports en suspension dans le Yaéré en 10⁶ tonnes.

	Avant barrage 1969-1973	Après barrage 1983-1986	Déficit
Monts Mandara	1,6	0,884	0,716
Fleuve Logone	0,897	0,768	0,129
Total	2,497	1,652	0,84

6.3 Le charriage au Cameroun

Le charriage de fond, constitué par les particules grossières, dont le déplacement s'effectue par roulement sur le fond du lit, n'a pas fait l'objet de nombreuses études. Le protocole de mesure reste difficile à mettre en œuvre dans des grands cours d'eau. Certaines mesures dans des fosses de décantation à l'exutoire des parcelles expérimentales ont cependant été réalisées.

Roose et Jadin (1969), Callède (1974) et Olivry et Hoorelbecke (1975) pensent que le charriage peut être aussi important que le transport en suspension sur des bassins de dimensions réduites et à fortes pentes. Vuillaume (1969) ajoute que les bassins où les sols sont démunis de leur couverture herbacée produisent aussi d'importantes quantités de matériaux charriés. En revanche, il semble que le charriage ne participe que médiocrement aux apports détritiques lorsque le ruissellement est faible.

La plupart des auteurs n'en ont donné que des estimations par rapport aux apports de matières en suspension. Ainsi, Gibbs (1967) indique 2 à 10 % pour l'Amazone et Gac (1980) donne 6 % dans le bassin amont du Chari.

Quelques travaux effectués sur des petits bassins versants de la partie septentrionale du Cameroun (Pelleray, 1957 ; Olivry et Hoorelbecke, 1975), ont permis de calculer des valeurs très élevées de 30 % à 70 % de charriage par rapport aux matières en suspension (tableau 4.13).

Tableau 4.13 : Estimation des valeurs du charriage au Cameroun.

Rivière	Station	Superficie	Suspension (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Charriage (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Pourcentage	Référence
Bénoué	Garoua	64000 km ²	200	140	70 %	(1)
Mayo Tsanaga	Mokolo	49 km ²	250	100	40 %	(2)
Mayo Kereng	Figuil	6,6 ha			65 %	(3)

(1) Olivry (1976) ; (2) Olivry et Hoorelbecke (1975) ; (3) Olivry (1976)

Comparativement aux valeurs assez modestes données par ailleurs, les résultats obtenus au nord Cameroun pour le charriage paraissent élevés. Il faudrait donc dans ces régions en tenir compte pour le comblement des retenues d'eau. Mais le pourcentage des matériaux charriés doit diminuer très rapidement avec la pente et la vitesse des écoulements. Toutefois, dans les régions à relief modéré et plus couvertes par la végétation, il faudrait admettre des valeurs beaucoup plus faibles.

7. COMPARAISONS AVEC LES BASSINS FLUVIAUX D'AFRIQUE TROPICALE

L'étude des flux de matières en suspension sur le territoire camerounais fait ressortir de très grands contrastes spatiaux dus notamment aux changements de la couverture végétale, aux modelés du relief et aux activités humaines. Les résultats gagnent à être comparés à ceux obtenus dans des domaines climatiques comparables, en Afrique (figure 4.22).

Les travaux réalisés dans le bassin versant du fleuve Congo, de 1941 à 1992, donnent des flux de matières en suspension compris entre 9 et 18 t.km⁻².an⁻¹ à la station de Brazzaville (Olivry *et al.*, 1988 ; Moukolo *et al.*, 1993 ; Laraque *et al.*, 1994). Les chiffres compris entre 1,6 et 6 t.km⁻².an⁻¹ sont également indiqués pour les affluents de la rive droite du Congo, de 1988 à

1990 (Moukolo *et al.*, 1993 ; Laraque et Olivry, 1999). Ces valeurs sont comparables à celles obtenues en zone équatoriale camerounaise (tableau 4.6).

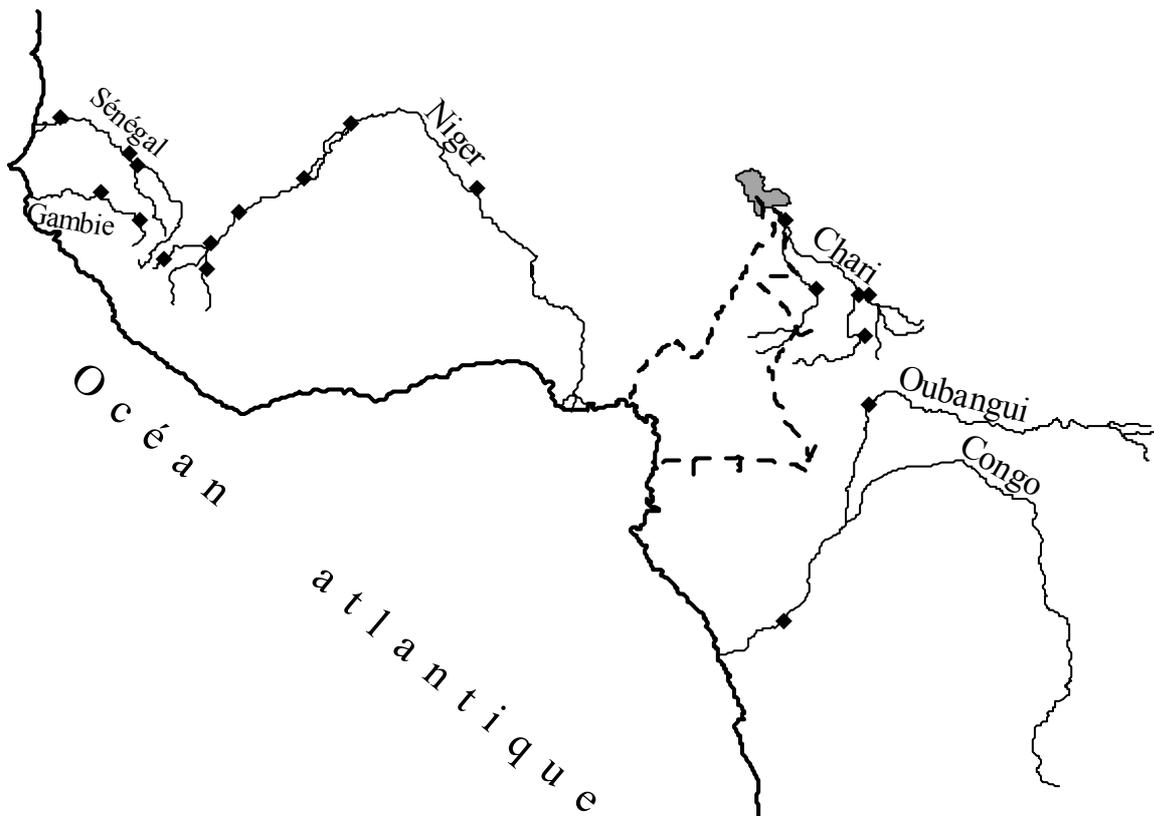


Figure 4.22 : Localisation des bassins versants tropicaux pour lesquels les données sont comparées à celles du Cameroun.

Dans les bassins versants en climat tropical plus sec, les différences avec les résultats obtenus dans des zones climatiques comparables (Niger, Sénégal et Gambie) paraissent plus importantes. Le tableau 4.14 indique pour ces fleuves, des flux de matières particulaires comprises entre 4 et 20 t.km⁻².an⁻¹, beaucoup plus faibles que les chiffres obtenus au Cameroun (tableau 4.6).

Compte tenu des analogies entre les climats, les différences principales avec les autres bassins ouest africains se situeraient au niveau du relief, des types de couverture géologiques et de leur ancienneté.

Tableau 4.14 : Quelques valeurs de flux de matières particulaires sur quelques bassins fluviaux d'Afrique tropicale.

Bassin versant	Station	Superficie x 10 ³ (km ²)	Cycle hydrologique	Débit (m ³ /s)	Flux solide (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Référence
Sénégal	Sénégal à Bakel	218	1979/1987	308	10,3	(1+7)
	Sénégal à Dagana	270	1981/1983	374	10,6	(2)
Gambie	Gambie à Gouloumbou	42	1983/1984	60	2,1	(3)
	Gambie à Kedougou	7,5	1987	59	7,9	(1)
Niger	Niger à Banankoro		1991-1994		6,2	(4)
	Niger à Koulikoro	120	1991-1994		5,2	(4)
	Bani à Douna		1991-1994		3,7	(4)
	Niger à Bamako	117	1990/1992	735	4,9	(5)
	Milo Kankan	9,6	1987	133	21,3	(6)
Lac Tchad	Ouham à Batangafo	44,7	1969-1970	326	9,3	(7)
	Logone à Laï	56,7	1969/1975	418	39,0	(8)
	Logone à Bongor	71,1	1969-1976	448	34,0	(8)
Congo	Oubangui à Bangui	500	1987	2840	5,8	(9)
	Lefini à Mbouambé	13,5	1987-1991	410	9,4	(10)
	Alima à Tchikapika	20,07	1987-1991	590	6,0	(10)
	Congo à Brazzaville	3500	1987/1991	8200	8,7	(10)

* Les valeurs des débits et des flux de MES sont celles mesurées au cours de l'année d'étude ou les moyennes sur des périodes continues.

(1) Kattan *et al.* (1987) ; (2) Gac et Kane (1986) ; (3) Lô (1984) ; (4) Bricquet *et al.* (1997) ; (5) Boeglin et Probst (1996) ; (6) Orange (1992) ; (7) Gac et Pinta (1973) ; (8) Gac (1980) ; (9) Olivry *et al.* (1988) ; (10) Moukolo *et al.* (1993)

Le Cameroun appartient à la zone mobile, entre les cratons ouest africain et du Congo, soumise à de grands bouleversements géotectoniques qui mettent en place des reliefs très accidentés, avec des formations de couverture beaucoup plus jeunes, sur lesquelles l'érosion reste encore intense. Cette structure s'oppose au « vieux » craton ouest africain, longtemps resté stable, sur lequel l'érosion a pénéplané les reliefs, formant en surface des cuirasses plus résistantes.

Plusieurs auteurs ont essayé d'estimer des flux de matières en suspension exportés annuellement dans d'autres régions de l'Afrique. Nous ferons référence à quelques travaux cités notamment par Walling (1984) : au Nigéria voisin, les affluents de Sokoto Rima transportent par an entre 155 et 438 t.km⁻², alors que des chiffres compris entre 219 et 739 t.km⁻² sont envisageables dans le bassin versant de Hadejia-jamaare (Oyebande, 1981) ; Virgo & Munro (1978) proposent 1 680 t.km⁻² pour un bassin éthiopien de 150 km² ; et Temple et Sundbord (1972) quant à eux trouvent pour un bassin versant tanzanien de 156 000 km² une valeur de 109 t.km⁻².an⁻¹.

CONCLUSION

Une quantité importante de données issues des études sur le transport de matières, en suspension a été rassemblée et gérée dans un Système de Gestion de Base de Données (SGBD). Ces données ont été collectées suivant un protocole établi depuis la fin des années 1960 et qui reste encore applicable. Il prévoit une augmentation de la fréquence des mesures quand la taille du bassin est petite et les variations de débits plus importantes. Ces mesures sont très souvent des jaugeages complets (prélèvements en plusieurs points de la section du cours d'eau) ou partiels (prélèvements en un ou plusieurs points représentatifs à la surface). Le matériel de prélèvement et les techniques d'analyse ont évolué dans le sens d'un allègement des quantités d'eau prélevées.

Les concentrations journalières varient énormément au cours de la saison en zone tropicale sèche, passant de plus de 10 000 mg.l⁻¹ en début de saison à 50 mg.l⁻¹ en fin de saison. Les variations sont beaucoup plus faibles en zones plus arrosées et à végétation dense, avec des valeurs comprises entre 50 et 150 mg.l⁻¹ en milieu tropical de montagne et entre 10 et 30 mg.l⁻¹ en milieu équatorial. A l'échelle mensuelle, on observe une rapide augmentation des concentrations en début de saison des pluies jusqu'à une valeur maximale, atteinte avant le maximum des débits, et plus ou moins stable suivant les régions climatiques.

L'analyse spatiale des transports en suspension fait ressortir une augmentation de la concentration moyenne annuelle vers les zones septentrionales. Les quantités de matières transportées ne semblent pas suivre une logique de répartition définie. Plusieurs facteurs tels que la végétation, la mise en culture des sols, la topographie locale et la répartition des pluies

influencent simultanément la charge des cours d'eau. Ainsi, les mesures effectuées à l'exutoire des grands bassins ne représentent qu'un très faible pourcentage de l'érosion locale des sols, car la majeure partie des matériaux érodés peut se déposer en bas des pentes, dans les plaines alluviales et les lacs.

Toutes les études, qu'elles soient à l'échelle locale ou régionale montrent la difficulté à prévoir des valeurs de matières transportées par les écoulements de surface (Walling, 1988), car elles résultent de la combinaison de facteurs variés : surfaces drainées, forme du réseau hydrographique, climat, type de sols, usage des sols. Elles évoluent avec les états de surfaces. Les informations disponibles depuis près de trente ans sur le territoire camerounais, tout en soulignant cette même difficulté, montrent l'intérêt d'un suivi permanent des flux de matières. Au-delà de la recherche des facteurs conditionnels de l'érosion et du transport de matières, la base de données obtenue a été utilisée pour proposer des cartes des risques d'érosion et de la sédimentation dans les retenues. Elles mettent en évidence des zones de plus forte vulnérabilité à l'érosion, liées notamment à la densité de la population. Les transports de matières vers les grands aménagements hydrauliques ne sont pas encore problématiques comme c'est le cas en Afrique du Nord et dans les régions andines, mais des mesures de surveillance devraient être prises constamment, compte tenu des modifications de l'environnement sur les bassins versants, extension des cultures intensives notamment.

CHAPITRE 5 :

ENVIRONNEMENT ET PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS ETUDIES

INTRODUCTION

Des études spatiales ou locales plus détaillées (Suchel, 1987 ; Letouzey, 1968 ; Olivry, 1986 ; Naah, 1990 ; Ntoupka, 1999 ; Triboulet, 1993 ; Yonkeu, 1993) ont mis en évidence, à l'intérieur des grands ensembles définis précédemment, de nombreuses variantes dues notamment à des climats locaux et/ou aux activités anthropiques. Aussi, afin de mieux préciser l'occupation de l'espace et leurs éventuelles influences sur les régimes hydrologiques et des transports de matières, ce chapitre, après avoir présenté les raisons qui ont dicté le choix des bassins à étudier, fera une description plus fine des facteurs conditionnels dans chacun des bassins versants représentatifs, avant de présenter les caractéristiques hydrologiques des rivières qui les drainent.

1. LA LOCALISATION ET LA JUSTIFICATION DU CHOIX DES BASSINS VERSANTS ETUDIÉS

A l'issue de la collecte et de l'inventaire des données hydropluviométriques et de flux de matières solides en suspension, il a fallu précéder au choix des bassins versants qui peuvent se prêter aux objectifs définis. Plusieurs critères sont alors pris en compte, notamment : la représentativité d'une unité climatique (figure 5.1), la longueur des chroniques et la qualité des données, les bassins très peu ou pas aménagés, les études antérieures sur les flux de matières en suspension et l'accessibilité pour des mesures ultérieures.

Beaucoup de stations des bassins du fleuve Logone et du fleuve Bénoué, dans la région soudano-sahélienne du Cameroun, ont des chroniques d'observations longues. Mais seules les stations de Laï, Bongor et N'djaména, en territoire Tchadien, ont fait l'objet d'études de matières solides en suspension au début des années 1970 (Gac, 1980). Parmi les cours d'eau torrentiels des monts Mandara, le Mayo Tsanaga à la station de Bogo présente également une chronique longue d'observations hydrométriques et de matières solides en suspension, observations collectées dans le cadre du réseau national et de grands projets. Ce bassin fait partie de l'ensemble qui avait été retenu pour la définition de la méthodologie d'étude des matières solides en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun (Nouvelot, 1969).

La zone de transition entre le climat tropical et le climat équatorial, est drainée principalement par les affluents du fleuve Sanaga, essentiellement voué à la production d'hydroélectricité. Seul le bassin de Lom à Betare Oya n'est pas influencé par des aménagements. Il a l'avantage d'appartenir au réseau suivi par la SONEL (aujourd'hui AES-sonel). De plus, des mesures de matières solides en suspension y ont été effectuées très récemment (Sigha Nkamdjou *et al.*, 1998). Signalons que les stations de Goura sur le Mbam et de Nachtigal sur la Sanaga ont les chroniques les plus longues de mesures de matières solides en suspension dans la zone tropicale de transition. Mais elles sont aujourd'hui influencées par des barrages de retenues d'eau de Mbakaou sur le Djerem, Bamendjing sur le Noun et Magba sur la Mape.

Les bassins situés en milieu forestier ont été relativement plus observés en MES. Ceux qui présentent les chroniques les plus longues et de bonne qualité sont le Ntem à Ngoazik et à Nyabessan, et la Ngoko à Mouloundou. Ce dernier bassin a une chronique de débits liquides très limitée. Le bassin du Ntem à Ngoazik est retenu ici pour la bonne accessibilité. De plus une bonne relation linéaire existe entre les observations des deux stations, Ngoazik et Nyabessan.

Le Fleuve Nyong à Mbalmayo ne présente pas un régime typiquement équatorial. Il a l'avantage d'une excellente accessibilité. Il y a de bonnes chroniques de débits et de matières solides en suspension obtenues dans le cadre des programmes DYLAT, puis CAMPUS. Comme, un grand nombre d'agglomérations du Sud Cameroun (Abong-Mbang, Ayos, Akonolinga, Mbalmayo) sont situées à l'intérieur de ce bassin, il pourra présenter un intérêt pour l'analyse des impacts anthropiques sur les écoulements et les transports de matières.

Le régime du climat côtier camerounais, dans ses deux composantes Nord et Sud, n'ont pas encore fait l'objet d'étude en matières solides en suspension, d'où l'intérêt qui leur est accordé dans cette étude. Les bassins de la Kienke à Kribi et du Mungo à Mundame ont été retenus (respectivement pour leurs climats côtiers Sud et Nord) pour les bonnes chroniques de débits liquides qui y sont disponibles. Les résultats des quelques analyses chimiques que l'on effectuera pourront servir d'éléments de comparaison avec les études antérieures faites dans le bassin du Mungo (Olivry et Naah, 1978).

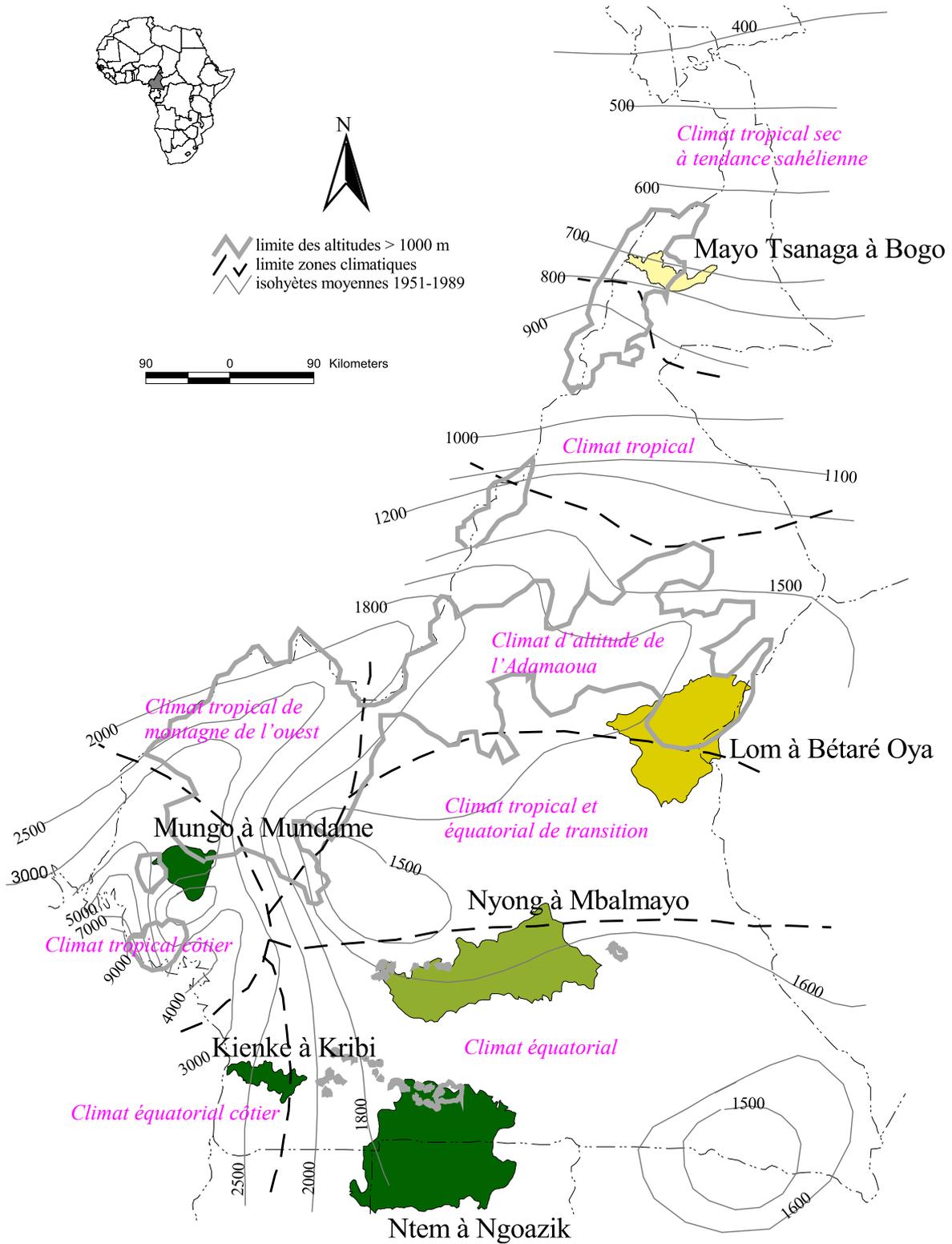


Figure 5.1 : Situation des bassins versants représentatifs étudiés par rapport aux principales zones climatiques.

2. LES CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET FACTEURS CONDITIONNELS DES ECOULEMENTS SUR LES BASSINS ETUDIES

Les caractéristiques morphométriques des six bassins versants étudiés sont regroupées dans le tableau 5.1. La carte détaillée de chacun des bassins versants étudiés est présentée au chapitre 8 de ce mémoire.

Tableau 5.1 : Caractéristiques morphométriques des bassins étudiés.

Nom de bassin	Mayos Tsanaga à Bogo	Lom à Betare Oya	Nyong à Mbalmayo	Ntem à Ngoazik	Kienke à Kribi	Mungo à Mudame
Superficie (km ²)	1 535	11 100	13 555	18 100	1 435	2 420
Périmètre (km)	246	430	570	550	190	200
Indice de compacité (Kc)	1,76	1,15	1,37	1,14	1,40	1,14
Longueur rectangle éq. (km)	108	128	224	161	76	59
Largeur rectangle éq. (km)	14	86,6	61	112	19	41
Altitude max. (m)	1436	1200	1225	1200	1022	
Altitude exutoire (m)	337	662	634	535	10	17
Indice global de pente (m/km)	3,91	9,48	0,41	0,48	2,50	21,7
Indice de pente de Roche	0,074	0,061	0,0255	0,0271	0,053	0,159

2.1. Le bassin versant sub-sahélien (Mayo Tsanaga)

L'extrême-Nord Cameroun, dans ses trois principaux compartiments géomorphologiques (les montagnes à l'Ouest, la plaine centrale de Diamaré, la plaine d'inondation au Nord-ouest), soumis aux rudes conditions climatiques et à un grand essor démographique, a fait l'objet de nombreux travaux. Le bassin du Mayo Tsanaga est assez connu sur le plan de l'occupation de l'espace. Sa description prendra alors ici une place de choix.

Situé dans la région de Diamaré, le bassin est allongé en forme de croissant dans le sens Est-Ouest, entre les centres de Bogo (Est) et de Mokolo (Ouest). Il peut être divisé du point de vue morphologique en trois parties. Le bassin amont, de Mokolo à Minglia (45 % de la superficie), est caractérisé par la présence des massifs montagneux, culminant souvent au delà de 1 000 m et séparés par des plateaux de 800 à 1 000 m. Ces massifs sont coiffés, à la

frontière camerouno-nigériane, par la chaîne des monts Mandara dans laquelle naissent la plupart des « Mayos » (cours d'eau temporaire) qui drainent la région, dont le Mayo Tsanaga. Entre Minglia et Maroua, le Mayo traverse la plaine de Diamaré (35 % de la superficie du bassin), de pente plus modérée. Ici, le relief est constitué d'ensembles de glacis et de plaines de piémont et alluviales d'où émergent parfois des pitons rocheux isolés. Mais ce sont surtout les fortes dénivellations du relief au-dessus des plaines avoisinantes et l'ampleur des dénivellations qui marquent le paysage dans ces deux premières parties. Entre Maroua et Bogo, le paysage est assez plat et monotone.

A la diversification du paysage correspond une diversification de la couverture pédologique (Segalen, 1962 ; Segalen et Valerie 1963). Dans le bassin supérieur, on trouve un fort pourcentage de roche-mère non altérée, séparée par des arènes détritiques, ainsi que des lithosols peu évolués, pauvres en argile et en matière organique. Ces sols sont essentiellement sableux (70 %) avec de 25 % à 30 % de gravier, mal protégés contre l'érosion. Dans la plaine de Diamaré, les sols de piémont sont dérivés des matériaux meubles (alluvions ou pédiments). Ce sont soit des vertisols évolués argilo-calcaires ou non et légèrement sableux, soit des sols gris sub-arides en début d'évolution, tendant vers des sols halomorphes. Ces sols sont mal drainés et peu perméables. Dans l'ensemble il s'agit partout des sols sableux à la même texture grossière qui manquent de matière organique et souffrent des périodes de sécheresse lors de l'arrêt des pluies, car ils n'ont qu'une faible rétention en eau. Mais l'originalité pédologique des plaines c'est la présence d'immenses étendues d'argiles noires, appelées « Karal » en langue locale, très planes et dénudées de toute végétation, et cultivées en mil repiqué en début de saison sèche, du fait de leur capacité de rétention en eau élevée.

Parallèlement à l'éventail de sols disposés sur les collines et les piémonts, Letouzey (1968) met en évidence une gamme de formations de végétation caractéristiques. Sur les massifs montagneux, il n'existe plus de couverture végétale que l'on puisse encore caractériser du stade primaire, à part une végétation d'arbustes rabougris sur les plus hauts sommets. Dans les plaines, le couvert végétal est affecté partout par la pression démographique. Seuls quelques bosquets sacrés témoignent de l'existence ancienne d'une forêt sèche de type soudanien, qui a été remplacée, principalement sous l'influence de l'homme, par une végétation sub-sahélienne (photo 5.1), en équilibre avec les facteurs récurrents tels que le feu, le pâturage et la coupe de bois (Ntoukpa, 1999). Les massifs, piémonts et plaines présentent généralement des paysages culturels parsemés de parcs boisés d'arbres tels que *Acacia*, *Balatines*, le grand caïlcédrat et

le tamarinier, souvent en peuplements denses, adaptés aux caractéristiques des sols. Certaines formations reliques telles que le palmier doum (*Hyphaene thebaïca*) (Boutrais, 1973) sont des témoins d'un paléoclimat récent plus aride que le climat actuel.



Photo 5.1 : végétation sub-sahélienne de la plaine de Diamaré (bassin versant du Mayo Tsanaga) (cliché Liéno, juillet 2002).

2.1.1 L'occupation de l'espace

Le peuplement de l'Extrême Nord Cameroun a subi de nombreuses mutations socio-économiques depuis le début des années 1960 (Seignobos, 1982 ; Boutrais, 1973). Les habitants des zones très peuplées de montagnes, pratiquaient depuis longtemps une agriculture intensive de saison des pluies en utilisant de façon remarquable les principes de conservation de l'eau et des sols. Ils avaient alors transformé les flancs des montagnes en des successions de terrasses en gradins soutenues par des cordons pierreux, une pratique efficace de conservation de la fertilité des sols et de lutte anti-érosive. Les plaines et les plateaux étaient réservés à l'élevage avec une pratique des feux de brousse associés à des cultures vivrières de fin de saison des pluies, dans les zones inondables et les bas-fonds.

Depuis les années 1960, l'explosion démographique touche la région. La densité moyenne de la population y est estimée à 62 habitants/km² en 1976 (Anonyme, 1978). Ce chiffre serait passé à 89 habitants/km² en 1987 et une projection pour l'année 2000 donnait 120 habitants/km² (Anonyme, 1990). Les besoins monétaires croissants ont poussé les populations des montagnes à se rapprocher des zones urbaines et des plaines pour y développer des cultures spéculatives (coton en particulier). On a assisté alors à une désorganisation de la gestion traditionnelle de l'espace rural. Cela a entraîné l'abandon des terroirs montagnards qui se sont détériorés progressivement à cause de l'érosion et d'une pression démographique accrue dans les plaines, qui a entraîné la surexploitation des savanes arborées.

En début de saison des pluies, les paysages sont essentiellement cultureux et on distingue alternativement, sur des sols encore cultivables, des carrés de coton et de mil principalement (photo 5.2), piquetés des arbres de parc. En 1989, les superficies cultivées étaient supérieures à 35 % (CBLT, 2000). Elle pourrait dépasser 45 % en 2003 (près de 700 km²). Par ailleurs, en 1987, le cheptel estimé à 262 118 bêtes disposait de 650 000 ha soit 7,2 % de superficie pour pâturer.

De grandes surfaces sont dénudées par le surpâturage et le défrichement. Les sols dépourvus de toute protection végétale sont alors soumis à d'intenses transformations : incrustation, érosion, etc. Il se forme de ce fait de nouvelles surfaces non cultivables, appelées « *Hardé* » en langue locale, issues de la dégradation des vertisols par induration de la pellicule superficielle qui devient imperméable (Seiny-Boukar et Pontanier, 1993) (photo 5.3). Ce phénomène entraîne un ruissellement important des précipitations par rapport au ruissellement sur les vertisols non dégradés ; cela se manifeste aux exutoires des bassins versants par une crue bimodale, même pour des averses ayant une seule pointe (Thebe, 1987). Triboulet (1993) a montré, en analysant les images satellitaires, que ces surfaces occupaient 5,5 % des superficies étudiées, soit environ 85 km² du bassin de Mayo Tsanaga.



Photo 5.2 : Paysage culturel de la plaine de Diamaré en début de saison des pluies ; même les cultures ne protègent pas efficacement le sol contre l'érosion (*cliché Liéno, septembre 2002*).



Photo 5.3 : Reboisement d'un sol « *Hardé* » dans la plaine de Diamaré. Noter les fosses creusées pour percer la pellicule superficielle imperméable, avec anneaux ouverts vers l'amont, a fin d'intercepter l'eau du ruissellement au pied des plants (*cliché Harmand J. M., 1993*).

Face à cette dégradation de l'environnement, plusieurs actions ont été entreprises dans le sens de la protection des formations végétales et la réhabilitation des sols dégradés « *Hardé* ». Il s'en est suivi alors l'identification et/ou la création de formations végétales dites domaniales (réserves et périmètres de reboisement) dont les principales (tableau 5.2) couvrent un peu plus de 1 % du bassin versant du Mayo Tsanaga soit environ 15 km².

Concernant les aménagements sur ce bassin, en 1979, sur le haut bassin de cette rivière, dans la localité de Douvar, a été mise en eau une retenue d'une capacité de 5,35 millions de m³, qui contrôle un sous bassin de 49 km². Ce barrage n'a pas d'influence significative sur les flux liquides transitant à Bogo car il ne retient en année moyenne que 3×10^{-6} % du volume moyen écoulé sur le bassin versant. Par contre son taux de rétention est de l'ordre de 4 % pour les matières en suspension. Ce qui n'est pas négligeable.

Tableau 5.2 : Différentes formations forestières mises en défens dans le bassin versant du Mayo Tsanaga (Anonyme (2003)).

Aires protégée	Nature	Superficie (ha)	Observations
Zamaï	Réserve forestière	500	Identifiée en 1947, sa superficie était estimée à 1 000 ha. Plus de la moitié a été détruite et remplacée par les champs de cultures
Biskanai	Réserve forestière	300	On estime que le tiers de la superficie a été envahie par les populations
Mokyo	Périmètre de reboisement	1 000	Identifiée en 1982, sa superficie et sa composition floristique ne cesse de diminuer
Mayo Ferengo	Périmètre de reboisement	50	Reboisé de 1970 en 1975, il subit une forte pression des populations
Mayo Ibbé	Périmètre de reboisement	50	Reboisé de 1970 en 1975, il subit une forte pression des populations
Plateau centre Méri	Périmètre de reboisement	2	Reboisé de 1970 en 1972, il subit une forte pression des populations
Balda (Bogo)	Périmètre de reboisement	2	
Lycée de Bogo	Périmètre de reboisement	2	
Total		1906	Soit 1,23 % de la superficie du bassin de Mayo Tsanaga

2.1.2. Le relief et l'hydrographie

Le relief du Mayo Tsanaga suit l'allure de la plaine de Diamaré en direction de la plaine du lac Tchad. Il est néanmoins assez fort sur les versants des monts Mandara où il prend sa source à une altitude de 910 m environ (figure 5.2). Dans cette partie amont du bassin, le Mayo Tsanaga et ses affluents dont le principal et Mayo Ndjouha présentent des pentes supérieures à 0,5 %.

Après avoir franchi le massif montagneux Nord-Sud, à la sortie de la plaine de Gazwa, la rivière rentre dans son bassin moyen. C'est alors la plaine de Diamaré qui est drainée également par le Mayo Kalliao, affluent le plus important du Mayo Tsanaga et qui le rejoint à hauteur de Maroua, et le Mayo Boula. Les deux rivières ont des pentes voisines de 0,3 %. A partir de Maroua et jusqu'à Bogo, le bassin inférieur du Mayo Tsanaga se caractérise par une pente assez faible (0,15 %). Le réseau hydrographique s'y dégrade progressivement et le Mayo inonde les plaines environnantes. Il disparaît dans la plaine d'inondation du fleuve Logone après avoir traversé le cordon sableux Limani-Yagoua, admis comme extrême limite d'un ancien lac tchadien quaternaire dont il marque le rivage (Pias, 1971). Les caractéristiques de forme du bassin versant sont présentées dans le tableau 5.1.

2.2. Le bassin versant tropical de transition (Lom)

2.2.1. L'occupation de l'espace

Le bassin du Lom à Betare Oya est situé sur le rebord méridional Est du plateau de l'Adamaoua, près de la frontière avec la République Centrafricaine. La limite nord du bassin atteint 1 200 m d'altitude. Mais les pentes assez élevées (tableau 5.1) font que l'on atteint la limite sud du bassin, à 600 m d'altitude environ, en moins de 100 km.

Les sols sont ferrallitiques sur la majeure partie du bassin. Mais les structures de ces sols ferrallitiques varient suivant la pente, les conditions climatiques locales, la nature du substratum et le degré de maturité. Ces sols peuvent aussi présenter des textures, des compositions minéralogiques et des couleurs différentes.

Le bassin du Lom est situé dans la partie nord de la bande de transition qui marque, entre 5° et 7° N, le passage entre les formations forestières et les savanes. La végétation est constituée essentiellement de la savane arbustive soudano-guinéenne qui se rattache aux zones phytogéographiques définies au Cameroun (Letouzey, 1958). Les îlots forestiers disparaissent à mesure que l'on remonte vers le nord, remplacés par de vastes savanes herbeuses, souvent d'origine anthropique (élevage et feu de brousse), ou des prairies à graminées avec des arbres ou arbustes disséminés (photo 5.4). Quelques espèces ligneuses de forêts plus méridionales subsistent encore dans les galeries forestières le long des cours d'eau.



Photo 5.4 : Savanes du plateau de l'Adamaoua, bassin versant du Lom (cliché Liéno, septembre 2002).

Le peuplement rural se répartit généralement dans des petits villages de 100 à 150 habitants, le long des grands axes routiers, surtout entre Garoua Boulai, Meiganga et Ngaoundéré. Plus à l'intérieur, les villages sont de moindre importance et souvent réduits à quelques cases. La densité de la population est de l'ordre de 7 habitants au kilomètre carré. Mais le taux de croissance annuelle est estimé à 3,1 %. Plus de 60 % de la population pratique l'agriculture. Très souvent le petit élevage y est associé. Mais on trouve aussi des éleveurs de bétail (Foulbé).

2.2.2. Le relief et l'hydrographie

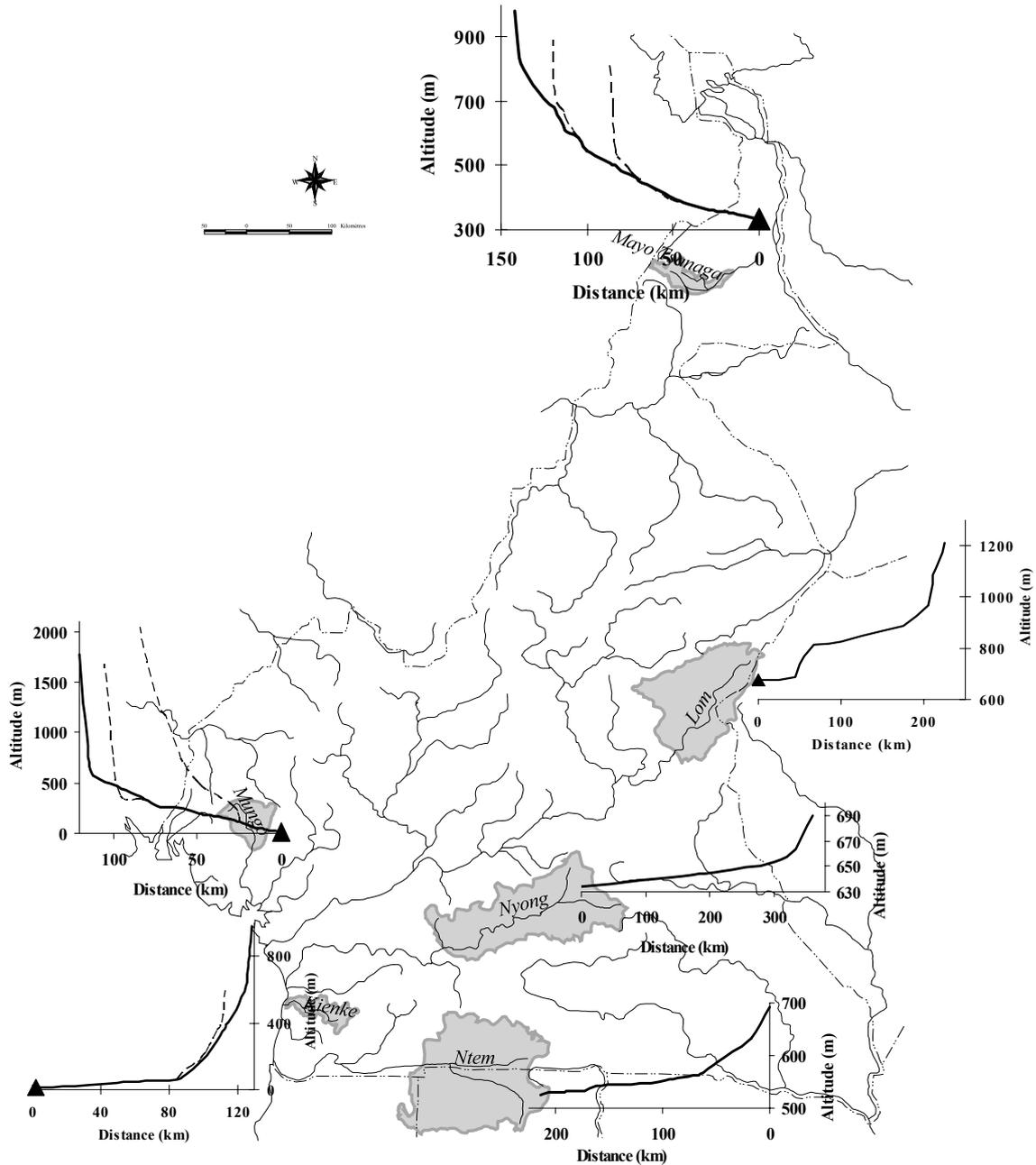


Figure 5.2 : Profil en long des bassins étudiés.

Le Lom prend sa source sur la bordure sud-Est de l'Adamaoua en République Centrafricaine à une altitude d'environ 1 200 m. Il présente un réseau en « arête de poisson ». Après avoir franchi le bord de l'Adamaoua, à une altitude d'environ 900 m, sa pente décroît considérablement pour atteindre l'altitude du plateau Centre-Sud camerounais (figure 5.2).

Cet adoucissement de la pente s'achève avec les chutes de Bangel, où le cours d'eau est rejoint en rive droite par le Mba, son affluent le plus important, 15 km en amont de la station de jaugeage de Bétaré Oya. Les sites de Litala (30 km en amont) et de Tourake, presque au droit de la station de Betare Oya, constituent de petites cuvettes dans lesquelles le Lom forme des méandres. Ils présenteraient des possibilités de stockage supérieures à 1 milliard de m³ chacun.

2.3. Les bassins versants forestiers (Ntem, Kienke, Nyong et Mungo)

2.3.1. L'occupation de l'espace



Photo 5.5 : La forêt du bassin versant du Mungo (cliché Mahé, août 2002).

Les bassins versants étudiés ont comme caractéristique commune essentielle une couverture dite de forêt dense humide (photo 5.5). Ce vaste ensemble forestier s'étend au sud vers la cuvette congolaise. Il est limité au Cameroun, entre le 4^e et le 5^e parallèle par la zone post-forestière (mosaïques de forêts secondaires et de savanes périforestières). A l'ouest, vers la frontière nigériane, sa limite septentrionale remonte beaucoup plus en latitude, jusqu'à la région de Manfé (bassin versant du fleuve Niger). Cette forêt couvre 3 des 8 régions

climatiques du Cameroun : le climat équatorial, le climat équatorial côtier sud et le climat tropical côtier.

L'apparence immuable et monotone de cette « grande forêt » ne peut toutefois cacher des différences physiologiques et floristiques. Il est possible de distinguer plusieurs sous-ensembles, sous influence climatique, altitudinale et surtout anthropique variées (figure 5.3). Comme l'abattage industriel est en cours depuis plus de 30 ans au Cameroun, il ne reste que peu de grandes forêts équatoriales continues et intactes.

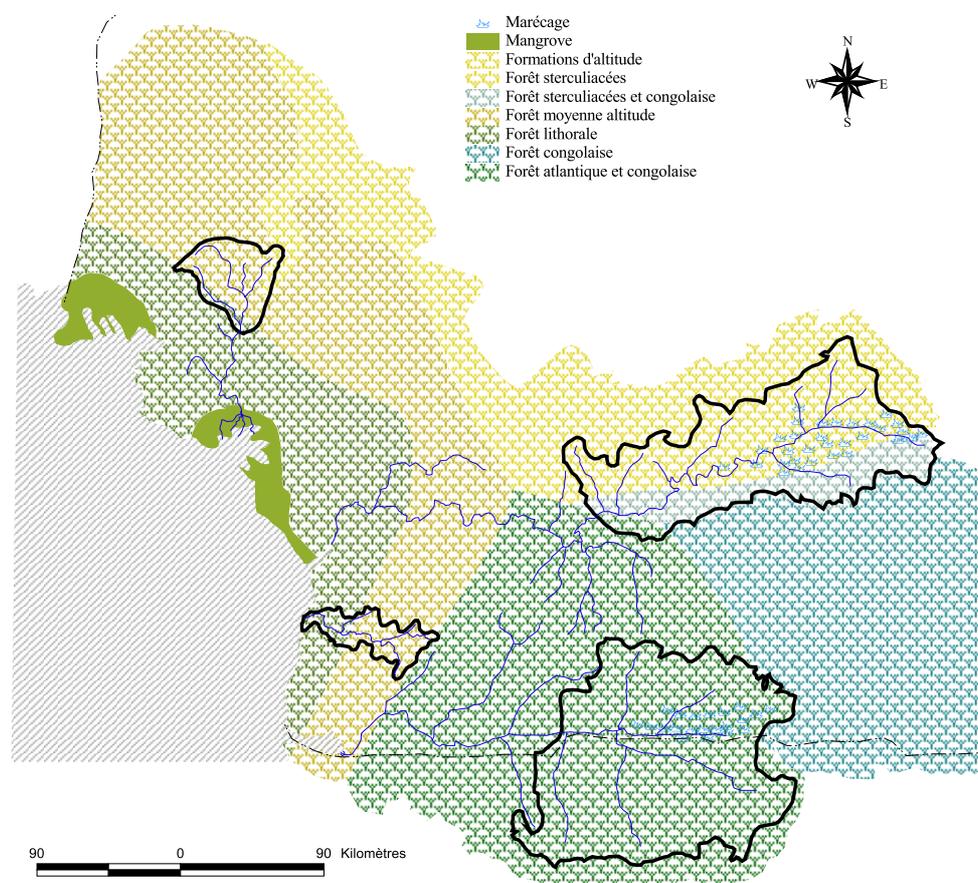


Figure 5.3 : Esquisse phytogéographique des bassins forestiers (In Olivry, 1986, modifiée).

La mangrove, forêt ombrophile sous influence essentiellement maritime, occupe le bassin sédimentaire de Douala et la partie nord-ouest du rivage, où elle se poursuit au Nigeria. Elle n'intéresse aucun des bassins versants étudiés. Du rivage vers le continent, la mangrove est suivie par la forêt littorale ou forêt ombrophile de basse altitude, puis par la forêt ombrophile atlantique de moyenne altitude. Ces trois faciès forment un arc pratiquement parallèle au rivage. Cet arc constitue la forêt « toujours verte » appelée « *moist evergreen rain forest* »

pour signifier le caractère très pluvieux de cette zone. Elle couvre l'ensemble des petits bassins versants côtiers dont celui de la Kienke et du Mungo.

Au nord de Douala, pratiquement à la limite Est et au Sud/Sud-Est du bassin du Mungo, de grandes zones de plantations industrielles (palmeraies, bananeraies, hévéas) ont particulièrement meurtri la forêt. Ces zones de plantations industrielles commencent sur le littoral avec des vastes plantations de cultures d'hévéa appartenant à la « Cameroons Development Corporation », société nationale exploitant les grandes plantations de la région du mont Cameroun (en aval de la station d'étude), puis, se poursuivent vers Penja, Loum et Nkongsamba par les bananeraies. Elles s'appuient à l'Est sur l'alignement des monts Koupé et Manengouba, s'étirent vers le haut bassin du Nkam et les hauts plateaux de l'ouest Cameroun. Le bassin du Mungo à Mundame, coïncé à l'Ouest de l'alignement des monts Koupé et Manengouba, est très peu anthropisé avec seulement quelques petites agglomérations le long des axes routiers entre la ville de Koumba et de Manfé, d'une part, et de Loum, d'autre part.

Le bassin du Ntem en particulier à la station d'étude est couvert par la forêt atlantique congolaise, alors que celui du Nyong en amont de la station de Mbalmayo présente encore une phytogéographie assez diversifiée, sous influence beaucoup plus anthropique et de la proximité des formations tropicales.

Ces formations sont regroupées sous le faciès de forêt dense humide semi-caducifoliée qui a comme caractéristique principale la caducité des feuillages de la plupart des grandes espèces ligneuses. C'est la principale région de plantations de cacao du Cameroun et, autour des zones de peuplement (Yaoundé, Mbalmayo, Sangmélina, Ebolowa), des formations post-culturelles remplacent en plusieurs endroits des « vieilles cacaoyères » abandonnées mais aussi ce qui reste de la forêt originelle.

Un aspect typique du paysage du cours supérieur du Nyong est l'importante zone marécageuse qui occupe le lit majeur et à travers laquelle le fleuve serpente en larges sinuosités décrivant de faux méandres. Ce que l'on appelle "prairies flottantes" ou "bourgoutières" sont constituées, en réalité, de graminées enracinées au fond de l'eau, prolongées de longues tiges qui flottent horizontalement à la surface de l'eau sur plusieurs mètres avant de se redresser. Le développement des parties verticales des tiges conduit à un enchevêtrement végétal formant

un véritable matelas flottant dont l'épaisseur peut atteindre la profondeur du fleuve. Le Nyong coule en chenal sinueux de quelques dizaines de mètres de large dans cette vaste prairie (Photo 5.6) qui peut atteindre par endroit une largeur de 3 km.



Photo 5.6 : Couloir sinueux du Nyong dans la prairie marécageuse en amont de la station de Mbalmayo (cliché Liéno, août 2002).

Le processus majeur dans la formation des sols est la ferrallitisation suivi du cuirassement des oxydes et hydroxydes. Ces sols sont individualisés en deux grands ensembles (figure 5.4). Le climat semble jouer un rôle important, puis le modelé topographique et le substratum. Les sols jaunes forment une bande qui suit le littoral. Ils sont liés principalement à l'abondance de la pluviométrie. Ils présentent une texture plus sableuse sur roches sédimentaires et plus argileuse sur roches métamorphiques et volcaniques. Les sols rouges sont plus continentaux et sont couverts par la forêt héli-ombrophile qui reçoit moins de précipitations que les zones côtières. Les sols ferrallitiques présentent par endroits des horizons cuirassés dus à l'engorgement d'une nappe phréatique.

Ces sols sous forêt sont assez évolués, la forêt dense tropicale constituant un facteur constant dans les processus de leur formation et par la suite de leur protection. Il semble que même dans les zones anthropisées, la destruction des formations primaires influencerait beaucoup plus les processus biogéochimiques que l'altération mécanique de la couverture pédologique.

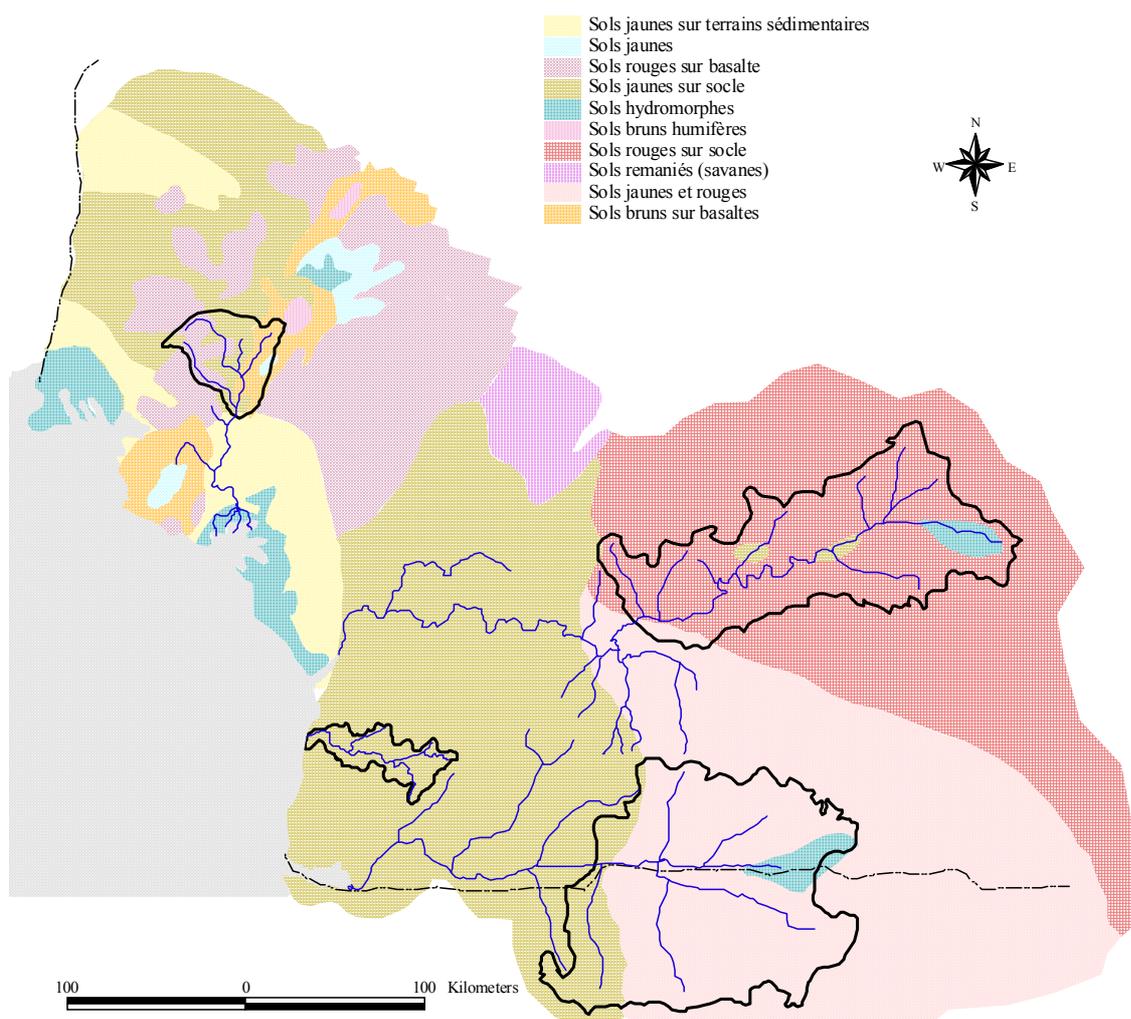


Figure 5.4 : Esquisse pédologique des bassins forestiers (In Olivry, 1986, modifiée).

2.3.2. Le relief et l'hydrographie

Les quatre rivières appartiennent à l'ensemble des fleuves côtiers de la façade atlantique du Cameroun dont le bastion est le bassin versant du fleuve Sanaga qui n'est étudié ici, que dans sa partie amont pour des raisons citées au paragraphe 1.

Le Ntem coule à la limite SSW du Cameroun. Son bassin versant couvre une superficie de 31 000 km², partagée entre le Cameroun (61 %), le Gabon (32 %), la Guinée équatoriale (7 %). Il est limité coté camerounais par les bassins versants de la Lobe, de la Kienke et du Nyong, coté gabonais par le bassin de l'Ogooué et coté équato-guinéen par les bassins versants

du Rio Benito et de la Mbia. Le haut bassin est caractérisé par une large zone marécageuse dans laquelle les rivières coulent lentement. Les pentes sont assez faibles jusqu'à la station de Ngoazik. Mais le bassin présente aux limites Sud et Nord des sommets pouvant dépasser 1 000 m d'altitude.

Les zones marécageuses à prairie flottante dans le lit majeur du Nyong sont dues aux pentes extrêmement faibles (comprises entre 0,05 ‰ et 0,15 ‰) entre Abong-Mbang et Mbalmayo. Le relief sur les versants est par ailleurs très peu accentué et les plus hautes altitudes ne dépassent qu'exceptionnellement 700 m. Toutefois, certains affluents sont issus de zones à reliefs plus marqués des collines du plateau sud-camerounais, d'altitude supérieure à 1 000 m.

A la différence du Ntem et du Nyong qui draine pour l'essentiel la plate-forme du plateau centre-sud, le bassin versant de la Kienke est entièrement compris en bordure du littoral et de la plaine côtière. Ces deux structures (talus et plaine) donnent alors au profil de la rivière une allure en deux pentes distinctes, forte en amont et plus faible dans la plaine.

Le bassin supérieur du Mungo est situé aux confins, à l'Est et Nord-Est, des massifs Rumpi, Manengouba et Koupé qui culminent à plus de 2 000 m environ et, à l'Ouest, des massifs de Bakossi. A la station de Mundame, le cours d'eau est formé de la confluence de rivières dont la plupart sont de véritables torrents issus de ces montagnes. Les pentes très fortes sur les flancs des montagnes s'adoucissent peu avant la station de Mundame (figure 5.2).

3. LES REGIMES HYDROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS ETUDIÉS

Les rivières que nous avons choisies pour cette étude représentent aussi parfaitement les quatre principaux régimes hydrologiques décrits au Cameroun (figure 5.5).

3.1. Un régime tropical pur : le Mayo Tsanaga

Le Mayo Tsanaga a un régime sahélien présentant des crues presque individualisées qui réagissent à toutes averses isolées reçues sur le bassin versant. Mais il n'est pas exclu pour les années plus « humides », que l'on observe un léger relèvement de la base de l'hydrogramme

annuel dû à un écoulement de base qui devient en saison sèche un écoulement d'inféro-flux décrit par Lefèvre (1971). Les crues sont souvent violentes avec des coefficients de ruissellement élevés. On a enregistré un maximum instantané de 315 m³/s le 15 juillet 1994. La durée de la période sans écoulement sera d'autant plus longue que le démarrage de la saison des pluies suivante sera tardif. La date de début des pluies et donc des écoulements est extrêmement variable. Nous avons observé entre les années 2002 et 2003 un décalage d'environ 2 mois (26 juillet 2002 et 01 juin 2003). Les valeurs moyennes des débits caractéristiques de ce régime sont présentées dans le tableau 5.3.

3.2. Un régime tropical humide de transition (variante méridionale) : le Lom

L'hydrogramme du Lom à Betare Oya montre une seule saison de hautes eaux, de juin à décembre, qui concentre plus de 80 % du volume d'eau annuel écoulé. La montée des crues est lente, 5 mois (de avril à septembre) alors que la décrue ne dure que 2 mois (novembre et décembre) au cours desquels le débit est divisé par quatre. Le tarissement est très souvent régulier (figure 5.5), jusqu'à l'étiage absolu, généralement au mois de mars. Le débit moyen spécifique et le coefficient d'écoulement (tableau 5.3) sont identiques à ceux mesurés sur certains bassins forestiers. Ces caractéristiques sont calculées sur la période antérieure à 1970.

Tableau 5.3 : Caractéristiques hydrologiques des cours d'eau étudiés

Nom de bassin	Tsanaga à Bogo	Lom à Betare Oya	Nyong à Mbalmayo	Ntem à Ngoazik	Kienke à Kribi	Mungo à Mudame
Superficie	1535	11100	13555	18100	1435	2420
Période d'observation	1966/1988	1951/1986	1951/1987	1953/1991	1955/1987	1951/1987
Régime	Tropical pur	Tropical de transition variante méridionale	Equatorial de transition boréal	Equatorial pur	Equatorial pur	Tropical de mousson
Pluie moyenne (mm)	840	1590	1595	1591	2760	2850
Module moyen ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	4,3	15,4	10,9	14,6	34,6	65,4
Cure maximale ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	86,1	76,7	41,1	73	156	386
Crue médiane ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	34,3	46,5	27,9	41,5	116,4	247,5
Crue minimale ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	11,7	12	22,5	33	22	107,4
Etiage maximal ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	0	5	5,9	6,2	16,1	22
Etiage médian ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	0	2	1,6	2,4	5,8	10,2
Etiage minimum ($l.s^{-1}.km^{-2}$)	0	0,9	0,5	0,8	1,5	3,3
Ke moyen (%)	20,25	30,64	22,36	31,76	41,42	72,34

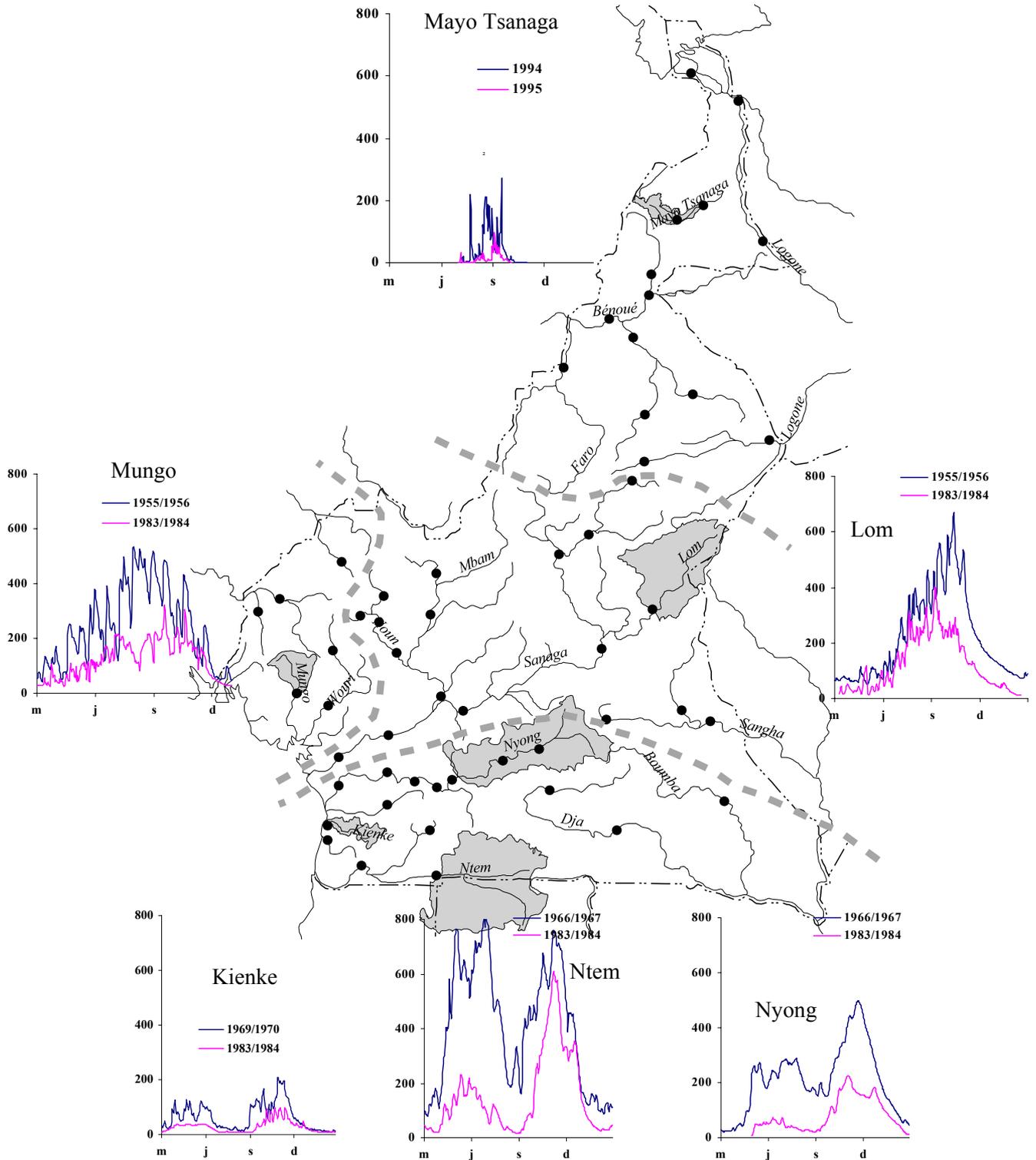


Figure 5.5 : Comparaison des régimes hydrologiques des rivières étudiées : année hydrologique la plus humide et la plus sèche de la chronique d'observations : débits journaliers en $m^3 \cdot s^{-1}$.

3.3. Un régime tropical côtier de montagne : le Mungo

Le sommet de l'hydrogramme annuel (figure 5.5) est découpé par une succession de crues élevées et de courte durée, qui résultent des réactions rapides du bassin aux épisodes pluvieux successifs et assez rapprochés. Les débits spécifiques y sont les plus élevés parmi toutes les régions climatiques (tableau 5.3). Les valeurs de hautes-eaux les plus fortes sont observées en août et septembre (la plus importante a atteint $950 \text{ m}^3/\text{s}$, le 05 août 1965). Les valeurs de basses eaux sont atteintes en février et mars. Les averses enregistrées pendant la saison moins humide génèrent aussi de petites crues de mêmes caractéristiques que celles des hautes eaux, mais d'amplitude beaucoup plus faible, qui perturbent le tarissement.

3.4. Un régime sub-équatorial: le Nyong

Par sa position plus au Nord, le Nyong a un régime équatorial d'influence tropicale, qualifié de sub-équatorial. Il présente deux saisons de hautes eaux (de mars à juin et de septembre à novembre). La deuxième est nettement plus importante et enregistre les plus fortes crues de l'année. Les basses eaux sont observées en juillet-août et de décembre à février, mais les étiages les plus prononcés se situent en février et mars.

3.5. Les régimes équatoriaux pur : le Ntem et la Kienke

Le Ntem et la Kienke ont un régime équatorial boréal. Le cycle hydrologique est divisé en quatre saisons. La première saison sèche est assez courte (juillet et août). Les écoulements sont abondants (coefficient d'écoulement $> 30 \%$), mais la variabilité interannuelle est ici plus élevée qu'en zone tropicale humide. La situation plus méridionale du Ntem permet d'observer souvent les débits les plus faibles au mois d'août. La crue de la deuxième saison des pluies est souvent plus importante, mais il n'est pas exclu qu'on enregistre pour certaines années le maximum au cours de la première saison.

CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de nous rendre compte que les six bassins versants choisis pour cette étude intègrent chacun les caractéristiques d'une entité climatique, avec des occupations de l'espace, des régimes climatique et hydrologique différents ; ont été aussi présentés les particularités propres à chaque bassins versant (pente, forme, etc.). Face à cette diversité de régimes hydroclimatiques et d'occupation de sol, on peut s'interroger sur la façon dont chaque régime a été affecté par la récente sécheresse.

TROISIEME PARTIE

NOUVELLES MESURES ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 6 :

VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES ECOULEMENTS SUR LES BASSINS VERSANTS ETUDIES

INTRODUCTION

Les conséquences souvent tragiques de la baisse persistante de la pluviométrie et des écoulements, sur les économies des pays en développement en Afrique de l'ouest et Centrale justifient l'intérêt constant porté sur l'analyse des changements climatiques. Le diagnostic est symptomatique dans les régions soudano-sahéliennes. Même dans les régions d'Afrique dite "humide", la sécheresse présente des analogies avec le domaine soudano-sahélien, avec cependant un léger décalage dans le temps (Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1997a, Paturel *et al.*, 1997a, Servat *et al.*, 1999, Mahé *et al.*, 2001), pour ne citer que ceux là.

En Afrique centrale équatoriale, les variations des régimes des crues (Mahé *et al.*, 1990 ; Bricquet *et al.*, 1997a) et des régimes des précipitations (Bigot *et al.*, 1998) sont ressenties beaucoup plus à l'échelle saisonnière. Ces variations sont en partie induites par les interactions océan-atmosphère-terre, qui influencent les migrations de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), génératrice des précipitations (Mahé et Citeau, 1993).

Toutes ces études concordent et soulignent l'apparition depuis 1970, d'une variabilité du climat en Afrique du Centre et de l'Ouest, avec des effets sur : le décalage dans le temps des saisons des pluies, la modification de la répartition des quantités précipitées dans l'année, la diminution des événements importants, du nombre de jour de pluie, le décalage des crues dans le temps, la modification des caractéristiques de hautes eaux, des tarissements, le renforcement des étiages et la modification de la réponse des bassins versants.

La situation géographique du Cameroun, qui intègre globalement tous les climats d'Afrique du Centre et de l'Ouest, permet de décrire à une petite échelle l'ensemble de ces modifications et leurs variations spatiales. Ce chapitre complète l'étude de Sighomnou (2004) par une approche par les moyennes spatiales sur les bassins, qui estompent les disparités spatiales.

1. LES DONNEES DE L'ETUDE

1.1. Collecte et inventaire

1.1.1. Les données hydrométriques

Les observations hydrologiques sur les fleuves et rivières du Cameroun ont été réalisées par plusieurs organismes. La disponibilité et la qualité des données dépendent du suivi du réseau de mesures, de son maintien en état et de la volonté de chaque organisme de transmettre les observations effectuées.

Le Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) gère une banque de données hydrométriques, en général au pas de temps journalier, qui renferme à peu près toutes les mesures effectuées sur le territoire camerounais depuis le début des années 1950, pour la plupart des stations. Ces mesures ont été effectuées d'abord par les chercheurs de l'ORSTOM (actuellement IRD) et leurs prédécesseurs de l'EDF (Electricité De France) puis, depuis 1980, par le CRH, service de l'Office National de la REcherche Scientifique et Technique (ONAREST), devenu Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (DGRST), puis Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la REcherche Scientifique (MESRES) et enfin MINistère de la REcherche Scientifique et Technique (MINREST).

Les premières stations hydrométriques ont été installées suivant des préoccupations économiques. Le réseau hydrométrique camerounais était souvent implanté dans les régions à fortes potentialités hydroéconomiques (électricité, navigation, etc.). C'est ainsi que les premières échelles furent installées en 1930 sur la Bénoué à Garoua, en 1940 sur le Nyong à Mbalmayo et à Abong Mbang pour la gestion des biefs navigables, et dès 1953 sur la Sanaga à Edéa à des fins hydroélectriques. Les observations ont été réalisées, de façon continue, jusqu'en 1987. Une partie de ces données (jusqu'en 1983) a été critiquée et publiée dans les annuaires et les monographies hydrologiques. Le reste (1984 à 1987) est stocké sous forme brute sur des fiches de lectures. Après 1987, en raison des contraintes budgétaires, le service hydrologique n'a plus garanti la continuité des observations, le gouvernement ne pouvant plus assurer le fonctionnement d'un secteur dont les effets ne sont pas immédiatement perceptibles sur l'économie et la vie quotidienne des citoyens. On note alors instantanément une

dégradation très sensible du nombre de stations observées (figure 6.1). Des mesures sont cependant parfois réactivées durant des collaborations avec des programmes internationaux ou bilatéraux, mais ne concernent le plus souvent que quelques bassins ou une région donnée.

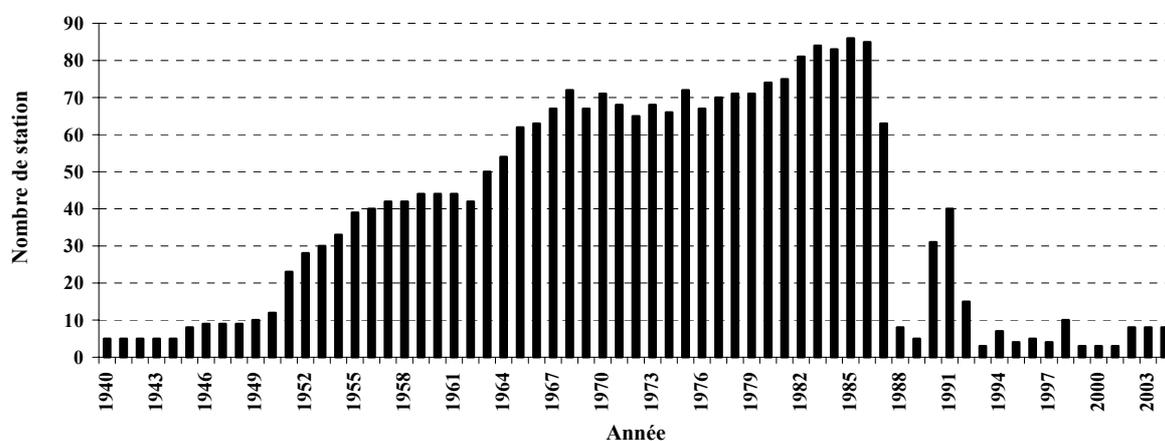


Figure 6.1 : Evolution du nombre de stations hydrométriques observées au Cameroun.

Certains cours d'eau camerounais, en raison de leur appartenance aux grandes unités hydrographiques africaines, ont bénéficié jusqu'à une date récente de l'appui des organisations régionales et internationales pour la collecte des données. Ainsi, la CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad) dispose d'une banque de données concernant le bassin du lac Tchad qui couvre l'extrême-nord et une partie du Nord Cameroun. L'ABN (Autorité du Bassin du Niger) gère certaines stations du bassin de la Bénoué.

Le projet Waza-Logone (de 1994 à 1998) visant la ré-inondation de la plaine du Logone a permis la collecte des données pour certaines stations de l'extrême-nord. Pour des fins de gestion de sa production hydroélectrique, la SONEL (SOCIÉTÉ NATIONALE d'ÉLECTRICITÉ, actuellement ASSONEL) gère plusieurs stations du bassin du fleuve Sanaga. On trouve aussi de nombreux renseignements sur les fleuves et rivières du Cameroun dans les travaux de Rodier (1964), Sircoulon (1976), Naah (1990). La référence en matière d'hydrologie est l'ouvrage de Olivry (1986) dont une réactualisation a été rédigée par Sighomnou (2004).

Toutes les sources potentielles de données citées ci-dessus ont été explorées. Il a généralement été constaté que le retard entre la collecte de données sur le terrain et le traitement primaire était de l'ordre de plusieurs années. D'autre part, lorsque ces données sont

traitées, elles sont souvent codées dans des formats particuliers, ce qui ne permet pas d'échanges simples avec les systèmes plus généralement utilisés. Plusieurs lacunes existent, notamment au cours des deux dernières décennies et de nombreuses données nécessitent d'être critiquées et reconstituées.

1.1.2. Données pluviométriques

Certaines données de pluies utilisées pour cette étude ont été tirées du recueil des pluies journalières pour les pays francophones publiées par le CIEH. D'autres sont tirées du recueil pluviométrique du bassin du lac Tchad (Beauvillain, 1995). Les données à certaines stations sont complétées jusqu'en 2001 par d'autres informations collectées directement auprès des gestionnaires des postes pluviométriques lors des déplacements sur le terrain.

Les données de la base SIEREM d'HydroSciences Montpellier (HSM) ont été aussi exploitées, notamment pour les stations des pays voisins concernant les bassins versants transfrontaliers comme le Lom et le Ntem. La base SIEREM¹ (Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation) rassemble les données hydrologiques et climatologiques provenant principalement des réseaux nationaux ainsi que diverses organisations internationales, inter-états et organismes de recherches comme la FAO, l'ASECNA, l'AGRHYMET, le CRU et l'IRD. Une importante masse de données a été collectée sur le territoire camerounais. Les stations pour lesquelles les données ont été collectées sont présentées à la figure 6.2. Les zones où le réseau de stations est le plus dense correspondent à celles qui ont des fortes densités de populations.

L'ensemble des données collectées est stocké et géré, d'abord à l'échelle du Cameroun, au sein d'une banque définie et organisée par ailleurs. La mise à disposition des ces données à l'échelle régionale, apportera une intéressante contribution à la constitution d'une banque de données centralisée, qu'il apparaît chaque jour plus nécessaire de constituer au sein du projet FRIEND/AOC.

¹ En plus des données de précipitations et de débits, les fonds de cartes (contours des bassins et réseaux hydrographiques notamment) de la base SIEREM de HSM ont été aussi utilisés pour notre étude. J'en suis particulièrement reconnaissant à Claudine Dieulin.

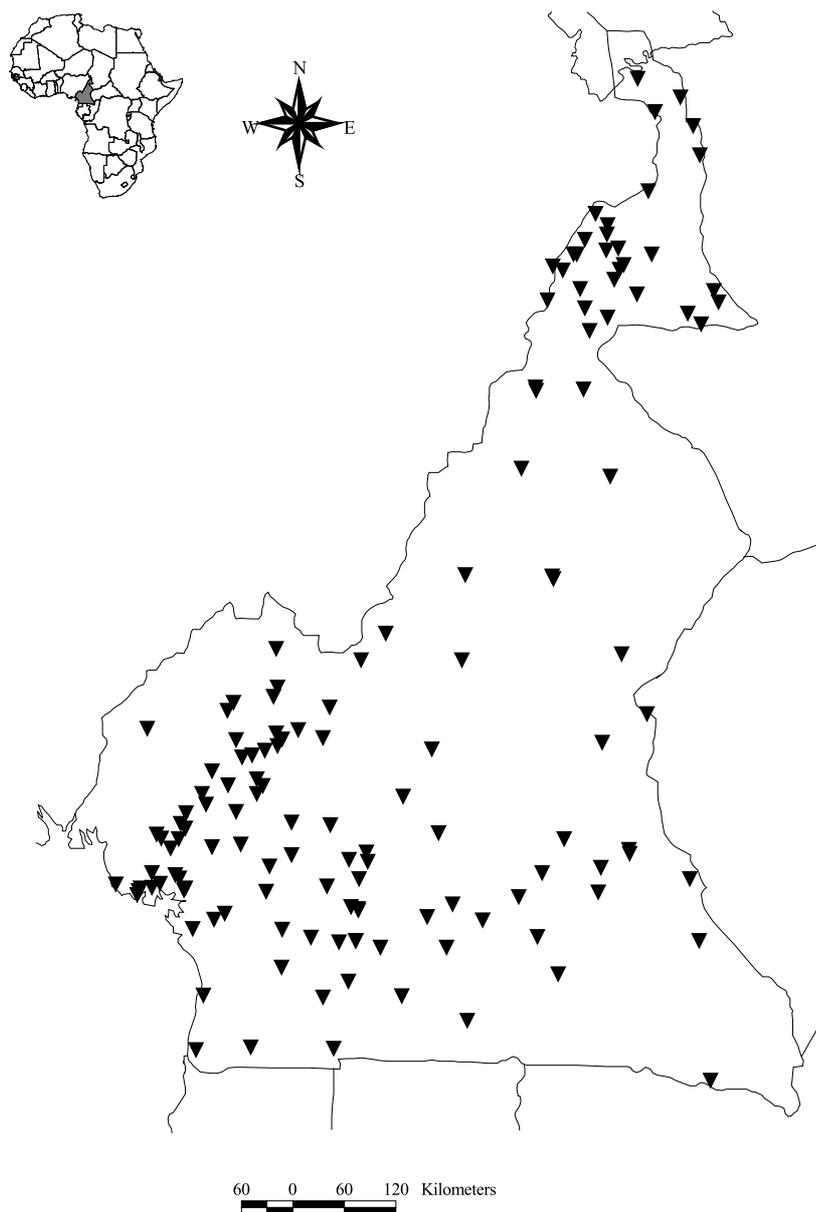


Figure 6.2 : Réseau des stations pluviométriques au Cameroun.

Pour chacun des bassins versants d'étude, nous avons retenu un certain nombre de postes pluviométriques (figure 6.3) : 10 postes pour le bassin versant Mayo Tsanaga, 11 postes pour le bassin versant de Lom, 11 postes pour le bassin versant du Mungo, 3 postes pour le bassin versant de la Kienké et 29 postes pour les bassins versants du Nyong et du Ntem.

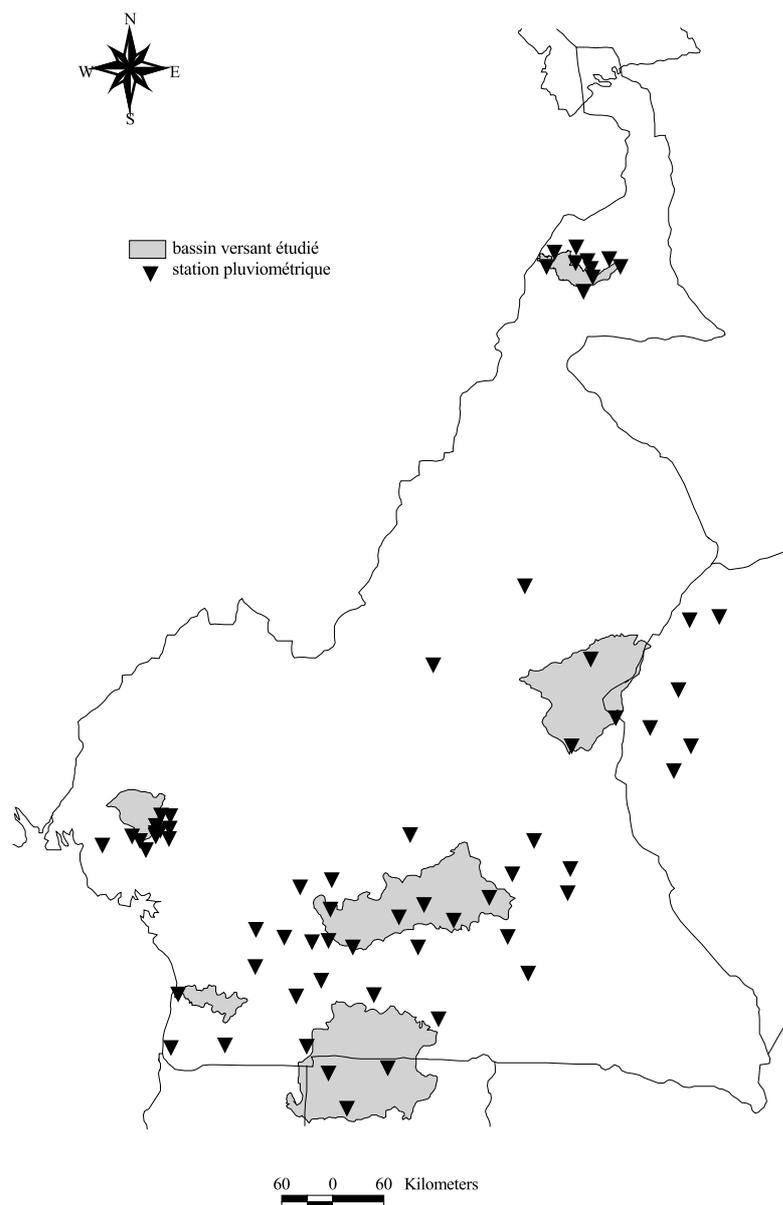


Figure 6.3 : Réseau pluviométrique retenu pour l'étude

1.2. La critique et la reconstitution des données hydrométriques par stations

1.2.1. Les principes de reconstitution des lacunes d'observation

L'inventaire des données hydrométriques a révélé que celles-ci comportent des lacunes d'observation. Le comblement de celles-ci vise à disposer de séries continues les plus longues possibles pour les différentes analyses.

Il existe plusieurs moyens d'estimer, à un moment donné, la valeur probable d'un paramètre qui n'a pas été observé. Le choix de la méthode de reconstitution dépend de la durée de la lacune, de sa position sur l'hydrogramme annuel (en étiage, en montée de crue ou en décrue), des informations disponibles (existence de stations voisines, caractéristiques physiques du bassin versant, données de pluie), du pas de temps concerné et des objectifs poursuivis par l'étude envisagée.

Le souhait pour ce travail est de disposer de séries chronologiques aussi complètes que possible et caractéristiques de l'écoulement aux six stations retenues. Le pas de temps mensuel a été choisi pour l'analyse des variabilités, qui est une échelle de temps commune des gestionnaires de projet d'aménagement. Afin d'avoir des séries de données les plus complètes possibles, la reconstitution a porté d'abord sur les débits journaliers, puis sur les mensuels.

Les méthodes de reconstitution choisies pour cette étude sont les outils classiques d'interpolation et de régression.

A l'échelle journalière, la méthode d'interpolation peut être mise en œuvre sur une période d'une dizaine de jours, en décrue et en basses eaux. Pour les périodes de crue, la période « reconstituable » est plus courte et dépend du régime des crues. Une étude statistique de temps de passage des crues est faite avant de déterminer la durée maximale de la lacune pouvant être reconstituée. Pour des stations d'un même bief, sans apports notables pouvant modifier le régime des crues, les régressions linéaires entre les débits journaliers ont été utilisées.

A l'échelle mensuelle, à la même station, en décrue et basses-eaux, des régressions sont mises en œuvre entre débits de mois successifs. Pour les autres périodes de l'hydrogramme, en montée de crue et hautes-eaux, nous avons établi des relations entre débits mensuels de stations voisines et situées dans la même zone climatique quand les données sont disponibles.

Afin de tenir compte de la variabilité climatique, 2 régressions ont été établies de part et d'autre des dates de rupture mises en évidence au Cameroun (Servat *et al.*, 1996). Mais cela suppose que l'hypothèse de rupture est admise pour toutes les stations. En effet, une analyse des résultats du programme ICCARE sur le Cameroun montre que bon nombre de stations n'ont pas connu de rupture. Cela n'est pas trop gênant car dans le cas de stationnarité des

observations, il est toujours possible de reconstituer selon le même modèle les données manquantes. Le critère des moindres carrés a servi à optimiser les régressions. La présentation de ces modèles constitue l'objet du paragraphe suivant.

1.2.2. Reconstitution des données manquantes par stations

Une partie des données de certaines stations auxquelles nous nous intéressons dans cette étude a été traitée et publiée par Olivry (1986) dans le cadre de la caractérisation des régimes des fleuves et rivières du Cameroun. Le traitement qui suit concerne donc principalement les données récemment collectées.

1.2.2.1. Le bassin du Lom à Bétaré Oya

La série chronologique des débits à la station de Bétaré Oya sur le Lom commence en 1951. Elle présente une interruption entre 1987 et 1989, et cesse en 1994. Les premières régressions mensuelles ont été calculées entre les mois successifs de basses eaux (novembre à mars). Le tableau 6.1 présente les caractéristiques des relations.

Pour la reconstitution des débits de hautes eaux, les meilleures corrélations possibles sont obtenues avec la station de Batouri sur la Kadéi, bassin voisin. Le tableau 6.2 présente leurs caractéristiques. Seul les mois d'avril, juin et octobre n'ont pas présenté de relations acceptables. Pour les années où un ou deux mois ne peuvent être complétés par des corrélations, plutôt que de supprimer l'année entière de la série, la moyenne mensuelle interannuelle est utilisée, tout en tenant compte des éventuelles ruptures dans la série.

Tableau 6.1 : Relations entre les débits de mois de basses eaux à la station de Betare Oya.

Mois	Equation	coefficient de détermination	Nbre d'observations
Novembre-Décembre	$Q_{\text{déce}} = 0,4223 \times Q_{\text{nove}} + 27,211$	0,87	32
Décembre-Janvier	$Q_{\text{janv}} = 0,7148 \times Q_{\text{déce}} - 8,1919$	0,94	36
Janvier-Février	$Q_{\text{févr}} = 0,939 \times Q_{\text{janv}} - 23,331$	0,92	35
Février-Mars	$Q_{\text{mars}} = 0,8297 \times Q_{\text{févr}} - 5,4153$	0,80	27

N : nombre de couples

Tableau 6.2 : Caractéristiques des relations entre les débits mensuels du Lom à Bétaré Oya et ceux de la Kadéi à Batouri.

Mois	Période	R ²	N
Avril	Avant 1970	0,76	10
	Après 1970	-	-
Mai	Avant 1970	0,80	12
	Après 1970	0,83	12
Juin	Avant 1970	-	-
	Après 1970	-	-
Juillet	Avant 1970	0,85	10
	Après 1970	0,87	11
Août	Avant 1970	0,77	12
	Après 1970	0,75	9
Septembre	Avant 1970	0,76	8
	Après 1970	0,86	11
Octobre	Avant 1970	-	-
	Après 1970	0,95	10

Ainsi, une chronique continue de débits mensuels d'avril 1951 à janvier 1994 a pu être constituée pour les besoins des analyses ultérieurement réalisées dans cette étude.

1.2.2.2. Le bassin du Nyong Mbalmayo

Le Nyong à la station de Mbalmayo est observé depuis 1940 mais de façon discontinue jusqu'en 1946. Les observations régulières ne recommencent qu'en 1951. Dans un premier temps, les lacunes ont été comblées à un pas de temps journalier par interpolation. Lorsque les relations établies ne nous ont plus semblé acceptables, le travail s'est poursuivi à un pas de temps mensuel, en utilisant des relations avec les débits mensuels à la station d'Olama, sur le même fleuve ou ceux de Bi sur le Dja (bassin équatorial voisin). Les tableaux 6.3 et 6.4 présentent les caractéristiques de ces relations.

Tableau 6.3 : Relations entre les débits mensuels aux stations de Mbalmayo et d'Olama.

Mois	Equation	R ²	N
Juillet	$Q_{mbal} = 0,6364 \times Q_{ola} + 13,198$	0,97	22
Août	$Q_{mbal} = 0,7066 \times Q_{ola} + 7,246$	0,97	22
Octobre	$Q_{mbal} = 0,5335 \times Q_{ola} + 31,254$	0,85	22
Novembre	$Q_{mbal} = 0,6343 \times Q_{ola} + 19,558$	0,92	22
Décembre	$Q_{mbal} = 0,711 \times Q_{ola} + 24,113$	0,96	22

Tableau 6.4 : Relations entre les débits mensuels aux stations de Mbalmayo et de Bi.

Mois	Equation	R ²	N
Janvier	$Q_{mbal} = 0,9083 \times Q_{bi} + 13,005$	0,98	11
Février	$Q_{mbal} = 0,4361 \times Q_{bi} - 0,8956$	0,89	11
Mars	$Q_{mbal} = 0,4768 \times Q_{bi} - 5,6399$	0,84	10
Avril	$Q_{mbal} = 0,4057 \times Q_{bi} + 4,7446$	0,93	12

1.2.2.3. Le bassin du Ntem à Ngoazik

La station de Ngoazik sur le Ntem a été observée de manière régulière de juin 1953 à février 1992. Quelques lacunes ont été comblées par interpolation des débits journaliers. Les débits

de cette station présentent des liaisons assez étroites, aussi bien à l'échelle journalière que mensuelle avec ceux de la station de Nyabessan, de chronique plus courte.

1.2.2.4. Le Bassin de la Kienké à Kribi

La Kienke est observée à la station de Kribi depuis 1955. L'étalonnage d'assez bonne qualité, établi par l'ORSTOM a été reprecisé avec les jaugeages faits par le CRH entre 1980 et 1987. Pour avoir une assez bonne chronique de débits, les valeurs mensuelles de la période 1961 à 1965, de relevés douteux, ont été reconstitués à partir des débits du bassin voisin de la Lobe. Les différentes relations sont données dans le tableau 6.5.

Tableau 6.5 : Relations entre les débits mensuels de la Lobe et de la Kienke à Kribi.

Mois	Equation	R ²	N
Janvier	$Q_{kien} = 0,6247 \times Q_{lobe} - 0,2734$	0,77	19
Février	$Q_{kien} = 0,2141 \times Q_{lobe} + 8,082$	0,73	21
Mars	$Q_{kien} = 0,4439 \times Q_{lobe} - 0,9733$	0,88	18
Avril	$Q_{kien} = 0,4734 \times Q_{lobe} - 2,2848$	0,94	15
Mai	$Q_{kien} = 0,4384 \times Q_{lobe} - 8,2253$	0,85	22
Juin	$Q_{kien} = 0,6032 \times Q_{lobe} - 7,2149$	0,81	14
Juillet	$Q_{kien} = 0,7137 \times Q_{lobe} - 1,4258$	0,87	25
Août	$Q_{kien} = 0,4854 \times Q_{lobe} + 6,6123$	0,85	20
Septembre	$Q_{kien} = 0,5506 \times Q_{lobe} + 3,3561$	0,88	17
Octobre	$Q_{kien} = 0,2444 \times Q_{lobe} + 46,794$	0,77	22
Novembre	$Q_{kien} = 0,4405 \times Q_{lobe} - 1,3124$	0,73	21
Décembre	$Q_{kien} = 0,2067 \times Q_{lobe} + 21,448$	0,72	16

1.2.2.5. Le bassin du Mungo à Mundame

Les données de débit à la station du Mungo débutent en 1951. Les débits journaliers connaissent quelques lacunes qui sont reconstituées par interpolation. Les débits pour la période 1980 à 1987 sont critiqués et complètent ceux déjà publiés par Olivry (1986). La série présente peu de lacunes mais la suite ne peut pas être reconstituée à partir de la station de Wouri à Yabassi bien qu'elle couvre la même période d'observation.

2. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA VARIABILITE D'UNE SERIE CHRONOLOGIQUE

Après l'inventaire des données disponibles et la reconstitution de certaines valeurs manquantes, les éventuelles fluctuations sont caractérisées au sein des séries chronologiques des variables pluviométriques et hydrologiques dans les six bassins versants représentatifs. Les analyses porteront essentiellement sur :

- les totaux pluviométriques annuels,
- les totaux pluviométriques saisonniers et mensuels,
- les débits moyens annuels,
- les débits moyens saisonniers et mensuels,
- les débits caractéristiques de basses et de hautes eaux (DCE et DCC),
- éventuellement, des modifications de la forme de l'hydrogramme annuel.

Dans le cadre du projet ICCARE (Servat, 1994), des variations climatiques ont été mises en évidence dans certains bassins versants du Cameroun (Servat *et al.*, 1999 ; Paturol *et al.*, 1997c). Le territoire camerounais se trouve aussi aux confins de plusieurs régions de pluviométrie homogène définies par Mahé *et al.* (2001), dans lesquelles l'auteur a défini des variabilités de la pluie moyenne et des écoulements.

Par rapport aux études antérieures, des données récentes sur la décennie 1990 sont intégrées et les précipitations sont traitées en terme de moyennes sur les bassins versants, qui permettront ultérieurement une analyse des éléments du bilan hydrique. On comparera les bilans

hydriques pour les séries avant et après rupture. On s'intéressera également aux totaux pluviométriques saisonniers et à leur évolution (comparaison de l'évolution des totaux pluviométriques des deux saisons des pluies de printemps et automne), et à l'impact de leur éventuelle modification sur les cycles hydrologiques saisonniers. Certaines caractéristiques de basses eaux et de hautes eaux seront aussi analysées.

Parmi les méthodes utilisées couramment pour analyser des chroniques de variables hydroclimatologiques, cette étude se base principalement sur les trois suivantes :

- les représentations graphiques d'un indice centré et réduit, défini ci-après
- les tests statistiques sur le caractère aléatoire de détection des ruptures,
- le calcul des déficits (ou excédents) de part et d'autre d'une supposée date de rupture.

2.1. Représentation d'un indice centré et réduit

Soit x une variable aléatoire de moyenne μ et d'écart type σ ($\sigma > 0$). On définit une variable aléatoire centrée et réduite (ou indice) x^* :

$$x^* = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

x^* est une quantité sans dimension, quelle que soit la dimension de x . Elle a une moyenne égale à zéro et une variance égale à 1.

L'utilisation de la variable centrée réduite est nécessaire pour comparer la valeur de la variable x_i de l'année i à la moyenne de la série considérée. Elle est positive (ou négative) quand la variable considérée est supérieure (ou inférieure) à la moyenne de la période considérée. Cet indice a été amplement utilisé pour la caractérisation de la pluviométrie en zone sub-sahélienne (Lamb, 1982) et plus récemment dans le programme ICCARE (Paturel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1999).

2.2. Les analyses statistiques

Le traitement statistique des séries hydropluviométriques a porté essentiellement sur l'analyse d'éventuelles modifications statistiques au sein des séries chronologiques. D'une façon générale, une série chronologique peut se décomposer en 4 éléments (Lubès *et al.*, 1994) :

- un élément purement aléatoire, exempt par conséquent de toute régularité et tout caractère systématique,
- un élément tendanciel ou « tendance » traduisant un comportement préférentiel de la variable,
- un élément oscillatoire ou cyclique qui traduit un comportement plus ou moins périodique ou présentant des répartitions plus ou moins régulièrement espacées,
- une auto corrélation ou un effet mémoire, exprimant le fait que dans la série, la valeur de la variable en n (x_n) soit dépendante des valeurs en $n-1, n-2, \dots, n-t$ (x_1, x_2, \dots, x_t).

Parmi les procédures statistiques souvent utilisées dans des études des séries hydrométéorologiques, trois sont mis en œuvre. Elles ont été largement utilisées pour l'étude de la stationnarité de séries chronologiques (Hubert et Carbonnel, 1989 ; Servat *et al.*, 1998 et 1999 ; Paturel *et al.* 1997a) :

- le test de corrélation sur le rang, qui ne suppose aucune propriété particulière de la série chronologique à étudier et qui analyse le caractère aléatoire de la série ;
- le test de Pettit, adapté à la détection de ruptures dans une série chronologique. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu ;
- une procédure de segmentation, appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne au sein d'une série chronologique.

Les descriptions de ces tests sont tirées de Lubès *et al.* (1994).

2.2.1. Test de corrélation sur le rang de Kendall

Ce test est non paramétrique. Il permet de déceler le caractère aléatoire d'une série et recherche alternativement une éventuelle tendance de la variable dans la série.

Soit une série chronologique de variables (x_i) , $i = 1, N$, les x_i désignent les réalisations de la variable observées à des pas de temps successifs égaux.

Soit l'hypothèse nulle : « la série des (x_i) , $i = 1, N$, est aléatoire ». L'hypothèse alternative reconnue de ce test est celle d'une tendance.

On calcule le nombre de paires P pour lesquelles $x_j > x_i$, $j > i$, avec $i = 1, \dots, N-1$.

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

$\tau = 1 - \frac{4Q}{N(N-1)}$ avec $Q = \frac{N(N-1)}{2} - P$ qui suit une distribution normale de moyenne nulle et

de variance égale à $\sigma = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}$.

Il en résulte que si l'hypothèse nulle est vraie, la variable

$U = \frac{\tau}{\sigma}$ est une variable normale réduite.

Pour un risque α de première espèce donnée, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre : $-U_{1-\alpha/2}\sigma_\tau$ et $U_{1-\alpha/2}\sigma_\tau$.

2.2.2. Test de Pettit

La série étudiée est divisée en deux sous-échantillons de tailles m et n . Les valeurs des deux échantillons sont classées par ordre décroissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testée sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population.

Soit la série chronologique (x_i) , avec $i = 1, N$

Soit l'hypothèse nulle « l'absence de rupture dans la série ». La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t variant de 1 à N , les séries (x_i) , avec $i = 1, t$ et (x_{ij}) , avec $j = t+1, N$ appartient à la même population.

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

On considère la variable $U_{t,N}$ telle que :

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

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

Si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

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

Pour un risque α de première espèce donné, si $\text{Prob}(K_N > k)$ est inférieur à α , l'hypothèse nulle est rejetée.

2.2.3. Procédure de segmentation

Une procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques a été proposée par Hubert *et al.* (1989).

Le principe de cette procédure est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de la moyenne.

La segmentation est définie de la façon suivante :

Toute série x_i , $i = i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$ où ($i_1 < i_2$) constitue un segment de la série initiale des (x_i) , $i = 1, \dots, N$.

Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

i_k , $k = 1, 2, \dots, m$;

$n_k = i_k - i_{k-1}$, la longueur du $k^{\text{ème}}$ segment ;

\bar{x}_k la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment, $\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{n_k}$;

D_m , l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée, $D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k$ avec

$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} \left(x_i - \bar{x}_k \right)^2$ Cet écart permet d'apprécier la proximité de la série et de la segmentation qui lui est appliquée.

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes. Cette contrainte est satisfaite par application du test de *Scheffé* qui repose sur le concept de contraste (Dagnélie, 1970).

Par conséquent si lors du processus de segmentation d'ordre $m+1$, aucune segmentation produite n'est valide au sens du test de *Scheffé*, la segmentation de la série qui est retenue en tant que meilleure segmentation est la segmentation optimale d'ordre m .

D'après les auteurs (Hubert et Carbonnel, 1989), cette procédure de segmentation peut être interprétée comme un test de stationnarité, **"la série étudiée est stationnaire" constituant l'hypothèse nulle** de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée. Aucun niveau de signification n'est attribué à ce test.

2.3. Le calcul des déficits (ou excédents)

Les déficits ou les excédents (exprimés en valeurs absolues ou relatives) représentent des écarts par rapport à une normale définie, le plus souvent la moyenne sur une période. Or, la persistance de la sécheresse dans certaines régions pose le problème de choix de la période à retenir pour le calcul d'une moyenne représentative du climat régional ou local. Les moyennes calculées sur les séries complètes sont alors le plus souvent des paramètres plus dépendant de la longueur de la série considérée que d'une situation climatique normale. De ce fait, nous caractériserons dans cette étude les déficits (ou excédents) d'une année ou d'une

période par rapport à la moyenne de la séquence avant rupture, qui représente le plus souvent une chronique statistiquement homogène.

3. LES PLUIES MOYENNES SUR LES BASSINS REPRESENTATIFS

La **méthode polygonale de Thiessen** utilisée ici pour calculer les pluies moyennes consiste à pondérer les données de chaque station en tenant compte de la surface élémentaire du bassin versant dont la station est censée être représentative. Sur la carte, on relie par des lignes les stations les plus proches. On trace par la suite les médiatrices de chaque ligne qui forment ainsi un polygone autour de chaque station. La surface du polygone est prise comme facteur de pondération des précipitations à la station. La somme des produits de la surface de chaque station et les précipitations qui y sont recueillies est divisée par la surface totale du bassin versant pour obtenir la moyenne selon l'équation suivante :

$$P = \frac{\sum P_i S_i}{S}$$

Avec :

P : pluie moyenne sur le bassin versant,

P_i : pluie tombée à la station i couvrant la portion du bassin versant de superficie S_i ,

S : surface totale du bassin versant,

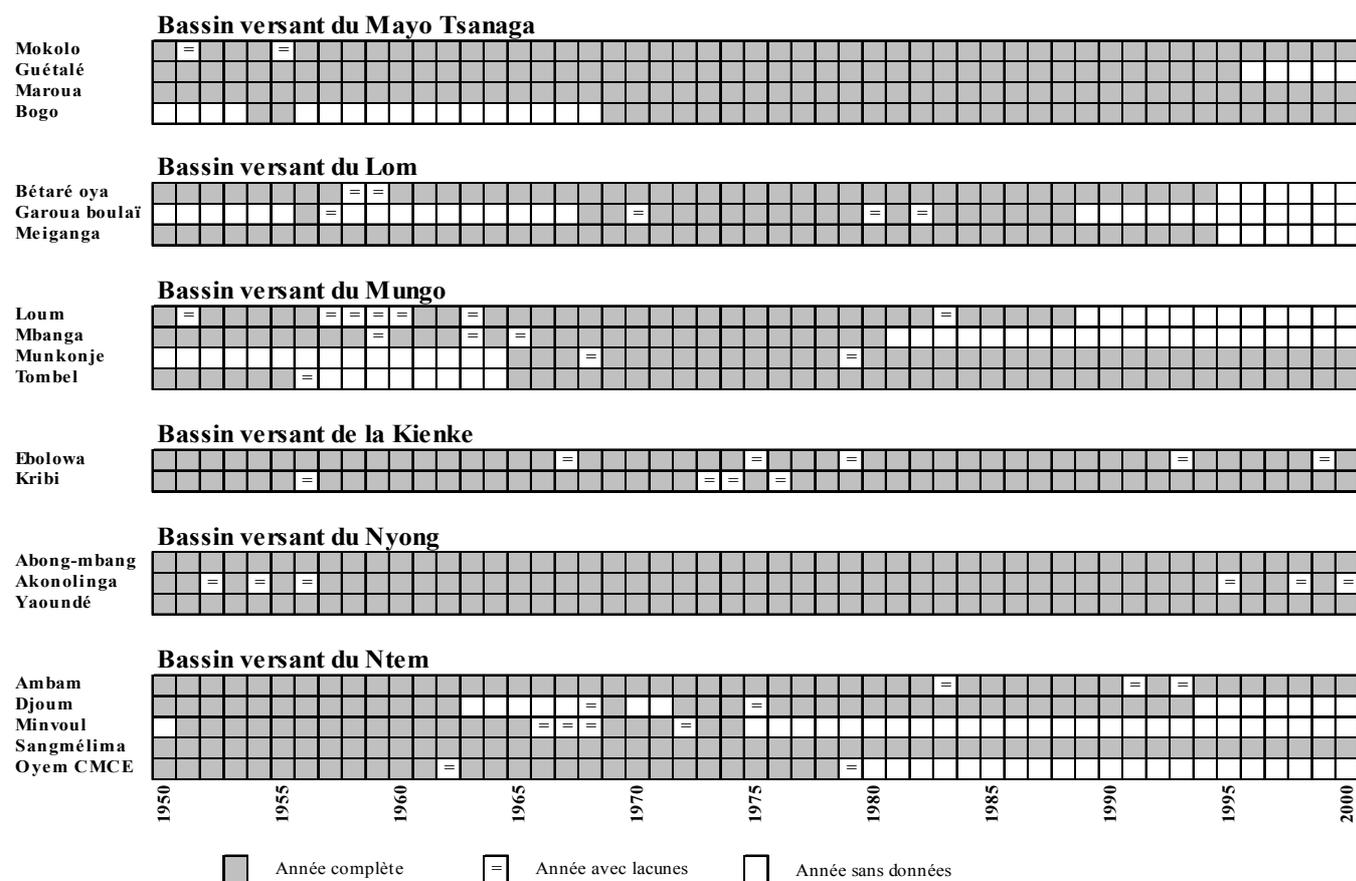
S_i : surface d'influence de la station i

Pour le calcul de la pluie moyenne, nous n'avons retenu des stations présentées à la figure 6.3 que celles qui ont des séries suffisamment longues, ne comportant que peu de lacunes (tableau 6.6) et assez représentatives d'une portion du bassin versant (figure 6.4). Les stations pluviométriques sont observées parfois depuis 1930. Mais seules les données de la période 1950 à 2000 sont utilisées, période pendant laquelle nous disposons également des données de débit.

La densité et la répartition des données varient au cours de l'historique (tableau 6.6). Plutôt que de reconstituer des données manquantes, on a préféré n'introduire que des données observées dans le calcul. Dans ces conditions, suivant le nombre et la répartition des données

disponibles, On a eu à calculer plusieurs polygones de Thiessen : ainsi, pour une situation de données disponibles, la figure 6.4 présente les stations utilisées pour le calcul des pluies moyennes, les polygones de Thiessen correspondant. La figure montre par ailleurs les variations saisonnières des pluies moyennes mensuelles sur les bassins étudiés. Deux stations en territoire gabonais ont été utilisées pour le bassin du Ntem.

Tableau 6.6 : Nombre de données de pluie utilisées pour le calcul de la pluie moyenne.



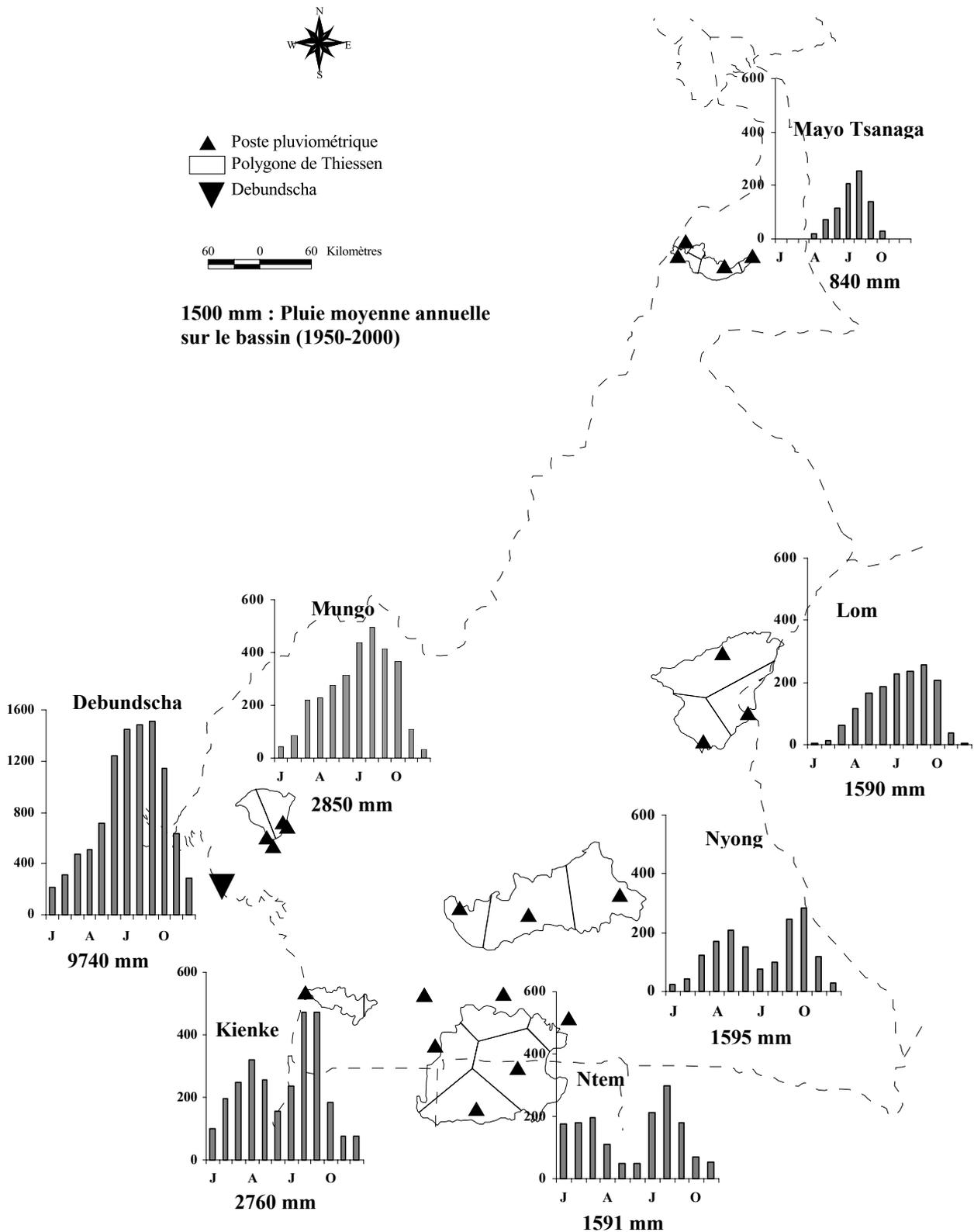


Figure 6.4 : régimes pluviométriques moyens sur la période 1955-2000 des bassins versants étudiés et de la station du Mont Cameroun (Debundscha) : postes pluviométriques utilisés et polygones de Thiessen associés.

3.1. Les pluies annuelles

Les pluies annuelles moyennes calculées sur la période 1950-2000 sur les bassins s'inscrivent bien dans la répartition spatiale connue de la pluviométrie annuelle sur le territoire camerounais. On note une diminution du sud vers le nord (de 1591 mm sur le bassin du Ntem à 840 mm sur celui du Mayo Tsanaga, en passant par 1595 mm et 1590 mm sur les bassins respectifs du Nyong et du Lom). Sur le plateau sud-camerounais, la diminution des pluies du littoral vers l'intérieur est également visible sur le bassin de la Kienké (2760 mm), du Ntem (1591 mm) et du Nyong (1595 mm).

Le bassin du Mungo, proche du maximum pluviométrique du Mont Cameroun, 9740 mm entre 1950 et 2000 à la station de Debundscha, enregistre en moyenne 2850 mm (figure 6.4). L'extrême variabilité spatiale des précipitations, caractéristique de cette zone de montagnes, exposée au flux de mousson atlantique, se dessine ici : entre le poste de Debundscha et le bassin versant du Mungo, distants seulement d'environ 100 km, on observe une différence d'environ 7000 mm de pluie.

3.2. Les pluies saisonnières

Les pluies annuelles sont réparties sur une ou deux saisons suivant les régions climatiques. Nous insisterons dans cette partie sur la comparaison entre les deux saisons des pluies en zone équatoriale.

3.2.1. Les saisons des pluies

Les contrastes climatiques se font également remarquer au niveau de la répartition saisonnière des précipitations. Le bassin versant du Mayo Tsanaga reçoit l'essentiel des précipitations annuelles en quatre mois (juin en septembre) (tableau 6.7 et figure 6.4). Le mois de mai, premier mois de la saison des pluies, enregistre souvent plus de 100 mm de pluie, mais depuis le début de la récente sécheresse, les valeurs supérieures à 50 mm se font de plus en plus rares. Il est fréquent que la saison des pluies ne démarre qu'en août, pour certaines années très sèches, limitant la période des pluies aux seuls mois d'août et septembre. Si on observe une

grande variation interannuelle de la date du début de la saison des pluies, entre mai et juin, et parfois juillet, l'arrêt en octobre est presque systématique. Le maximum des pluies mensuelles est enregistré en août. Ici encore, le prolongement de la ligne du Cameroun vers le nord-ouest, par les monts Mandara, y entraîne une légère augmentation des précipitations par rapport à la partie Nord-Est du pays, due à l'altitude.

Les bassins tropicaux du Lom et du Mungo présentent aussi une saison des pluies et une saison sèche centrées, respectivement, en août/septembre et décembre/janvier. Les hyétogrammes annuels montrent une montée progressive et assez lente des pluies mensuelles de mars à août/septembre et une descente assez rapide d'octobre à décembre (figure 6.4).

La répartition saisonnière des pluies sur le bassin versant du Mungo est analogue à celle observée sur le Lom. Toutefois, les pluies mensuelles sont beaucoup plus importantes. Les maxima et minima mensuels sont centrés, respectivement, sur août et sur décembre.

Le tableau 6.7 présente quelques caractéristiques des chroniques des pluies moyennes mensuelles sur les six bassins versants. Il exprime la vigueur de la saison sèche sur le bassin du Mayo Tsanaga, où de novembre à mars, on n'observe pratiquement pas de traces de pluie, au contraire des deux autres bassins tropicaux, le Lom et le Mungo. La position en zone équatoriale des bassins de la Kienké, du Ntem et du Nyong impose un régime à quatre saisons. La première saison des pluies du printemps boréal dure quatre mois (mars à juin). Les hauteurs des pluies mensuelles y sont plus faibles comparativement à son homologue d'automne boréal qui dure trois mois (septembre à novembre).

Tableau 6.7 : Quelques caractéristiques des pluies moyennes mensuelles (1950-2000).

		Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nove	Déce
Mayo Tsanaga	Maximum	0	1	27	57	161	188	360	432	253	93	6	0
	Médiane	0	0	0	17	61	120	201	247	127	20	0	0
	Minimum	0	0	0	0	11	61	89	143	73	0	0	0
	Ecart type	0	0	5	14	35	32	51	58	41	24	1	0
Lom	Maximum	64	57	158	202	259	301	432	387	414	324	145	55
	Médiane	0	6	58	116	166	190	234	238	254	209	38	0
	Minimum	0	0	5	52	100	106	114	55	113	68	0	0
	Ecart type	13	16	41	36	39	45	63	65	60	54	32	11
Mungo	Maximum	128	382	617	445	467	523	772	895	734	678	271	117
	Médiane	40	91	181	210	259	318	398	442	409	358	120	45
	Minimum	0	5	27	99	143	99	134	176	160	181	20	0
	Ecart type	28	65	90	63	64	92	135	146	113	86	53	28
Nyong	Maximum	97	139	247	273	330	266	180	256	418	392	240	113
	Médiane	12	32	115	169	202	134	88	110	250	284	114	21
	Minimum	00	0,6	27	90	127	64	4	10	133	182	46	00
	Ecart type	18	35	41	46	50	45	42	59	56	51	42	27
Kienké	Maximum	187	331	337	476	626	709	866	783	942	1063	323	217
	Médiane	66	77	190	244	287	254	98	193	452	456	185	69
	Minimum	00	6	21	56	108	49	20	22	175	232	78	6
	Ecart type	46	68	69	87	103	142	192	168	168	154	73	47
Ntem	Maximum	149	150	327	288	329	281	203	196	409	417	252	110
	Médiane	41	63	155	177	178	125	54	68	210	289	163	43
	Minimum	00	5	62	67	128	49	7	13	129	158	74	00
	Ecart type	36	34	48	45	49	45	44	42	61	54,6	42	29

Les moyennes calculées sur les séries de 1950 en 2000 montrent (tableau 6.8) que les apports d'automne (période de septembre à novembre) sont plus importants que les apports de printemps (période de mars à juin) en zone côtière (bassin de la Kienké), alors qu'ils tendent à s'égaliser pour les deux saisons à l'intérieur du pays (Bassins du Nyong et du Ntem).

Tableau 6.8 : Pluies moyennes saisonnières sur les bassins versants équatoriaux (moyenne calculée sur la période 1950-2000).

	Décembre février	en Mars	en juin	Juillet et août	Septembre novembre	en	Moyenne annuelle
Nyong	88		653	201	648		1590
Ntem	159		675	152	679		1665
Kienké	234		1002	454	1130		2820

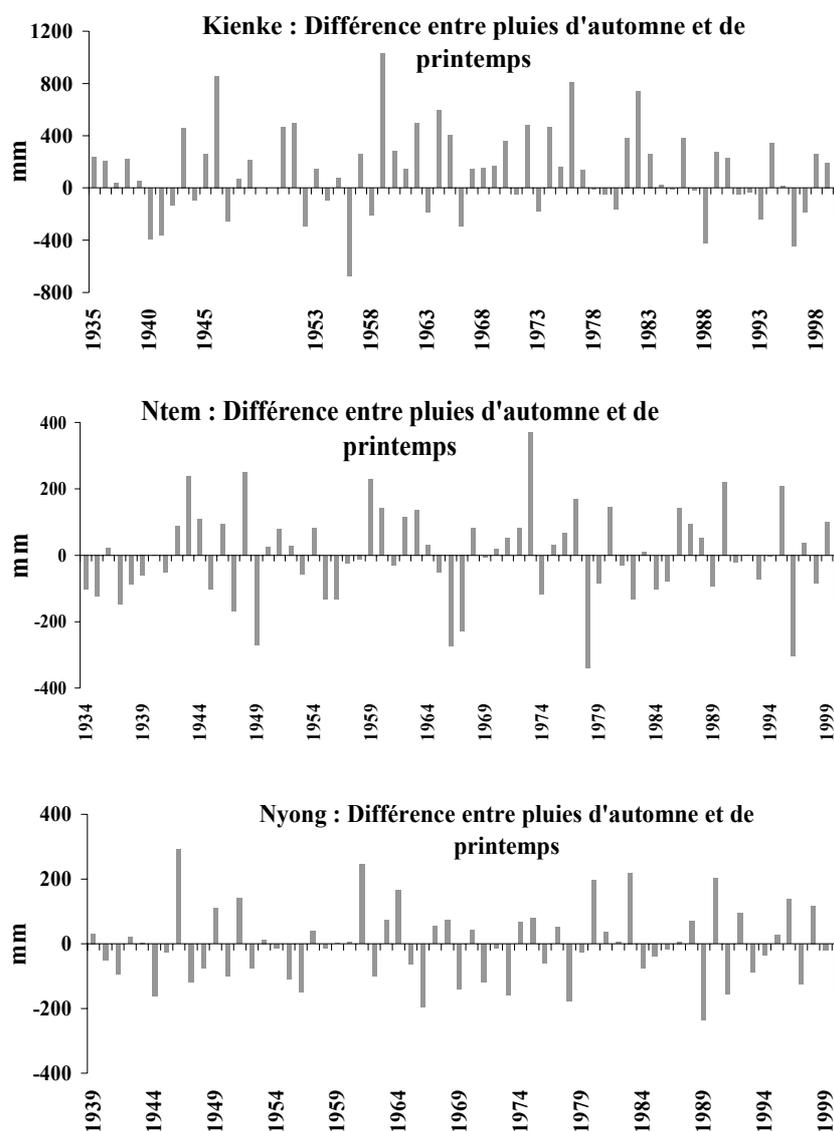


Figure 6.5 : Différence entre les totaux pluviométriques de la saison des pluies de mars, avril, mai et juin (printemps) et de celle de septembre, octobre et novembre (automne) sur les bassins versants forestiers.

En climat équatorial, les termes « petite saison des pluies » et « grande saison des pluies » sont souvent utilisés pour désigner respectivement la saison de mars à juin et celle de septembre à novembre. Bien que la première dure quatre mois et la deuxième trois, on peut se rendre compte qu'il n'y a pas de différence significative entre les pluies des deux saisons.

L'évolution de la différence entre les apports d'automne et ceux de printemps (figure 6.5) montre que la prédominance de l'une ou l'autre des deux saisons est assez relative. On hésiterait, malgré le vocabulaire en usage de parler de « petite saison des pluies » pour la première. La différence n'est que d'ordre qualitatif. Les pluies mensuelles sont plus faibles et la saison dure quatre mois, alors qu'elles sont concentrées en trois mois au cours de la seconde. La probabilité pour que le cumul saisonnier des précipitations mensuelles soit plus important en automne est de 0,61 sur la côte, alors qu'elle est de 0,5 sur les bassins intérieurs. Que le cumul des pluies soit plus élevé au Printemps ou en automne, les écarts entre les pluies des deux saisons sont plus élevés sur la Kienke comme indiqué par les écarts-types écartype (Kienke, 327,7 ; Ntem, 138,2 ; Nyong, 114).

3.2.2. Les saisons sèches

La saison sèche est courte sur le bassin du Lom, quatre mois (novembre à février), alors qu'elle dure sept à huit mois (octobre à avril) sur celui du Mayo Tsanaga. Pendant cette période, ces bassins, notamment celui du Mayo Tsanaga, sont entièrement couverts de brume sèche venant des alizés Nord-Est, de l'anticyclone sahararien. De fait, la saison sèche est rigoureusement dépourvue de précipitations, du moins pour les principaux mois (décembre, janvier et février).

Sur les bassins des régions « humides » tropicale (Mungo) et équatoriale (Kienké, Ntem et Nyong), le caractère « sec » n'a pas la même consonance qu'en régions tropicales sèches. La détermination du seuil à partir duquel un mois est considéré comme sec ne fait pas toujours l'unanimité. Suchel (1987) considère comme sèche toute période de 7 jours consécutifs sans pluie, à condition qu'elle soit incluse dans un mois pouvant être rattaché à la(les) saison(s) sèche(s) de la zone considérée.

Si cette considération est adoptée, et en choisissant les cas extrêmes de la région côtière sud-ouest du pays (versant exposé du mont Cameroun) et de l'extrême-nord du pays, le premier ne connaîtrait presque pas de période sèche au cours de l'année, alors que le second serait globalement sec toute l'année. Dans la mesure où la saison des pluies devrait être considérée comme une succession de séquences sèches, interrompues par des averses isolées.

Certains auteurs ont proposé des indices pour définir le caractère sec du mois à partir des données de températures et des précipitations. L'utilisation de l'indice de Gaussen, qui considère un mois sec comme celui au cours duquel la pluie est inférieure à deux fois la température, pour les bassins des régions « humides » (Nyong, Ntem, Mungo, Kienke) aboutit aux résultats qui figurent dans le tableau 6.9.

Tableau 6.9 : Les mois secs suivant le diagramme ombrothermique de Gaussen (moyennes de 1955 à 1980).

Bassin versant	Données de température	Mois secs
Nyong	Yaoundé	décembre, janvier, février
Ntem	Ambam	janvier, juillet, août
Mungo	Mamfe	aucun
Kienké	Kribi	aucun

Il ressort de ces différentes observations que la définition de la saison sèche dépend de chaque région considérée. La saison sèche en région soudano-sahélienne n'a donc pas les mêmes caractères qu'en région « humide », où elle désigne plutôt une période de précipitations relativement faibles.

3.2.3. Les irrégularités dans les répartitions mensuelle et saisonnière des précipitations

Les cycles saisonniers décrits ci-dessus ne sont pas toujours stables. Dans une analyse de la répartition des pluies journalières sur les hautes terres de l'Ouest Cameroun, Tsalefac (1999) remarque que la variabilité intermensuelle des précipitations est très forte, notamment en saison sèche où un seul événement peut égaler la pluviométrie totale du mois. Même en

saison humide, seuls quelques jours de pluies peuvent être suffisants pour donner à un mois l'apparence du mois le plus pluvieux de l'année. Il est fréquent d'observer qu'un mois normalement sec enregistre le total pluviométrique le plus important de l'année. Par ailleurs, Bigot *et al.* (1998) notent que les cycles saisonniers restent les signaux dominants de la variabilité des pluies en Afrique centrale. Cette irrégularité intermensuelle et intersaisonnière influence souvent le cycle saisonnier. Ainsi, le bassin du Mungo a enregistré en 64 années d'observations 22 % d'années irrégulières, le bassin de la Kienké 30 % en 75 années d'observation, le bassin du Ntem 10 % en 66 années d'observations et le bassin du Nyong 17 % en 62 années d'observation. Ces analyses montrent que les irrégularités intermensuelle et intersaisonnière sont plus fréquentes en zones plus humides ; elles révèlent aussi que plus de 60 % de ces irrégularités s'observent à partir de la décennie 1980.

4. VARIABILITE INTERANNUELLE DES PLUIES ET DES ECOULEMENTS : DU MENSUEL A L'ANNUEL

Sur chaque bassin versant, la moyenne spatialisée de la pluie est calculée au pas de temps mensuel (cf 4.3.1). Ainsi, suivant les régimes des précipitations, la variabilité peut être caractérisée aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle. Des séries de précipitations existent parfois depuis les années 1930. Mais les séries d'écoulements ne commencent qu'au début des années 1950. Il est donc nécessaire d'utiliser des séries chronologiques de longueur identique et débutant la même année afin de pouvoir comparer l'évolution des bilans hydrologiques. L'essentiel des résultats présentés concernera alors la période 1950/2000. En revanche, quelques données plus anciennes seront évoquées par la suite pour une comparaison avec d'autres sécheresses du 20^e siècle.

4.1. La caractérisation d'une variabilité à l'échelle annuelle

Les précipitations et les modules annuels sont calculés sur l'année hydrologique, suivant la définition de Roche (1972). Le début coïncide avec le premier mois pluvieux consécutif à la saison sèche (Printemps boréal pour les bassins versants équatoriaux). Par souci d'homogénéité, l'année hydrologique moyenne allant du début mars à fin février est choisi

pour les bassins des zones équatoriale et tropicale. Ainsi, le total pluviométrique et le module de l'année N correspondent à l'année hydrologique N/N+1 avec la crue en année N et l'étiage, généralement en année N+1.

4.1.1. La variabilité des précipitations

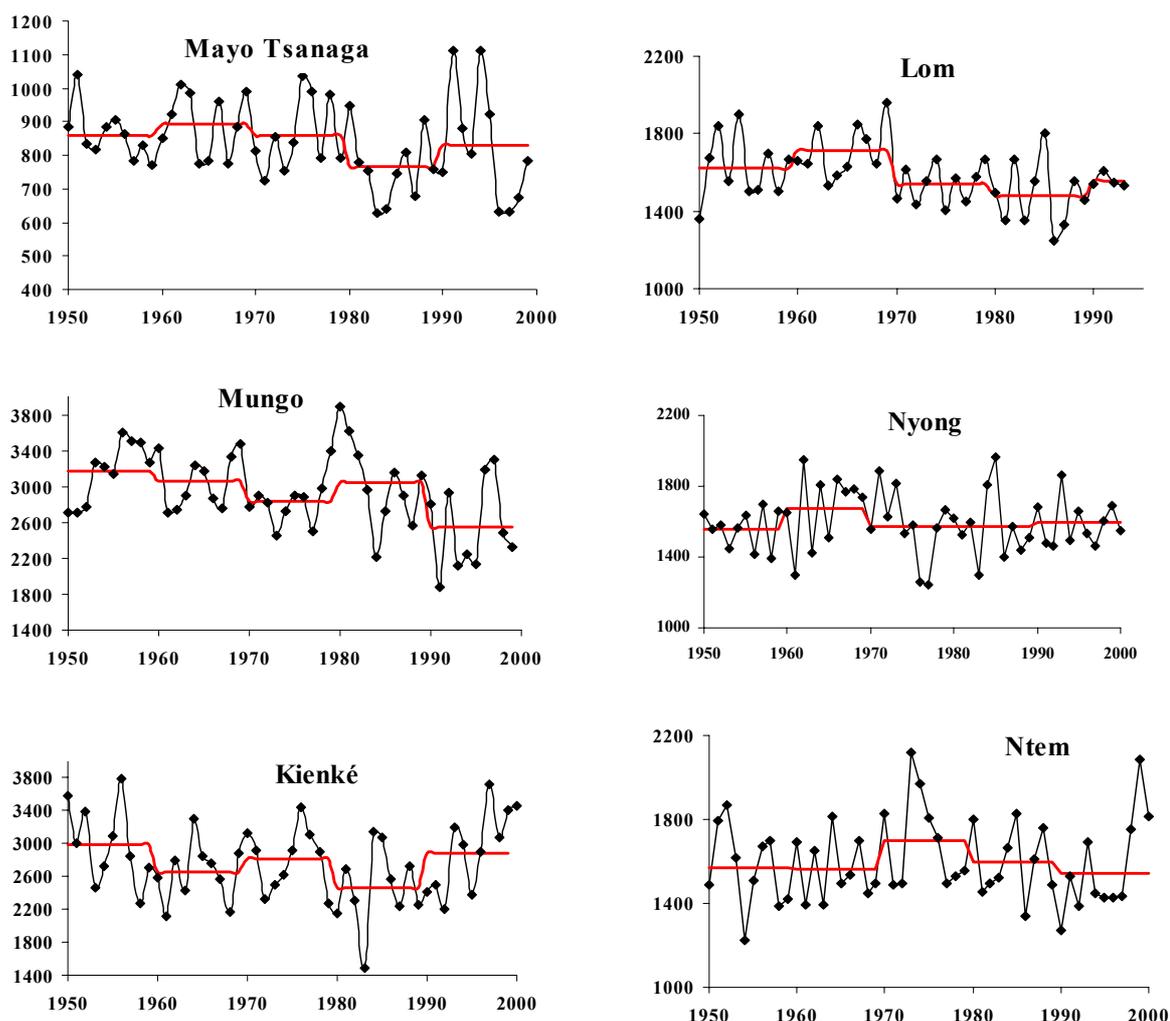


Figure 6.6 : Evolution interannuelle des cumuls des pluies annuelles sur les bassins versants et moyennes décennales (valeurs en mm).

Les pluies annuelles (figure 6.6), sur le Mayo Tsanaga, le Lom et le Mungo (bassins tropicaux à une seule saison des pluies), montrent, une tendance à la baisse. Sur le bassin du Mayo Tsanaga, les années 1991 et 1994 se distinguent, par une pluviométrie élevée (respectivement 1113 mm et 1112 mm). Le bassin du Mungo, situé dans la région la plus arrosée du pays,

connaît les déficits les plus accentués, notamment durant la décennie 1990, alors que cette décennie apparaît comme plus pluvieuse, mais toujours en deçà de la pluviométrie moyenne sur 1950-2000, dans les régions sahéliennes d'Afrique (Paturel *et al.*, 2002 ; L'Hôte *et al.*, 2002 et 2004 ; Ardoin *et al.*, 2003).

La variabilité est beaucoup plus modérée pour les bassins équatoriaux. Une légère tendance à la baisse, moins perceptible que sur les trois premiers bassins cités, semble se dessiner. Le bassin côtier de la Kienké présente, après la décennie la plus sèche de 1980, une réelle tendance à des pluies plus importantes.

Le paroxysme de l'actuelle sécheresse apparaît néanmoins d'une façon générale en 1983/1984 sur les six bassins versants.

Ces résultats sont assez proches des observations faites par Mahé (1993) à partir des pluies homogénéisées sur des unités plus grandes. La variabilité sur le bassin du Mungo est analogue à celle de la région MONTCAM. Sur les bassins du Ntem et du Nyong la variabilité est semblable à la région SANAGA. La variabilité sur le Lom est plus comparable à celle de la région RCA. L'adoucissement relatif des déficits peut être rattachée à l'influence des hautes terres de l'Adamaoua. La variabilité sur le Mayo Tsanaga est à rapprocher de celle la région JOS, avec aussi des modérations dues aux monts Mandara Le bassin de la Kienke correspondrait à la partie Nord de la région COTNEQ.

4.1.2 La variabilité des écoulements

L'évolution interannuelle des débits moyens annuels est représentée sur les graphiques de la figure 6.7. Comme pour la pluviométrie, on y porte également les moyennes par décennie pour permettre une meilleure visualisation des tendances. Le bassin du Mayo Tsanaga n'est observé qu'à partir de 1966. Mais en dehors des années 1975 et 1994 de bonne hydraulicité, les valeurs de débit durant la période postérieure à 1970 restent faibles, autour de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

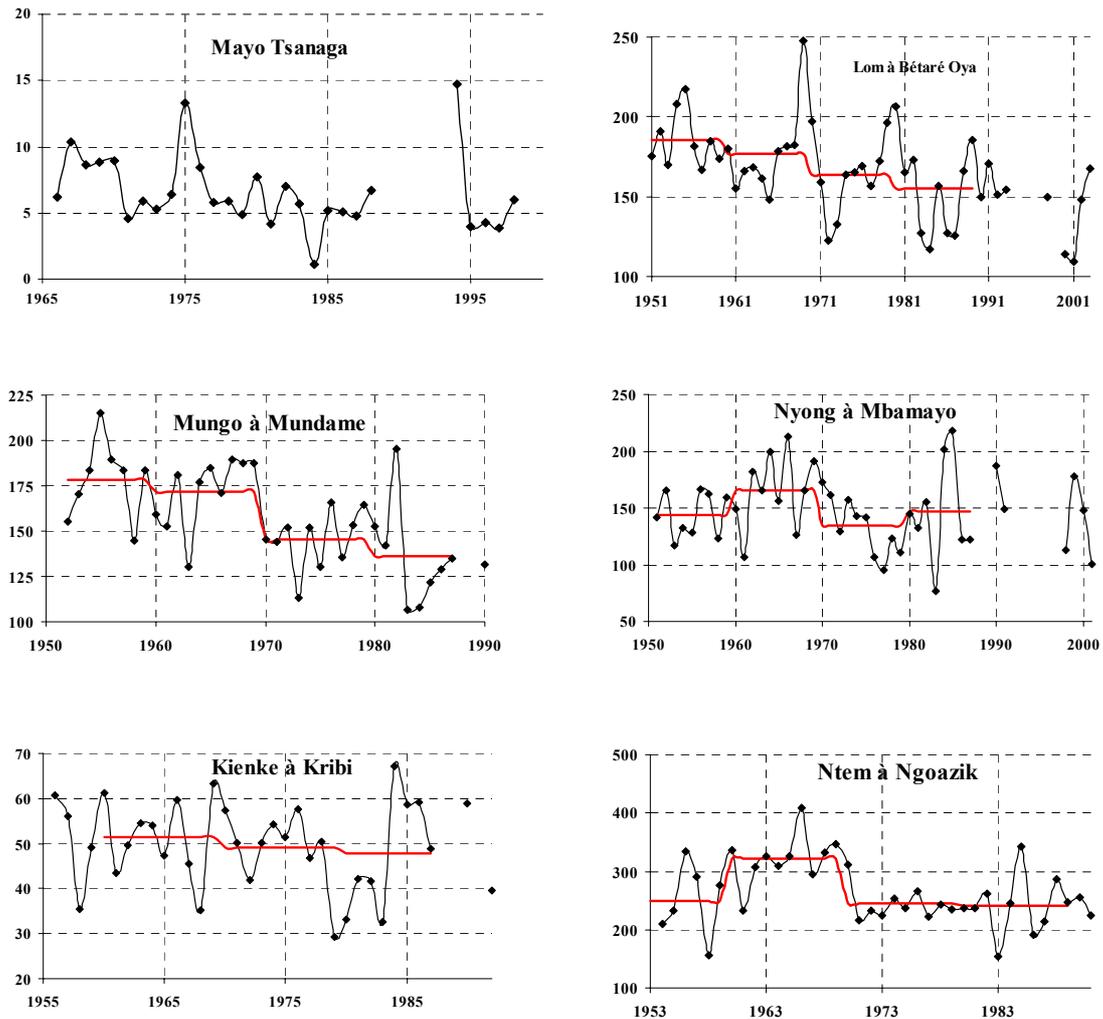


Figure 6.7 : Variations des débits moyens annuels sur les bassins versants (valeurs en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Pour les autres bassins versants, même si on observe de façon sporadique d'importants écoulements pour certaines années récentes, les décennies 1950 et 1960 (surtout cette dernière sur les bassins du Nyong et du Ntem) sont globalement plus humides. La baisse des écoulements est continue parfois depuis la décennie 1960, et s'accroît généralement dans le courant de la décennie 1970. Les écoulements du Mungo et du Ntem accusent une baisse sensible au début de la décennie 1970. Sur le Lom, l'évolution des écoulements dessine une succession d'épisodes relativement humides et secs, présentant des débits minimums (ou maximums) qui tendent d'une façon linéaire vers des valeurs plus faibles. La baisse relative est de l'ordre de 25,5 %, soit une diminution de $48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 1951 et 2000. Cette tendance linéaire à la décroissance des débits a été observée sur l'Oubangui à Bangui, un autre fleuve de l'Afrique Centrale dont le bassin est également soumis essentiellement au régime tropical

humide (Wesselink *et al.*, 1995). Sur le Nyong et la Kienke, les écoulements remontent plus vite à des valeurs moyennes après l'épisode sec et la tendance générale n'évolue pas vers une persistance de l'épisode sec.

En dépit de la reconstitution effectuée pour certains débits manquants, la plupart des chroniques s'arrêtent au début des années 1990. Toutefois les observations faites sur les pluies indiquent que les situations observées pendant les décennies 1970 et 1980 ne se sont guère améliorées de façon significative durant de la décennie 1990.

Tableau : 6.10 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqué aux pluies et aux modules annuels et calculs des taux de variation.

Bassin	Paramètre	Chronique	Tendance (corrélation sur le rang)	Année de rupture (Pettitt au seuil de confiance de 90%)	Moyenne (mm ; m ³ .s ⁻¹)	Taux de variation (%)
Mayo Tsanaga	Pluie	1950/2000	na	1980	873 793	- 9
	Débit	1965/1998	-	-	-	-
Lom	Pluie	1950/1993	na	1969	1666 1519	- 9
	Débit	1950/1993	na	1970	181 149	- 18
Mungo	Pluie	1950/2000	na	1983	3069 2612	- 15
	Débit	1950/1987	na	1969	174 144	- 17
Nyong	Pluie	1950/2000	a	-	1595	0
	Débit	1950/1990	a	-	265	0
Ntem	Pluie	1953/2000	a	-	1591	0
	Débit	1953/1991	na	1970	296 239	- 19
Kienke	Pluie	1955/2000	a	-	2760	0
	Débit	1955/1992	a	-	50	0

a : série aléatoire ; na : série non aléatoire

Les résultats du test de Pettit, appliqué aux chroniques des pluies et des débits (tableau 6.10), sont en accord avec les tendances décrites. La rupture a lieu en général autour du début des années 1970, aussi bien pour les pluies que pour les débits annuels. Sur les bassins équatoriaux, les moyennes interannuelles des pluies annuelles n'ont pas subi de changement significatif, détectable par le test au seuil de confiance de 90%. Par contre sur les bassins

versants tropicaux, les déficits sont de l'ordre de 15 % pour le Mungo et 9 % pour le Lom et le Mayo Tsanaga. Ces résultats sont proches de ceux de Olivry (1974) concernant les cartes des écarts de pluie durant la sécheresse 1972-1973 (figure 3.8). Ils corroborent aussi les observations de Servat *et al.* (1999) qui constatent que sur l'Afrique occidentale et centrale non sahélienne les modifications les plus importantes concernent les régimes pluviométriques extrêmes : les plus humides (de la Guinée à la Côte d'Ivoire) et les plus secs (en bordure sahélienne). La répartition spatiale des déficits pluviométriques semble alors conservée depuis le début de la sécheresse : **Les plus forts déficits sont enregistrés dans des régimes pluviométriques extrêmes (bassin du Mungo et bassin du Mayo Tsanaga).**

Les déficits calculés sur les débits sont plus importants, 18 % sur le Lom, 17 % sur le Mungo, ce qui confirme l'amplification du phénomène de sécheresse sur les écoulements. Le léger affaiblissement de la pluviométrie sur le Ntem, non décelable par le test, a néanmoins entraîné une réduction de 19 % sur les débits.

En dépit du fait que les chroniques de débits ne commencent qu'en 1950, le test de segmentation des séries est appliqué aux chroniques de pluies, depuis 1930. On remarque qu'il a existé plusieurs séquences sèches et humides de durées plus ou moins longues dans les bassins versants étudiés et, que dans certains de ces bassins versants, en dépit de la persistance de l'actuelle sécheresse, il y aurait eu un épisode sec plus intense que l'actuel au cours des années 1940. Il aurait duré en moyenne 15 ans (1936-1950) sur le bassin versant du Mungo et celui du Lom avec des déficits allant de 15 % à 20 % par rapport à la séquence humide qui a suivi. Il aurait duré moins longtemps dans le sud (Kienke, Nyong et Ntem), de 1940 à 1944.

Depuis quelques décennies, une baisse des pluies est observée en zone tropicale camerounaise. L'occurrence du changement de la moyenne se situe autour de la même période que celle indiquée dans les études régionales ; c'est-à-dire entre 1970 et 1980. Les déficits les plus importants apparaissent dans les régions les plus pluvieuses, tropical côtier (bassin versant du Mungo) et équatorial côtier (bassin versant de la Kienke) (figure 6.8). Les déficits conséquents sur les débits sont généralement supérieurs à ceux sur les précipitations. La diminution des pluies annuelles n'est presque pas sensible en zone équatoriale. Mais la légère fluctuation a entraîné une baisse perceptible des écoulements sur certains bassins équatoriaux.

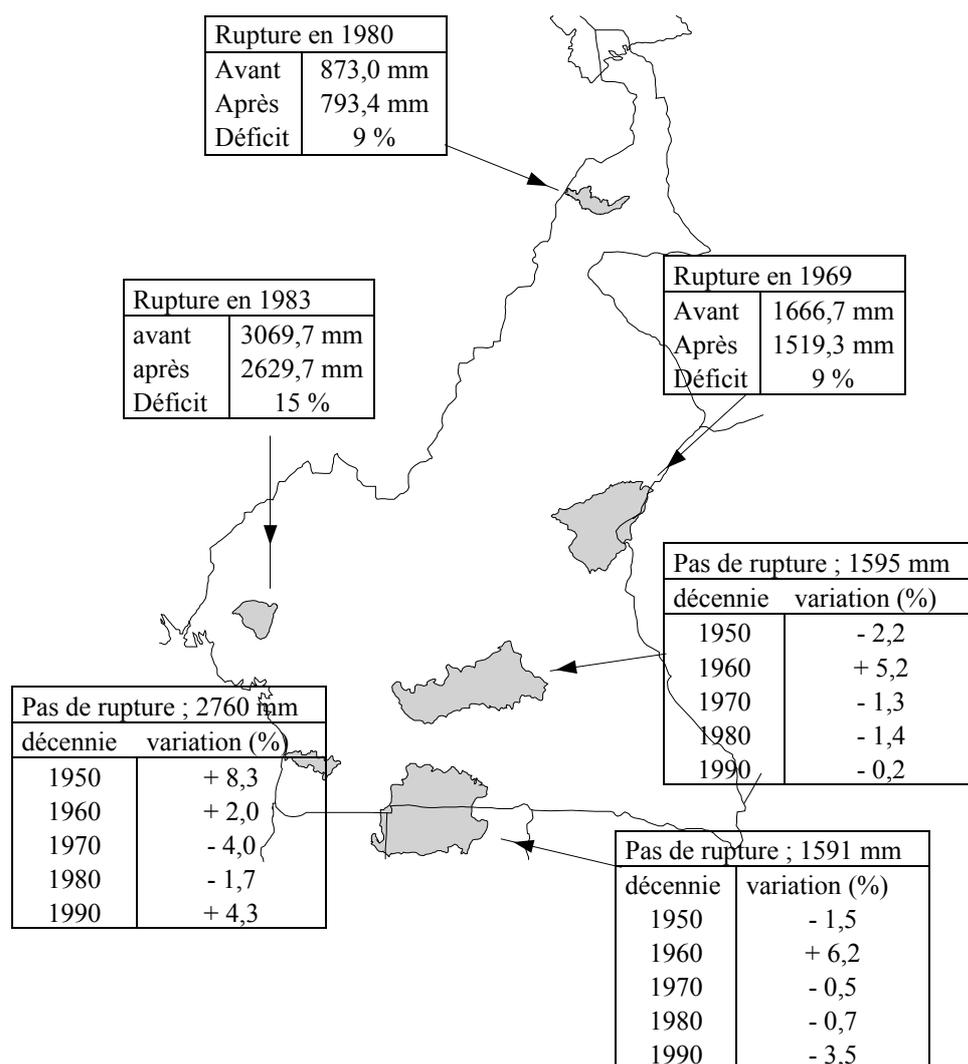


Figure 6.8 : Quelques aspects de la variabilité des précipitations annuelles sur les bassins versants étudiés.

4.2. La caractérisation d'une variabilité aux échelles saisonnière et mensuelle

Cette section sera consacrée à voir de quelle façon les saisons ont été affectées dans leur déroulement, tant pour les précipitations que pour les écoulements.

En régime équatorial, l'année hydrologique est découpée en quatre périodes suivant les profils saisonniers des précipitations qui seront dénommées ainsi qu'il suit :

- de mars à juin (MAMJ) : « petite saison des pluies », qui correspond au printemps boréal,

- juillet et août (JA) : « petite saison sèche » qui correspond à la récession estivale en été boréal,
- de septembre à novembre (SON): « grande saison des pluies » qui correspond à l'automne boréal,
- de décembre à février (DJF) : « grande saison sèche » qui correspond à la récession hivernale en hiver boréal.

Les variables analysées ici sont les totaux pluviométriques et les débits moyens de chaque saison, les valeurs mensuelles, les maxima mensuels des saisons des pluies et leur date d'apparition. Les méthodes appliquées sont les mêmes que pour les variables annuelles.

4.2.1 La variabilité des pluies

4.2.1.1 Les pluies de saisons sèches

L'évolution des cumuls de pluie pour chacune des deux « saisons sèches » est représentée sur la figure 6.9. Les pluies de JA et les pluies de DJF montrent des variabilités avec des tendances tout à fait différentes de part et d'autre d'une période charnière, entre 1975 et 1980.

De 1950 à 1978 pour le bassin versant de la Kienke, les précipitations estivales et hivernales n'évoluent pas sensiblement à la baisse ou à la hausse. Les totaux sont globalement égaux, entre 250 mm et 300 mm. Les précipitations hivernales sont plus importantes sur le Ntem, alors que sur le Nyong ce sont les précipitations estivales qui sont légèrement plus élevées.

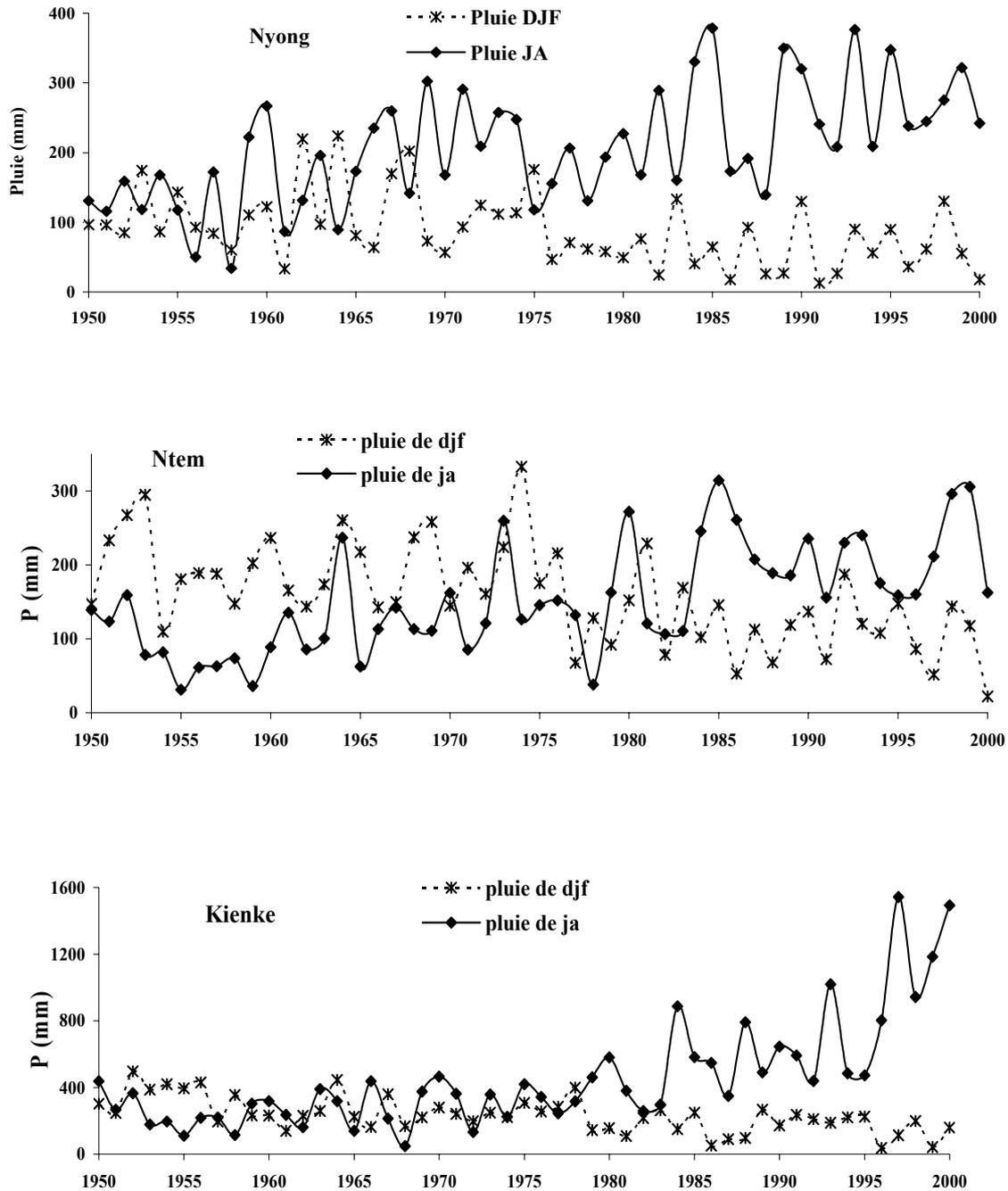


Figure 6.9 : Evolution interannuelle des pluies estivales et hivernales sur les bassins versants (mm).

A partir des années 1970 et de façon plus remarquable depuis la décennie 1980, les précipitations des deux « saisons sèches » (JA et DJF) suivent des tendances opposées pour les trois bassins versants équatoriaux. Les pluies de JA augmentent en même temps que celles de DJF diminuent. L'augmentation progressive des pluies de JA sur le bassin côtier de la Kienke, notamment au cours de la décennie 1990, est très importante. Sur le bassin du Ntem,

les pluies de DJF qui étaient avant la décennie 1970 supérieures à celle de JA leur sont inférieures après, traduisant une évolution du régime des précipitations à caractère austral vers un autre régime plus boréal.

Le test de Pettit (tableau 6.11) indique les dates d'occurrence de la rupture dans les chroniques des pluies hivernales (DJF) et estivales (JA). Les déficits(excédents) sont calculés par rapport à la moyenne de la séquence précédant la date de rupture. Les ruptures sont localisées globalement durant la décennie 1970. Les déficits des pluies de DJF sont de l'ordre de 43 % sur le Ntem, 48 % sur le Nyong et 42 % sur la Kienké. L'accroissement des pluies de JA est encore plus important avant et après la date de rupture. On enregistre des taux de 52 % sur le Nyong, 83 % sur le Ntem. Les pluies sont multipliées par 2,5 sur la Kienke. La figure 6.10 est parfaitement illustrative de l'écart croissant qui s'établit entre les précipitations des deux « saisons sèches ». Le rapport des pluies k (pJA/pDJF) est multiplié par un facteur moyen de 3 entre la décennie 1960 et 1990.

Tableau : 6.11 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux totaux des précipitations estivales et hivernales, chronique de 1950 à 2000 et calcul des taux de variation.

Bassin versant	Paramètre	Tendance (corrélacion sur le rang)	Date d'occurrence de la rupture (Pettitt à 90%)	Moyenne (mm)	Taux de variation (%)
Nyong	Pluie de JA	na	1981	174 265	+ 52
	Pluie de DJF	na	1975	113 59	- 48
Ntem	Pluie de JA	na	1972	104 190	+ 83
	Pluie de DJF	na	1976	199 113	- 43
Kienke	Pluie de JA	na	1978	269 658	+ 144
	Pluie de DJF	na	1978	283 163	- 42

Cette prédisposition à l'augmentation des pluies de JA, ressentie jusqu'à la limite septentrionale de la zone équatoriale (Bafia et Nanga Eboko), apparaît comme un phénomène

général qui indique un changement dans le profil des précipitations annuelles en zone équatoriale camerounaise.

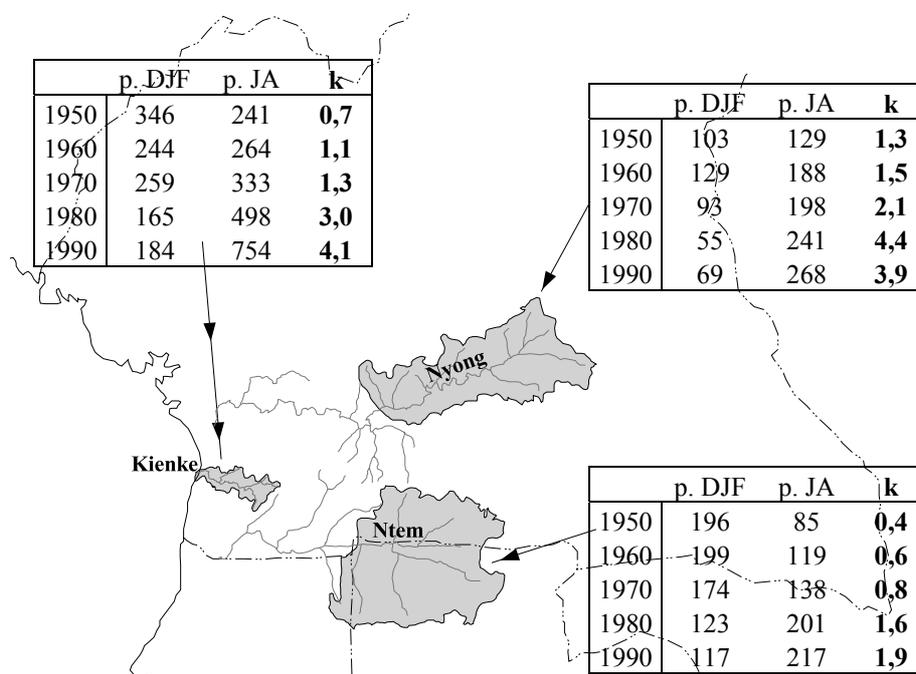


Figure 6.10 : Comparaison entre les précipitations hivernales (p. DJF) et estivales (P. JA), k représente le rapport p.JA/p.DJF.

Ce phénomène toucherait aussi, au moins en partie, d'autres zones équatoriales en Afrique Occidentale. Des cartes de variations relatives des précipitations établies par Ouedraogo (2001) font état d'une augmentation de la pluie du mois d'août, parfois supérieure à 80 % au sud de la Côte d'Ivoire, alors que les totaux des précipitations annuelles ont baissé jusqu'à 30 %.

4.2.1.2. Les pluies de saison des pluies

A l'inverse des deux saisons sèches, les deux saisons des pluies (printemps, MAMJ et automne, SON) ont des variations globalement similaires (figure 6.11 et 6.12). Leur évolution interannuelle, à la baisse ou à la hausse, est similaire à celle des totaux pluviométriques annuels (figure 6.8). On observe quelques périodes de précipitations plus faibles, sans pour

autant qu'elles induisent une réelle tendance à la baisse, même si d'une manière générale pour les trois bassins versants, la séquence après 1980 semble légèrement déficitaire.

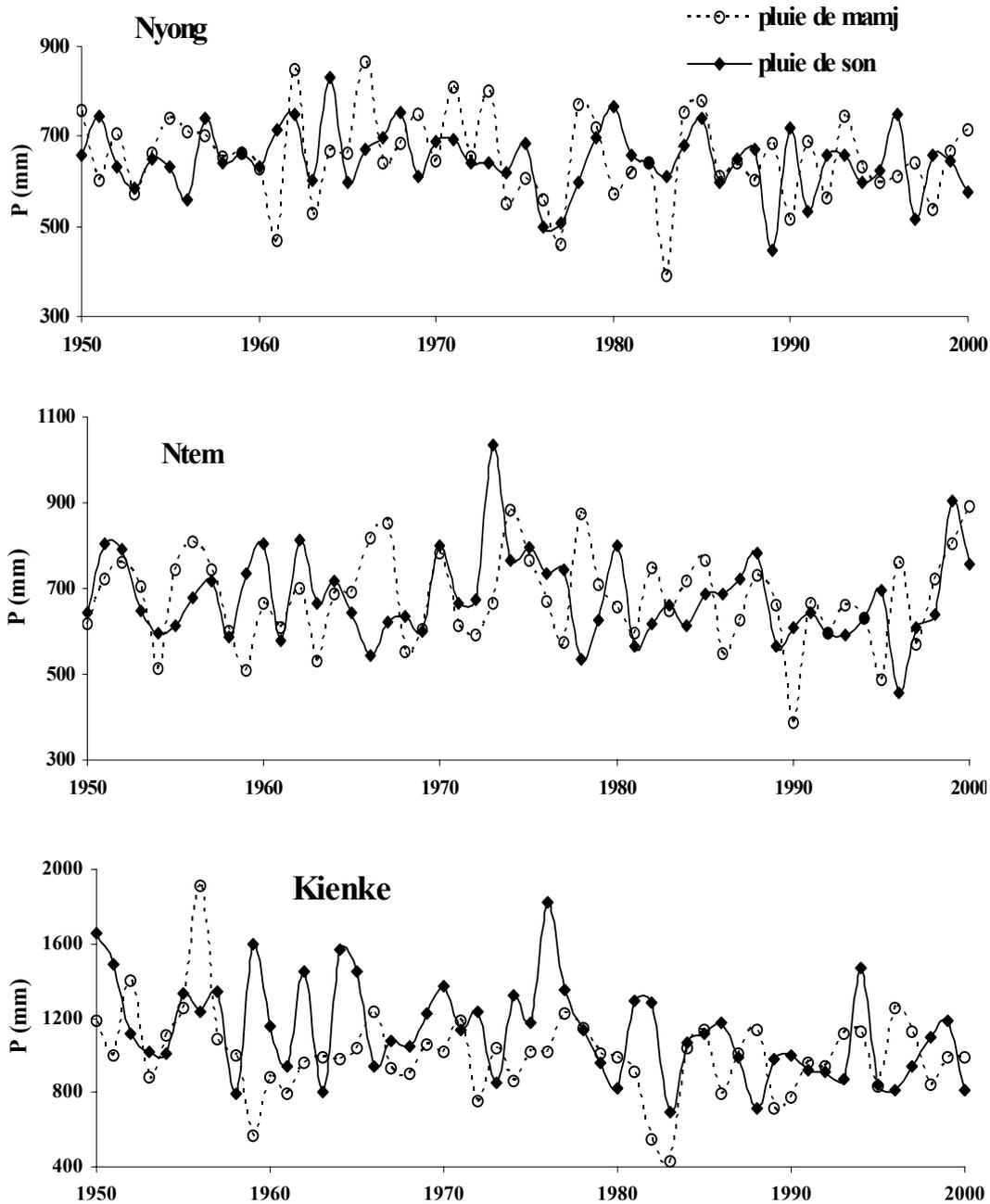


Figure 6.11 : Evolution interannuelle des pluies de MAMJ et de SON sur les bassins versants (mm).

Les variations des précipitations se font dans le même sens à la baisse au cours des trois dernières décennies. Les déficits sont faibles et atteignent rarement 10 % (figure 6.12). Le rapport k ($P.SON/P.MAMJ$) reste constant et égal à 1. Ceci atteste que les précipitations des 2

saisons des pluies, globalement de même ampleur, ont évolué parallèlement, avec une faible diminution au cours des trois dernières décennies. Seul, sur la Kienke, ce coefficient est légèrement supérieur à 1.

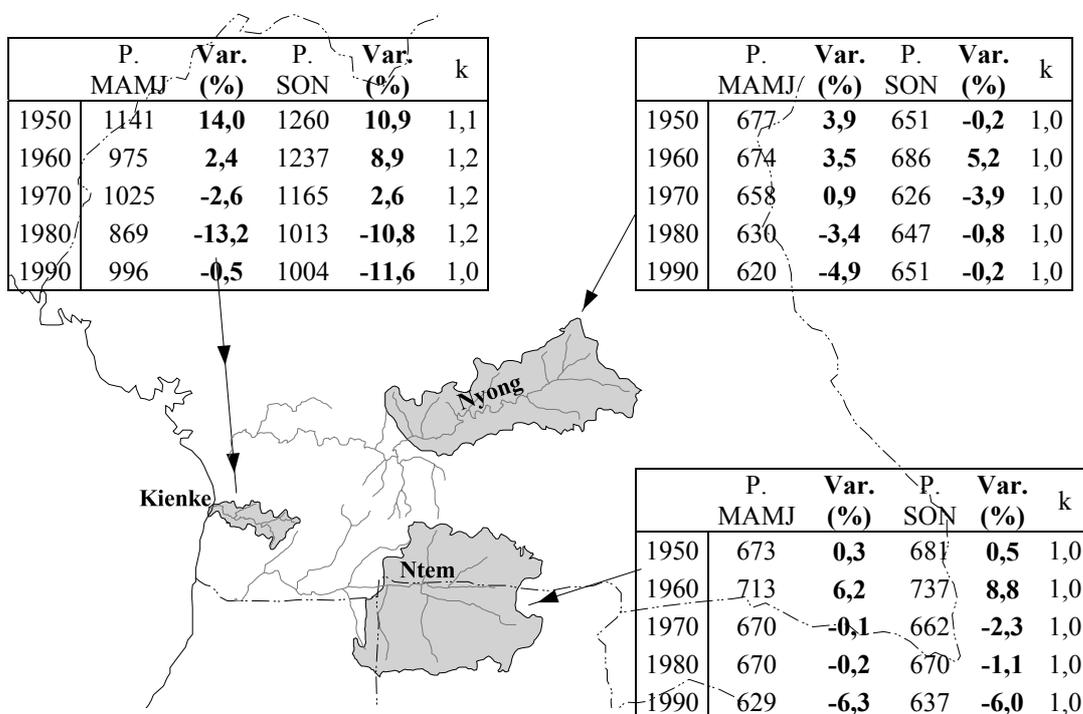


Figure 6.12 : Comparaison des variations (Var.) par décennie des précipitations de printemps (P. MAMJ) et de celles d'automne (P.SON) sur les bassins versants équatoriaux, k représente le rapport P.SON/P.MAMJ.

Tableau 6.12 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettitt appliqués aux pluies de printemps et d'automne, chronique de 1950 à 2000.

Bassin versant	Paramètre	Tendance (corrélation sur le rang)	Date d'occurrence de la rupture (Pettitt à 90%)	Moyenne (mm)	Taux de variation (%)
Nyong	Pluie de MAMJ	a	Pas de rupture	653	0
	Pluie de SON	a	Pas de rupture	648	0
Ntem	Pluie de MAMJ	a	Pas de rupture	675	0
	Pluie de SON	a	Pas de rupture	679	0
Kienke	Pluie de MAMJ	a	Pas de rupture	1001	0
	Pluie de SON	na	1978	1233 997	- 19

Le test de Pettit appliqué aux chroniques des pluies de printemps et d'automne n'indique pas de rupture sauf pour les pluies d'automne sur le bassin versant de la Kienke, avec une occurrence autour de 1978 (tableau 6.12). Le déficit correspondant est de 19 %. Ce déficit serait dû à un déplacement progressif des maximums de pluies mensuelles vers le mois d'août, comme nous le verrons au tableau 6.13.

L'analyse de la répartition mensuelle des précipitations annuelles révèle que, sur le bassin versant du Ntem et sur celui du Nyong, l'occurrence d'apparition du maximum des pluies mensuelles se situe en mai pour la période de mars à juin et, en octobre pour la période de septembre à novembre. Par contre, pour le bassin versant de la Kienke, les maximums pluvieux habituellement observés au mois d'octobre au cours des décennies humides 1950 et 1960, se déplacent vers le début de la saison (en septembre), puis en août (tableau 4.13). Ce déplacement du maximum pluvieux mensuel de l'année vers le mois d'août pourrait être à l'origine de la baisse de 19 % de la pluie d'automne (tableau 6.12), qui n'a néanmoins pas d'incidence significative sur le total annuel. La comparaison avec la décennie 1940, bien encadrée par la période 1936-1950 également déficitaire, principalement autour du golfe de Guinée (Servat *et al.*, 1999), atteste bien de ce que le déplacement du maximum pluvieux d'automne vers le début de la saison est associé à une manifestation de la sécheresse. Nous manquons malheureusement de données sur d'autres bassins côtiers autour du golfe de Guinée.

Tableau 6.13 : Occurrence d'apparition du maximum pluvieux sur le bassin de la Kienke.

Décennie	Fréquence d'apparition des maximums pluvieux mensuels par décennie		
	Août	Septembre	Octobre
1940	1	6	3
1950	0	2	8
1960	0	2	8
1970	0	7	3
1980	2	6	2
1990	5	3	2

4.2.1.3. Variabilité des pluies et facteurs du climat

Sous les tropiques, le cycle hydrologique est sensible aux conditions de surface (relief, albédo, température, végétation) et aux mouvements verticaux qui se développent dans la convection profonde. Les travaux des climatologues, basés sur les Modèles de Circulation Générale (MCG) ont montré une connexion statistique entre la circulation générale et certains paramètres continentaux (couvertures forestières) et océaniques comme la Température de Surface Marine (TSM) notamment.

Les vingt dernières années sont marquées par l'existence de fréquentes anomalies positives du phénomène El Niño-Southern Oscillation (ENSO), ainsi que par l'installation d'un gradient méridien assez persistant d'anomalies de température de surface de l'atlantique tropical. Ce forçage des conditions de surface affecte la circulation de l'atmosphère, notamment à travers l'amplitude et le positionnement des branches des cellules de Hadley et Walker, et de fait, les précipitations (Fontaine *et al.*, 1998). Une anomalie de TSM de l'Atlantique nord négative (ou positive) entraînerait une position plus méridionale (ou occidentale) de la ZCIT qui se traduirait par une diminution (ou augmentation) des pluies au Sahel (Fontaine *et al.*, 1998). La situation extrême de 1984 au Sahel est décrite par Mahé et Citeau (1993). Au mois d'août, pendant que les pluies sont déficitaires sur le Sahel, les zones équatoriales enregistrent d'assez fortes précipitations qui génèrent des écoulements importants.

Ces interactions à l'interface océan-atmosphère-continent sont très complexes. Mais il est encore difficile de corrélérer avec précision les pluies et les différents facteurs, même pris séparément. Il nous semble toutefois que le renforcement des pluies et l'apparition de plus en plus fréquente du maximum mensuel en août observé au cours des deux dernières décennies en zone équatoriale camerounaise, peuvent être liés, au moins en partie, à une quasi-permanence de la zone C du FIT sur la zone équatoriale au mois d'août. Cet important apport des précipitations de mousson pourrait être amplifié par la forêt dense sempervirente sur la bande côtière en ce sens que le recyclage (Bigot, 1997) peut être plus important quand de la vapeur d'eau est disponible.

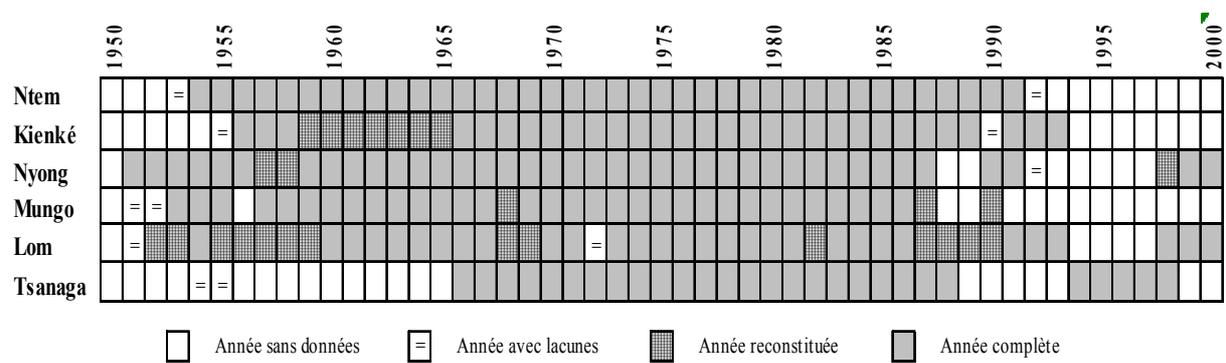
Les modifications décrites dans les régimes saisonniers des précipitations ont sans doute eu des conséquences sur les régimes des écoulements. L'analyse des débits permettra d'apprécier

l'impact de ces changements sur les ressources en eau dans les bassins étudiés et d'apporter une contribution à la caractérisation de la variabilité climatique en zone humide équatoriale.

4.2.2 La variabilité des écoulements

La variabilité des écoulements est étudiée en utilisant des données collectées à partir de diverses banques, critiquées, et dont certaines valeurs mensuelles ont été reconstituées (voir paragraphe 1.2). Le tableau 6.14 indique les structures des séries de données utilisées, leur longueur, les données reconstituées et les lacunes encore existantes.

Tableau 6.14 : Nombre de données de débit utilisées.



Dans ce tableau, l'année sans données (□) indique une année pour la quelle nous n'avons pu trouver aucune donnée hydrométrique, tandis que l'année complète (■) désigne une année où tous les mois ont été observés. L'année avec lacune (▤) signifie que certains mois sans données n'ont pu être reconstitués. Enfin, les années reconstituées (▨) sont celles pour lesquelles nous avons reconstitué un ou quelques mois, généralement de décrue ou de basses eaux, par interpolation ou corrélation avec les données de la même station, ou avec celles des stations voisines.

Comme pour les pluies, les débits moyens sont calculés pour chacune des saisons. L'examen des débits moyens des deux « saisons sèches » (juillet et août, JA et décembre à février, DJF) montre une période relativement stable avant la décennie 1970, correspondant à la période humide (figure 6.13). Ensuite une diminution synchrone des débits d'hivers (débits de DJF) et des débits d'été (débits de JA) jusqu'au début de la décennie 1980. A la fin de la décennie

1980 et au début de la décennie 1990, on observe d'une manière générale, une augmentation des débits de JA. Cette augmentation, timide mais continue, est concomitante avec l'augmentation de la pluie et montre que les pluies estivales participent à maintenir raisonnablement les écoulements en juillet et août. Ceci est parfaitement visible en 1984 et 1985, années au cours desquelles on observe les précipitations estivales les plus fortes (figure 6.9), et qui ont généré aussi d'importants écoulements en juillet et août sur l'ensemble des bassins équatoriaux camerounais (figure 6.13). Les débits de la « grande saison sèche » par contre, restent relativement faibles et dans la plupart des cas, continuent à diminuer. Ceci corrobore une fois de plus l'évolution des pluies qui ont aussi baissé. Cet amenuisement des débits de la « grande saison sèche » peut laisser penser à une incidence des séquences pluviométriques déficitaires sur les ressources souterraines des bassins, comme l'ont d'ores et déjà mis en évidence Pouyaud (1986), Olivry (1987, 1996), Liéno *et al.* (1999a) et Mahé *et al.* (2000).

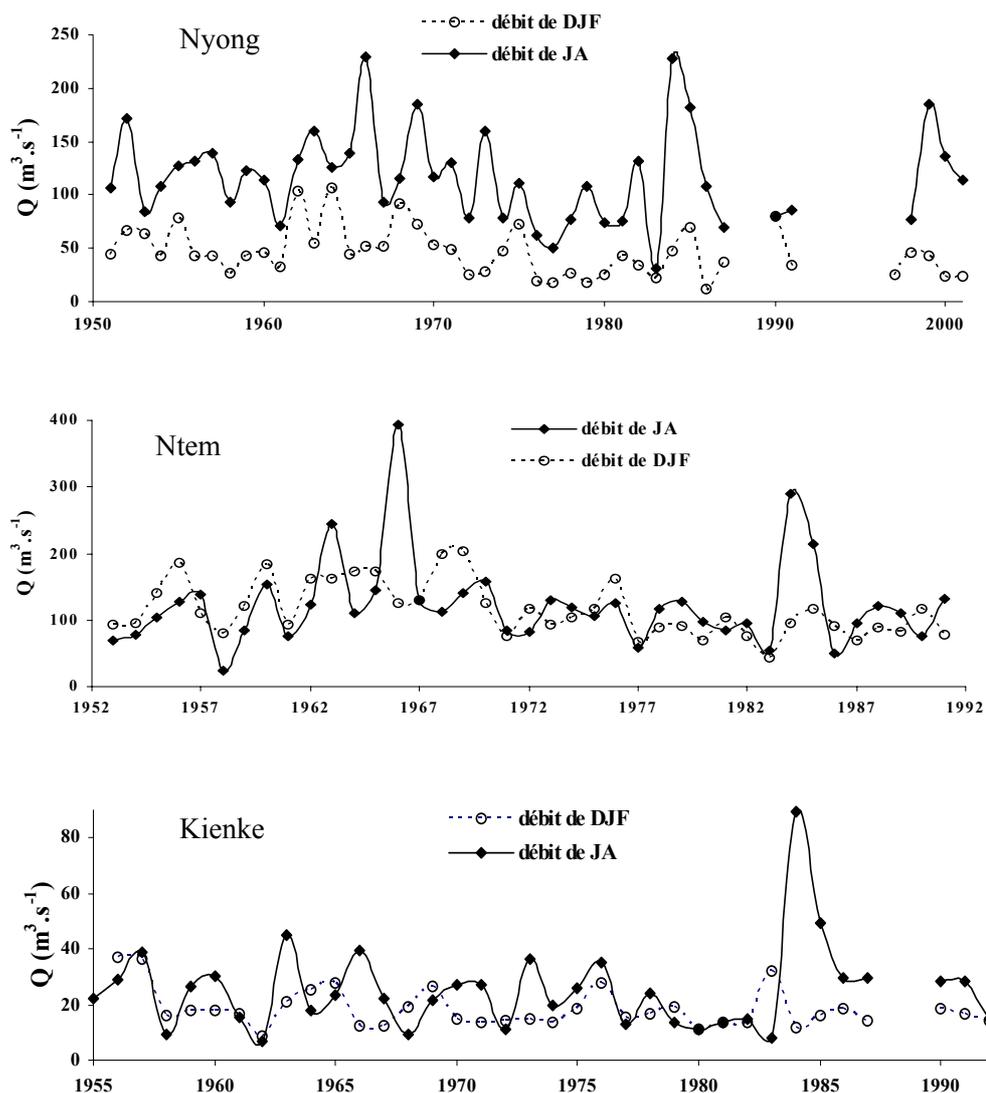


Fig 6.13 : Evolution des débits moyens de JA et DJF (valeur en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) : les débits de MAMJ baissent beaucoup plus que ceux de SON qui, certaines années, sont très élevés.

L'évolution des écoulements des « saisons sèches » décembre à février et juillet et août est en concordance avec celle des pluies qui les génèrent (la baisse des précipitations hivernales entraîne la baisse des écoulements et inversement, l'augmentation des précipitations estivales entraîne l'augmentation des écoulements).

En revanche, on constate de façon générale pour les trois bassins versants équatoriaux, que la diminution des débits de printemps (de mars à juin) est plus importante et continue, alors que les débits d'automne (de septembre à novembre) ont parfois modérément augmenté (figure 6.14).

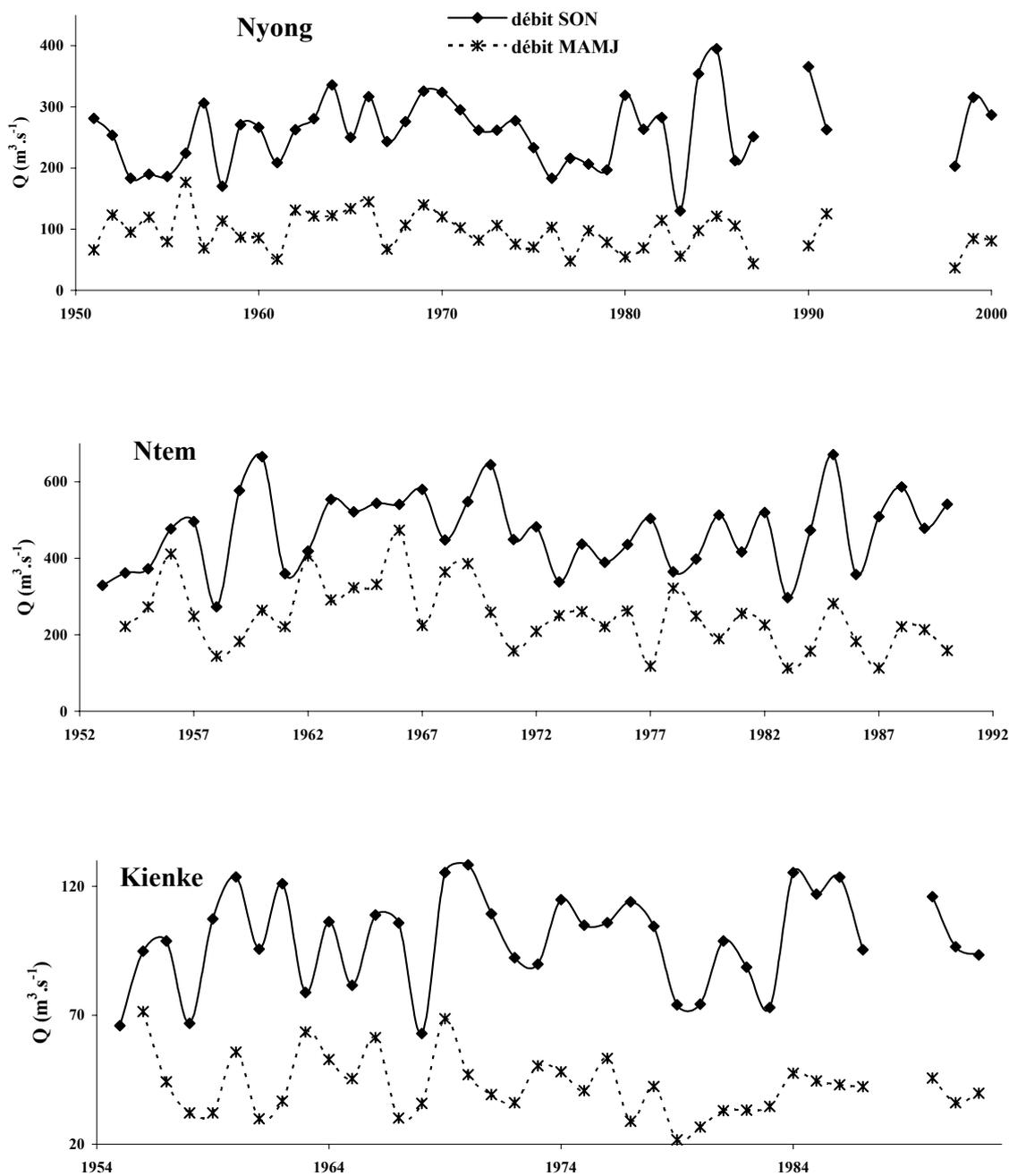


Fig 6.14 : Evolution des débits moyens de MAMJ et SON (valeurs en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

On se rappelle que les précipitations de printemps (MAMJ) et d'automne (SON) ont évolué modérément de sorte qu'aucun changement significatif n'a été détecté, mais de façon parallèle à la baisse, tout en gardant le rapport approximatif de 1 qui existe entre elles.

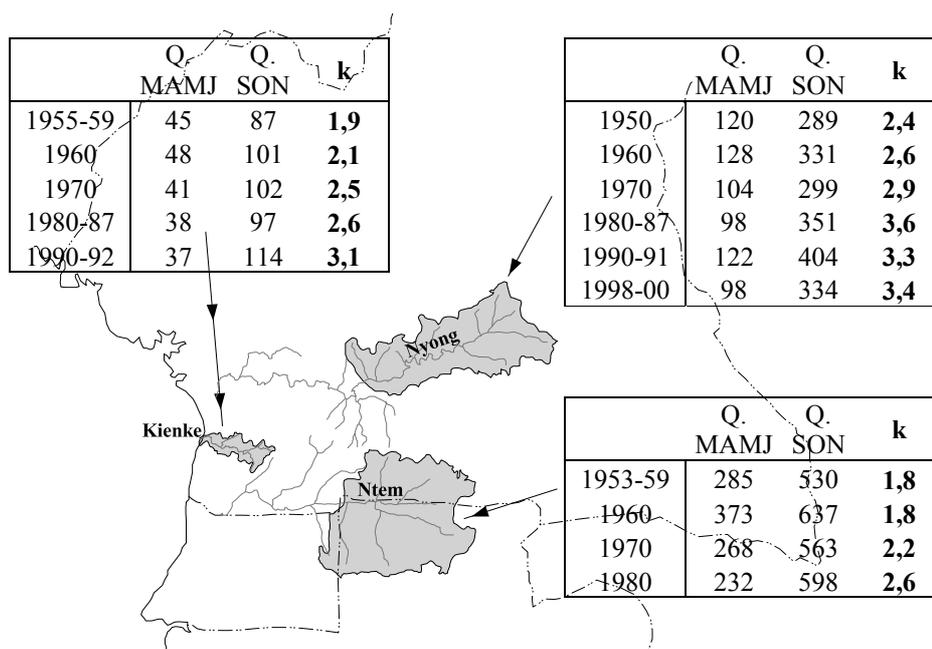


Figure 6.15 : Comparaison entre les écoulements de printemps (Q.MAMJ) et de ceux d'automne (Q.SON) sur les bassins versants équatoriaux, k représente le rapport Q.SON/Q.MAMJ.

Les variations des débits sont opposées pour les deux saisons des pluies. Au printemps, les écoulements continuent de baisser. Les rapports entre les débits moyens des deux saisons sont passés de 2 à 3 pour la Kienke, de 2,5 à 3,5 pour le Nyong et de 1,8 à 2,5 pour le Ntem (figure 6.15). Les procédures statistiques d'analyse des séries de données identifient un changement brutal de la moyenne entre 1970 et 1975. Les variations entre les deux périodes avant et après la rupture sont comprises entre - 20 et - 30 % (tableau 6.15) (rapport $k = Q.SON/Q.MAMJ$).

Les débits d'automne par contre sont revenus à la normale après la décennie 1970. De plus, plusieurs années ont enregistré des écoulements plus importants, alors que les précipitations n'ont pas changé sensiblement. Le phénomène est remarquable dans le bassin de la Kienke où un déficit d'environ 19 % de la pluie d'automne ne s'est pas fait ressentir sur les écoulements qui, sont restés relativement stables.

Tableau 6.15 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux débits moyens saisonniers.

Bassin versant	Paramètre	Tendance (corrélation sur le rang)	Date d'occurrence de la rupture (Pettitt à 90%)	Moyenne (m ³ .s ⁻¹)	Taux de variation (%)
Kienke	Débit de MAMJ	na	1976	46 37	- 20
	Débit de JA	a	Pas de rupture	25	0
	Débit de SON	a	Pas de rupture	97	0
	Débit de DJF	a	Pas de rupture	18	0
Ntem	Débit de MAMJ	na	1970	297 208	- 29,7
	Débit de JA	a	Pas de rupture	121	0
	Débit de SON	a	Pas de rupture	470	0
	Débit de DJF	na	1970	132 98	- 26
Nyong	Débit de MAMJ	na	1972	109 80	- 27
	Débit de JA	a	Pas de rupture	114	0
	Débit de SON	a	Pas de rupture	260	0
	Débit de DJF	na	1972	57 45	- 21

Tableau 6.16 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux paramètres de basses et hautes eaux.

Bassin versant	Paramètre	Chronique	Tendance (corrélation sur le rang)	Date d'occurrence de la rupture (Pettitt à 90%)	Moyenne (m ³ .s ⁻¹)	Taux de variation (%)
Ntem	DCC	1953-1991	a	Pas de rupture	729	0
	DCE	1953-1991	na	1974	66 41	- 33,5
Nyong	DCC	1951-1990	a	Pas de rupture	385	0
	DCE	1951-1990	na	1971	37 24	- 33,7
Mungo	DCC	1950-1990	na	1969	475 400	- 16,6
	DCE	1950-1990	na	1975	34 24	- 29,6
Lom	DCC	1950-1993	a	Pas de rupture	458	0
	DCE	1950-1993	na	1972	45 19	- 59,7

DCC : débit caractéristique de crue, dépassé pendant 10 jours consécutifs par an ;
DCE : débit caractéristique d'étéage, non dépassé pendant 10 jours consécutifs par an.

La même méthodologie appliquée aux pluies et aux débits annuels, saisonniers et mensuels est utilisée pour quelques débits caractéristiques de basses et hautes eaux. Tous les bassins présentent une réelle diminution des débits caractéristiques d'étiage alors que les débits de hautes eaux ne semblent pas varier de façon significative. Le tableau 6.16 résume les résultats des tests de corrélation sur le rang et de détection de rupture. Les variables traitées sont les débits non dépassés pendant dix jours consécutifs (DCE) pour les basses eaux et les débits dépassés pendant dix jours consécutifs (DCC) pour les hautes eaux. Seul le Mungo accuse une baisse des débits de crue avec une occurrence de rupture en 1969 et un déficit de 16,6 %. On observe une diminution des basses eaux sur tous les bassins. La période de rupture correspond à celle des modules, mais les déficits sont beaucoup plus importants.

De façon quasi générale sur les trois bassins au sud du Cameroun, la variabilité des pluies et des écoulements présente quelques aspects particuliers : d'une part la diminution intense des pluies de la "grande saison sèche" (hiver) et l'augmentation tout aussi importante des pluies de la "petite saison sèche" (été) et, d'autre part une baisse des écoulements pendant la "petite saison des pluies" (printemps) s'opposant à une augmentation des écoulements pendant la "grande saison des pluies" (automne), alors que les précipitations qui les génèrent ont varié très modérément et parallèlement.

4.3 Pluviométrie et déficit d'écoulement : fonctionnement hydroclimatique au pas de temps mensuel et saisonnier en zone équatoriale camerounaise

L'équation du bilan hydrique peut être formulée à des degrés divers de complexité. L'expression la plus simple est donnée par la formule :

$$L_p = E_T + L_e + \Delta S$$

Avec L_p la lame d'eau précipitée sur le bassin, E_T la lame d'eau reprise par l'évapotranspiration, L_e la lame d'eau écoulée et ΔS la variation du stock d'eau du bassin, qui traduit la potentialité de recharge de la nappe.

Par ailleurs, on définit le coefficient d'écoulement (Ke) comme étant la fraction relative, exprimée en pourcentage, que représente la lame d'eau écoulee par rapport à la lame d'eau précipitée : $Ke = Le/Lp \times 100$.

L'examen des coefficients d'écoulements calculés pour chacune des saisons des pluies est susceptible de nous éclairer sur les modifications survenues durant les saisons des pluies. L'évolution des coefficients d'écoulement (figure 6.16) montre des tendances opposées de part et d'autre de la décennie 1970, décennie à partir de laquelle la diminution des coefficients d'écoulement est uniforme.

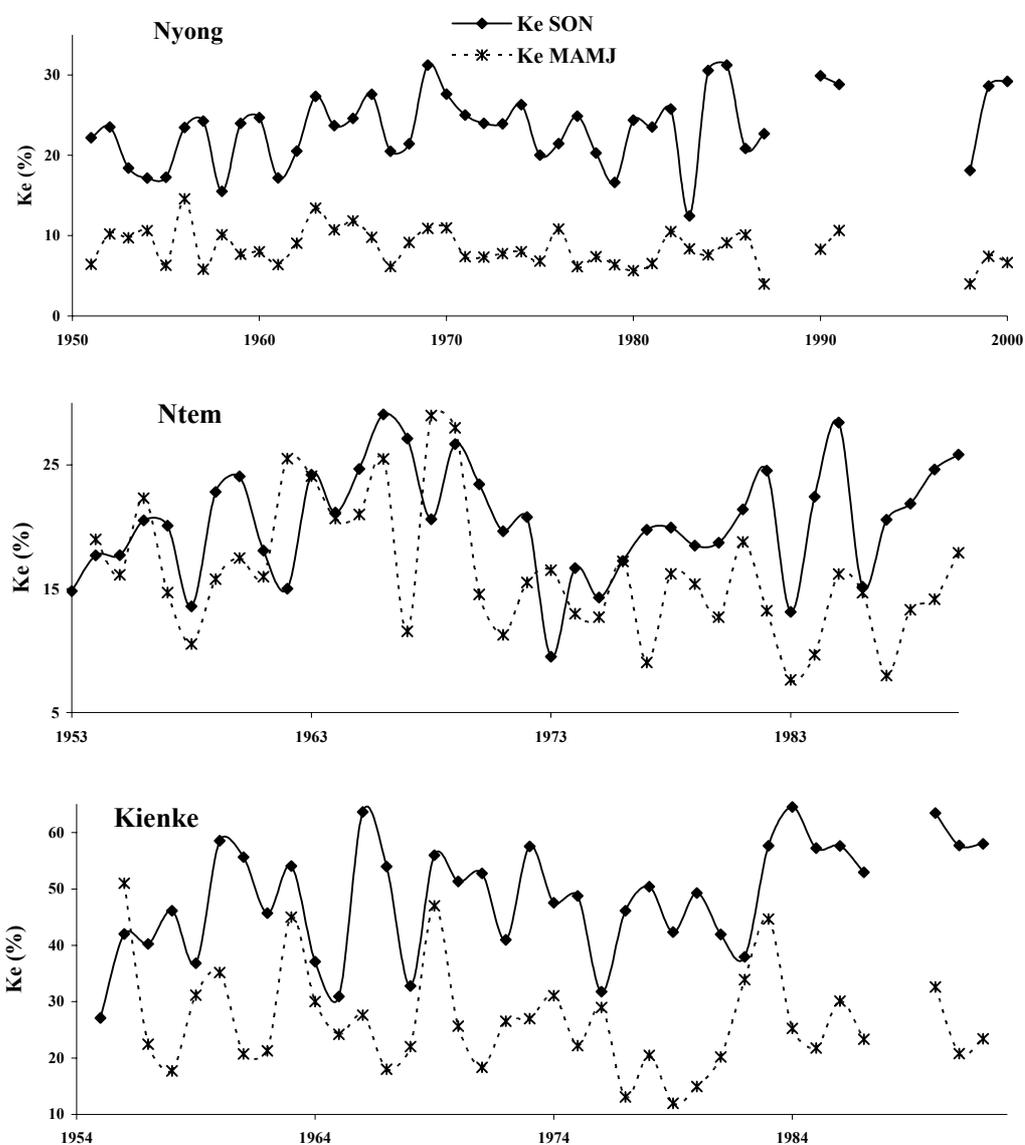


Figure 6.16 : Evolution des coefficients d'écoulement de MAMJ de SON.

Par ailleurs les coefficients d'écoulements en automne sont supérieurs à ceux du printemps, sauf sur le bassin du Ntem qui affiche des coefficients proches en valeur, marquant un régime équatorial pur au cours de la période précédant la décennie 1970.

A partir de la fin des années 1970 et au début des années 1980, les coefficients d'écoulement augmentent en automne pendant que ceux de printemps tendent à diminuer de façon continue. Cette situation est plus remarquable sur le bassin versant du Ntem, où les écoulements sont passés d'un état de parité des coefficients à une disposition où les coefficients d'automne sont systématiquement supérieurs à ceux de printemps.

Bien que plus atténuée sur le bassin versant de la Kienke, du fait peut être à sa petite taille, la diminution des débits pendant la première saison des pluies (MAMJ) et leur accroissement pendant la deuxième saison des pluies (SON), durant une période pendant laquelle les pluies n'ont pas varié, ou parfois diminué très faiblement, s'avère un phénomène assez généralisé sur les trois bassins étudiés en zone forestière camerounaise.

L'accroissement des coefficients d'écoulement observé en automne sur trois bassins est similaire aux appréciations faites sur certains bassins du Sahel (Albergel et Valentin, 1986 ; Mahé *et al.*, 2002 et 2003). **On peut alors se demander si ce phénomène résulte également d'une augmentation des surfaces imperméables sous l'effet d'une pression anthropique élevée comme observé dans certaines zone sahéliennes** (Mahé *et al.*, 2003 et 2005).

L'action de l'homme est indéniable en zone forestière camerounaise. Les abattages y sont effectués à des fins d'exploitation et, pour la plupart des cas, pour créer des plantations de cultures arborées ou d'arbustes pérennes (cacaoyers, palmiers à huile, caféiers, hévéa). Mais ces plantations évoluent très souvent, quand l'emprise de l'homme se relâche, vers des formations secondaires dont l'influence sur les régimes d'écoulement peut être comparable à celle des forêts originales.

Des destructions irréversibles sont cependant observées aux alentours des centres urbains. Mais leur effet sur les régimes d'écoulement serait très localisé et très peu ressenti à l'échelle des grands bassins versants. Les changements intervenus dans le régime des écoulements sur les trois bassins versants au sud du Cameroun ne paraissent pas principalement liés aux modifications des états de surface.

Les observations faites ci-dessus conduisent à la description suivante du fonctionnement hydroclimatique des bassins équatoriaux camerounais, qui paraît lié aux changements intervenus dans les régimes des précipitations estivales et hivernales.

Pendant la première saison des pluies (Printemps boréal, MAMJ), l'écoulement et le coefficient d'écoulement baissent alors que par ailleurs la pluie reste relativement constante. Cela signifie en terme de fonctionnement hydrologique du bassin, que la lame écoulée diminue beaucoup plus vite au cours des décennies 1980 et 1990. Le bassin prélève alors relativement plus qu'il ne le faisait avant le début de la sécheresse. En d'autres termes, la part du bilan hydrique qui n'est pas évacuée en écoulement augmente progressivement. On rappelle que cette part représente la somme de l'évapotranspiration (E_T) et de la recharge des nappes (ΔS). Cependant, l'examen des chroniques des débits de basses eaux, pour tous les trois bassins ne montre pas d'évolution significative pouvant indiquer une recharge des nappes, qui signifierait une augmentation du stock ΔS . Les débits de base sont restés toujours faibles. On peut dès lors supposer que l'augmentation du déficit d'écoulement au cours de cette première saison des pluies est due à une reprise progressivement croissante de l'eau précipitée par les processus d'évaporation et de transpiration, pendant les décennies 1980 et 1990, associé à une modification de la répartition des pluies intra-saisonnières, avec un total saisonnier variant peu.

A l'inverse, pendant la saison des pluies d'Automne boréal (SON), le coefficient d'écoulement augmente progressivement alors que, comme pour la première saison, la pluie reste toujours assez stable. Cela signifie que la lame écoulée croît, donc que la part des précipitations qui n'est pas évacuée en écoulement diminue. En d'autres termes, au cours des décennies 1980 et 1990, l'état hydrique des bassins versants est plus favorable à générer des écoulements.

A chaque instant t , la répartition de la lame d'eau précipitée en différents termes du bilan (E_T , L_e et ΔS) dépend de l'état hygrométrique du bassin versant à l'instant précédent $t-1$. Dans le tableau 6.16, les quatre saisons sont placées dans leur position respective au cours de l'année hydrologique, les flèches indiquent les tendances des différents termes de bilan au cours des décennies 1980 et 1990.

Tableau 6.16 : Tendances évolutives comparées des termes de bilan hydrique sur les bassins versants équatoriaux camerounais au cours des décennies 1980 et 1990.

	printemps	été	automne	hiver
Pluie	→	↗	→	↘
Ecoulement	↘	→	↗	↘
Déficit d'évaporation		↘	→	↗
Coefficient d'écoulement	↘		↗	

Après la décennie 1970, la baisse des pluies de DJF crée un plus important déficit hydrique (évaporation et réserve en eau du sol) des bassins versants au début de la première saison des pluies de MAMJ. Cette aridification de l'hiver boréal fait qu'une partie plus importante des précipitations reçues pendant le printemps participe d'abord au comblement de ce déficit hydrique, et donc la fraction qui génère effectivement les écoulements se trouve réduite. Cela se traduit alors par des lames écoulées (*Le*) plus faibles pour les mêmes hauteurs moyennes de précipitations ; ce qui explique la baisse du coefficient d'écoulement. Ceci est d'autant plus vraisemblable que l'analyse des débits moyens mensuels montre que ces déficits sont beaucoup plus importants au cours des premiers mois (mars et avril).

La situation est inversée pendant la deuxième saison des pluies. L'augmentation des pluies au cours de la première saison sèche de JA (Eté boréal) réduit considérablement le déficit d'évaporation et des réserves en eau du sol au début de la saison SON, favorisant le ruissellement. La partie des précipitations qui participe effectivement à l'écoulement s'accroît, d'où une augmentation du coefficient d'écoulement.

Quelle que soit l'origine des modifications climatiques, leurs effets tendent beaucoup plus à modifier le déroulement des régimes des précipitations et des écoulements qu'à diminuer de façon durable les ressources en eau comme c'est le cas en zone soudano-sahélienne.

4.4 Comparaison avec les fleuves gabonais

Les variabilités décrites pour trois rivières du sud-Cameroun montrent de grandes similitudes avec d'autres observations faites en Afrique équatoriale (figure 6.17), qui mettent en évidence une évolution différente des crues de printemps et d'automne sur le bassin versant de l'Ogooué à Lambaréné et de son affluent, l'Ivindo à Makokou (Mahé *et al.*, 1990) et, sur le bassin versant du Kouilou à Sounda (Bricquet *et al.*, 1997). Ces auteurs notent qu'à partir de 1980, la crue de printemps diminue de façon significative par rapport à la crue d'automne qui varie peu. Particulièrement sur l'Ogooué, la différence entre la crue maximum journalière de printemps et celle d'automne est passée de l'ordre de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jusqu'aux années 1950 à $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au cours de la décennie 1970 puis à $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la fin de la décennie 1980.

Cet amoindrissement de la crue de printemps pour les bassins gabonais est associé aux moins bonnes conditions pluviogènes du flux de mousson lors de la montée septentrionale de la zone de convergence intertropicale, corroborées par les anomalies de températures de surface océanique et les upwellings équatoriaux (Bricquet *et al.*, 1997) ; l'impact étant une modification dans la répartition des pluies mensuelles de printemps, qui se traduit par le décalage progressif des plus fortes pluies de la fin vers le début de la saison (Mahé *et al.*, 1990).

Sur le bassin versants du Ntem comme sur celui du Nyong et de la Kienké, les pluies mensuelles de printemps (mars à juin) montrent également un changement de répartition au cours des dernières décennies, en phase avec la période sèche actuelle. Les coefficients de tarissement ont également augmenté et les basses eaux sont moins soutenues dans cette zone (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998a).

Les variations des pluies observées pour les deux « saisons sèches » (juillet à août et décembre à février) apportent des compléments intéressants d'informations quant aux manifestations de la variabilité climatique. Elles semblent être les phénomènes climatiques majeurs dans la zone équatoriale de l'Afrique. Leur plus grand impact sur les écoulements des saisons des pluies de printemps et d'automne, qui les suivent, au travers de l'évolution des coefficients d'écoulement, mais aussi et surtout de la répartition des déficits sur les débits mensuels, plus importants pour les premiers mois de printemps (les premiers à subir la

récession pluviométrique hivernale) et, inversement, moins importants pour les premiers mois d'automne (les premiers à subir le rafraîchissement estival).

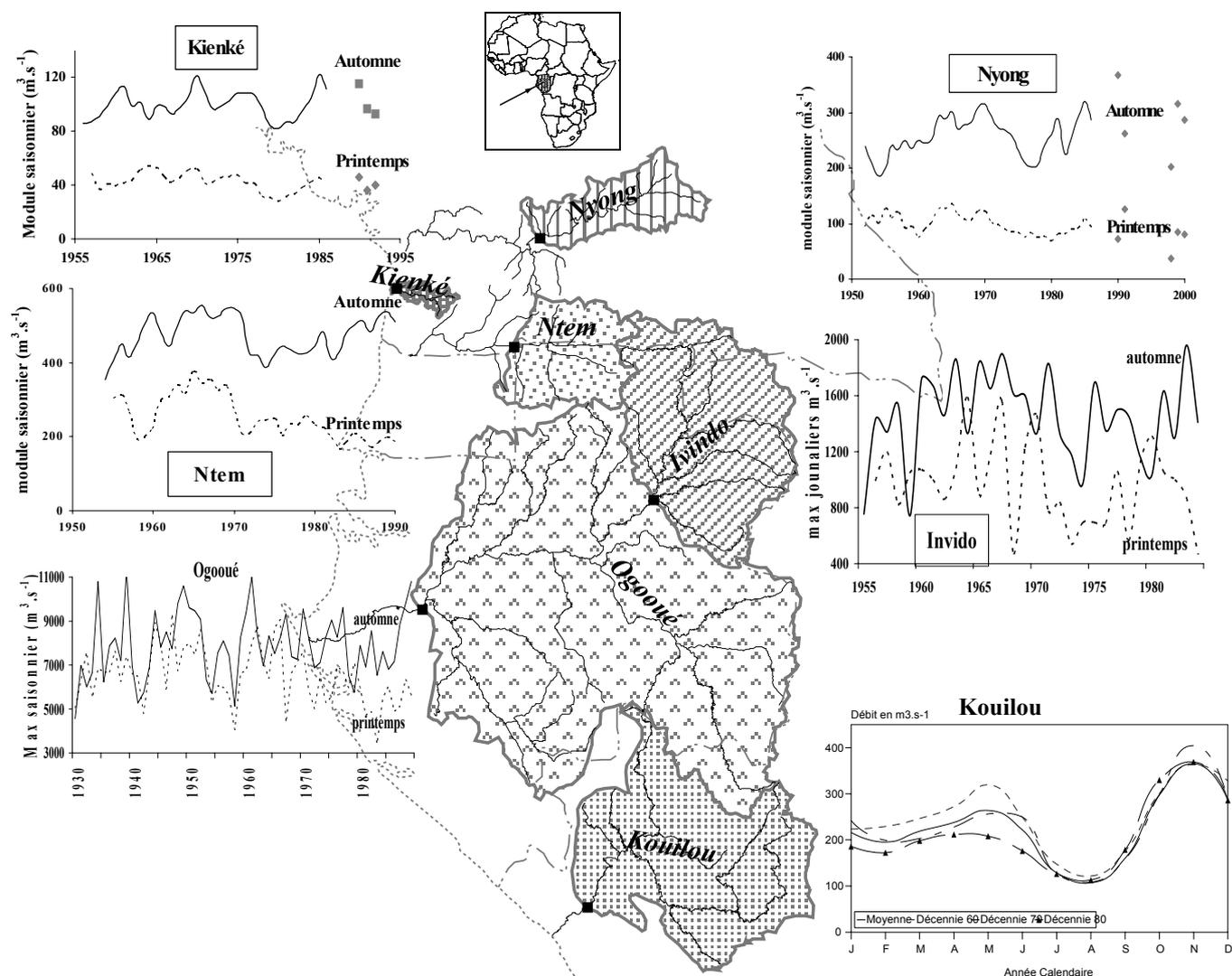


Figure 6.16 : Quelques aspects des modifications des régimes hydrologiques en Afrique équatoriale centrale : Ogooué et Ivindo (Mahé *et al.*, 1990), Kouilou (Bricquet *et al.*, 1997a), Ntem, Nyong et Kienké (Liéno *et al.*, 2005b).

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a analysé la variabilité climatique à différents pas d'échelle sur les bassins versants représentatifs choisis. Un inventaire de données utilisées, leur source et les

différentes relations utilisées pour estimer les valeurs mensuelles des débits pour certaines périodes non observées sont présentés en début de chapitre.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour analyser l'évolution des précipitations et des écoulements à différentes échelles de temps (de l'annuel au mensuel) sur les six bassins versants.

D'une façon générale, la sécheresse qui sévit depuis environ 35 ans revêt un caractère très préoccupant dans les bassins tropicaux (Mayo Tsanaga, Lom et Mungo), où la baisse des pluies est tout aussi remarquable qu'en Afrique Occidentale. Elle entraîne une tendance à la diminution continue des ressources en eau, même au cours de la décennie 1990, où on observe une réduction des déficits pluviométriques. Les analyses sur le bassin versant du Mungo confirment l'importance des déficits dans cette région, où la relative abondance actuelle peut cacher un avenir inquiétant. Les faibles déficits en valeurs relatives sont importants en valeurs absolues.

Sur les bassins équatoriaux (Ntem, Nyong et Kienke), les effets de la sécheresse ne sont pas ressentis de la même façon à toutes les échelles de temps.

A l'échelle annuelle, la légère diminution des précipitations, beaucoup moins importante qu'en zone tropicale n'entraîne pas une tendance à la baisse continue des débits. Les phases aiguës de la sécheresse, notamment celle des années 1980, se sont toutefois manifestées par un abaissement considérable des débits.

Les analyses des pluies et modules aux échelles saisonnières et mensuelles, apportent des renseignements nouveaux à la compréhension de la variabilité climatique dans les régions forestières équatoriales d'Afrique. Les totaux des deux saisons des pluies (de mars à juin et de septembre à novembre) n'ont pas varié significativement, mais leur évolution est restée parallèle. En revanche, les deux saisons sèches suivent des tendances opposées, avec une augmentation des pluies en été (juillet et août) et une diminution des pluies en hiver (décembre à mars). Les maximums de pluies mensuelles apparaissent de plus en plus en août. Ces phénomènes paraissent dès la sécheresse des années 1970 et 1980 qui a touché l'ensemble de l'Afrique occidentale et centrale.

Cette modification du profil des précipitations annuelles, qui semble liée à une faible amplitude de migration de la ZCIT, entraîne un changement de tendance dans le régime des écoulements qui, évolue vers une diminution des débits de printemps boréal et à une augmentation de ceux d'automne boréal.

Il semble que ce phénomène atteint les latitudes de Bafia et de Nanga Eboko à la bordure Nord du climat équatorial. Mais il est encore difficile de définir spatialement ses limites à l'Est, où des études dans le bassin de l'Oubangui (Wesselink *et al.*, 1995) ont montré une variabilité semblable au domaine tropical humide. Pourtant il paraît plus généralisé dans la partie équatoriale littorale, où des analyses statistiques ont indiqué une rupture avec augmentation significative de module sur le bassin versant de la Lokoundje à Lolodorf (Servat *et al.*, 1998).

Les dimensions spatiale et temporelle de la variabilité climatique et de ses impacts sur les ressources en eau restent complexes. La modification des régimes saisonniers des pluies et des écoulements ne concerne plus particulièrement que les bassins versants entièrement soumis à un régime climatique équatorial (quatre saisons dans l'année). De ce fait, elle peut toucher aussi les petits bassins dans des zones humides sur les côtes ouest africaines, où Ouedraogo (2001) avait déjà noté une augmentation significative des pluies du mois d'août (saison sèche d'été). Une meilleure connaissance des systèmes pluviogéniques à petite échelle, dans ces régions équatoriales d'Afrique du centre et de l'ouest est indispensable.

Le domaine de la recherche tournée vers la variabilité du climat et ses conséquences sur les ressources en eau reste donc particulièrement étendu. Il n'est pas exclu que ce phénomène, associé aux modifications des états de surface principalement d'origine anthropique, ait eu des effets sur l'érosion et les transports solides.

CHAPITRE 7

**CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DES ANNEES
ETUDIEES : PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS DE 2002 A
2004 SUR LES BASSINS VERSANTS ETUDIES**

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sont analysées les données pluviométriques et hydrométriques sur les six bassins versants représentatifs, au cours des deux années pour lesquelles les matières transportées sont mesurées. L'échelle de travail étant toujours le bassin versant, nous n'analyserons pas les précipitations ponctuelles aux stations pluviométriques. Les pluies moyennes sur les bassins versants et les écoulements sont décrits aux pas de temps mensuel, saisonnier et annuel.

L'objectif n'est plus de réétudier la variabilité des pluies et des écoulements sur ces bassins, largement décrite au chapitre 4. Mais on vise à caractériser la pluie et l'hydraulicité des années 2002/2003 et 2003/2004 par rapport à la série des observations depuis 1950 et dans le contexte de sécheresse actuelle, et à les comparer plus particulièrement aux valeurs des années antérieures pour lesquelles des données de transport de matières en suspension sont disponibles.

1. DONNEES

L'établissement et l'interprétation des bilans de flux de matières transportés par les cours d'eau supposent la connaissance des précipitations et des débits. Il a été prévu, parallèlement aux mesures de matières en suspension, la collecte des données de débit et de pluies sur les six bassins versants étudiés, pendant deux cycles hydrologiques, 2002/2003 et 2003/2004.

1.1. Données de pluies

Les données sont celles des postes pluviométriques du réseau national. Les mêmes postes (tableau 6.6) sont, lorsque cela est possible, considérés : pour certains bassins (2), le nombre et la répartition des postes ont légèrement changé ; les observations ayant cessé à certaines stations. C'est le cas du Ntem, où les données à trois stations utilisées antérieurement ne sont disponibles : deux stations en territoire gabonais (Oyem et Minvoul) et une station en territoire camerounais (Djoum). C'est aussi le cas pour le Lom, où la station de Betare Oya a

été abandonnée en 1994. En ce qui concerne les quatre autres bassins représentatifs, la répartition des postes pluviométriques n'a pas subi de modification.

Comme nous avons procédé au chapitre 6 pour les séries longues, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée pour calculer les pluies moyennes sur les bassins versants.

1.2. Mesures hydrométriques

Le Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé a maintenu une activité minimum autour de quelques stations principales du réseau national. Mais plusieurs stations sont restées sans visites depuis la fin des années 1980. Ainsi, parmi les six stations choisies pour cette étude, certaines ont été partiellement ou entièrement réfectionnées et les jaugeages classiques couplés aux « jaugeages complets de débits solides » ont permis de contrôler leur courbes d'étalonnage.

1.2.1. Etalonnage des stations

Comme le lit des cours d'eau est susceptible de changer, les relations hauteur - débit établies à un instant donné peuvent devenir rapidement obsolètes. Ceci a nécessité la vérification des relations hauteur - débit établies par le passé avant de les utiliser. Les principales caractéristiques, l'historique et l'étalonnage, de bon nombre de stations hydrométriques des fleuves et rivières du Cameroun ont été établis, jusqu'à la fin des années 1970 et publiés dans la monographie d'Olivry (1986). Nous ne signalons dans cette partie que les jaugeages effectués au cours des deux dernières années, l'essentiel de l'historique des stations et les récents travaux réalisés étant détaillés en annexe.

Les opérations de réfection des stations et les jaugeages ont toutes été réalisées par une équipe de techniciens du CRH de Yaoundé qui ont, aussi, participé activement à leur dépouillement.

- Station de Bogo sur le Mayo Tsanaga

La station n'avait plus été visitée depuis 1998. Trois jaugeages ont été effectués en 2002, 2003 et 2004. On n'a pas pu jauger les hautes eaux. Mais la position des trois jaugeages sur la courbe d'étalonnage (figure 7.1) montre que la relation hauteur-débit n'a pas changé de façon significative.



Cliché Mahé ; octobre 2004

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
09/9/02	48	1,7
15/8/03	85	16,7
26/8/04	117	47

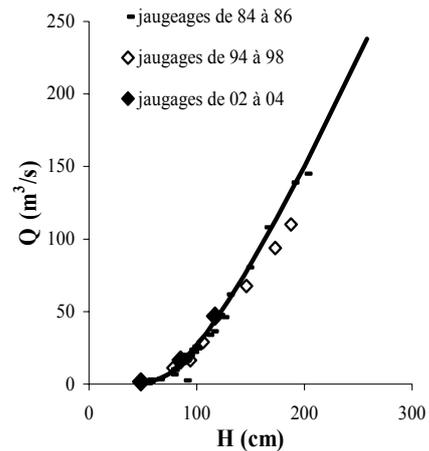


Figure 7.1 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Bogo.

- La station de Betare Oya sur le Lom

La station a été successivement entretenue par le CRH puis par la société nationale d'électricité du Cameroun, pour la surveillance des barrages de retenue d'eau. La batterie d'échelles est bien conservée et l'étalonnage est resté stable depuis la création de cette station. Les jaugeages effectués à des cotes suffisamment élevées en 2002 et 2003 le confirment (figure 7.2).



Cliché Issa ; octobre 2004

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
05/9/02	375	372
23/10/02	411	420,3
29/3/03	19	22

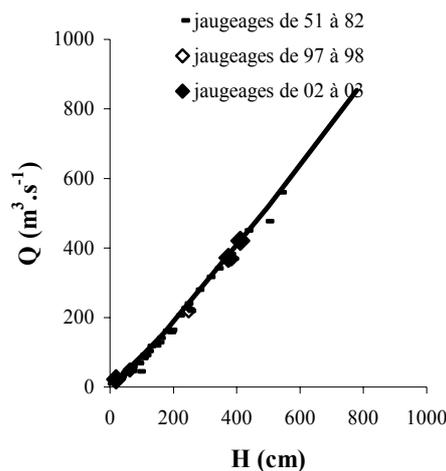


Figure 7.2 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Betare Oya.

- La station de Mbalmayo sur le Nyong

L'ancienne station installée par l'ORSTOM a été suivie jusqu'en 1992, avec une relation hauteur - débit stable. Abandonnée depuis, elle a été réinstallée sur le même site en 1998. Les jaugeages effectués en 1998 et 1999 indiquent une modification de la relation hauteur - débit, notamment en moyennes eaux, montrant des débits plus faibles pour les mêmes hauteurs (figure 7.3). Les trois jaugeages réalisés de 2002 à 2004 s'inscrivent dans cette même logique.



Cliché Liéno ; août 2002

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
21/6/02	223	160
23/3/03	39	33,3
17/12/03	245	196,1

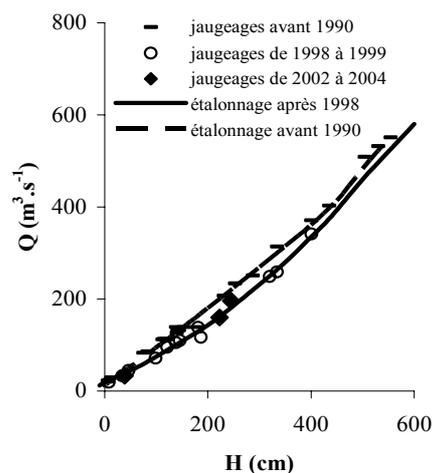


Figure 7.3 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Mbalmayo.

- Station de Kribi-scierie sur la Kienké

La station a été abandonnée en 1991. L'élément 2-3 m de l'ancienne batterie d'échelles, a servi à caler les nouvelles échelles installées en 2002. Les jaugeages que nous avons effectués en basses et moyennes eaux montrent également la stabilité de la station (figure 7.4).



Cliché Mahé ; août 2002

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
23/8/02	252	25,5
26/10/02	336	90,7
01/4/03	218	9,1

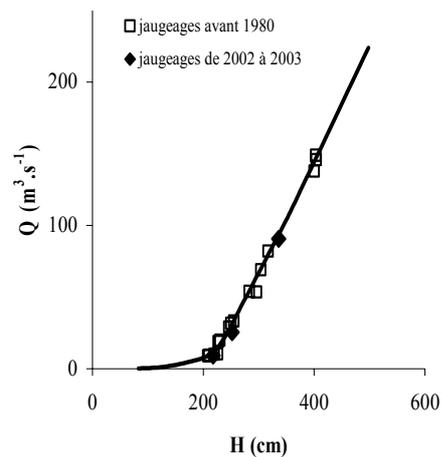


Figure 7.4 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Kribi-scierie.

- Station de Ngoazik sur le Ntem

La station a été observée par l'ORSTOM puis par le CRH jusqu'en 1992, année d'arrêt des observations. En 2002 la station a été détruite par les travaux public et la seule trace de l'ancienne station est la borne repère et son altitude bien marquée. Les différents travaux effectués par le passé signalent une modification de repère du niveau zéro des échelles. Mais une analyse critique des anciens jaugeages montre que ce repère n'a jamais changé et, reste situé à 3,765 m sous la borne, (cf. annexe n° 1). Les jaugeages de 2002 et 2003 confirment la stabilité de cette station (figure 7.5).



Cliché Mahé ; août 2002

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
19/6/02	156	476
28/01/02	85	180,5
27/3/03	84	171,4

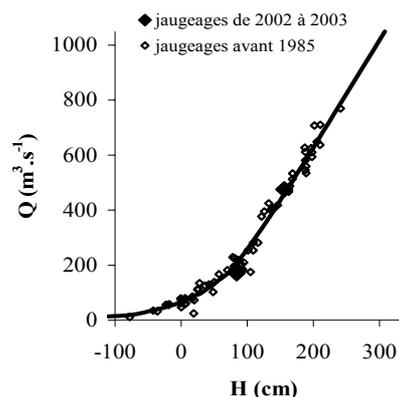


Figure 7.5 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Ngoazik.

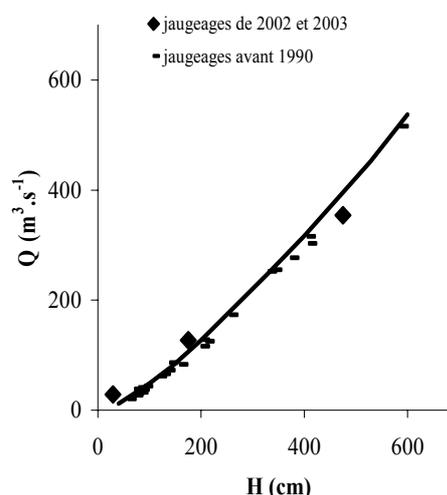
- Le bassin du Mungo à Mundame

Abandonnée depuis 1990, seul l'élément 0-1 m, resté fixé sur la base du mur de l'ancien quai de douane tombé en ruine, a servi de repère pour caler les nouvelles échelles que nous avons installées. Les deux jaugeages effectués en basses eaux à cette station indiquent une relative stabilité. Les corrélations entre les cotes avec le jaugeage de hautes eaux réalisé plus en amont permettent de voir que celui-ci est proche de la courbe d'étalonnage (figure 7.6).



Cliché Mahé ; août 2002

	H (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)
21/8/02	475*	354
28/10/02	175	127
02/4/03	29	28,7



* Côte obtenue par corrélation sur la même rivière en amont, sur la route Loum-Koumba (Ebonje)

Figure 7.6 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Mundame (la photo est prise au pont de la route Loum – Kumba, en amont de la station de jaugeage).

Conclusion sur les étalonnages

L'objectif de cette opération n'était pas de procéder à un étalonnage complet des stations. Celles-ci avaient été longtemps suivies par les hydrologues de l'ORSTOM puis du CRH. Mais il était important, après une période assez longue sans observations, de vérifier la validité des relations hauteur - débit qui ont été établies par le passé.

Malgré le nombre réduit des points, trois seulement par station, leurs positions sur les courbes d'étalonnage sont satisfaisantes et montrent que ces courbes peuvent encore être utilisées pour traduire les hauteurs d'eau.

1.2.2. Données de débits

Parmi les six bassins versants étudiés, celui du Lom et celui du Nyong sont aussi suivis respectivement par l'ASsonel et le programme ORE. Pour ces deux bassins versants, les données de débits antérieures à notre période d'observation sont obtenues auprès de ces sources. Pour les quatre autres bassins versants, les données commencent avec le démarrage de nos campagnes de mesures en 2002.

Les hauteurs d'eau sont lues aux échelles deux fois par jour (matin et soir) pour cinq bassins (Lom, Mungo, Kienke, Nyong et Ntem), et trois fois par jour pour le Mayo Tsanaga, du fait des crues rapides. Ces hauteurs d'eau sont traduites en débits grâce aux étalonnages vérifiés conformes (§1.2.1) avec le logiciel HYDROM 3.2 de l'IRD. Les débits moyens mensuels sont en suite calculés à partir des débits instantanés et journaliers. Quelques lacunes de lectures journalières ont été complétées par les procédés expliqués au chapitre 6.

2. PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats sur les pluies moyennes calculées sur chaque bassin, et les écoulements à l'échelle mensuelle, en essayant de les situer dans le contexte climatique changeant actuel. A cette fin, les pluies et les débits des années d'études seront comparés aux normales de la période antérieure. Pour les séries où des ruptures ont été

identifiées, les mesures récentes sont comparées aux normales des deux séquences, avant et après la date de rupture.

2.1. Le bassin versant du Mayo Tsanaga (Extrême-nord Cameroun)

- Les pluies

Les pluies moyennes mensuelles (tableau 7.1) sont calculées pour les trois années sur le bassin versant, à partir de quatre stations pluviométriques. Pour tous les mois, les pluies de l'année 2003 sont plus élevées que celles des deux autres années. Les pluies de l'année 2004 sont plus faibles que celles de l'année 2002 pour les mois de juin et juillet. Mais, inversement, les pluies sont plus importantes en mai, août et septembre en 2004.

Les années 2002 et 2004 enregistrent des totaux annuels respectifs de 615,9 mm et de 690,5 mm. La pluie annuelle en 2003 (941 mm) est la troisième plus élevée, enregistré depuis 1980, après 1994 (1112 mm) et 1991 (1113 mm).

Tableau 7.1 : Pluies moyennes mensuelles et annuelles (en mm) sur le Mayo Tsanaga à Bogo.

	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nove	Déce	Total
2002	0	0	0	20,4	21,8	115,2	152	171,7	102	32,7	0	0	615,9
2003	0	0	0	11,9	125,9	139,4	248,9	221,4	159,1	34,3	0	0	941
2004	0	0	1,7	6,1	66,8	104,6	128,4	202,6	143,8	36,4	0	0	690,5

La figure 7.7 compare les histogrammes des pluies mensuelles des trois années 2002, 2003 et 2004, avec les moyennes pluviométriques calculées sur les deux périodes, avant et après la date de rupture détectée, 1980.

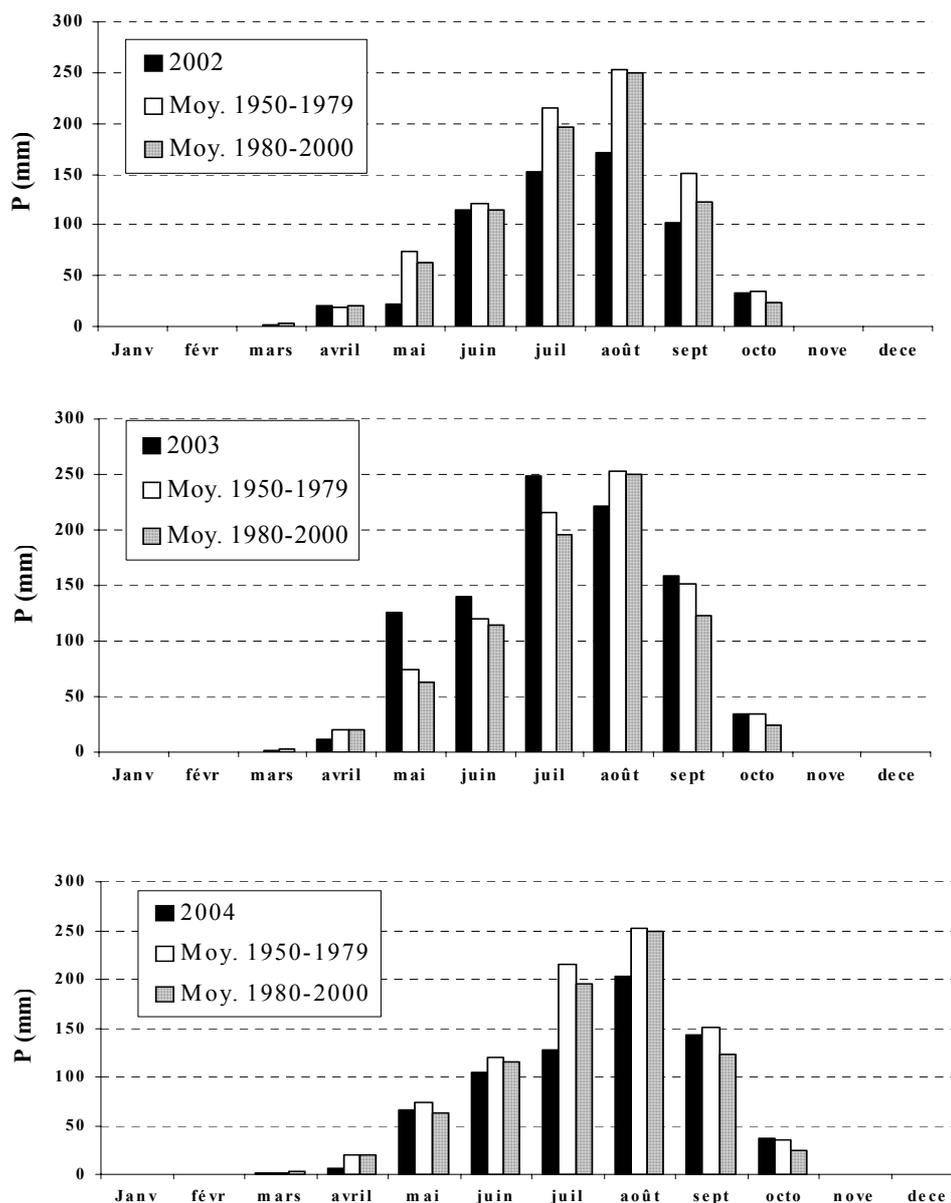


Figure 7.7 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002, 2003 et 2004 sur le Mayo Tsanaga à Bogo, comparées aux moyennes de 1950-1979 et 1980-2000.

Dans le tableau 7.2 l'écart calculé pour chaque mois est utilisé comme élément de comparaison de ces pluies mensuelles.

Ces écarts, en valeurs absolues, sont dans l'ensemble supérieurs à 10 % et atteignent parfois 30 %. Ils montrent que les pluies mensuelles des années 2002 et 2004 sont globalement déficitaires par rapport à la moyenne de la période sèche, de 1981 à 2000. Les déficits les plus importants se situent au cours des mois les plus pluvieux, juillet et août. En revanche, en

2003, seul le mois d'août reste légèrement déficitaire, alors que tous les autres mois de la saison enregistrent des pluies supérieures à la moyenne de la période humide, de 1950 à 1980.

Tableau 7.2 : Ecart relatif (en %) de la pluie mensuelle des trois années d'étude par rapport aux moyennes pluviométriques de la série d'observations sur le Mayo Tsanaga à Bogo.

		Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nove	Déce
2002	Par rapport à 1950-1980				5	-71	-4	-30	-32	-32	-6		
	Par rapport à 1981-2000				3	-65	0	-22	-31	-17	36		
2003	Par rapport à 1950-1980				-39	69	16	15	-12	5	-1		
	Par rapport à 1981-2000				-39	99	21	27	-11	29	42		
2004	Par rapport à 1950-1980				-69	-10	-13	-41	-20	-5	5		
	Par rapport à 1981-2000				-69	6	-9	-34	-19	17	51		

Ces observations montrent dans l'ensemble que les trois années 2002, 2003 et 2004 retracent l'irrégularité interannuelle des précipitations, caractéristique des régions soudano-sahéliennes d'Afrique. Elles s'inscrivent en outre dans le contexte de déficit pluviométrique encore persistant dans ces régions.

- Les débits

Les écoulements ont été observés pendant trois saisons, 2002, 2003 et 2004 à la station de Bogo. Les hydrogrammes annuels des débits instantanés présentés à la figure 7.8 sont représentatifs du régime torrentiel soudanien, avec des crues rapides plus ou moins rapprochées.

La date du début des écoulements est très variable d'une année à l'autre. Les écoulements commencent le 26 juillet en 2002, le 01 juin en 2003 et le 20 juillet en 2004.

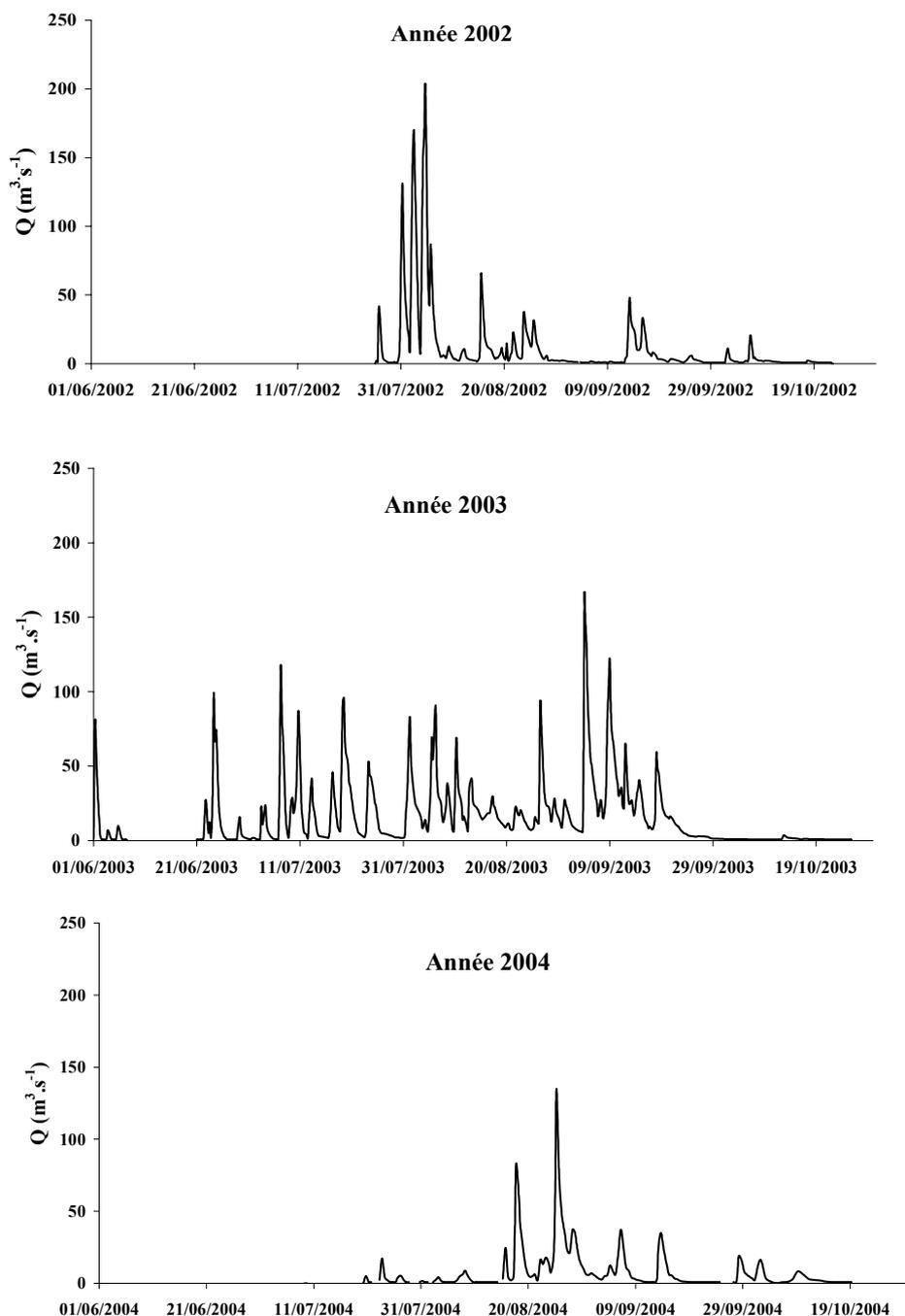


Figure 7.8 : Mayo Tsanaga à Bogo ; hydrogrammes annuels des débits instantanés.

Les hydrogrammes annuels des années 2002 et 2004 sont assez semblables. L'essentiel de l'écoulement annuel se concentre en quelques crues seulement. En 2002 les trois principales crues sont très rapprochées pendant une semaine, entre le 30 juillet et le 06 août, et concentrent 56 % du volume annuel écoulé. Les débits de pointe sont de 128 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 31 juillet, 170 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 02 août et 200 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 04 août. L'année 2004 n'enregistre que deux

crues importantes en deux semaines, entre le 17 août et le 29 août. Elles concentrent à elles seules 57 % du volume annuel écoulé. Les débits de pointe sont beaucoup moins importants qu'en 2002, $83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 17 août et $135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 25 août.

En 2003 en revanche, après un premier épisode entre le 01 et 06 juin, les crues sont assez régulières entre le 23 juin et le 20 septembre, avec des débits de pointe le plus souvent supérieurs à $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A titre de comparaison, les trois années 2002, 2003 et 2004 enregistrent respectivement 4, 14 et 2 crues dont les débits de pointe sont égaux ou supérieurs à $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les débits journaliers les plus élevés sont respectivement de $154 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 2002, $122 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 2003 et $94 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 2004. Comparés à des débits maximums de la période avant 1980, ces débits maximums journaliers sont relativement élevés pour des modules annuels encore très faibles, notamment en 2002 et 2004.

Les modules annuels (tableau 7.3) retracent assez régulièrement les variations des débits journaliers et mensuels. Les modules les plus faibles sont enregistrés en 2002 et 2004, $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, alors qu'il est plutôt relativement moyen en 2003, $6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Comme les valeurs de pluie, les modules annuels de ces deux années, 2002 et 2004, sont proches de celui de 1984, $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, valeur la plus faible enregistrée depuis la création de la station en 1966. L'année 2003 peut être considérée comme une année moyenne. Car son module est inférieur à la moyenne de la période humide ($7,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et supérieur à la moyenne de la période sèche ($4,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Tableau 7.3 : Débits moyens mensuels et annuels en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Bogo.

	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nove	Déce	Annuel
2002	0	0	0	0	0	0	3,9	22,5	4,7	1,5	0	0	2,7
2003	0	0	0	0	0	6,2	18,5	23,5	24,6	0,8	0	0	6,1
2004	0	0	0	0	0	0	0,4	13,3	5,7	1,8	0	0	1,8

Le rapprochement de ces débits aux moyennes mensuelles de la série observée à la station depuis 1966 (figure 7.9), montre que l'écoulement du mois de juillet est faible en 2002 et

2004, alors qu'il est supérieur à la moyenne en 2003. Celui du mois d'août est déficitaire au cours des trois années. Il atteint à peine la moyenne de la période sèche en 2002 et en 2003. Le débit de septembre est semblable à celui de juillet, faible en 2002 et en 2004, et assez important en 2003.

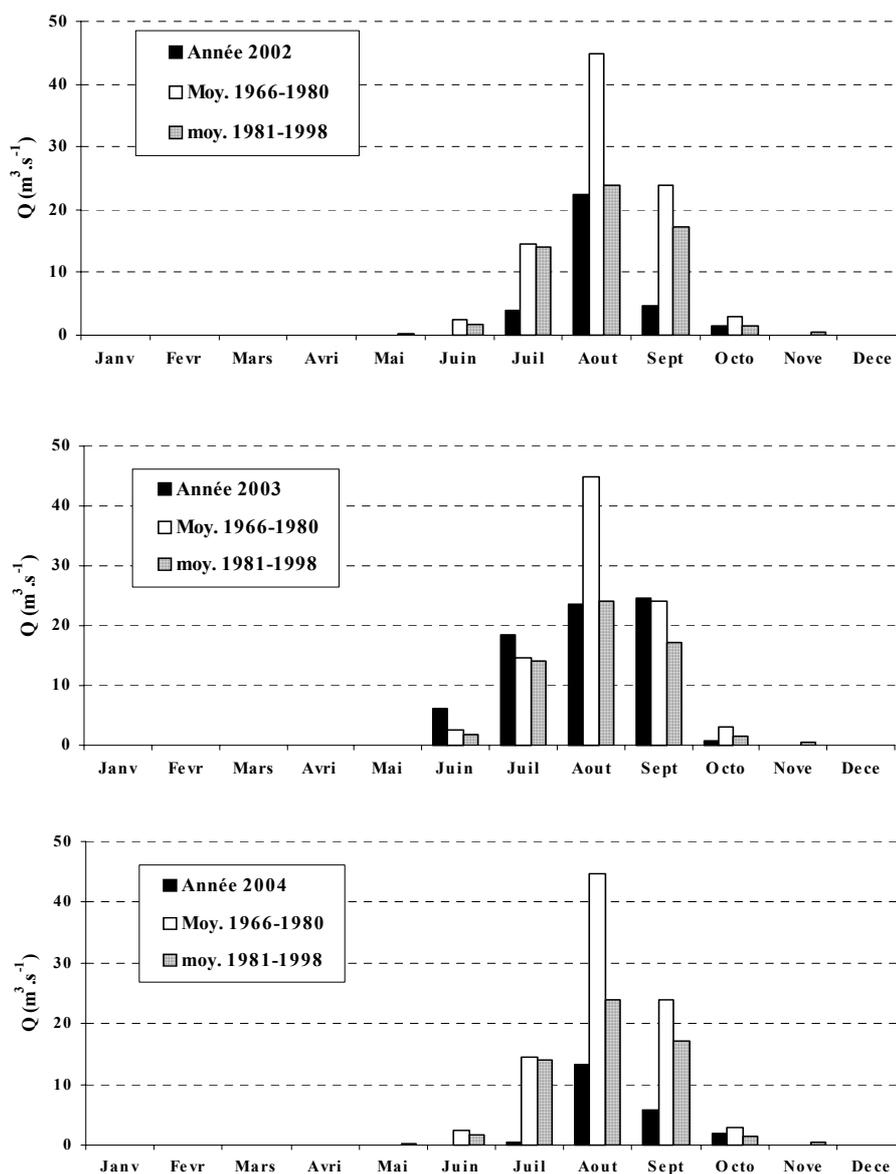


Figure 7.9 : Débits moyens mensuels des années 2002, 2003 et 2004 à Bogo, comparées aux moyennes avant et après la rupture.

Les valeurs relatives de ces déficits, calculées pour les mois les plus humides (de juillet à août) dépassent en général 50 %, et peut atteindre 90 % (tableau 7.4). Au cours des trois

années et pour tous les mois, les débits sont systématiquement plus faibles que la moyenne de la période 1966-1980. Seuls les débits des mois de juillet et septembre 2003, et celui du mois d'octobre 2004 dépassent la moyenne de la période 1981-1998.

Tableau 7.4 : Ecart relatif (en pourcent) des débits des trois années d'étude aux moyennes mensuelles à la station de Bogo.

		Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce
2002	Par rapport à 1966-1980							-73	-50	-80	-50		
	Par rapport à 1981-1998							-10	-2	-13	0		
2003	Par rapport à 1966-1980							27	-47	3	-72		
	Par rapport à 1981-1998							32	-2	43	-43		
2004	Par rapport à 1966-1980							-97	-70	-76	-39		
	Par rapport à 1981-1998							-97	-44	-67	22		

Conclusion

Les observations montrent dans l'ensemble que les trois années 2002, 2003 et 2004 retracent les principaux aspects de l'évolution du climat dans la sous-région : une irrégularité interannuelle des écoulements et un contexte de faible hydraulicité encore persistant.

2.2. Le bassin versant de Lom (centre Cameroun)

- Les pluies

Les pluies moyennes mensuelles sont calculées à partir des données de deux stations pluviométriques (Meiganga et Garoua Boulai), la troisième station, Betare Oya ayant été arrêtée en 1993.

Au cours des trois années d'études, le total pluviométrique annuel suit une évolution similaire à ce qu'on a observé plus au nord sur le bassin versant du Mayo Tsanaga. L'année 2003

enregistre la pluie la plus élevée (1489,2 mm). L'année 2004 suit avec un total partiel (cf. plus bas) de 1186,7 mm. L'année 2002 enregistre 1185,7 mm (tableau 7.5). Les trois années ont enregistré des totaux pluviométriques faibles, inférieurs à la moyenne de 1491 mm de la période 1970-1994, caractérisée comme sèche. Les années 2002 et 2004 enregistrent les valeurs les plus faibles jamais observées depuis 1950. Les déficits par rapport à la moyenne de la période 1970-1994 sont de - 20% en 2002 et - 0.12% en 2003.

Tableau 7.5 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Lom à Betare Oya.

	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Déce	Total
2002	0,0	6,7	13,3	55,3	76,4	175,7	185,4	283,9	255,1	116,6	17,1	0,0	1185,7
2003	0,0	0,0	10,9	84,1	74,7	216,1	310,4	329,6	272,4	171,8	19,2	0,0	1489,2
2004	0,0	0,0	7,1	107,3	158,2	157,0	280,0	208,1	269,1	-	-	-	1186,7*

* année incomplète

La figure 7.10 compare les hauteurs moyennes mensuelles et les régimes des précipitations des périodes 1950-1969 (1969, année de rupture) et 1970-1994 à ceux des trois années 2002, 2003 et 2004. Pour ces trois années de mesures, la répartition mensuelle des précipitations est de type tropical humide, présentant huit à neuf mois de pluies. Les mois les plus pluvieux restent juillet, août et septembre.

La répartition des écarts de la pluie mensuelle par rapport à la moyenne de la période sèche 1970-1994 montre d'un point de vue général que les mois les plus pluvieux (juillet, août et septembre) n'ont pas connu de variation sensible (tableau 7.6). Les écarts sont le plus souvent positifs, traduisant des excédents de pluies, atteignant parfois des valeurs supérieures à 30 %, notamment en 2003. Mais les pluies de ces mois n'atteignent pas pour autant les valeurs de la période humide 1950-1969.

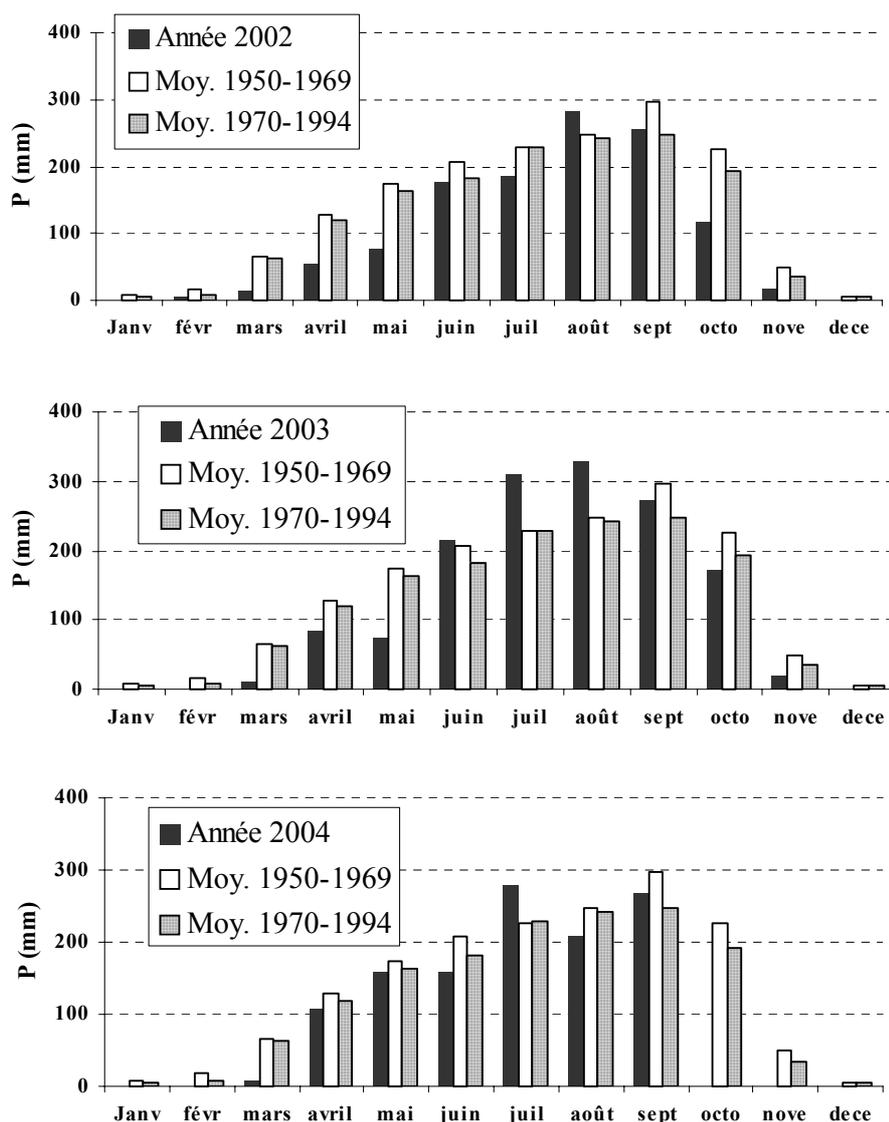


Figure 7.10 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Lom à Betare Oya, comparées aux moyennes de 1950-1969 et 1970-1994.

Tableau 7.6 : Ecart relatif (en %) de la pluie mensuelle des trois années d'étude par rapport à la moyenne pluviométrique de la période 1970-1994, sur le bassin versant de Lom à Betare Oya.

	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Annuel
2002	-	-18,5	-78,5	-53,5	-53,2	-3,1	-19,3	17,4	3,0	-39,5	-50,6	-	- 20
2003	-	-	-82,5	-29,3	-54,3	19,1	35,2	36,3	10,0	-10,8	-44,6	-	- 0,12
2004	-	-	-88,5	-9,8	-3,2	-13,5	21,9	-14,0	8,6	-	-	-	-

Par contre, il apparaît que les mois de début de saison (mars, avril, mai) et de fin de saison (octobre, novembre) enregistrent des déficits les plus importants, dépassant fréquemment 50 %. Ce phénomène marque un allongement de la saison sèche et un raccourcissement de la saison des pluies, qui contribuent à la baisse des précipitations annuelles.

- Les débits

Les mesures de débits pour cette étude n'ont commencé qu'en septembre 2002. Cependant, on a pu récupérer les données du début de l'année 2002 auprès de la société nationale d'électricité, dans le cadre du programme de gestion des retenues d'eau dans le bassin supérieur de la Sanaga. Elles couvrent alors la période d'avril 2002 à septembre 2004. Les valeurs mensuelles sont présentées dans le tableau 7.7. Les débits moyens annuels sont plus faibles que la moyenne de la période 1951-1970 ($181 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), mais sont proches de la moyenne de la période 1971-1993 ($156 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Tableau 7.7 : Débits moyens mensuels et annuels à Betare Oya en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Janv	Fevr	Mars	Annuel
2002/2003	20,5	40,1	80,1	195	248	454	367	206	104	64,6	33,3	17	152,6
2003/2004	35	32,8	72	144	305	474	478	234	123	78,2	42,8	22,5	170,1
2004/2005	36	58,3	75	164	241	308	-	-	-	-	-	-	-

La comparaison de ces débits mensuels avec les moyennes des chroniques observées à la station depuis 1951, montre (figure 7.11) que les débits des trois mois les plus humides (août, septembre et octobre) ne connaissent pas de changement sensible par rapport à la moyenne de la série. Il semble même que pour certaines années, les débits de chacun de ces trois mois sont significativement supérieurs à la moyenne de la période 1951-1970, considérée comme la plus humide.

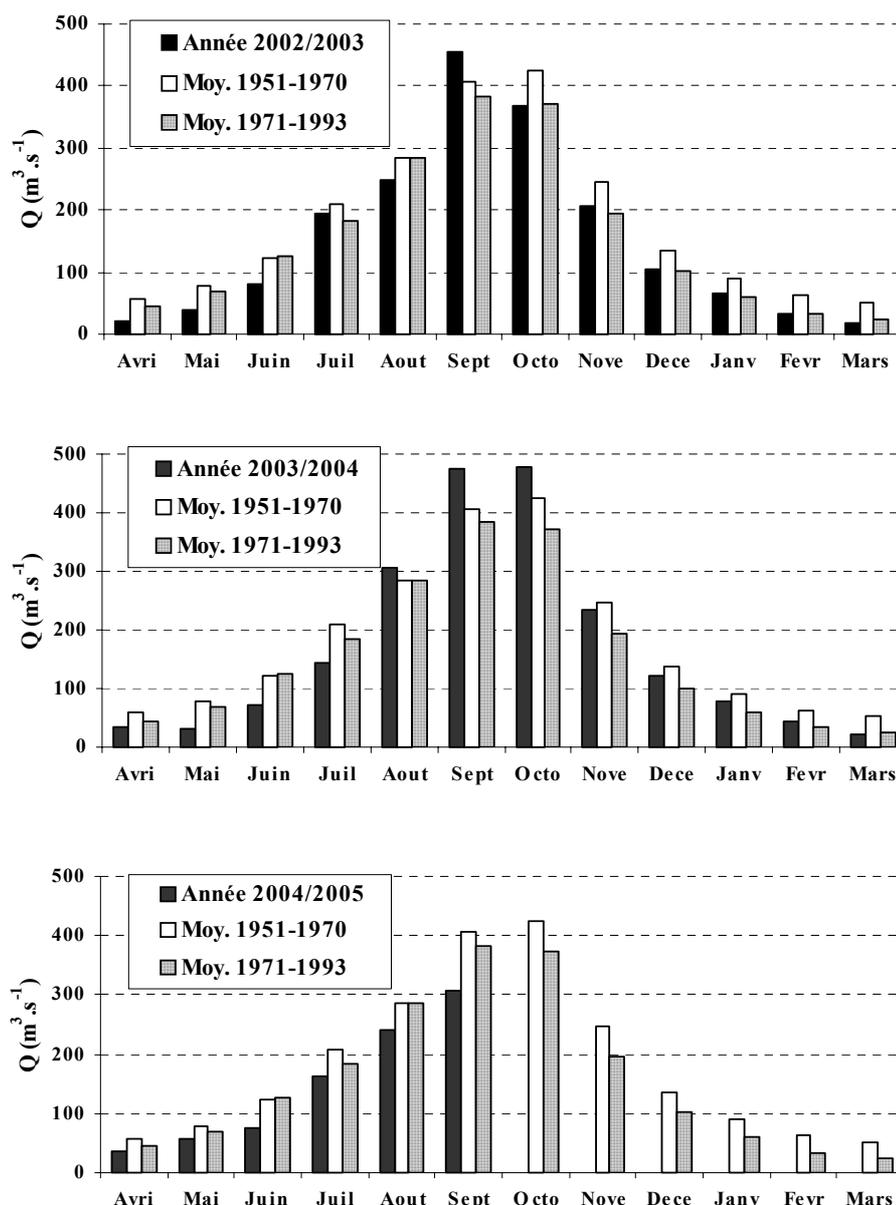


Figure 7.11 : Débits moyens mensuels des années d'étude à Betare Oya, comparés aux moyennes de la période humide (1951-1970) et de la période sèche (1971-1993).

En revanche, on observe une tendance générale à une diminution beaucoup plus importante des débits des mois de saison sèche avec, dans l'ensemble, des déficits plus importants pour les mois de plus faibles écoulements (tableau 7.8).

Ces observations corroborent celles déjà faites sur les pluies mensuelles, et concourent à affirmer que les deux années d'étude sont marquées par un renforcement de la saison sèche, qui paraît sensiblement plus longue. Bien que la saison humide soit plus courte, les pluies et

les débits de ces mois n'ont guère connu de variations, et sont même quelquefois supérieurs à ceux de la période humide. De ce fait, il semble que c'est la diminution des pluies et des écoulements enregistrée hors saison humide qui contribue de façon plus importante à la baisse des valeurs annuelles des précipitations et des écoulements.

Tableau 7.8 : Ecart relatifs (en %) des débits des années d'étude aux moyennes mensuelles à la station de Betare Oya.

		Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Janv	Fevr	Mars
2002/2003	Par rapport à 1951-1970	-64,9	-49,1	-34,4	-6,4	-12,7	11,6	-13,7	-16,2	-23,5	-28,5	-47,9	-66,6
	Par rapport à 1971-1993	-53,4	-42,0	-36,0	5,9	-12,9	18,5	-1,5	5,9	2,6	6,2	-0,4	-25,6
2003/2004	Par rapport à 1951-1970	-39,4	-58,3	-41,0	-30,9	7,1	16,4	12,4	-4,8	-9,5	-13,5	-33,0	-57,0
	Par rapport à 1971-1993	-19,7	-52,5	-42,4	-21,8	7,0	23,6	28,3	20,3	21,4	28,5	28,1	-4,2
2004/2005	Par rapport à 1951-1970	-38,3	-25,9	-38,5	-21,2	-15,2	-24,4						
	Par rapport à 1971-1993	-18,2	-15,7	-40,0	-10,9	-15,3	-19,7						



Ce phénomène s'avère être une manifestation de la récente sécheresse dans cette région centre du Cameroun. En effet, une simple analyse graphique comparative de l'évolution des débits moyens des trois mois les plus humides (août, septembre, octobre) et les plus secs (février, mars, avril) montre (figure 7.12) qu'entre 1951 et 1970 (A), on ne note aucune tendance dans l'évolution des débits, aussi bien pour ceux des mois les plus humides que pour ceux des mois les plus secs. A partir de 1971 jusqu'en 2003 (B), les mois les plus humides connaissent une diminution des débits au cours des phases aiguës de la sécheresse (1972, 1983-1984, 2000-2001), mais la tendance générale ne montre aucune évolution à la baisse ou à la hausse. Par contre, les débits moyens des trois mois les plus secs connaissent une évolution continue à la baisse, passant d'une moyenne de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 1951 et 1970 à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la fin des années 1990.

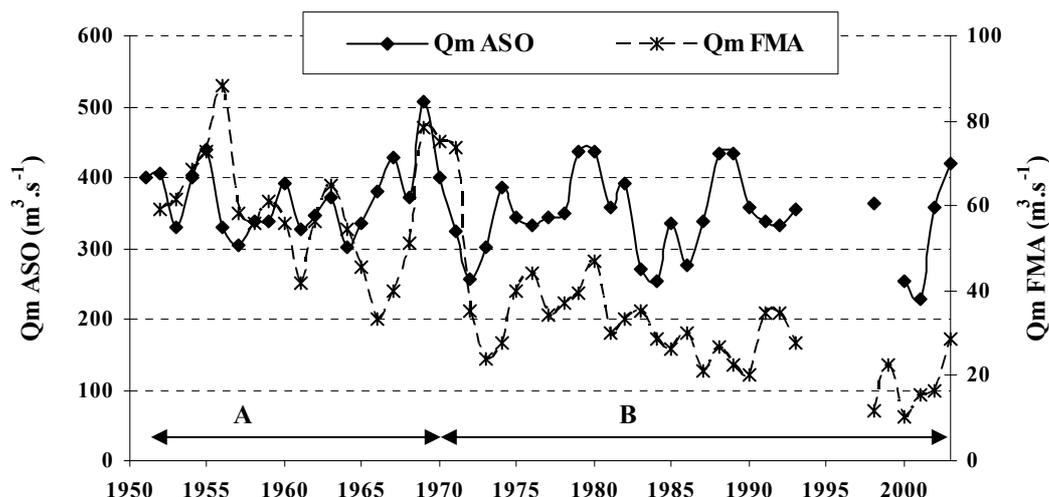


Figure 7.12 : Evolution comparée des débits moyens d'août, septembre, octobre (Qm ASO) et de février, mars, avril (Qm FMA) du Lom à Betare Oya (région centre du Cameroun).

Même si dans l'absolu la diminution des débits des mois de la saison des pluies est comparable à celle des débits des mois de la saison sèche (tableau 7.9), les effets de cette diminution peuvent être plus perceptibles en saison sèche par des populations essentiellement pastorales. Aussi, les systèmes d'approvisionnement en eau potable de plusieurs agglomérations dans les régions du centre et du sud du Cameroun sont constitués de prises au fil de l'eau. L'abaissement des débits de basses eaux peut ainsi se révéler désastreux pour ces aménagements qui ne disposent pas de barrages de retenue pour soutenir les débits d'étiage.

Tableau 7.9 : Différences absolues entre les débits moyens mensuels de la période 1951-1970 et 1971-2003 à Betare Oya, en $m^3.s^{-1}$.

Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nove	Déce	Jan	Févr	Mars
18,2	14	2,4	25,6	5	26,6	56,6	53,7	36,6	33	33,1	30,8

Par ailleurs, il n'est pas exclu d'observer en cette période de sécheresse, pendant les mois de crues, des événements journaliers ou même hebdomadaires exceptionnellement humides. Nous avons pu mesurer plusieurs fois, en septembre et octobre 2003, des niveaux d'eau au dessus de l'échelle des hautes eaux (6 m) à Betare Oya. Le niveau maximum était de 6,65 m le 20 octobre, ce qui correspond à un débit journalier de $726 m^3.s^{-1}$. On notera que le débit maximum journalier mesuré à cette station ($686 m^3.s^{-1}$) remontait au 13 octobre 1954. Ceci

illustre bien le caractère exceptionnel de ces maximums journaliers mesurés en septembre et en octobre 2003, pendant une année qui a enregistré un module annuel plutôt moyen ($170,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Le débit minimum d'étiage pour la même année est de $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 26 février 2004 et reste inférieur à la moyenne de la période humide 1951-1970 ($36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ceci montre encore l'écart qui se creuse entre les paramètres de basses eaux et ceux de hautes eaux, et souligne un plus grand renforcement de la saison sèche.

2.3. Le bassin versant du Mungo (sud-ouest Cameroun)

- Les pluies

Les pluies moyennes sont calculées à partir des données de quatre stations, Mbanga, Kumba, Loum et Tombel, toutes situées dans la partie aval du bassin. Il n'existe pas de station pluviométrique immédiatement en amont. La station de Manfe se trouve beaucoup trop loin pour avoir une influence sur la pluviométrie du bassin au sens de Thiessen. Les pluies des années 2002 et 2003 sont respectivement de 2261.6 mm et 2338.7 mm (tableau 7.10). Elles sont plus faibles que la moyenne de la période 1950-1983 (3110 mm) et de la période 1984-2000 (2651 mm).

Tableau 7.10 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002 et 2003 sur le bassin versant du Mungo à Mundame.

	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Total
2002	20,74	92,7	127,9	166,8	180	239,6	220,1	255,1	412,2	370,1	167	9,3	2261,6
2003	16,8	77,7	115,2	232,1	146	225,5	297,4	368,2	445,8	340,1	61,74	12,1	2338,7
2004	11,1	21,9	103,4	189,5	196,5	265,6	-	-	-	-	-	-	-

En terme de répartition mensuelle de la pluie annuelle et de comparaison avec les périodes précédentes, le régime présente une seule saison des pluies centrée sur les mois d'août, septembre et octobre principalement (figure 7.13). Cette région du sud-ouest Cameroun garde de ce fait un caractère tropical. Mais les hauteurs de pluies mensuelles sont plus élevées que dans la zone précédente (région du centre).

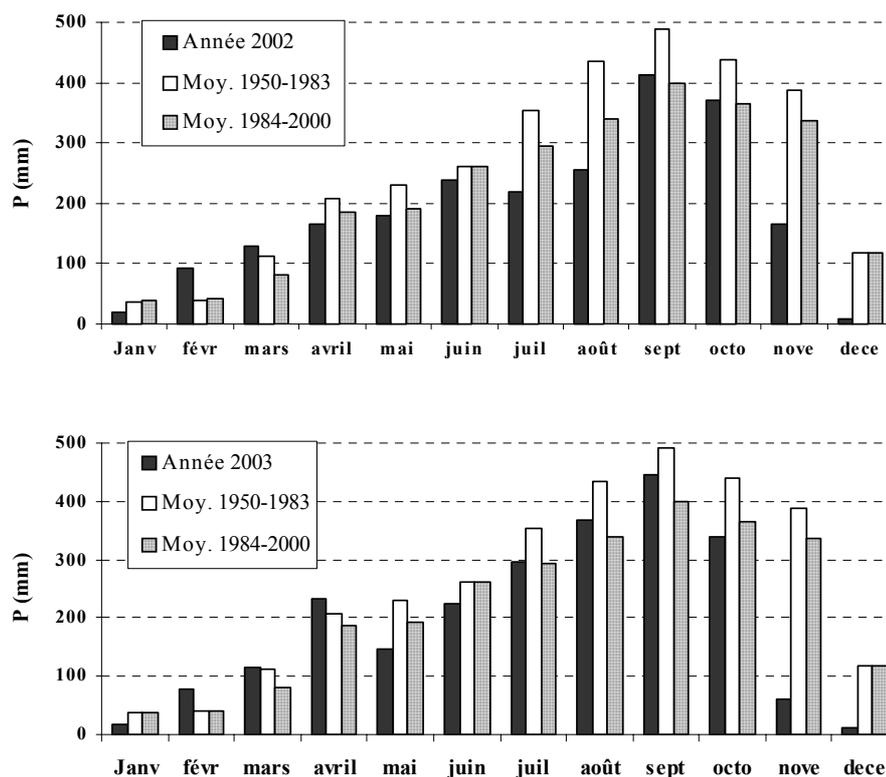


Figure 7.13 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002 et 2003 sur le bassin versant du Mungo à Mundame, comparées aux moyennes de 1950-1983 et 1984-2000.

Les précipitations moyennes mensuelles des années 2002 et 2003 sont systématiquement plus faibles que la moyenne de la période sèche (1984-2000). Les déficits sont en moyenne de 20 à 25 % pour les mois les plus pluvieux (tableau 7.11). Ils augmentent considérablement en intersaison pour atteindre parfois 80 %. Les précipitations sont aussi globalement plus faibles par rapport à la période sèche 1984-2000, cependant quelques mois enregistrent des pluies légèrement supérieures à la moyenne de cette période sèche. Dans cette région du sud-ouest, les déficits apparemment faibles en valeurs relatives sont en réalité élevés en terme de valeurs absolues. Les déficits respectifs de 389.4 mm et 312,3 mm sur les pluies annuelles des années 2002 et 2003 par rapport à 1984-2000, ne représentent que 14,6 % et 11,8 % en valeurs relatives.

Tableau 7.11 : Ecarts relatifs (en %) de la pluie mensuelle des deux années d'étude par rapport à la moyenne pluviométrique de la période 1950-1983 et celle de la période 1984-2000, sur le bassin versant du Mungo à Mundame.

		Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce
2002	Par rapport à 1950-1983	-45,1	131,1	14,8	-19,9	-21,7	-7,9	-37,8	-41,3	-15,9	-15,8	-56,8	-92,1
	Par rapport à 1984-2000	-45,6	123,1	59,1	-10,0	-6,4	-8,3	-25,0	-24,9	3,3	1,5	-50,5	-92,0
2003	Par rapport à 1950-1983	-55,5	93,8	3,3	11,5	-36,5	-13,3	-16,0	-15,2	-9,1	-22,6	-84,0	-89,7
	Par rapport à 1984-2000	-55,9	87,1	43,2	25,2	-24,1	-13,7	1,3	8,3	11,8	-6,7	-81,7	-89,6
2004	Par rapport à 1950-1983	-70,7	-45,3	82,5	-9,0	-14,6	2,1						
	Par rapport à 1984-2000	-70,9	-47,2	28,5	2,2	2,2	1,7						

- Les écoulements

Les données ne couvrent que la période de novembre 2002 à août 2004. Une seule saison hydrologique, 2003/2004 est observée en intégralité (tableau 7.12). Le module annuel ($116 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) accuse un déficit absolu de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par rapport à la moyenne de 1970-1987 ($174 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et $58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par rapport à la moyenne de 1951-1969 ($140,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ces valeurs représentent respectivement 18 % et 33,3 % en valeurs relatives.

Tableau 7.12 : Débits moyens mensuels et annuels à Mundame en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	-	-	-	-	-	-	-	-	137	38,6	25,9	19,1	-
2003/2004	14,5	25,2	76,7	139	220	277	290	181	103	34,2	21,3	10	116
2004/2005	15,4	28,9	61,4	130	-	223,4	-	-	-	-	-	-	-

Les déficits sont aussi calculés au pas de temps mensuel. Comme pour la région du centre (bassin versant du Lom), les valeurs relatives du déficit sont plus élevées pour les mois de la saison sèche que pour les mois de la saison humide (tableau 7.13). Il semble encore ici que la diminution des débits, soit plus perceptible en saison sèche qu'en saison des pluies, mais les

irrégularités interannuelles sont aussi plus remarquables. Par ailleurs, les écarts absolus à la moyenne sont plus importants.

Sur ce bassin de la **zone tropicale plus humide**, certains débits journaliers, pour cette année 2003/2004 plutôt déficitaire, ont atteint des valeurs mesurées pendant l'année humide (figure 7.18). Pour la même année, les débits de basses eaux sont plus faibles que ceux de l'année la plus sèche.

Il semblerait que la baisse des modules annuels dans les zones tropicales humides soit due à une réduction de la période d'écoulement, avec un amenuisement des débits d'étiage et des événements de crues qui ont considérablement diminué en nombre, tout en gardant globalement les mêmes valeurs de débits de pointe. Ce qui pourrait s'expliquer par une diminution d'évènements pluvieux importants.

Tableau 7.13 : Ecart relatifs (en %) des débits de la période d'étude à la moyenne de 1970-1987 à Mundame.

	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr
2002/2003									-7,8	-40,6	-32,1	-37,2
2003/2004	-64,7	-58,9	-16,4	1,9	7,0	-7,4	-6,6	-31,2	-30,7	-47,4	-44,1	-67,1
2004/2005	-62,5	-52,9	-33,1	-4,7		-25,3						

2.4. Les bassins versants de la zone équatoriale (sud Cameroun)

En rappel, la zone équatoriale est représentée dans cette étude par trois bassins versants qui caractérisent ses principales variantes :

- ce qu'on peut appeler le régime équatorial au sens strict est identifié sur le bassin versant du Ntem, bassin versant camerounais le plus au sud, avec une grande partie au Gabon ;
- une variante littorale, différente de la précédente par des hauteurs de précipitations plus élevées, s'identifie sur le bassin versant de la Kienke ;
- une variante septentrionale, qualifiée souvent d'équatoriale de transition avec la zone tropicale, est représentée par le bassin versant du Nyong.

Pour éviter des descriptions et des remarques redondantes, les données de ces trois cours d'eau à régimes hydroclimatiques très proches sont mises ensemble dans ce même paragraphe. Pour ces bassins, les variations interannuelles des précipitations et des écoulements annuels sont analogues aux descriptions faites en Afrique humide. On y observe une faible diminution sur l'ensemble des séries, mais marquée par des épisodes secs plus intenses (1972-1973, 1983-1984 et 1991-1992).

Cependant, une autre variabilité à long terme, induit une tendance à un changement dans le déroulement du cycle hydrologique annuel, sans affecter significativement les valeurs annuelles (Liéno *et al.*, 2005b). La baisse de la pluviométrie de la "saison sèche" d'hiver boréal (décembre à février) accentue le déficit hydrique qui entraîne une baisse des coefficients d'écoulement de la saison des pluies de printemps boréal (mars à juin). Inversement, l'augmentation des écoulements en automne (septembre à novembre), alors que la pluviométrie correspondante a peu varié, tient probablement au fait que les pluies de la "saison sèche" d'été (juillet et août) sont plus élevées depuis quelques décennies, ce qui entretient vraisemblablement une humidité du sol plus élevée favorable au ruissellement au début de la crue d'automne.

- Les pluies

Les données de pluies mensuelles sont issues pour les bassins versants du Nyong et de la Kienke des mêmes stations pluviométriques que précédemment, c'est-à-dire : Yaoundé, Akonolinga et Abong-Mbang pour le premier et, Kribi et Ebolowa pour le second. En ce qui concerne le bassin versant du Ntem, les observations n'ont pas été disponibles à trois des cinq stations pluviométriques utilisées pour décrire les variabilités des pluies mensuelles et saisonnières. Il s'agit des deux stations en territoire gabonais (Oyem et Minvoul) et d'une station en territoire camerounais (Djoum). L'information sur la moitié du bassin située du côté gabonais n'est donc pas disponible. Plutôt que de procéder à des reconstitutions de données à ces trois stations, Les données de deux stations seulement en territoire camerounais (Ambam et Sangmelima) sont utilisées, somme toute insuffisantes, mais présentent l'avantage d'être réellement observées.

Les valeurs de pluies moyennes mensuelles et annuelles pour les trois années sont présentées dans le tableau 7.14.

Tableau 7.14 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002, 2003 et 2004 sur les bassins versants de la zone forestière ; Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik, en mm.

	Janv	févr	mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nov	Déce	Total
Nyong													
2002	25,6	68,43	180,2	171,4	158,6	229,3	118,5	155,8	223,7	322,9	128,3	20,35	1803,1
2003	18,5	38,91	133,6	189,3	168,4	236,8	117,4	147,3	233,3	189,1	136,4	16,52	1625,4
2004	17,5	56,27	147,3	80,91	198,3	225,8	101,5	155,3	258,6				
Kienke													
2002	42,4	30,8	169	284,8	340,7	589,7	128	441,3	432,1	512,1	263,4	21,7	3256
2003	71,1	136,6	148,5	213,5	335,8	562,7	542	423,6	712	173,9	272	44,2	3635,9
2004	99,2	22,2	62,4	407,4	189,5	279,9	272,5	-	-	-	-	-	-
Ntem													
2002	8,5	107,6	190,3	199,3	150,5	201,8	100,5	114	269,5	388,4	125,5	23,2	1879
2003	15,6	68,8	154	224,8	232,9	130,8	154,9	93,3	227,6	279,3	172,6	18,3	1772,7
2004	67,4	50,7	133,1	210	114	163,3	60,8	-	-	-	-	-	-

Tableau 7.15 : Ecarts des pluies annuelles des années d'étude par rapport à la moyenne interannuelle 1950-2000 sur les bassins versants forestiers.

Bassin	Année	Excédent	
		Absolu (mm)	Pourcentage
Nyong à Mbalmayo	2002	208,1	13
	2003	30,4	2
Kienke à Kribi	2002	482	17,4
	2003	861,9	31,1
Ntem à Ngoazik	2002	217	13
	2003	110,7	6,7

Les moyennes interannuelles sur la période 1950-2000 sont de 1595 mm pour le Nyong, 2774 mm pour la Kienke et 1662 mm pour le Ntem. Il se dégage alors du tableau 7.14 précédant que les totaux annuels des années d'étude sont supérieurs à la moyenne interannuelle de 1950-2000. Les excédents pluviométriques sont compris entre 13 % et 17,4 % en 2002 (tableau

7.15). La pluviométrie de l'année 2003 est légèrement faible sur les bassins versants continentaux (Nyong et Ntem), où l'excédent est compris entre 2 % et 6,7 %. Par contre on enregistre sur la côte un total annuel beaucoup plus élevé avec une augmentation de 31,1 % par rapport à la moyenne 1950-2000.

Cette tendance à des pluies annuelles supérieures à la moyenne est observée dans la zone équatoriale camerounaise depuis 1995 sur la côte (bassin versant de la Kienke) et depuis 1998 sur le bassin versant du Ntem (figure 6.6). Elle est beaucoup moins sensible sur le bassin versant du Nyong où les pluies sont quasiment constantes depuis le début de la décennie 1990.

La répartition mensuelle de la pluie annuelle indique bien un régime à quatre saisons (figure 7.14) ; deux saisons sèches et deux saisons des pluies. Cette répartition reste vérifiée à la côte où, malgré la concentration des précipitations les plus élevées entre mai et octobre, on note une accalmie entre juillet et août, séparée par deux grands maximums en juin et en septembre (Kienke).

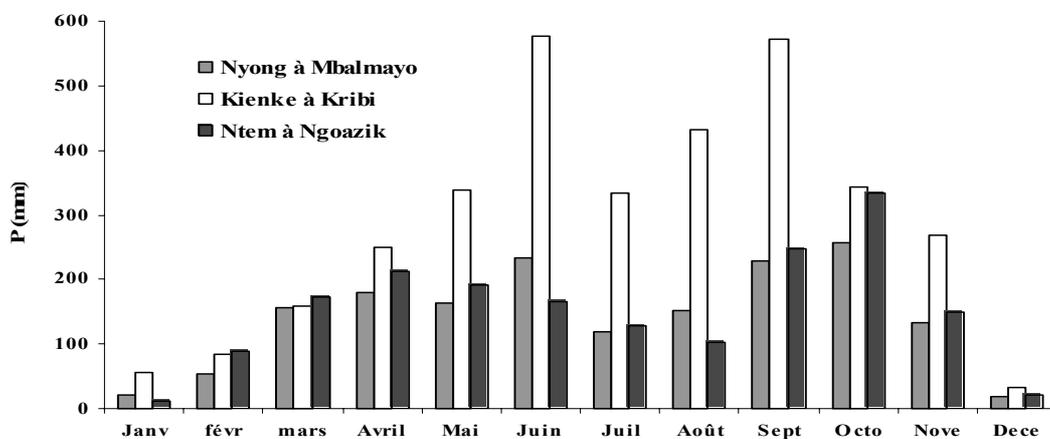


Figure 7.14 : Répartition mensuelle de la pluie annuelle sur les trois bassins équatoriaux ; moyennes mensuelles calculées sur les deux années 2002 et 2003.

Il est intéressant de regarder comment les augmentations constatées sur les pluies annuelles sont réparties par mois et par saison, compte tenu de la tendance à la modification des régimes des précipitations en zone équatoriale camerounaise. Dans cette optique, les précipitations

saisonniers sont comparées aux normales de la série des observations sur chaque bassin versant.

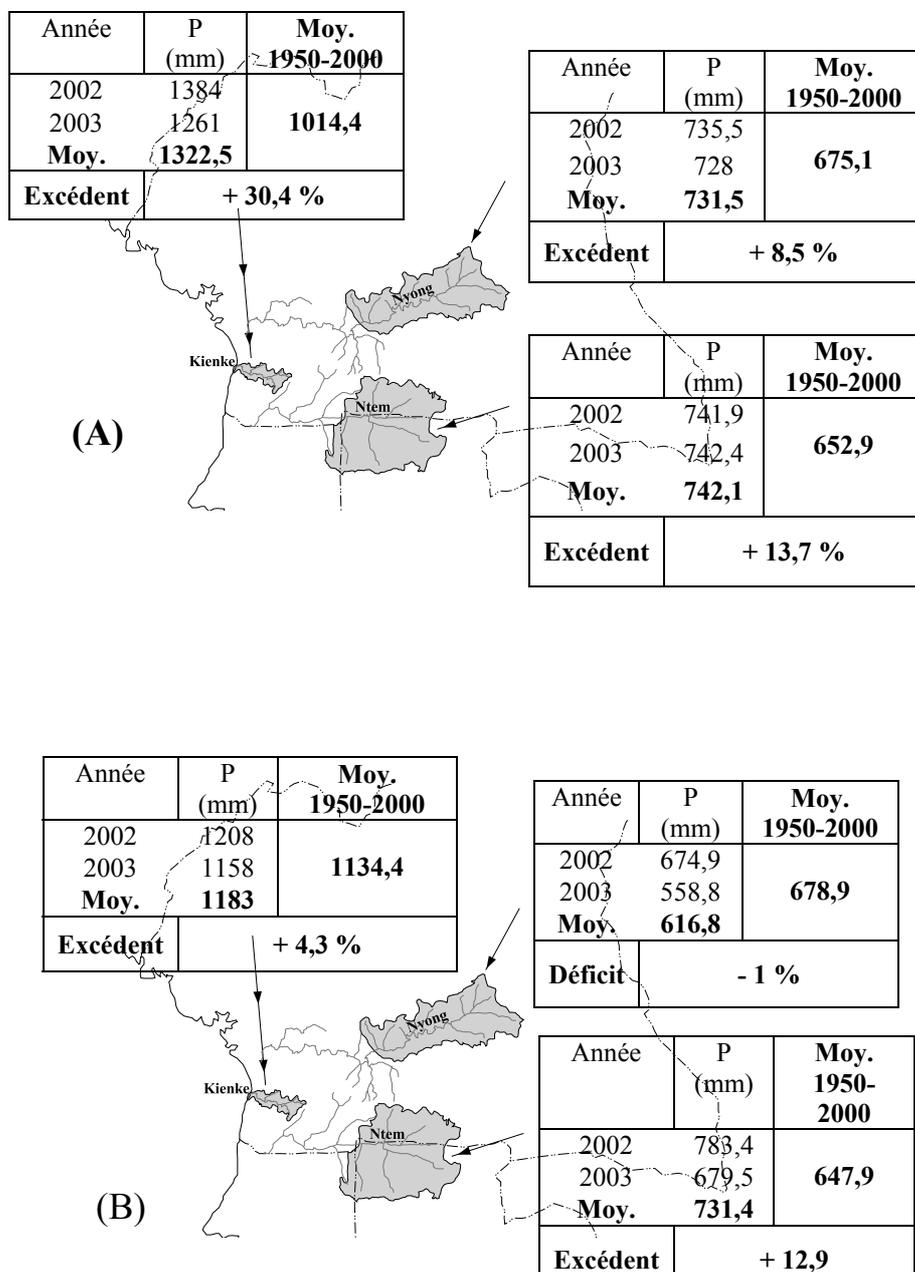


Figure 7.15 : Précipitations des deux saisons des pluies des années d'étude comparées à la moyenne interannuelle 1950-2000 sur Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik : (A) ; printemps et (B) ; automne.

En ce qui concerne les saisons des pluies (figure 7.15), les années 2002 et 2003 ont enregistré des précipitations excédentaires. Les valeurs relatives sont semblables à celles obtenues sur

des pluies annuelles. Les variations des précipitations de printemps sont relativement plus élevées (8 % à 30 %) que celles d'automne (-1 % à 13 %).

Pour les précipitations des « saisons sèches », les années 2002 et 2003 s'inscrivent dans la tendance à une évolution opposée. Les précipitations hivernales (DJF) sont toujours amoindries alors que les précipitations estivales (JA) sont élevées (figure 7.16).

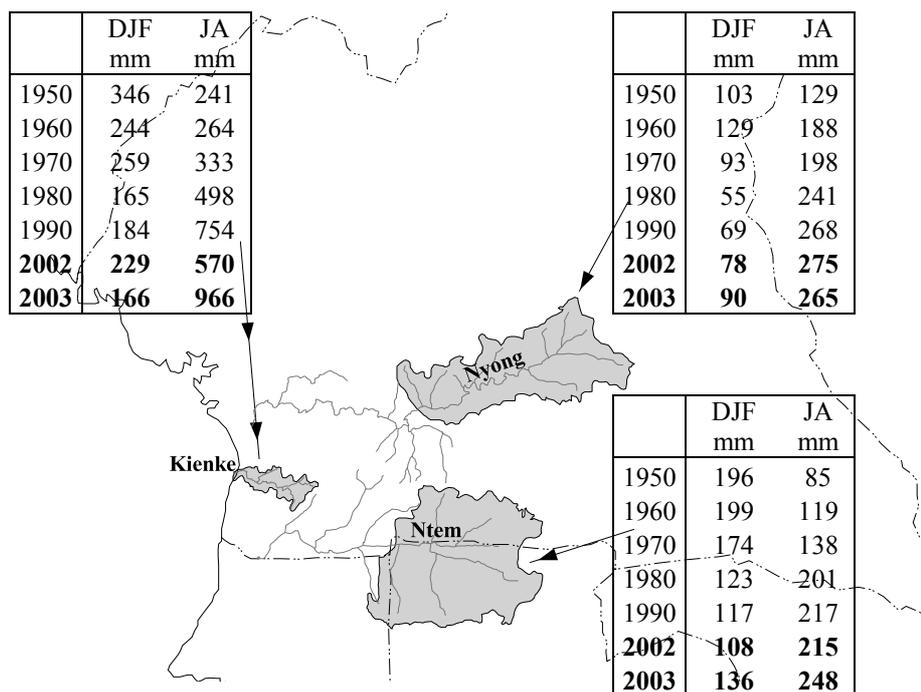


Figure 7.16 : Précipitations hivernales (DJF) et estivales (JA) des années d'étude (2002, 2003) comparées aux moyennes décennales depuis 1950 sur Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik.

- Les écoulements

Si les données de précipitations complètes pour les deux saisons hydrologiques étudiées, les données de débits, elles, s'étendent sur 24 mois, mais ne couvrent entièrement que l'année 2003/2004. La saison 2002/2003 n'est observée que pour sa deuxième moitié, alors que 2004/2005 l'est pour sa première. Les valeurs mensuelles et annuelles sont présentées dans le tableau 7.16.

Tableau 7.16 : Débits moyens mensuels et annuels observés sur les trois bassins versants de la zone forestière du Cameroun, en $m^3.s^{-1}$: Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik.

	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Déce	Janv	Févr	Annuel
Nyong													
2002/2003	38,4	58,1	91,6	138	157	151	185	321	455	252	121	37,5	167,1
2003/2004	41,6	50,9	62,9	103	100	121	166	259	304,3	193	93,8	28,6	127
2004/2005	20,3	58,4	69,9	64	81,3	110	169	-	-	-	-	-	-
Kienke													
2002/2003	-	-	-	-	-	-	114	99	101	41,2	15,9	11,6	-
2003/2004	20,5	33,3	46,9	74,3	80,3	88,7	142	96,8	86,9	47,9	24,4	11,9	62,8
2004/2005	10,3	22,4	51,3	32,2	22,7	33,7	-	-	-	-	-	-	-
Ntem													
2002/2003	-	-	-	-	313	250	512	707	1030	464	229	108	-
2003/2004	178	353	320	367	470	403	494	573	545,9	285	161	111	355,1
2004/2005	113	196	311	246	-	-	-	-	-	-	-	-	-

De ce fait, le module annuel ne concernera que l'année complète, sauf pour le bassin versant du Nyong où nous avons complété l'année 2002/2003 avec les données collectées auprès du programme ORE.

Les séries de débits disponibles sur les bassins sont plus courtes que celles des pluies. Les observations continues s'arrêtent au début de la décennie 1990. Les séquences qui suivent sont plus discontinues, mais s'inscrivent dans les mêmes tendances en évolution interannuelle. Les tests statistiques utilisés au chapitre 4 ont décelé une rupture seulement dans la chronique des débits annuels du Ntem, survenue autour de 1970. Le module annuel est passé de $296 m^3.s^{-1}$ entre 1953 et 1970 à $239 m^3.s^{-1}$ entre 1971 et 1991, soit une diminution de 19 %. Les modules du Nyong et de la Kienke ont connu aussi des faibles variations à la baisse, mais sans rupture de série décelable au seuil des tests statistiques utilisés. Le module moyen de la Kienke est de $49 m^3.s^{-1}$ sur la période de 1955 à 1992, avec les données des années 1988 et 1989 qui manquent. Celui du Nyong est de $148 m^3.s^{-1}$ pour la période 1951-2001, avec des lacunes en 1988 et 1989 et entre 1992 et 1997.

Les valeurs de débits confirment les remarques énoncées sur la pluviométrie. D'une manière générale, les débits de la saison 2003/2004 sont supérieurs aux moyennes interannuelles (à l'exception du Nyong où il n'a coulé que $127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un déficit de 14,2% par rapport à la moyenne). Le débit de la Kienke correspond à un excédent de 28,2 % par rapport à la moyenne interannuelle. Celui du Ntem correspond à un excédent de 48,6 % par rapport à la période 1971-1991, et 20 % par rapport à la période 1953-1970.

Il est difficile de se prononcer sur la diminution des débits du Nyong, à la même année où ceux du Ntem et de la Kienke sont excédentaires. Toutefois, on note quelques différences importantes dans les variations des précipitations sur ces bassins, même si elles sont toutes globalement excédentaires. Les précipitations annuelles en 2003 ont connu la plus faible augmentation sur le bassin du Nyong, + 2 %, contre + 6,7 % et + 31,1 % respectivement sur le Ntem et la Kienke. De plus, les précipitations d'automne y ont été très moyennes sur les deux années de notre étude, - 1%, contre + 12,9 % sur le Ntem et + 4,3 % sur la Kienke. Les précipitations de printemps montrent elles aussi la plus faible augmentation sur le Nyong, + 8,5 % contre + 13,7 % sur le Ntem et + 30,4 % sur la Kienke.

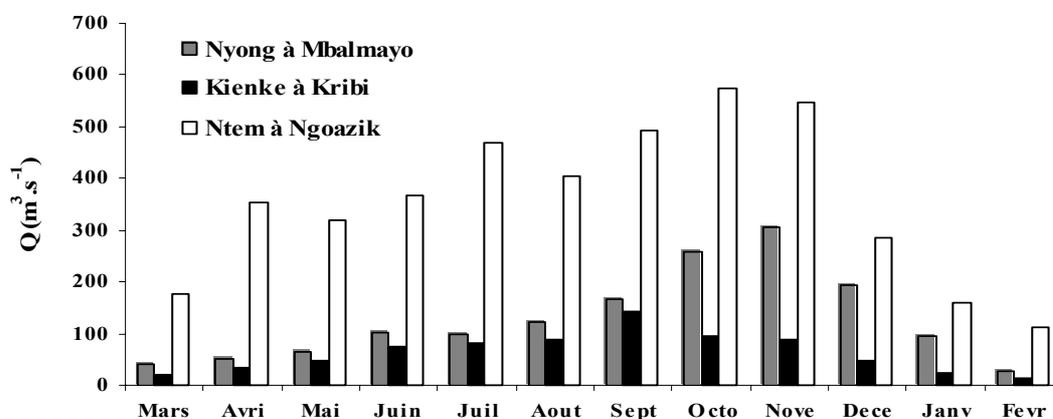


Figure 7.17 : Débits moyens mensuels de la saison 2003/2004 sur les bassins versants équatoriaux.

La principale remarque qu'on puisse tirer de la distribution mensuelle des écoulements c'est l'abondance des écoulements de la « saison sèche » d'été (juillet et août) sur l'ensemble des trois bassins (figure 7.17). Ces écoulements sont la conséquence des précipitations estivales de plus en plus importantes depuis le début des années 1980, en zone équatoriale du Cameroun.

La répartition saisonnière des écoulements a été étudiée en utilisant les données disponibles, sur une année hydrologique complète et les deux portions des autres années. Le débit de chaque saison est obtenu en calculant la moyenne arithmétique des débits mensuels, des mois de la saison concernée. Les résultats figurent dans le tableau 7.17. Pour chaque saison, nous indiquons les moyennes sur les années étudiées, calculées avec les données existantes.

Tableau 7.17 : Débits saisonniers sur les bassins versants étudiés et moyennes des deux ou trois années, en $m^3.s^{-1}$.

		Q _{MAMJ}	Q _{JA}	Q _{SON}	Q _{DJF}
Nyong à Mbalmayo	2002	81,5	154	320,3	136,8
	2003	64,6	110,5	243,1	105,1
	2004	53,2	95,7	-	-
	Moy.	66,4	120,1	281,7	121,0
Kienke à Kribi	2002	-	-	104,7	22,9
	2003	33,6	56,3	108,6	28,1
	2004	28	28,2	-	-
	Moy.	30,8	42,3	106,6	25,5
Ntem à Ngoazik	2002	-	281,5	749,7	267,0
	2003	304,5	436,5	537,6	185,7
	2004	216,5	-	-	-
	Moy.	260,5	359	643,7	226,3

Les débits des deux « saisons sèches » (JA et DJF) sont assez semblables sur le Nyong. Par contre, sur la Kienke et le Ntem, les écoulements estivaux (JA) sont beaucoup plus importants que les écoulements hivernaux (DJF).

Mais la principale information qui se dégage de ce tableau c'est l'écart considérable entre les débits de printemps (MAMJ) et ceux d'automne (SON) sur les trois bassins. Les rapports (Q_{SON}/Q_{MAMJ}) sont de l'ordre de 4,2 pour le Nyong, 3,5 pour la Kienke et 2,5 pour le Ntem.

Pour mieux expliquer le dysfonctionnement entre le printemps et l'automne, les lames d'eau précipitées sont comparées aux lames d'eau écoulées, les bilans étant appréciés par les coefficients d'écoulement (K_e). Ce coefficient est le rapport entre la lame d'eau écoulée et la

lame d'eau précipitée pendant la même période. Pour une lame d'eau précipitée sur le bassin, il exprime la part (en pourcentage), qui s'est effectivement écoulée à la station de mesures de débit.

Tableau 7.18 : Coefficients d'écoulements saisonniers calculés sur les bassins équatoriaux.

		MAMJ			SON		
		P (mm)	Le (mm)	Ke (%)	P mm	Le (mm)	Ke (%)
Nyong à Mbalmayo	2002	735,5	63,4	8,6	674,9	185,8	27,5
	2003	728	50,2	6,9	558,8	141	25,2
	2004	652,3	41,3	6,3	-	-	-
Kienke à Kribi	2002	1384	-	-	1208	573,5	47,5
	2003	1261	246,6	19,6	1158	594,8	51,4
	2004	939,2	205,7	21,9	-	-	-
Ntem à Ngoazik	2002	741,9	-	-	783,4	325,6	41,6
	2003	742,4	177,3	23,9	674,5	233,5	34,6
	2004	620,5	126,1	20,3	-	-	-

Les lames d'eau écoulées sont faibles au cours de la première saison des pluies (printemps), ce qui engendre des faibles coefficients d'écoulement. Au contraire, les coefficients d'écoulements sont beaucoup plus élevés au cours de la deuxième saison des pluies (automne) (Tableau 7.18). Pourtant les précipitations de printemps ont été en général supérieures à celles d'automne entre 2002 et 2004, à l'exception du bassin versant du Ntem.

Ces remarques supposent que la réponse de ces bassins versants aux précipitations qu'elles reçoivent est désormais différente au printemps et en automne. Les quantités d'eau qui échappent à l'écoulement sont beaucoup plus importantes au cours de la première saison qu'au cours de la deuxième. Ceci peut vraisemblablement être lié aux modifications du bilan hydrique des bassins pendant les « saisons sèches » hivernales et estivales qui précèdent les saisons des pluies.

3. QUELQUES OBSERVATIONS AVEC CERTAINS FLEUVES ET RIVIERES DE LA SOUS REGION AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

Les observations faites dans les principales unités de climat du Cameroun méritent d'être comparées avec celles des autres fleuves et rivières de la sous-région d'Afrique de l'ouest et du centre. Le bassin versant du fleuve Niger est un vaste système hydrographique qui s'étend de la Guinée au Cameroun. Il intègre bien les variations hydro climatiques en Afrique de l'ouest et du centre. Ce bassin versant empiète sur le territoire camerounais pour plus de 85 000 km² (soit environ 1/5 du pays), représenté par le bassin versant supérieur de la Bénoué.

Ainsi, les écoulements des années 2002 et 2003 à certaines de ses stations présentent des similitudes avec les fleuves camerounais appartenant globalement aux mêmes faciès climatiques. Les hydrogrammes des trois stations représentatives des trois grandes parties du bassin du fleuve Niger sont présentés sur la figure 7.18, comparés à ceux des bassins versants camerounais étudiés. La station de Koulikoro montre l'évolution des écoulements du bassin supérieur du Niger. Ceux du Niger moyen sont présentés par l'hydrogramme de la station de Niamey. Les écoulements du Niger inférieur, qui intègrent les apports de la Bénoué, sont indiqués par la station de Lokoja.

Les écoulements des années 2002 et 2004 sont bien au dessus de l'année la plus sèche, l'hydrogramme de l'année 2003 étant au dessus de celui de 2002 à chaque station, avec des débits de pointe plus élevés. A Niamey, le fleuve Niger a établi un nouveau record de crues locales, avec un débit de pointe de 1915 m³.s⁻¹, supérieur au précédent débit maximal de la période sèche, mesuré en 1988, mais n'atteignant pas le débit maximal, 2340 m³.s⁻¹ de la série des observations disponibles (Dessouassi, 2004). A la station de Lokoja où la Bénoué contribue de façon très importante aux écoulements du Niger, la crue de 2003 est encore bien plus importante que celle de 2002, avec un maximum de 19025 m³.s⁻¹.

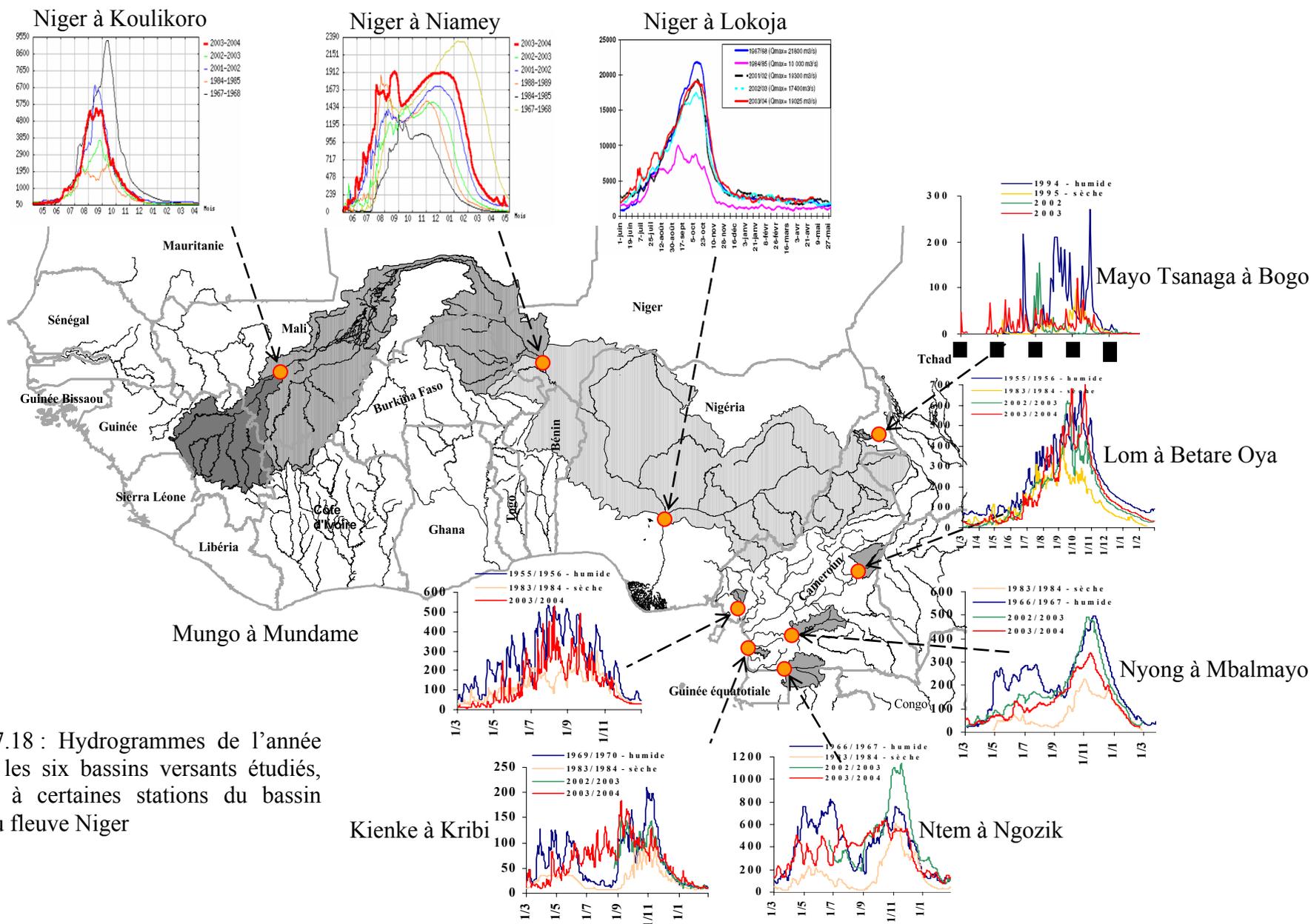


Figure : 7.18 : Hydrogrammes de l'année 2003 sur les six bassins versants étudiés, comparés à certaines stations du bassin versant du fleuve Niger

D'autres analogies sont également observées avec l'évolution des basses eaux. En effet, en dehors des stations du Niger moyen et du Niger inférieur où les étiages sont influencés par des barrages de retenues, les débits de basses eaux du Niger supérieur sont restés faibles en 2003/2004 en dépit d'une crue annuelle plutôt moyenne, ponctuées par des pointes souvent importantes. Ce qui semble analogue au régime du Lom à Betare Oya. Le décalage d'environ 2 mois entre le début des écoulements en 2002 et 2003 semble aussi correspondre à celui constaté sur le Mayo Tsanaga à Bogo.

D'autres observations faites ailleurs dans d'autres pays font état de la bonne situation hydroclimatique de l'année 2003. Au Burkina Faso par exemple la pluviométrie est excédentaire à plusieurs postes et supérieure à la normale de la période 1971-2000 (M.A.H.R.H., 2003). De ce fait, la situation de remplissage des barrages sur toute l'étendue du territoire burkinabé a été très satisfaisante, la majorité de barrage ayant dépassé leur capacité de remplissage.

La relative augmentation de la pluviométrie et des écoulements dans la zone tropicale camerounaise s'inscrit donc dans le même contexte dans la sous région d'Afrique de l'ouest et du centre, où on a mesuré des écoulements excédentaires en 2003. Toutefois, l'augmentation des écoulements n'est pas toujours liée à de bonnes pluies. Il y intervient aussi une augmentation des coefficients d'écoulement. Ainsi, même avec des pluies moins qu'avant, les écoulements sont plus importants sur certains bassins versants.

Les données manquent sur cette même période d'étude concernant les bassins versants des autres zones équatoriales d'Afrique pour étayer les observations sur les bassins versants du même climat au Cameroun.

CONCLUSION ET BILAN DES MODIFICATIONS DES REGIMES HYDROLOGIQUES AU CAMEROUN

Les analyses effectuées sur les longues séries de données ont confirmé la persistance de faibles précipitations et débits, notamment dans les zones tropicales (sèches et humides). Une tendance continue à la modification des régimes pluviométriques et hydrologiques s'est

révélée être la manifestation dominante de la sécheresse dans les zones équatoriales, même si les valeurs annuelles y ont souvent baissé, mais de manière statistiquement non significative.

Les mesures réalisées sur six bassins versants représentatifs des principales unités climatiques n'ont duré que deux années hydrologiques. Les valeurs de précipitations et de débits obtenues restent plus faibles que les moyennes interannuelles des périodes humides (avant les dates probables de ruptures statistiques), dans les zones tropicales. Certaines sont encore inférieures aux moyennes des périodes sèches (après les dates probables de ruptures statistiques), et d'autres sont même proches des niveaux observés au cours des années les plus sèches (1983-1984).

Dans les régions tropicales, les mois des saisons sèches enregistrent des déficits les plus importants, alors que les mois humides semblent ne pas être sensiblement touchés sur la base des analyses statistiques. Il semble même que pendant des années globalement moyennes ou sèches, il n'est pas exclu d'observer des événements journaliers, décennaires ou mensuels très exceptionnels (largement supérieurs aux valeurs de la période humide). On n'est donc pas à l'abri des catastrophes dues à des crues très importantes, bien que les valeurs annuelles s'inscrivent dans une continuité de déficit. Les nouvelles bases de redéfinition des normes hydro climatiques devraient prendre en compte cet autre aspect.

Dans les régions équatoriales, la période d'étude a enregistré des pluies et des débits excédentaires, supérieurs aux moyennes interannuelles. Même sur le bassin versant subéquatorial du Nyong, où les écoulements de l'année 2003 sont déficitaires (-14.2 %), la bonne hydraulicité de l'année 2002 (+ 9,6 %), ramène la moyenne des deux années à une valeur encore proche de l'hydraulicité normale. Cette période 2002-2003 peut alors être considérée dans l'ensemble comme humide en zone équatoriale du Cameroun.

Cependant rien ne permet d'affirmer qu'elle s'inscrit dans un retour vers des conditions climatiques plus favorables de façon permanente. En effet, ces mesures sont réalisées après que certaines stations aient été abandonnées depuis plus de dix années. Le diagnostic ne sera alors possible qu'en prenant en compte les années à venir sur une longue période d'observations.

Cette période d'étude garde toutefois les signes d'une évolution des régimes hydroclimatiques en zone équatoriale, dont le début coïncide avec l'apparition de la sécheresse, au cours des années 1980. Si les quantités précipitées et écoulées restent importantes dans l'absolu, les effets de cette modification des régimes peuvent se révéler désastreux, en ce sens qu'elle modifie les données des équilibres floristiques et faunistiques, déjà très souvent mis à mal par la pression des activités humaines.

Depuis très longtemps, les sociétés humaines savent modifier, voire contrôler, les écoulements naturels pour en tirer profit. La variabilité du climat observée depuis environ 35 années a elle aussi inévitablement contribué à cette modification des régimes des écoulements de surface. Dans ce double contexte actuel de changement climatique et d'action anthropique, les régimes d'écoulements actuels des cours d'eau vont dépendre de la combinaison des ces deux actions.

Les cours d'eau camerounais n'échappent pas à cette règle, les constructions d'aménagements sur leur cours ayant commencé depuis le début des années 1950. De nos jours un certain nombre d'aménagements à caractères hydroélectrique, agricole et d'adduction d'eau y ont été réalisés (figure 4.19).

La figure 7.19 montre un bilan des modifications des régimes d'écoulements à certaines stations, dues à la variabilité climatique et/ou aux activités humaines. Les analyses chiffrées détaillées de l'impact de la sécheresse sur les bassins versants autres que ceux qui sont étudiés dans cette thèse ont été effectuées par Sighomnou (2004). Les distinctions entre périodes humides et sèches sont basées sur les résultats de cet auteur.

A toutes les stations représentées, la baisse des précipitations a entraîné la diminution des écoulements presque pour tous les mois de l'année. Sur les bassins versants équatoriaux, l'augmentation des précipitations d'été a eu pour conséquence une légère augmentation des écoulements en juillet et août, et parfois en septembre et octobre.

L'impact des barrages de retenues d'eau se dessine aux stations de Riao, Nachtigal, Goura et Bafoussam. Les crues principales diminuent considérablement du fait des retenues, alors que les étiages augmentent du fait de la régulation.

CHAPITRE 8

**REGIMES DE TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION SUR
LES BASSINS VERSANTS ETUDIES ; EVOLUTION DANS LE
CONTESTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET
ENVIRONNEMENTAUX**

INTRODUCTION

Des travaux antérieurs ont déjà eu pour but l'évaluation des transports de matières en suspension au Cameroun. Mais presque tous se limitent, pour une période donnée, à certaines zones climatiques. De ce fait, ces travaux n'ont pas été synchrones dans divers écosystèmes étudiés, effectués pendant des années d'hydraulicités différentes.

L'étude entreprise ici est la première en son genre sur le territoire camerounais, du point de vue de sa couverture spatiale. Elle est bâtie autour de six bassins versants représentatifs des différents écosystèmes du Cameroun, dont l'hydrologie ne soit pas excessivement modifiée par des aménagements (figure 4.19). A partir des protocoles de mesures adaptés aux régimes hydrologiques des rivières, ce travail tente les résultats épars concernant les flux de matières aux exutoires des bassins versants.

En reprenant quatre des bassins suivis antérieurement (Mayo Tsanaga, Lom, Nyong et Ntem) (figure 8.1), l'étude vise à comparer les récents résultats avec les études antérieures, en relation avec les modifications environnementales d'origine climatique et anthropique. Par ailleurs, elle complète le réseau de mesures de matières en suspension sur le territoire camerounais aux écosystèmes forestiers côtiers, bassins versants de la Kienké et du Mungo, qui n'ont jusqu'alors fait l'objet d'aucune action de recherche sur les matières en suspension à l'échelle de bassins versants moyens et grands.

Après avoir indiqué les caractéristiques des précipitations et des débits au cours de la période d'étude (chapitre 7), ce chapitre sera consacré à présenter les différents aspects des matières en suspension (MES) sur les bassins versants étudiés. Dans un premier temps, il s'agira de faire une évaluation quantitative des transports solides liés aux écoulements étudiés au chapitre précédent. La répartition spatiale des flux pourra être mieux précisée, sur la base des résultats de mesures effectuées dans les mêmes conditions hydroclimatiques, dans les principales zones du Cameroun, qui amènera à discuter de la variabilité spatiale. Un autre objectif est de discuter de la variabilité interannuelle des régimes de transport de matières, en rapport avec la variabilité climatique observée au cours des trente cinq dernières années.

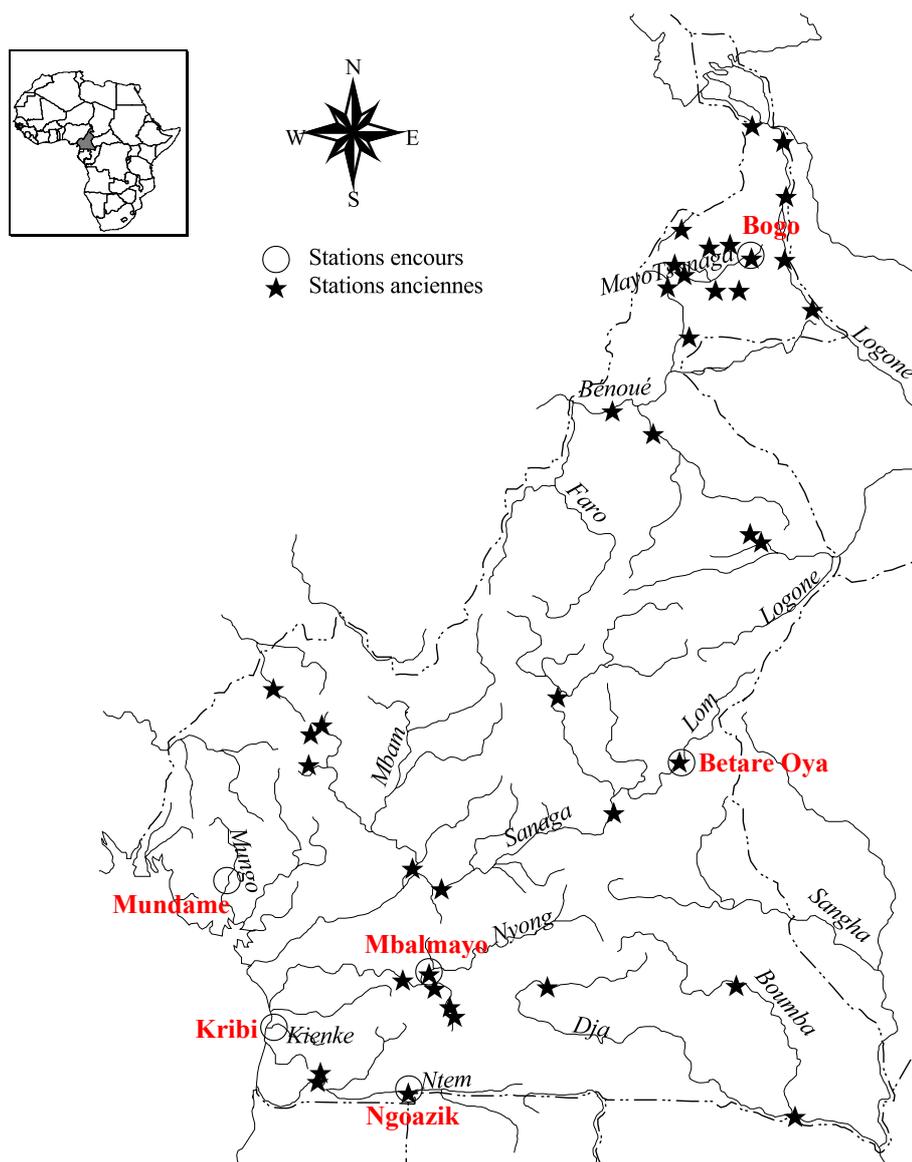


Figure 8.1 : Situation des stations étudiées par rapport aux études antérieures.

1. Descriptif des stations, protocoles de mesure et données antérieures

Il importe essentiellement de rappeler les principaux résultats obtenus antérieurement sur quatre des six bassins versants représentatifs, en précisant les protocoles et les fréquences de mesures. Les plus anciens datent de 1968 et concernent le Mayo Tsanaga. Les résultats les plus nombreux sont obtenus après 1970, et plus généralement après 1980. Ils ne sont donc pas assez représentatifs d'un contexte humide. Toutefois, certaines années au cours desquelles les MES ont été mesurées ont enregistré une pluviométrie encore élevée et, on peut

raisonnablement penser que les milieux naturels n'étaient pas encore aussi dégradés qu'actuellement.

1.1. Sud forestier : Ntem (figure 8.2)

Sur la période 1981 à 1983, les mesures de matières en suspension aux stations de Ngoazik (18 100 km²) et Nyabessan (26 350 km²) entraient dans le cadre du projet d'aménagement hydroélectrique des chutes de Menve'ele, situées à 1 km en aval de la station de Nyabessan.

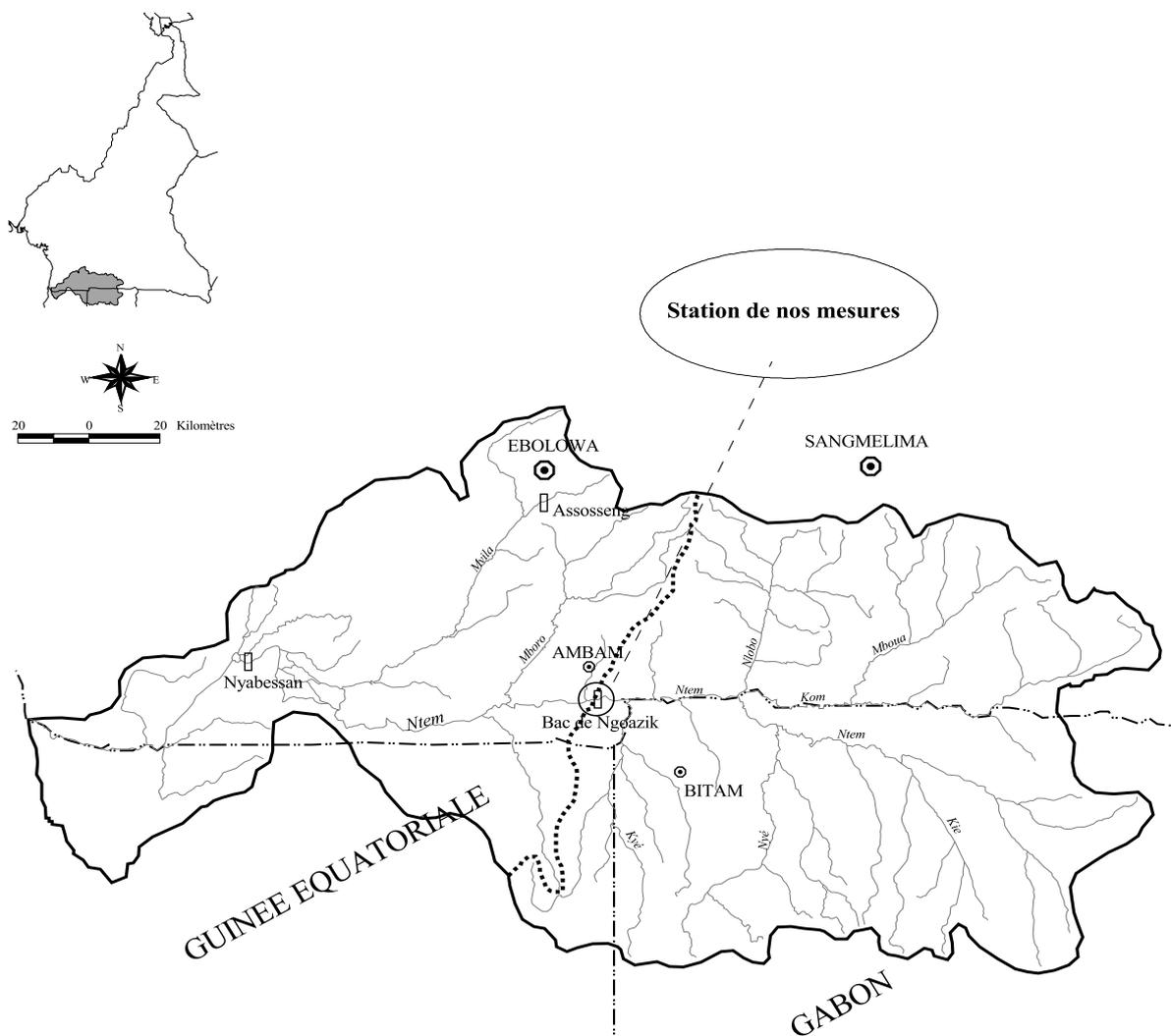


Figure 8.2 : Bassin versant du Ntem à l'océan ; station de mesures de Ngoazik.

Les prélèvements ont été effectués à Nyabessan entre le 01/08/1980 et le 28/02/1983 ; à Ngoazik, entre le 02/05/1981 et le 28/02/1983. Le tableau 8.1 rassemble les résultats de ces deux années.

Tableau 8.1 : Résultat des études antérieures à la station de Ngoazik ; valeurs moyennes mensuelles. Les pluies proviennent du fichier des pluies moyennes calculées par la méthode de Thiessen.

	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr
1981/1982												
P (mm)	126,3	167,9	212	91,5	63	57,8	151,6	298,1	116,5	34,2	138,3	56,6
Q (m ³ .s ⁻¹)		169	386	314	110	52,1	190	476	532	213	135	95,4
C (g.m ⁻³)	-	-	26,5	26,1	25,4	22,5	27,1	27,9	27,2	31,6	23,8	21,7
Flux (10 ³ t)	-	-	27,3	21,3	7,5	3,2	13,2	35,6	37,6	17,9	8,6	5,1
1982/1983												
P (mm)	155	149,2	285,3	160,1	42	64,6	174,1	361,6	81	20,6	0,0	57,9
Q (m ³ .s ⁻¹)	107	160	364	210	116	71,1	234	476	769	232	74,6	33,3
C (g.m ⁻³)	22,3	21	25,5	22,9	20,5	15	20	26,9	27,1	24,8	21,9	15,6
Flux (10 ³ t)	6,2	8,8	24,9	12,4	6,4	2,9	12,2	34,3	54,2	15,5	4,3	1,2

Les fréquences pour les deux stations étaient d'un prélèvement tous les deux jours en basses eaux (décembre à février et juillet à août) et un prélèvement tous les jours en hautes eaux (mars à juin et septembre à novembre).

D'autres mesures ont été réalisées plus récemment par Sigha Nkamdjou (1994). Mais elles se sont limitées à trois prélèvements réalisés à chacune de ces deux stations en 1990 (avril, octobre et décembre), et en 1992, un seul prélèvement a été effectué en janvier à la station de Ngoazik.

1.2. Centre-Sud : Nyong (figure 8.3)

Sigha Nkamdjou a effectué à Mbalmayo (13 555 km²) deux prélèvements rattachés à des hauteurs d'eau en 1990 (mai et novembre), pour la détermination de matières en suspension. A partir de 1994, dans le cadre du programme DYLAT, des mesures de matières en

suspension ont été effectuées aux stations de Mbalmayo et Olama (18 510 km²). Les prélèvements se faisaient au seau au milieu du fleuve, à partir d'un pont. La fréquence était mensuelle en basses eaux et bimensuelle en hautes eaux jusqu'en 1997. A partir de 1998, ces stations sont réfectionnées et les concentrations de matières en suspension à l'échelle mensuelle ont été rattachées aux hauteurs d'eau.

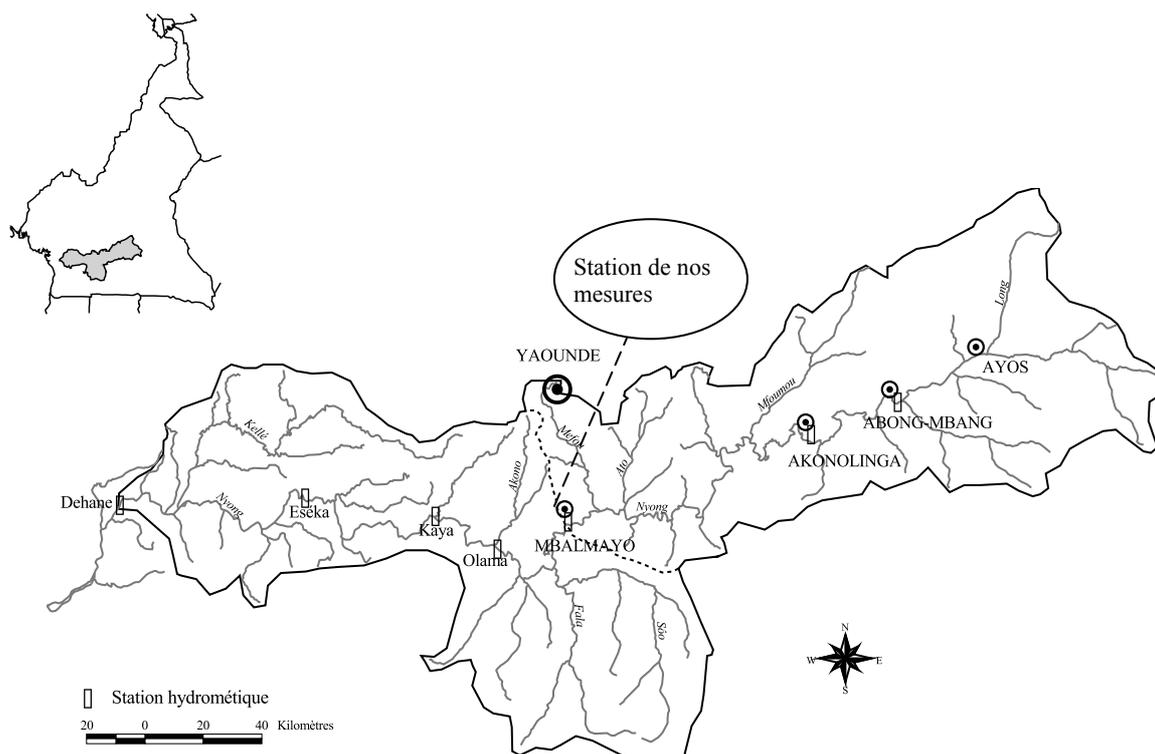


Figure 8.3 : Bassin versant du Nyong à Dehane ; station de mesures de Mbalmayo.

Par ailleurs, le bassin versant du So'o, affluent sud du Nyong, est un observatoire sur la dynamique des matières (suspension et dissoutes) en milieu forestier. Plusieurs stations hydrométriques y sont équipées, à différentes échelles, depuis le petit bassin versant expérimental de Mengong à Nsimi (0,58 km²), jusqu'au bassin versant du So'o au pont de la route Yaoundé-Ebolowa (3 070 km²). D'autres mesures concernant les nappes souterraines, les pluies, la température, l'évaporation et les aérosols y sont effectuées. Plusieurs résultats de ces travaux ont été publiés (Ndam Ngoupayou (1997), Boeglin *et al.* (2003), Viers *et al.* (2000), Braun *et al.* (2005)), essentiellement consacrés à la chimie. Les traitements des données sur les MES sont encore en cours. Ce bassin est suivi de nos jours et de nouveaux

équipements de mesures à différentes échelles de temps et d'espace y sont installés dans le cadre d'un programme ORE (Observatoire de Recherche en Environnement). Un site web est en cours d'élaboration, qui rassemblera toutes les données de cet observatoire.

1.3. Sud côtier : Kienke (figure 8.4)

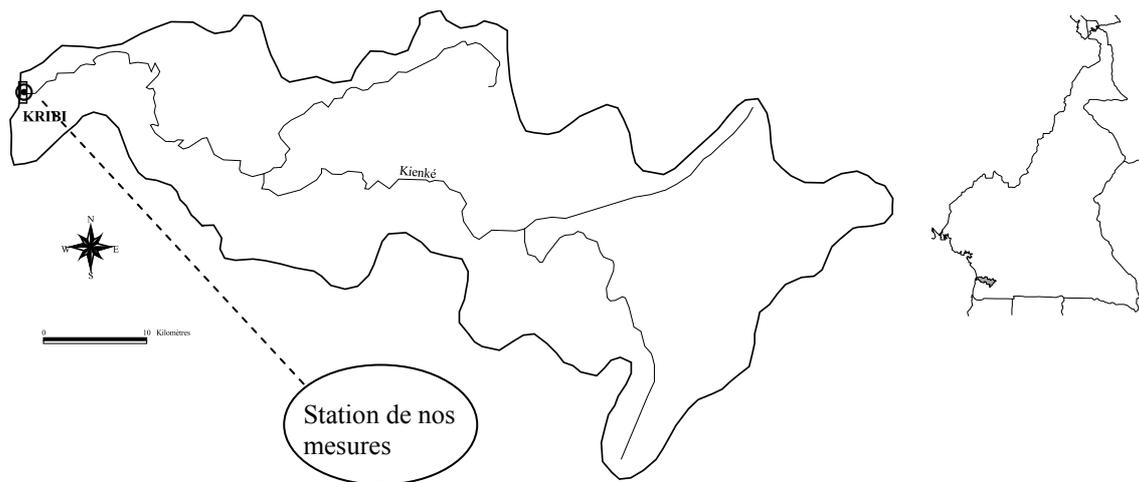


Figure 8.4 : Bassin versant de la Kienke à Kribi.

Il n'est fait mention d'aucune mesure de MES dans cette région avant notre étude. Dans cette région climatique, d'après nos sources, seule la station de Nyabessan sur le Ntem, assez proche de la côte sud du Cameroun, a été suivie. Mais les résultats de mesures qui y sont effectuées intègrent le bassin versant du Ntem depuis sa partie amont qui est plutôt continentale. Ils ne sont par conséquent pas véritablement représentatifs du climat de cette zone. Par contre, toujours au cours du projet d'aménagement des chutes de Menve'ele, les mesures sur le bassin versant de Ndjo'o, affluent du Ntem, à la station d'Abem (373 km²), peuvent être assez représentatives du climat équatorial côtier. Nous signalons aussi ici l'existence de quelques données collectées dans le cadre du programme TROPENBOS, sur des bassins versants de plus petite taille de la zone, mais sans suivi régulier.

1.4. Sud-Ouest : Mungo (figure 8.5)

Il n'est fait mention d'aucune mesure de matières en suspension à l'échelle d'un bassin versant dans cette région du sud-ouest Cameroun avant notre étude.

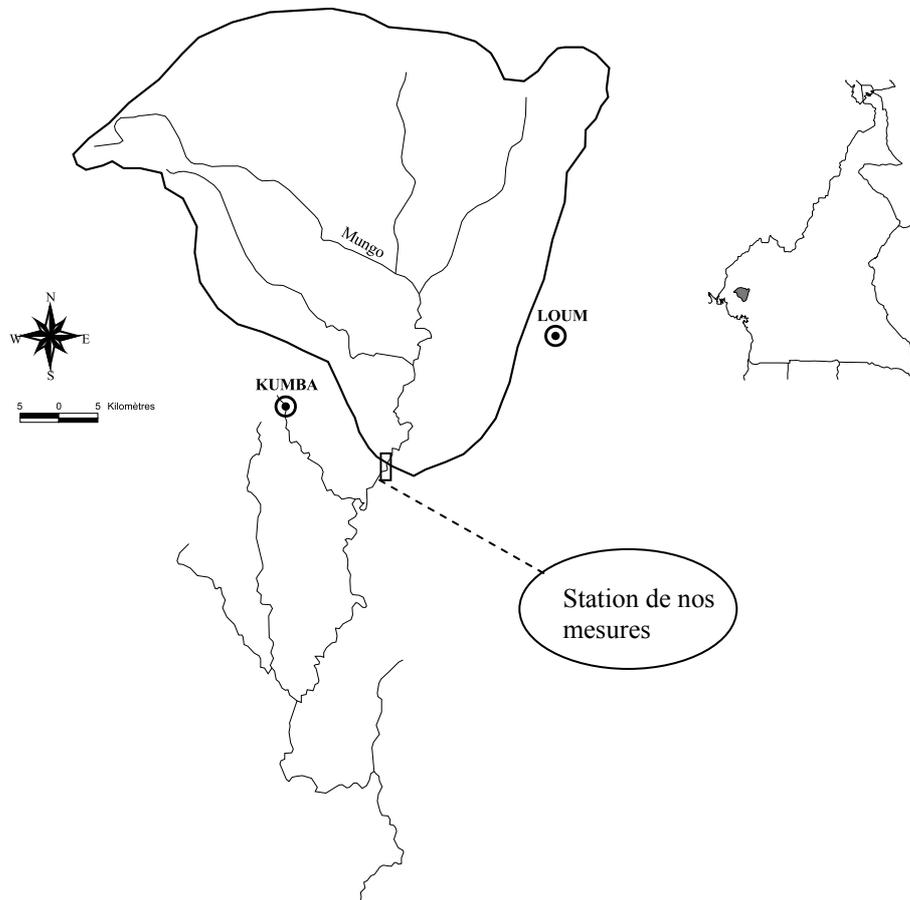


Figure 8.5 : Bassin versant du Mungo à Mundame.

1.5. Centre-Est : Lom (figure 8.6)

Trois jaugeages complets pour la détermination de MES ont été effectués à cette station lors des campagnes de septembre 1997, janvier et août 1998, dans le cadre du projet de construction de la retenue (encore en projet) de Lom-Pangar. Le tableau 8.2 présente les résultats obtenus. Au cours de ces deux années, les données de pluie ne sont pas disponibles

aux stations intéressant le bassin (Méiganga, Bétaré Oya et Garoua Boulaï). Pour cette raison, les pluies mensuelles de la station de Ngaoundéré qui est proche sont utilisées à titre indicatif,

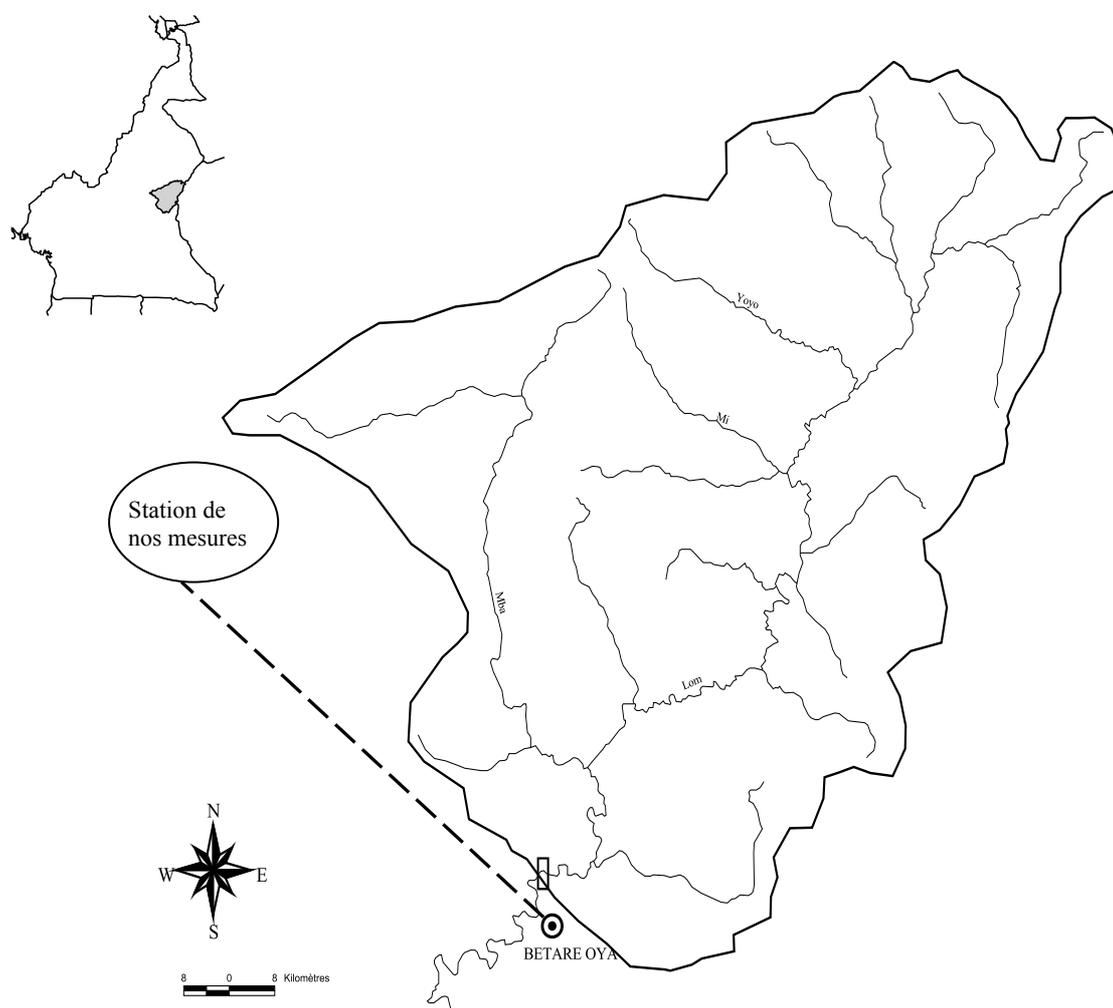


Figure 8.6 : Bassin versant du Lom à Bétaré Oya.

Tableau 8.2 : Résultat des trois mesures effectuées antérieurement à la station de Bétaré Oya. Les pluies sont celles de la station de Ngaoundéré.

	14-sept-1997	09-janv-1998	09-août-1998
*P (mm)	209	0	346,6
*Q (m ³ .s ⁻¹)	369	52	259
C (g.m ⁻³)	115	13,7	143
Flux (10 ³ t)	110	1,9	99,2

* pluie (p) et débit (Q) du mois

1.6. Nord : Mayo Tsanaga (figure 8.7)

Quatre stations contrôlant des bassins versants emboîtés dans le bassin versant principal de 1 535 km² à Bogo ont fait l'objet d'études visant à quantifier les MES : ce sont de l'amont vers l'aval, la station de Mokolo, de Minglia, de Maroua et de Bogo. Mais seule la station de Bogo a été suivie plusieurs années. Les caractéristiques de ces données sont résumées de la station la plus en amont vers celle la plus en aval.

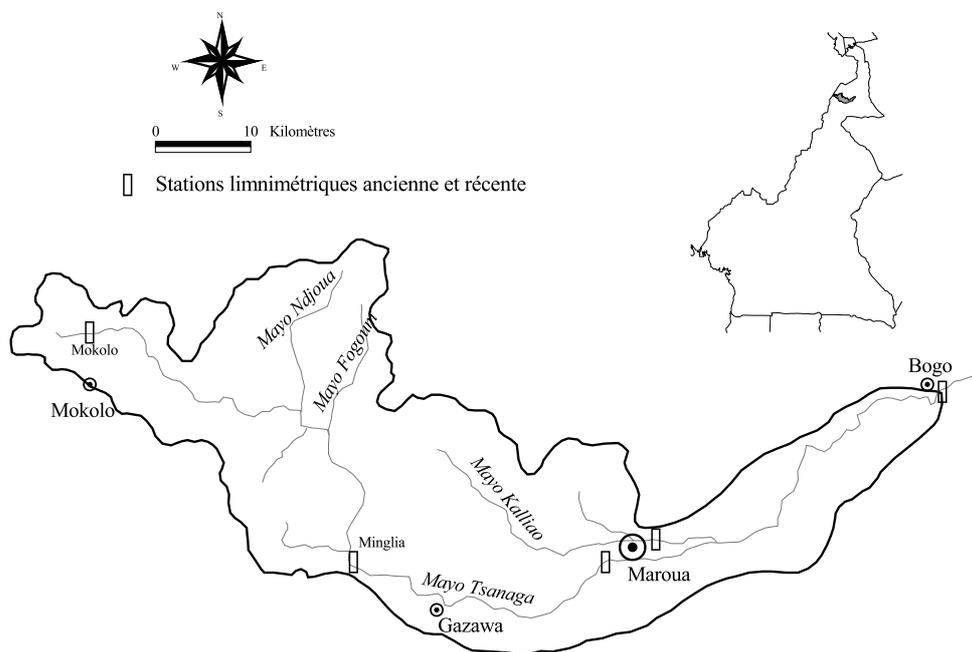


Figure 8.7 : Bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo

- Station de Mokolo (49 km²)

En 1975, l'étude de matières en suspension à la station de Mokolo entrainait dans le cadre de la conception d'un projet pour l'aménagement de la retenue d'adduction d'eau potable de Mokolo. Les mesures journalières ont duré toute la saison des pluies.

- Station de Minglia (575 km²)

En 1977, l'étude de MES à la station de Minglia entrainait dans le cadre de la conception du projet d'aménagement de la plaine de Gazawa, avant le passage du seuil montagneux. Les mesures journalières ont duré toute la saison des pluies.

- Stations de Maroua (845 km²)

En 1968 et 1969, parallèlement à l'étude de MES à la station de Bogo, quelques mesures sont effectuées à Maroua. Celles-ci ont été présentées dans la monographie du Mayo Tsanaga (Nouvelot, 1972d).

- Station de Bogo (1 535 km²)

Les MES ont été étudiées en 1968, 1969, 1973, 1985 et 1986. Le tableau 8.3 présente les résultats au pas de temps mensuel. Les campagnes consistaient en des mesures complètes comprenant des échantillons de 10 litres prélevés sur différentes verticales et à différentes profondeurs :

- en 1968, entre le 05 juillet et le 18 octobre, 53 mesures complètes représentant 460 prélèvements,
- en 1969, entre le 18 juin et le 06 octobre, 84 mesures complètes représentant 720 prélèvements,
- en 1973, entre le 11 juillet et le 02 octobre, 114 mesures représentant 883 prélèvements (avec au moins 3 prélèvements par crue, un à la montée, un au maximum et un à la décrue).
- en 1985 et 1986, les mesures étaient effectuées journalièrement. Le nombre d'échantillons n'est pas précisé.

Tableau 8.3 : Résultat des études antérieures à la station de Bogo ; valeurs moyennes mensuelles. Les pluies sont obtenues par la méthode de Thiessen.

	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Octo	Nov	Déce	An
Année 1968													
P (mm)	0	0	0	16,1	44	164,1	222,3	263,9	155,6	18,4	0	0	884,5
Q (m ³ .s ⁻¹)	0	0	0	0	0	3,4	23,4	46,2	28,9	1,3	0	0	8,6
C (g.m ⁻³)	0	0	0	0	0	2424	1302	1274	432	53	0	0	1038
Flux (10 ³ t)	0	0	0	0	0	21,4	81,6	157,6	32,4	0,2	0	0	293,2
Année 1969													
P (mm)	0	0	0	25,2	49	139,7	247,7	306,6	142,6	74,8	4,4	0	990
Q (m ³ .s ⁻¹)	0	0	0	0	0	3,3	15	54	30,7	2,8	0	0	8,8
C (g.m ⁻³)	0	0	0	0	0	2960	1740	1240	680	80	0	0	1138
Flux (10 ³ t)	0	0	0	0	0	25,8	69,8	178,2	54,5	0,6	0	0	328,9
Année 1973													
P (mm)	0	0	1,4	7,3	83,1	99	167,3	256,1	126,6	12,9	0	0	753,7
Q (m ³ .s ⁻¹)	0	0	0	0	0	0	7,9	39,7	14,9	0,9	0	0	5,3
C (g.m ⁻³)	0	0	0	0	0	0	4460	1448	588	83	0	0	1590
Flux (10 ³ t)	0	0	0	0	0	0	94,4	154	22,7	0,2	0	0	273,3
Année 1985													
P (mm)	0	0	9,8	18,6	105	153	200,7	171,4	87,6	3,5	0	0	746,6
Q (m ³ .s ⁻¹)	0	0	0	0	0	5,6	18,6	21,5	20,3	0,9	0	0	5,2
C (g.m ⁻³)	0	0	0	0	0	3018	2270	1580	1370	42	0	0	1876
Flux (10 ³ t)	0	0	0	0	0	43,8	113,2	91,2	72,2	0,1	0	0	320,5
Année 1986													
P (mm)	0	0	7,7	16,4	43,2	119	223,9	216,3	220,9	7,9	0	0	809,9
Q (m ³ .s ⁻¹)	0	0	0	0	0	0	13,2	19,3	25,7	0,6	0	0	5,0
C (g.m ⁻³)	0	0	0	0	0	0	2460	1930	1000	63	0	0	1595
Flux (10 ³ t)	0	0	0	0	0	0	84,2	99,6	66,5	0,1	0	0	250,4

Le tableau 8.4 résume les caractéristiques des données antérieures, périodes, protocoles et fréquences de mesure. Il n'a été volontairement retenu que les stations qui intéresseront la suite du travail. Les années au cours desquelles les mesures ont été effectuées sont différentes

d'un bassin à l'autre. De ce fait, l'hydraulicité d'une année peut avoir une influence non négligeable sur la quantité de matières transportées annuellement. De plus, il ressort du tableau 8.4 que les protocoles d'échantillonnage et les fréquences des mesures diffèrent d'un bassin à l'autre, et, pour le même bassin, en fonction des projets de développement menés successivement. Enfin, certains travaux n'ont pas été exécutés sur la base des mesures suivies, l'évaluation des matières transportées reposant sur des mesures ponctuelles de concentration.

Tableau 8.4 : Quelques caractéristiques des données antérieures sur les bassins versants étudiés.

	Superficie (km ²)	Période de mesure de MES	Protocole de mesure	Fréquence de mesure	Auteurs
Mayo Tsanaga	1 535	1968, 1969, 1973, 1985, 1986	Jaugeages partiels et complets	Journalier	Nouvelot (1972) ; Olivry (1974) ; Naah (1990)
Lom	11 100	1997, 1998	jaugeages complets	3 mesures en 2 années	Sigha Nkamdjou <i>et al.</i> (1998)
Nyong	13 555	depuis 1994	prélèvements en surface	Hebdomadaire, bimensuelle et mensuelle	Ndam Ngoupayou (1997)
Ntem	18 100	de 1981 à 1983	Prélèvements et jaugeages complets	Bihebdomadaire	Boum <i>et al.</i> (1983) ; Sigha Nkamdjou (1994)
Mungo	2 420	Aucune étude			
Kienke	14 35	Aucune étude			

L'étude que nous avons entreprise de 2002 à 2004 comble certaines lacunes évoquées ci-dessus. Elle se distingue des précédentes par deux principaux aspects :

- **sa couverture spatiale** ; au cours des mêmes années et de façon simultanée, on mesure les MES exportées à l'exutoire des bassins versants représentatifs des principaux écosystèmes du pays ;
- **la fréquence des mesures** ; le rythme d'échantillonnage est adapté à chaque cas d'espèce au régime hydrologique, et donc intensifié en période de hautes eaux. Des jaugeages complets sont effectués en basses, moyennes et hautes eaux, pour valoriser les prélèvements de surface. Ce protocole permet une approche plus rigoureuse des concentrations de matières en suspension par rapport à certaines études antérieures.

2. PROTOCOLE, MATERIEL DE PRELEVEMENT ET DE TRAITEMENT

Le protocole de mesures des MES à l'exutoire des bassins versants moyens et grands repose sur le contrôle des variations de la concentration dans l'espace (section de la rivière) et dans le temps (fréquence de mesures). Sur la base de la méthodologie mise au point par les chercheurs de l'ORSTOM et largement appliquée dans plusieurs programmes dont PIRAT¹, EQUANIS² et HYBAM³, nous avons élaboré un protocole d'échantillonnage des eaux, pour la détermination des matières en suspension transportées par les rivières étudiées.

2.1. Protocole, matériel de prélèvement sur le terrain

La pratique de la mesure de matières en suspensions sur les moyens à grands fleuves s'apparente à celle couramment utilisée en hydrologie pour la mesure des débits. Elle utilise une technique lourde qui consiste à prélever dans la section mouillée des échantillons d'eau, à des points où la vitesse a été préalablement mesurée.

Le dispositif est ici constitué par le matériel d'un jaugeage classique par exploration des champs de vitesses d'écoulement, sur une embarcation. L'appareil de prélèvement est une bouteille océanographique de capacité 1,5 litre. C'est un cylindre fermé à ses extrémités par deux clapets, reliés entre eux par un fort tendeur, dont on commande la fermeture depuis la surface. La bouteille est descendue, lestée par un saumon, les deux extrémités ouvertes et les clapets retenus par des crochets. Lorsque la profondeur voulue est atteinte, il suffit de déclencher la fermeture des clapets en libérant les crochets. Les échantillons conservés dans des flacons en polyéthylène d'un litre sont transportés dans des malles métalliques ou en bois jusqu'au laboratoire de traitement.

La vitesse de courant variant lentement dans les rivières étudiées, excepté le Mayo Tsanaga, nous effectuons d'abord un jaugeage classique complet avant d'effectuer les prélèvements,

1 Programme Inter-disciplinaire de Recherche péri-Atlantique

2 Environnement et Qualité des apports du Niger au Sahel

3 HYBAM : Hydrologia da Bacia Amazônica

soit un peu plus de 70 points de mesure (de vitesse ou de prélèvement) par séance de jaugeage (photo 8.1).



Photo 8.1 : Séance de jaugeage complet sur le Ntem à Ngoazik (cliché Paturel ; janvier 2003).

Il est possible que cet appareillage modifie la vitesse de l'écoulement au point de prélèvement. Mais on admet que l'influence de la vitesse d'écoulement sur la turbidité est probablement négligeable pour des particules fines de la taille des argiles et des limons, notamment lorsque les concentrations sont faibles. Or dans la quasi-totalité des rivières que nous étudions, les sables et les limons constituent une part importante des matériaux solides en suspension et, les concentrations sont faibles, à l'exception du bassin soudano-sahélien du Mayo Tsanaga.

Le suivi continu des variations de la concentration dans le temps, en accord avec celles des débits, nécessite une pratique quotidienne des « jaugeages complets de débits solides ». Or cette méthode associe de longues et harassantes opérations de terrain et de laboratoire, et la mobilisation de moyens humains et matériels très important, qui ne rentreraient pas dans notre budget. Un minimum de 2 ou 3 campagnes de terrain ont été nécessaires pour réaliser des

« jaugeages complets de débits solides » sur chacun des bassins en périodes d'étiage, de maximum de crue, et en milieu de décrue.

Plutôt que d'interpoler entre deux valeurs de concentration assez espacées, obtenues par ces jaugeages complets, nous avons prévu des échantillonnages réguliers de surface. Les échantillons sont conservés de la même façon dans des flacons en polyéthylène d'un litre (Photo 8.2). Les prélèvements sont effectués suffisamment près du milieu de la section, les concentrations ponctuelles obtenues devant être valorisées par les résultats des jaugeages complets par corrélation. Cette méthode mise au point en 1968 par Nouvelot (Nouvelot, 1972c) a été largement utilisée dans les fleuves tropicaux (Olivry *et al.*, 1974 ; Boum *et al.*, 1983; Olivry *et al.*, 1988 ; Olivry *et al.*, 1989 ; Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Liéno *et al.*, 2005c).



Photo 8.2 : Prélèvement de surface sur le Ntem à Ngoazik (cliché Mahé ; août 2002).

2.2. Protocole, matériel de traitement au laboratoire

Le traitement des échantillons est effectué au laboratoire du Centre des Recherches Hydrologiques (CRH) de Yaoundé. Il a consisté essentiellement à la détermination de la

concentration de matières en suspension dans chaque échantillon d'eau par une simple filtration, suivie d'une différence de pesée.

Les filtres utilisés sont en acétate de cellulose de type Whatman, de 47 mm de diamètre (soit 17,35 cm²) et 0,45 µm de porosité. Ils sont placés dans des rampes de filtration montées en série sur une pompe à vide qui permet de créer la pression (photo 8.3).



Photo 8.3 : Pompe à vide montée sur 4 unités de filtration en série (Cliché Liéno, octobre 2004).

Une fraction de l'échantillon, 250 ml pour les eaux du Mayo Tsanaga et 500 ml pour les cinq autres rivières, est filtrée. La différence de poids entre le filtre chargé de MES et le filtre non chargé, préalablement séchés, donne la quantité de matières en suspension en mg. La concentration de l'échantillon, en mg.l⁻¹, est obtenue en ramenant cette quantité de matières à un litre.

3. VARIABILITE DES CONCENTRATIONS DANS LA SECTION JAUGEAGE ET CHOIX DES POINTS DE MESURES

Une bonne approche de la concentration moyenne exige un nombre suffisant d'échantillons d'eau prélevés à des points convenablement répartis dans la section de la rivière, qui puisse être représentatif des variations de la concentration. La question que l'on se pose le plus souvent au début d'une étude sur les MES dans les grandes rivières c'est : **Quels doivent être**

le nombre et la répartition des points de prélèvements pour que l'on puisse au mieux approcher la concentration moyenne dans une section de mesures ? Toutefois, les meilleures approches qu'on puisse imaginer de cette question se heurtent le plus souvent à la disponibilité des moyens matériels et humains. Plusieurs études utilisent alors des méthodes simplificatrices pour estimer les concentrations moyennes des matières en suspension.

3.1. Variabilité des concentrations dans la section jaugeage

Au regard de plusieurs travaux réalisés dans la sous-région Afrique de l'ouest et du centre, la considération du nombre et de la répartition des points de mesure dans les sections de jaugeage n'est pas uniforme, et varie d'une étude à une autre, souvent pour la même station de jaugeage.

Ainsi, pour des mesures sur des rivières du Togo et du Bénin (ex Dahomey), les prélèvements sont effectués en 12 points répartis sur 5 verticales (Colombani, 1967). Pour le Chari à Fort-Lamy, le nombre de prélèvements est plus important, 32 points répartis sur 8 verticales (Billon, 1968). Nouvelot a choisi de prélever en 24 points répartis sur 6 verticales sur la Sanaga et le Mbam (Nouvelot, 1972c). Sur le fleuve Congo à Brazzaville (3 km de largeur) et son principal affluent l'Oubangui à Bangui (800 m de largeur), des mesures effectuées en cinq points sur une verticale unique, ont été jugées suffisamment représentatives pour permettre une évaluation fiable des quantités de matières exportées (Olivry *et al.*, 1989). Dans le bassin supérieur du fleuve Sanaga, pour trois stations d'importance inégale, 9 points répartis sur 3 verticales ont suffi pour quantifier les matières en suspension et dissoutes (Sigha Nkamdjou *et al.*, 1998).

Sauf pour le fleuve Congo où le choix de la verticale unique était basé sur les résultats d'une étude antérieure de Molinier (1979), les critères de sélection ne sont le plus souvent pas explicites. Il semble avant tout que ce choix dépend dans plusieurs cas des moyens matériels et humains disponibles. En général on peut admettre qu'il ne soit pas convenable d'effectuer un prélèvement à chaque point de mesures de vitesse. Mais il n'en est pas moins qu'un protocole de mesures non adapté aux conditions d'écoulement peut occasionner des erreurs parfois significatives sur le résultat.

Dans le cadre de cette étude, pour chaque jaugeage, 15 échantillons de 1 litre chacun sont prélevés en 15 points répartis sur cinq verticales dans la section de la rivière :

- une verticale en rive droite, à 20 m environ ;
- une verticale au 1/3 de la section en rive droite ;
- une verticale au milieu de la section ;
- une verticale au 1/3 de la section en rive gauche ;
- une verticale en rive gauche, à 20 m environ ;

Sur chaque verticale, on effectue un échantillonnage près du fond, un au milieu de la profondeur, et un à 50 cm en dessous de la surface de l'eau. Un échantillon est ensuite prélevé en surface, à l'endroit où les prises régulières de surface sont effectuées. On obtient au total 16 échantillons ($5 * 3 + 1$) pour chaque jaugeage. Nous présentons sur la figure 8.8 quelques caractéristiques de certains jaugeages : profil de la section, points de mesures de vitesses, points d'échantillonnage des eaux et concentrations ponctuelles.

Certains travaux ont indiqué dans certains cours d'eau tropicaux une légère tendance à l'augmentation des concentrations des MES vers les profondeurs. Ceci a été constaté sur le Chari à Fort-Lamy (Ndjaména) (Billon, 1968) et sur la Sanaga à Nachtigal (Nouvelot, 1969). Ces auteurs remarquent toutefois que cette tendance à une organisation verticale des concentrations n'est pas toujours vraie pour toutes les verticales d'une même section de jaugeage. Des variations latérales très significatives des concentrations des MES peuvent parfois être possibles, dues à la confluence des cours d'eau de turbidités très différentes ou à des activités sur les berges. C'est le cas du Lom et du Djerem, deux affluents de la Sanaga (Sigha Nkamdjou *et al.*, 1998, Liéno *et al.*, 2005a). Le Lom amène tous les matériaux arrachés à son bassin amont, alors qu'une partie des sédiments transportés par le Djerem est soustraites par la retenue de Mbakaou.

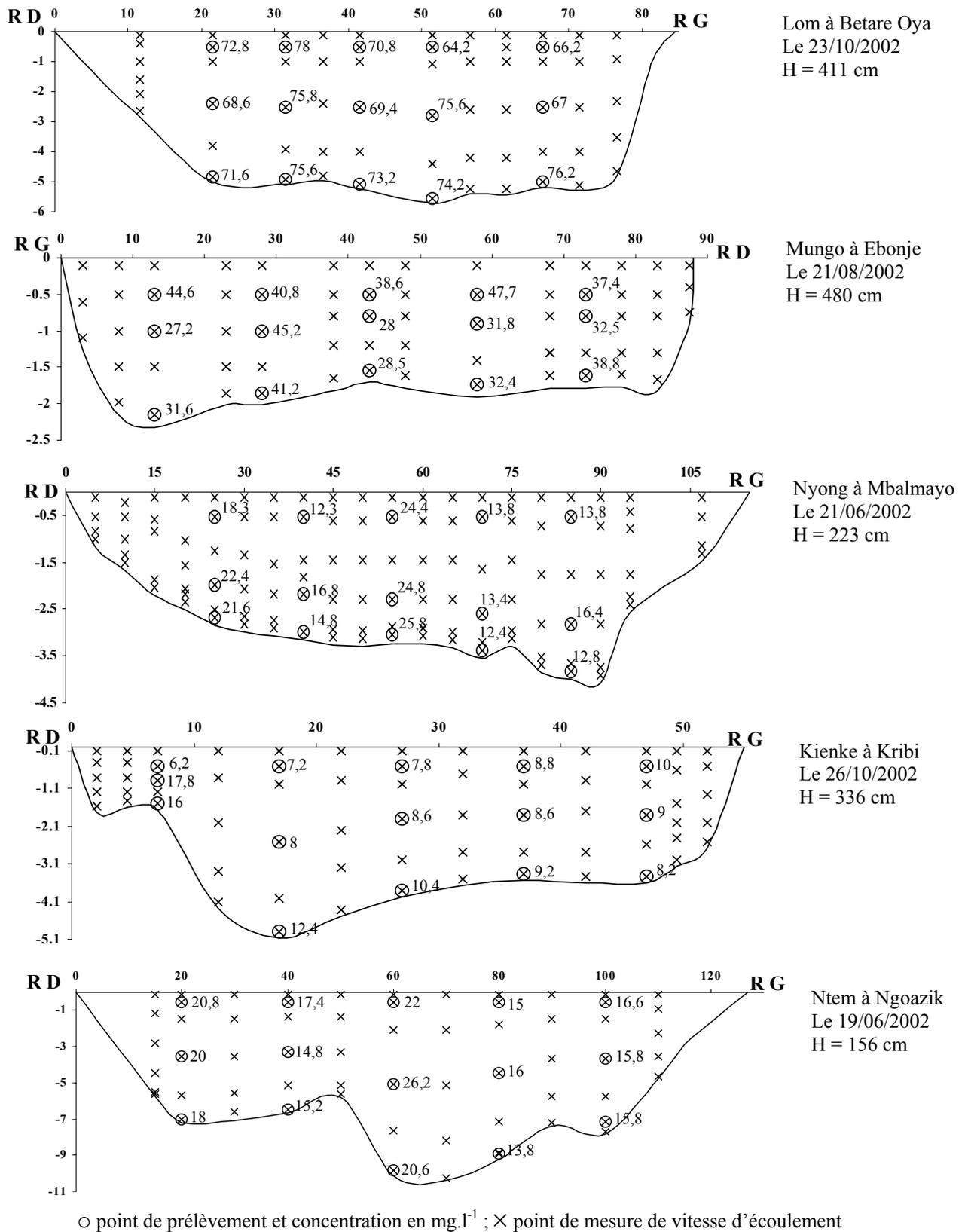


Figure 8.8 : Concentrations ponctuelles à différents points de prélèvement dans les sections de quelques rivières étudiées ; en ordonnées les profondeurs (en m) et en abscisses les distances sur la section de jaugeage (en m).

Pour l'ensemble des jaugeages effectués sur les bassins étudiés (figure 8.8), la répartition des concentrations en différents points ne montre aucune organisation spatiale remarquable des MES, tant sur la largeur de la section que sur sa profondeur. Même les échantillons prélevés à 25 cm près du fond ne montrent aucune concentration particulière en MES.

Le coefficient de variation (rapport de l'écart type par la moyenne des concentrations ponctuelles d'un jaugeage, exprimé en %), traduit l'ampleur de la dispersion des valeurs d'une série autour de la moyenne. Elle est utilisée ici pour étudier l'écart entre les concentrations ponctuelles d'un même jaugeage (Tableau 8.5).

Tableau 8.5 : Coefficients de variations des concentrations ponctuelles dans la section, pour les 17 jaugeages effectués.

	Date	Cm (mg.l ⁻¹)	CV (%)
Mayo Tsanaga à Bogó	09/09/2002	62,4	79,3
	15/08/2003	434,4	10,4
	26/08/2004	882,1	16,6
Lom à Betare Oya	05/09/2002	70,9	6,1
	23/10/2002	71,9	5,7
	29/03/2003	32,9	14,2
Mungo à Mundame	21/08/2002	36,4	18,2
	28/10/2002	27,6	33
	02/04/2003	44,5	9
Nyong à Mbalmayo	21/06/2002	17,6	28
	25/03/2003	15	20,3
Kienke à Kribi	23/08/200	9,1	26
	26/10/2002	10	32,4
	01/04/2003	11,4	19,7
Ntem à Ngoazik	19/06/2002	17,8	19
	28/1/2003	14,4	11,4
	27/03/2003	15,6	13,6

Cm : moyenne arithmétique des ci ; CV : coefficient de variation

Si on considère l'ensemble des 17 jaugeages solides réalisés aux 6 stations de mesures entre 2002 et 2003, deux stations (Nyong à Balmayo et Kienke à Kribi) se distinguent par des coefficients de variation assez élevés (supérieurs à 20 %), du fait de leurs conditions d'écoulement particulières. A Mbalmayo, les MES sont plus importantes vers le canal sinueux dans lequel le Nyong s'écoule au milieu de la prairie qui encombre son lit. A Kribi, on a noté un îlot de végétation en amont de la station, qui influence la répartition des MES dans la

section.

Pour les quatre autres stations, la répartition des MES est beaucoup plus uniforme. Les coefficients de variation sont inférieurs à 20 %. Les valeurs assez élevées obtenues pour les jaugeages effectués en étiage, peuvent être dues à la remobilisation des bancs de sable, lors que la tranche d'eau qui s'écoule est faible.

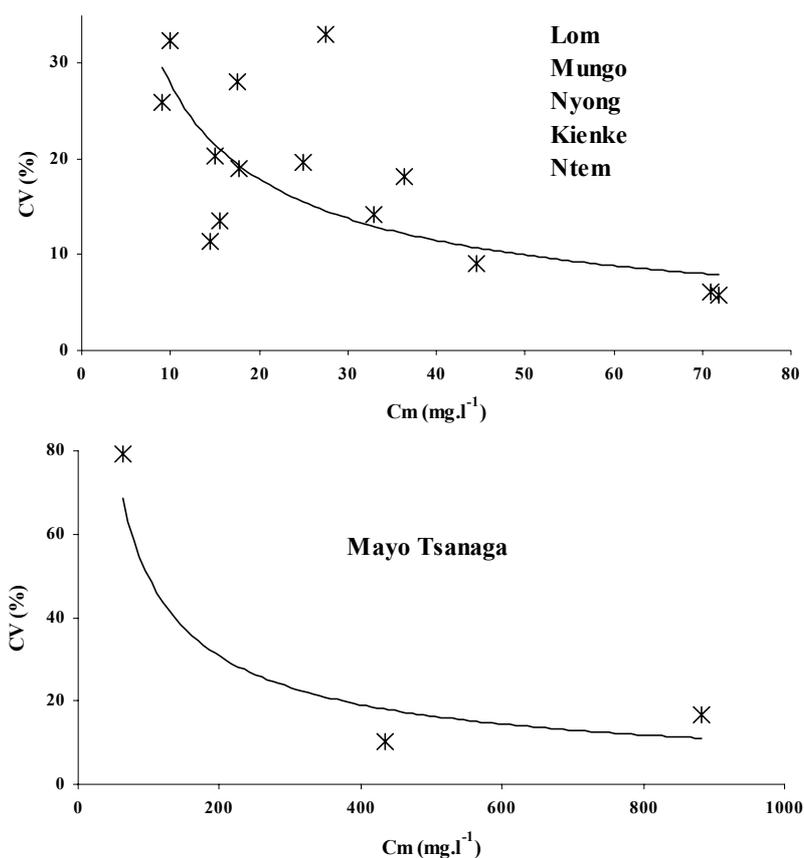


Figure 8.9 : Evolution des coefficients de variation par rapport aux concentrations moyennes obtenues lors de 17 jaugeages effectués aux 6 stations de mesures.

On observe tendance générale à la décroissance des coefficients de variations avec des concentrations élevées (figure 8.9). Cette grande dispersion des concentrations ponctuelles peut être due aux erreurs de manipulations (filtrations et pesées), du fait que le volume filtré est assez réduit pour des très faibles concentrations, surtout en milieu tropical humide et équatorial. Ceci rejoint les remarques de Picouet (1999) sur les données du fleuve Niger.

3.2. Choix des points de prélèvement dans la section

A partir de ces valeurs ponctuelles de concentration, diverses méthodes de traitement permettent d'obtenir les débits solides et les concentrations moyennes dans la section. Pour le dépouillement des jaugeages complets on a utilisé la méthode par double intégration des concentrations sur les profondeurs puis sur la largeur décrite au chapitre 2.

Suivant la répartition des concentrations ponctuelles dans la section de la rivière, la concentration moyenne des matières en suspension peut dépendre du nombre et de la position des verticales de mesures.

Pour étudier cette influence, nous avons pour quelques jaugeages de moyennes et hautes eaux, calculé les débits solides, puis les concentrations des matériaux en suspension en faisant varier le nombre et la position des verticales selon ces trois méthodes :

- dépouillement sur une verticale : seule la verticale du milieu est considérée ;
- dépouillement sur deux verticales : rive droite 1/3 et rive gauche 1/3 ;
- dépouillement sur trois verticales : rive droite, milieu et rive gauche.

Chaque procédé de dépouillement suit la méthodologie décrite au chapitre 2, qui consiste à une double intégration des concentrations sur la profondeur et sur la largeur de la section. Chaque procédé suppose que les données des points non considérés n'existent pas. Pour comparer les résultats obtenus à une référence, on suppose que le dépouillement intégrant les cinq verticales (colonne 4 dans le tableau) donne le résultat de référence. Le tableau 8.6 présente ces différentes comparaisons.

Tableau 8.6 : Débits et concentrations moyennes des matières en suspension en fonction du nombre de verticales choisies pour le jaugeage.

Station	Date	Q ($m^3.s^{-1}$)	(1)		(2)		(3)		(4)	
			Q_s ($kg.s^{-1}$)	C_m ($mg.l^{-1}$)						
Ntem à Ngoazik	19/06/2002	476	13,5	28,4	5,6	11,7	8,2	17,2	7,5	15,8
Nyong à Mbalmayo	21/06/2002	160	3,6	22,5	2,0	12,5	3,5	22,0	3,0	18,8
Kienke à Kribi	26/10/2002	91	0,5	5,5	1,0	11,0	0,6	6,6	0,8	8,8
Mungo à Mundame	21/08/2002	354	10,0	28,3	13,6	38,4	11,2	31,6	12,7	35,9
Lom à Bétaré Oya	23/10/2002	387	17,4	45,0	28,0	72,4	25,0	64,6	26,5	68,5

- (1) résultat du dépouillement sur la verticale du milieu ;
 (2) résultat du dépouillement sur deux verticales (rive droite 1/3 et rive gauche 1/3) ;
 (3) résultat du dépouillement sur trois verticales (rive droite, milieu et rive gauche) ;
 (4) résultat du dépouillement sur les cinq verticales, résultat témoin ;
 Q débit liquide; Q_s débit solide; C_m concentration moyenne.

La concentration moyenne obtenue varie considérablement suivant le nombre et la position des verticales prises en compte pour le jaugeage. Il semble que les valeurs sont plus élevées au milieu de la section (28,4 $mg.l^{-1}$ pour le Ntem et 22,5 $mg.l^{-1}$ pour le Nyong) et plus faibles aux bords, pour les cours d'eau en zone forestière (Ntem et Nyong). Cette répartition peut être liée à la végétation qui ralentit les écoulements et filtre les MES vers le rivage. Par contre, pour la Kienke, la plus faible concentration (5,5 $mg.l^{-1}$) est obtenue au milieu de la section et est probablement due à un îlot d'herbe en amont de la station de jaugeage, qui crée des champs de vitesse et de concentrations plus élevées vers les bords (1/3 de la rive droite et 1/3 de la rive gauche). Les écarts par rapport aux concentrations moyennes de référence sont de l'ordre de +20 % à +80 % pour le Ntem et le Nyong, et - 38 % pour la Kienke.

L'analyse de la répartition de MES dans la section des rivières montre que celle-ci est influencée par la forme du profil en travers. En effet, les zones de grande profondeur concentrent généralement plus de matières, associées à des chenaux de vitesses élevées. Parallèlement aux champs de vitesses, la variation des concentrations dans la section semble un peu différente en étiage et en hautes eaux.

De ce fait, on ne peut avoir à priori une prédéfinition de la répartition des points de prélèvements. Un jaugeage de débit solide adéquat, tout comme un jaugeage classique du débit liquide d'un cours d'eau, en dépit de son coût élevé et de la durée des opérations, devrait explorer tous les chenaux de concentrations dans la section de jaugeage considérée.

Tableau 8.7 : Résultats de jaugeages solides.

Bassin versant	Station	Date	Cote (cm)	Q (m ³ .s ⁻¹)	Q _s (kg.s ⁻¹)	C _m (mg.l ⁻¹)
Mayo Tsanaga	Bogo	09/09/02	48	1,7	0,1	62,5
		15/08/03	85	16,7	7,2	434,4
		26/08/04	117	47	37,4	796,6
Lom	Bétaré-Oya	05/09/02	375	372	26,9	72,3
		23/10/02	411	420,3	30,2	71,9
		29/03/03	19	22	0,8	34,5
Mungo	Ebonje	21/08/02	475	354	11,9	33,5
	Mundane	28/10/02	175	127	3,2	25,8
		02/04/03	29	28,7	0,3	8,9
Nyong	Mbalmayo	21/06/02	223	160	2,8	17,6
		23/03/03	39	33,3	0,6	16,5
Kienke	Kribi	23/08/02	252	25,5	0,2	9,2
		26/10/02	336	90,7	0,7	8,7
		01/04/02	218	9,1	0,1	10,7
Ntem	Ngoazik	19/06/02	156	476	7,5	15,7
		28/01/03	85	180,5	2,3	12,9
		27/03/03	84	171,4	2,7	13,8

Q : débit liquide ; Q_s : débit solide ; C_m : concentration moyenne par double intégration

Les résultats des 17 jaugeages effectués en 2002 et 2003 figurent dans le tableau 8.7. Les concentrations moyennes dans ce tableau représentent les résultats obtenus par double intégration des concentrations ponctuelles sur les cinq verticales.

Du fait des longues et laborieuses opérations de planimétrie associées à la méthode de double intégration, nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux que l'on obtenait en ne faisant qu'une simple moyenne arithmétique des différentes concentrations mesurées. La figure 8.10 présente la relation entre les concentrations obtenues par une simple moyenne arithmétique et celles obtenues par la méthode de double intégration. La dispersion des points

autour de la droite théorique est très faible. Ce qui veut dire que, lorsque tous les champs de concentrations sont explorés dans les sections de jaugeage que nous avons étudiées, la moyenne arithmétique des n concentrations mesurées en différents points est bien représentative de la concentration moyenne.

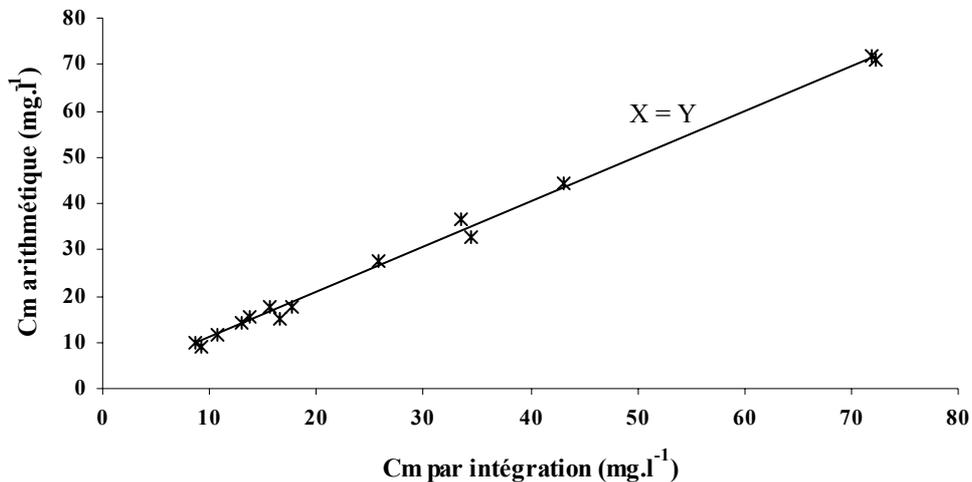


Figure 8.10 : Comparaison des concentrations moyennes obtenues par une simple moyenne arithmétique et celles obtenues par la double intégration (14 jaugeages à 5 stations différentes).

4. FREQUENCE DES PRELEVEMENTS

Il était prévu pour cette étude de mesurer les MES sur les bassins versants représentatifs pendant **deux années hydrologiques**, la deuxième année devant être une sorte de validation des résultats de la première année. Ces mesures devraient être réalisées au cours des années hydrologiques 2002/2003 et 2003/2004. Elles devaient alors commencer en mars 2002 et s'achever en février 2004. A cause du retard dû au démarrage des campagnes les premières mesures n'ont eu lieu qu'en juin 2002 sur le Ntem et le Mayo Tsanaga, puis en septembre pour les autres bassins versants. A défaut d'avoir deux années hydrologiques complètes, nous avons continué les observations jusqu'en août 2004, de sorte que les mesures de chaque mois de l'année soient validées au moins une fois au cours de la période de mesures. Les données de MES collectées couvrent globalement une période de vingt quatre mois, centrée autour de l'année hydrologique 2003/2004, de juin 2002 à août 2004..

Sur le Mayo Tsanaga à Bogu par contre, nous avons pu mesurer les matières en suspension pendant trois années successives, 2002, 2003 et 2004. C'est la série de données continues la plus longue à cette station, après celles mesurées par Nouvelot en 1968 et 1969 et par Naah en 1985 et 1986 (tableau 8.3).

Les fréquences de prélèvements que nous avons adoptées pour le suivi des variations dans le temps des concentrations des matières en suspension varient suivant les périodes de basses et de hautes eaux des rivières étudiées, que nous rappelons dans le tableau 8.8.

Tableau 8.8 : Périodes de hautes et basses eaux des rivières étudiées.

Rivière	Périodes de basses eaux	Périodes de hautes eaux
Ntem	décembre-février juillet-août	mars-juin septembre-novembre
Kienke	décembre-février juillet-août	mars-juin septembre-novembre
Nyong	décembre-février juillet-août	mars-juin septembre-novembre
Mungo	décembre-avril	mai-novembre
Lom	décembre-avril	mai-novembre
Mayo Tsanaga	novembre-mai	juin-octobre

Le calendrier suivi est, pour les bassins versants équatoriaux (Ntem, Nyong et Kienké), de deux prélèvements par semaine en hautes eaux (mars à juin et septembre à novembre) et un prélèvement par semaine en basses eaux (décembre à février et juillet à août) et pour les bassins versants tropicaux (Mungo et Lom), de deux prélèvements par semaine entre mai et octobre et un seul par semaine entre décembre et avril. Dans le cas du Mayo Tsanaga, les prélèvements sont quotidiens pendant la période d'écoulement, avec plusieurs mesures exécutées pendant la crue (trois par jours au minimum). Le tableau 8.9 résume les fréquences de prélèvements aux exutoires des rivières.

Un observateur est recruté pour chaque station. Il a pour mission, en plus des lectures quotidiennes des hauteurs d'eau aux échelles, de prélever un échantillon de 1 litre d'eau au milieu de la section, à 50 cm en dessous de la surface. Les prélèvements sont hebdomadaires,

bihebdomadaires ou quotidiens, selon les stations et les saisons, comme défini dans le tableau 8.9. Il est demandé aux observateurs d'échantillonner autant que possible au même endroit, où un échantillonnage témoin est effectué pendant les jaugeages complets de débits solides. Les bouteilles en polyéthylène bien fermées sont rangées dans des malles métalliques ou en bois. La date, l'heure, la hauteur d'eau à l'échelle et le nom de la station sont écrits au marqueur sur chaque bouteille. Ces échantillons sont ensuite récupérés lors des missions ponctuelles, au cours desquelles les jaugeages complets de débits solides sont réalisés. Le tableau 8.10 établit le nombre effectif des échantillons collectés par mois et par station au cours de la période d'étude. Pour quelques mois, les observateurs ont prélevé un nombre plus ou moins important d'échantillon. Nous avons néanmoins filtré tous les échantillons reçus.

Tableau 8.9 Fréquences des prélèvements par mois et par station.

	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nov	Déce
Ntem	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Nyong	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Kienké	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Mungo	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Lom	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Mayo Tsanaga	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	□	□



1 prélèvement par semaine



2 prélèvements par semaine



1 prélèvement par jour et plusieurs en crue



pas d'écoulement

Les échantillons prélevés en surface, tout comme ceux collectés lors des jaugeages solides, sont filtrés au laboratoire du CRH de Yaoundé. L'ensemble des données de concentrations instantanées complètent la banque de données sur les MES que nous avons constituée pour les fleuves et rivières du Cameroun et donc les premiers résultats d'analyses présentés au chapitre 4, ont fait l'objet de publication (Liéno *et al.*, 2005a).

Tableau 8.10 : Nombre d'échantillons prélevés par rivière et par mois.

Rivières	Année 2002/2003 (deuxième moitié)										Année 2003/2004										Année 2004/2005 (première moitié)						Total			
	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J		A	S	O
Ntem	2	5	5	5	9	10	5	4	4	6	8	8	9	7	4	9	9	8	9	6	7	7	8	4	-	-	-	-	-	158
Nyong	2	2	2	4	6	10	4	5	4	5	8	9	9	9	5	8	8	11	12	7	6	5	6	5	6	5	4	-	-	167
Kienké	-	-	1	8	10	8	9	4	4	6	8	8	9	7	4	9	9	8	10	5	4	4	5	4	3	5	6	-	-	158
Mungo	-	-	-	-	1	8	8	9	9	7	5	5	9	9	8	9	9	8	6	3	3	5	5	4	-	-	-	-	-	130
Lom	-	-	-	8	9	9	5	5	4	5	4	9	8	9	8	10	9	8	9	4	3	4	5	8	9	8	1	9	4	174
Mayo Tsanaga	*	9	39	31	20	*	*	*	*	*	*	*	27	55	53	44	36	*	*	*	*	*	*	*	*	12	43	32	7	408

- pas de données ; * pas d'écoulement

5. VARIABILITE DES CONCENTRATIONS

Suivant la méthodologie définie, il aurait fallu valider les valeurs des concentrations de surface, en recherchant une relation avec les concentrations moyennes dans les sections, obtenues à l'issu des jaugeages complets de débits solides. Bien que 17 campagnes de mesures aient été effectuées au cours des deux années d'observations, le nombre de jaugeages solides à chaque station n'a pas été jugé suffisant pour tenter une corrélation entre les concentrations des prélèvements de surface et les concentrations moyennes obtenues par les jaugeages.

Toutefois, certaines études (Nouvelot, 1792c ; Picouet, 1999) ont permis de constater que dans certains biefs où le brassage des eaux est suffisamment important pour que la turbidité varie assez peu d'un point à l'autre, les écarts entre les concentrations des prélèvements de surface et les concentrations moyennes dans les sections sont faibles, inférieurs à l'erreur de mesure. Les comparaisons entre les concentrations moyennes (C_m) dans les sections et les concentrations (C_i) des échantillons de surface (tableau 8.11) montrent également de faibles écarts.

Pour chacune des stations, les concentrations des échantillons de surface ont donc été considérées comme représentatives de la concentration moyenne dans les rivières étudiées et seront utilisées directement pour la caractérisation des régimes des matières en suspension et le calcul des charges solides.

L'étude des MES dans les cours d'eau requiert deux approches. Celle des concentrations renseigne sur les quantités par unité de volume, et donc caractérise les régimes de turbidité, alors que les débits solides et les flux font intervenir les volumes d'eau écoulés, et décrit les quantités effectives des matériaux qui sont exportées pendant un temps Δt .

Tableau 8.11 : Comparaison des concentrations des échantillons de surface (C_i) et des concentrations moyennes (C_m) dans les sections de jaugeages.

Bassin versant	Station	Date	C_m (mg.l^{-1})	C_i (mg.l^{-1})
Mayo Tsanaga	Bogo	09/09/02	62,5	-*
		15/08/03	434,4	-*
		26/08/04	796,6	883,7
Lom	Bétaré-Oya	05/09/02	72,3	70
		23/10/02	71,9	66,2
		29/03/03	34,5	36
Mungo	Ebonje	21/08/02	33,5	35,8
	Mundane	28/10/02	25,8	22,8
		02/04/03	43,1	7,2
Nyong	Mbalmayo	21/06/02	17,6	16,8
		23/03/03	16,5	15,8
Kienke	Kribi	23/08/02	9,2	10,4
		26/10/02	8,7	7,4
		01/04/02	10,7	10,1
Ntem	Ngoazik	19/06/02	15,7	18
		28/01/03	12,9	17
		27/03/03	13,8	15,3

*le niveau de l'eau dans le lit était bas et seul un prélèvement a été effectué par verticale

5.1. Régimes des concentrations instantanées

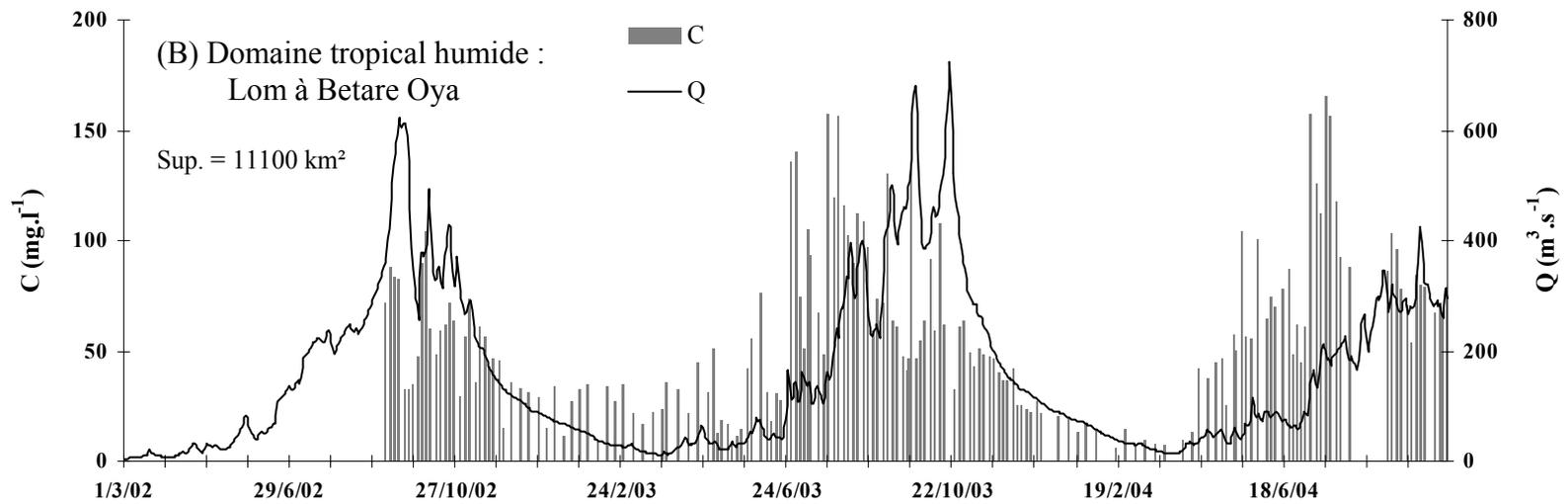
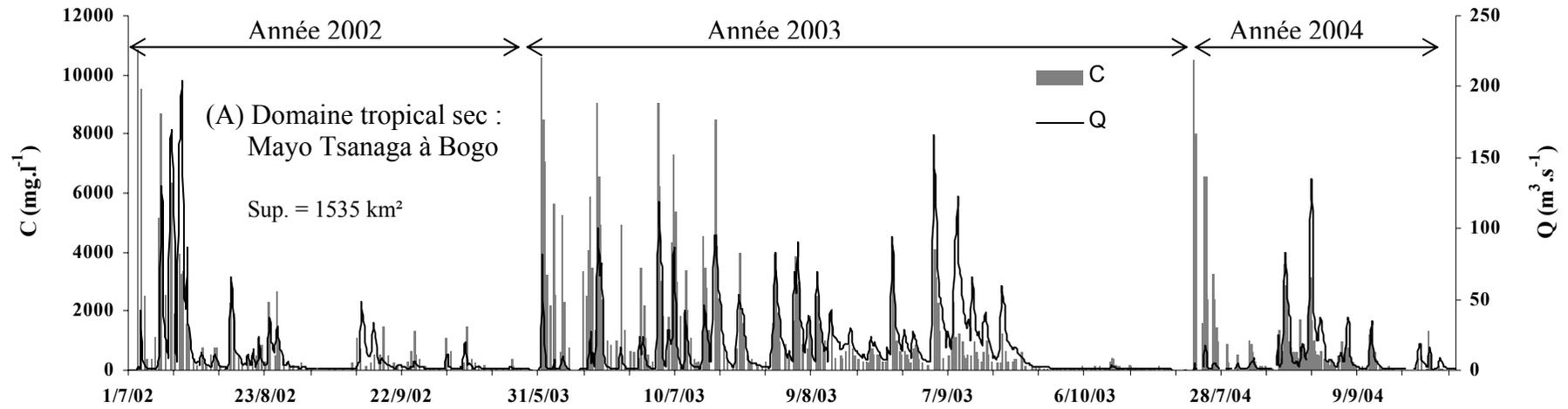
Les régimes des concentrations au cours du cycle hydrologique présentent différents aspects suivant les domaines climatiques. Les bassins versants étudiés sont regroupés dans deux grands domaines : un grand domaine tropical (sec et humide) et un grand domaine équatorial (côtier et continental).

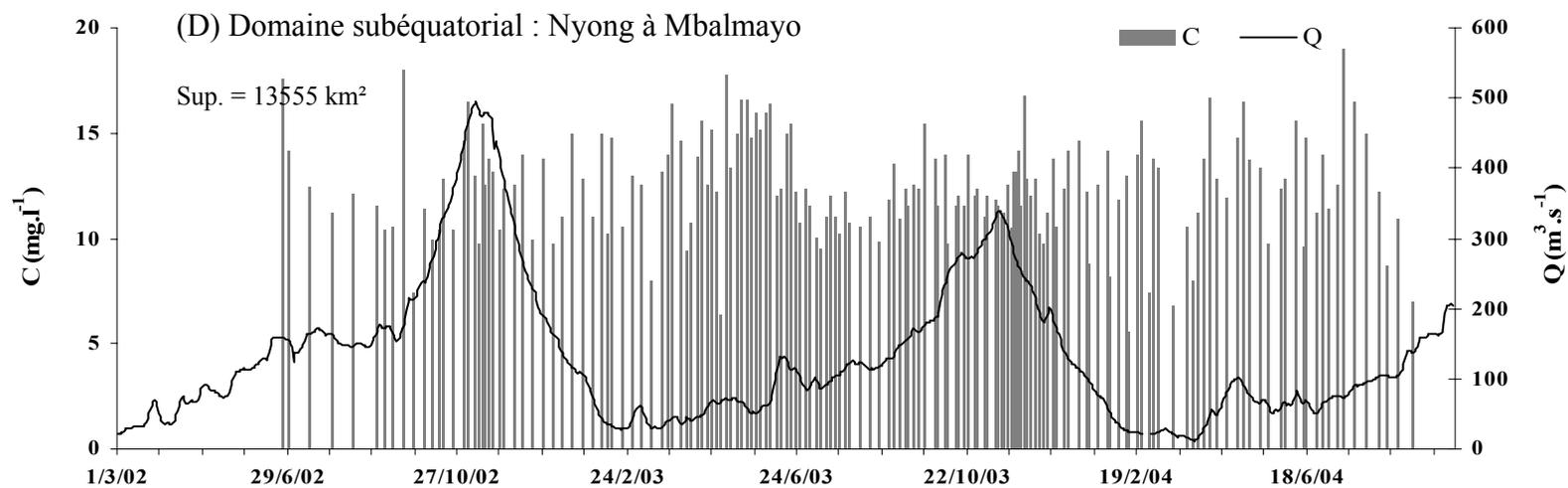
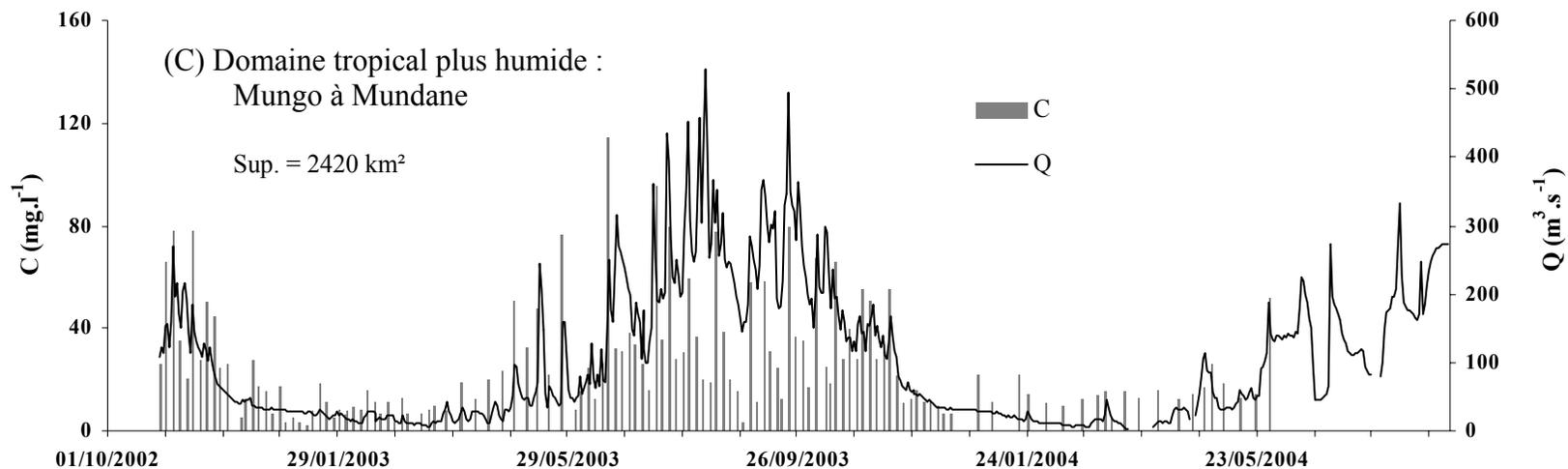
En climat tropical (sec et humide) (figure 8.11 A, B et C), on retrouve le schéma classique de la variation des concentrations largement décrit par plusieurs auteurs (Nouvelot, 1972b ; Olivry, 1977 ; Bricquet *et al.*, 1997b, Picouet, 1999). Les concentrations sont beaucoup plus élevées pour les premières crues de l'année hydrologique. Ces auteurs expliquent ce phénomène par le fait que les sols, mal protégés par un couvert végétal discontinu, soumis

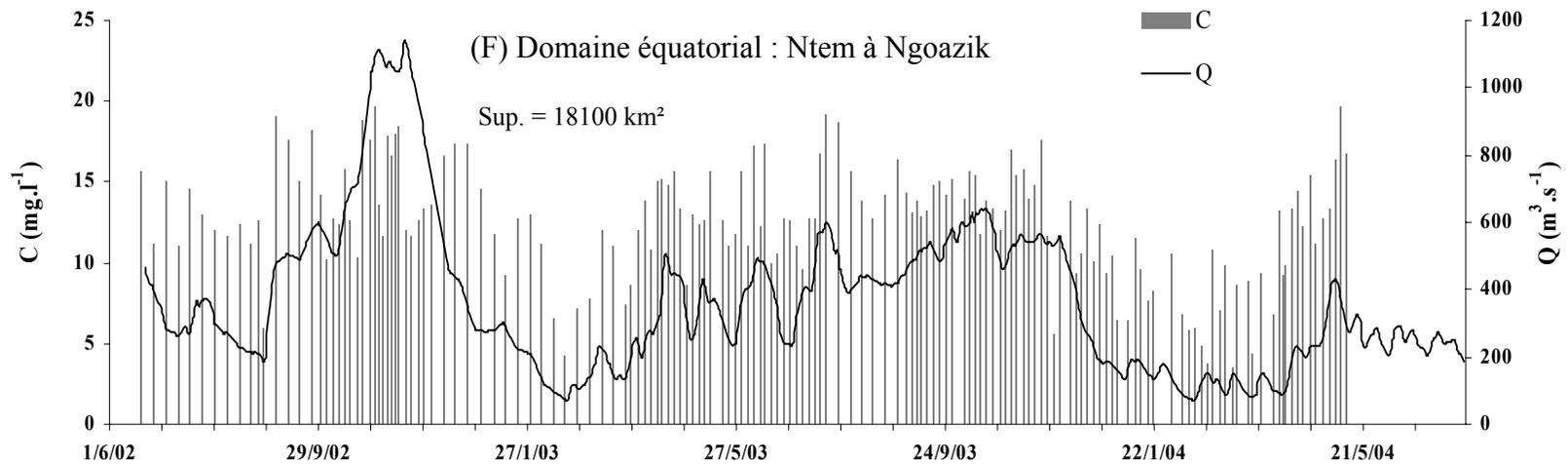
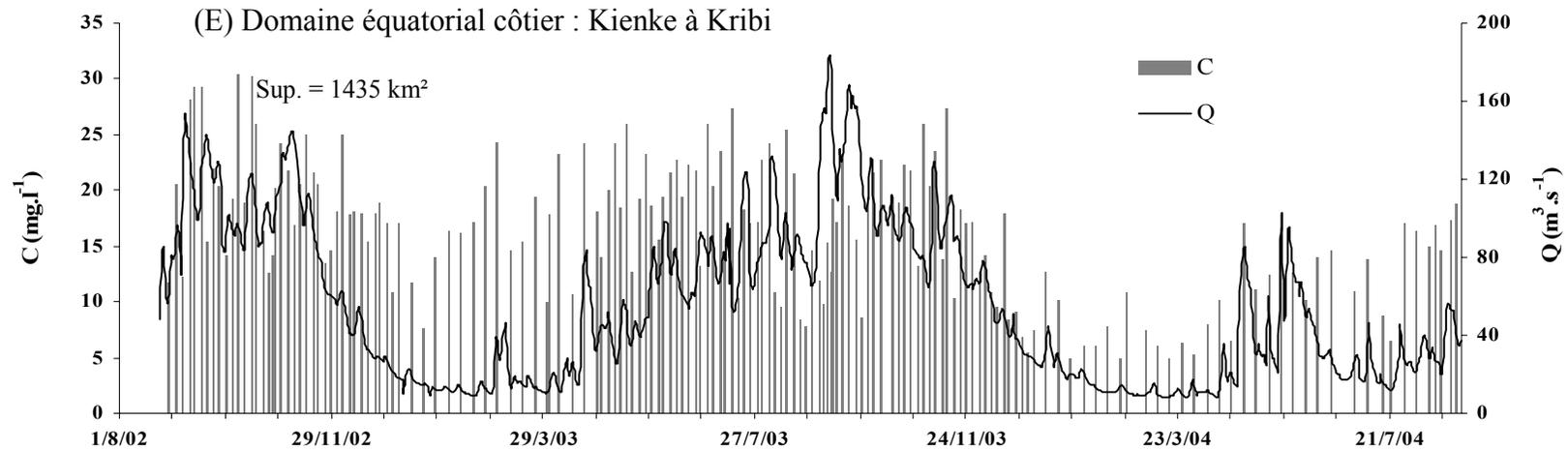
aux aléas climatiques et aux activités humaines (cultures et élevage notamment), sont fortement désagrégés pendant la longue saison sèche. Les premières crues se chargent alors en priorité de ces matériaux pulvérulents laissés en surface. Pour conforter cette hypothèse, Olivry *et al.* (1974) montrent, dans le bassin versant du Mayo Tsanaga, que cette charge en MES des premières crues est encore plus élevée quand la saison sèche a été plus longue et plus rigoureuse, du fait des quantités plus grandes des sols désagrégés. Par la suite, les concentrations baissent considérablement, à cause du développement de la strate herbacée due aux premières pluies, qui protègent les sols et favorisent l'infiltration, mais aussi à cause de la diminution des quantités de matériaux facilement mobilisables.

Ce régime apparaît bien sur les bassins versants du Mayo Tsanaga et du Lom. Il l'est moins dans le domaine tropical plus humide. Ici, bien que quelques pics de concentrations correspondant à de pics de crues soient élevés au début de l'hydrogramme annuel, on note au milieu de la saison, et même vers la fin, d'importantes crues qui engendrent aussi de fortes concentrations.

Figure 8.11 : Variations des débits et des concentrations instantanés sur la période d'étude ; pages suivantes.







Dans les rivières équatoriales, la tendance majeure est plutôt à une homogénéisation des concentrations au cours du cycle hydrologique. Les concentrations ne varient pas beaucoup en début de saison comme dans le domaine tropical. Sur le Ntem et la Kienke, les fortes crues engendrent globalement de fortes concentrations. Les variations des concentrations correspondent à celles des débits. Par contre, le Nyong, en zone subéquatoriale, a un comportement similaire avec celui rencontré dans des régions tropicales. En dépit des faibles écoulements au cours de la première saison des pluies, par rapport à la deuxième, les concentrations y sont plus élevées.

Compte tenu des grandes variations observées au sein des séries de concentrations instantanées, avant d'indiquer les valeurs moyennes, il est intéressant de présenter quelques caractéristiques statistiques des séries de concentrations à chaque station, qui décrivent mieux les distributions des valeurs ponctuelles, en mettant en exergue les différences entre les bassins versants (tableau 8.12).

Tableau 8.12 : Quelques variables caractéristiques de la distribution des concentrations ponctuelles obtenues aux stations étudiées.

Bassins versant	Période de mesures	N	Médiane (mg.l ⁻¹)	Q25 (mg.l ⁻¹)	Q75 (mg.l ⁻¹)	CV (%)	ET
Mayo Tsanaga	2002	99	364,8	135,8	1263,2	178,1	1924,8
	2003	216	650,2	274,3	1987,6	148,2	1927
	2004	95	507,2	160	952,1	164,8	1667,6
Lom	Sept 2002 à octo 2004	174	49	30,6	75,2	62,2	35,7
Mungo	Octo 2002 à mai 2004	130	18	11,2	32,8	84,5	21,6
Nyong	Juin 2002 à août 2004	170	12,4	10,9	14	19,4	2,4
Kienke	Août 2002 à sept 2004	164	16,8	12	20,4	36,7	6
Ntem	Juin 2002 à mai 2004	159	12,7	10,6	15	28,1	3,5

N : Taille d'échantillon ; Q25 : Quantile à 25 % ; Q75 : Quantile à 75 % ; CV : Coefficient de variation ; ET : Ecart type.

Ce tableau met en évidence le contraste entre les bassins tropicaux (Lom, et Mayo Tsanaga) et les bassins équatoriaux (Nyong, Kienke et Ntem). Les concentrations sont beaucoup plus élevées sur le Mayo Tsanaga, en milieu tropical sec. En moyenne, 25 % des concentrations mesurées sont supérieures à 1900 mg.l⁻¹ et 75 % supérieures à 190 mg.l⁻¹, alors que les

concentrations maximales obtenues sur la Kienke, bassin versant de superficie presque équivalente, en zone équatoriale, sont de l'ordre de 30 mg.l⁻¹. Ces concentrations élevées, caractérisent les milieux déjà mis à mal par les conditions climatiques, et soumis à une pression démographique intense. On y rencontre les plus fortes densités de population du pays, avec des chiffres dépassant 200 habitants au km². Les séries de concentrations y présentent aussi les variations les plus fortes (coefficients de variation globalement supérieurs à 150 %).

Sur le Lom, les concentrations sont plus réduites. Elles restent cependant élevées par rapport aux résultats classiquement obtenus en zone équatoriale forestière. Les coefficients de variation sont également plus faibles. Ils sont comparables aux valeurs obtenues dans le bassin supérieur du Niger entre 1991 et 1999 (Picouet, 1999).

En zone forestière, les concentrations sont des plus faibles, généralement inférieures à 20 mg.l⁻¹, et assez régulières. Les coefficients de variation sont proches de 20 % et les écarts type généralement inférieurs à 5. Le coefficient de variation de 36,7 % sur le la Kienke peut être lié à la taille du bassin versant et à son régime d'écoulement, fait de crues irrégulières et assez rapides entraînent des variations aussi importantes de concentration des MES.

5.2. Des régimes de concentrations régis par la couverture végétale

Les matériaux mesurés à l'exutoire des bassins versants sont issus d'un ensemble de processus d'érosion qui les arrachent aux versants (voir chapitre 2). Avant de rejoindre le réseau hydrographique, ces matériaux peuvent être repris dans divers mécanismes complexes, alliant à différentes échelles des processus de sédimentation et de reprise, dans lesquels les caractéristiques physiques des bassins et les activités humaines interviennent.

Dans les zones tropicales, la couverture végétale est très réduite ou presque inexistante en fin de saison sèche. Les premières averses engendrent alors de grandes nappes de ruissellement plus ou moins rapidement sur les versants suivant les pentes. Ces nappes mobilisent vers les principaux axes d'écoulement tous les matériaux détachés, notamment pendant la longue saison sèche.

Dans les zones équatoriales par contre, la couverture forestière, est assez dense. Les strates successives de végétation constituent des écrans de protection pour les sols. Aussi, le développement d'une strate herbacée dense, des racines et de la litière, constitue un obstacle à l'énergie de battance de la pluie et au ruissellement rapide. Ce qui contraint en grande partie les eaux, même sur des fortes pentes à s'infiltrer ou tout au moins à s'écouler en sub-surface. Ce ruissellement indirect, lorsqu'il rejoint le réseau hydrographique, est alors dépourvu ou presque de MES. Même dans des clairières dues à des coupes de bois et aux champs de cultures, les couverts herbacés jouent un rôle protecteur presque équivalent à celui de la forêt vis-à-vis des sols. Les particules déplacées dans les champs, généralement sous forme d'érosion aratoire⁴, ne peuvent être transportées sur de longues distances. L'acquisition des matières en suspension serait alors dans ce cas limitée à l'érosion des berges mal protégées, lors des grandes crues.

Dans ces zones de forêts, on observe aussi directement sur le terrain, lors des averses, que les axes routiers et les pistes sont des chemins facilement empruntés par les eaux du ruissellement, pour parvenir aux réseaux hydrographiques. L'aménagement de routes et surtout le développement de l'industrie du bois ont considérablement contribué à la densification de ce réseau routier. Or il semble que c'est ce ruissellement souvent très important, amené par les routes et les pistes qui contribue de façon considérable aux augmentations assez rapides du niveau d'eau dans les fleuves. Et, vraisemblablement, les MES qu'il entraîne participent à l'augmentation des concentrations.

Les sources les plus plausibles des MES dans les fleuves en zones de forêts sont donc principalement l'érosion des berges et les apports dus aux axes routiers. Ce qui peut à priori justifier les faibles variations de concentrations au cours de l'année, et le fait que les concentrations les plus élevées correspondent aux débits les plus élevés.

⁴ L'érosion aratoire est le résultat du mouvement des particules de sol par les outils de travail de champ. Elle consiste en un déplacement puis une redistribution de sol sur le versant cultivé. Le passage des outils, des plus simples comme la houe, aux plus complexes comme la charrue, provoque un arrachement des sols. Le travail du sol est donc un phénomène érosif dont les outils sont les agents.

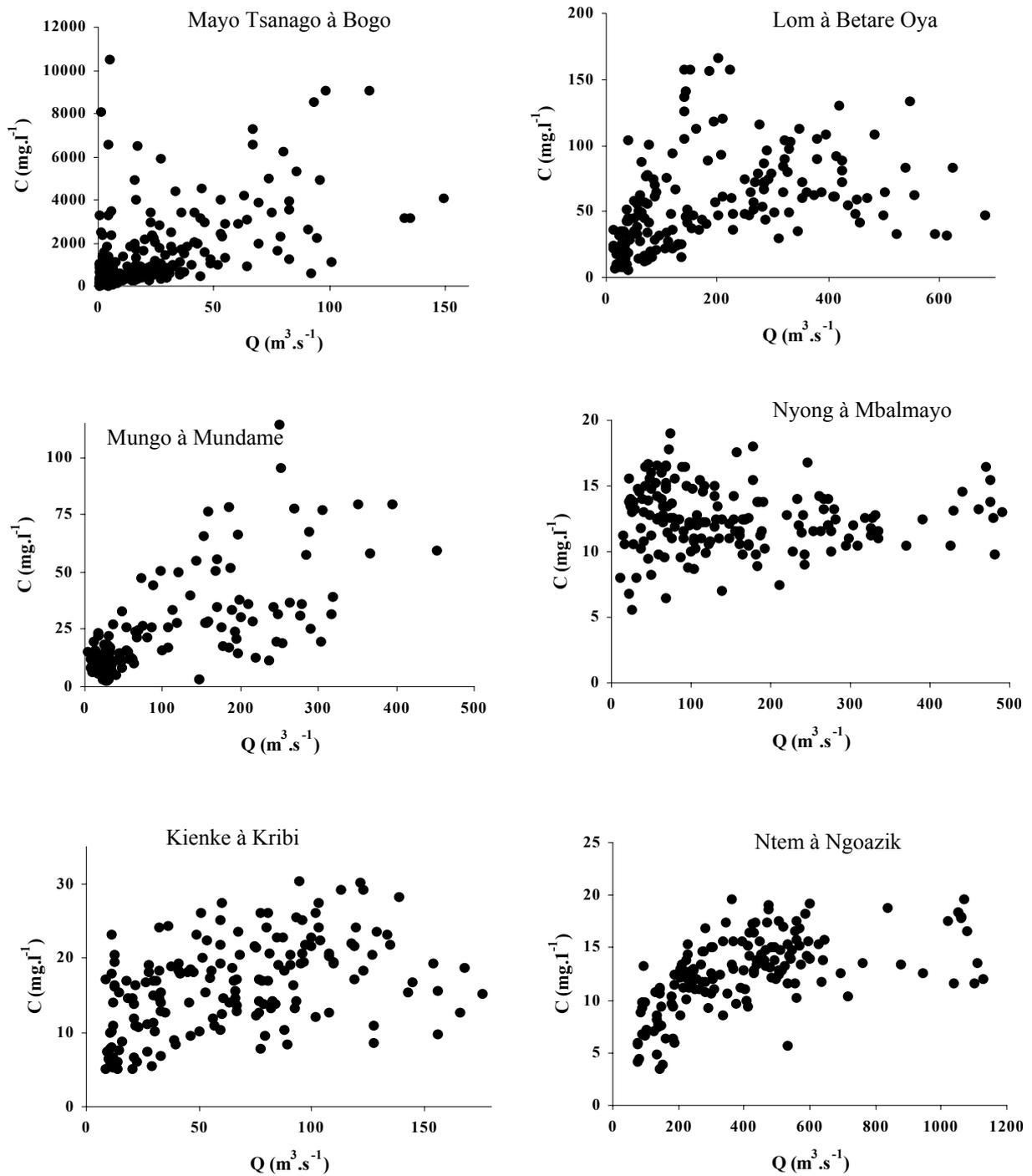


Figure 8.12 : Relations entre concentrations instantanées et débits instantanés sur les bassins versants étudiés.

5.3. Relations entre les concentrations et les débits

Les fréquences de mesures des débits et celles des prélèvements des échantillons d'eau ne sont pas les mêmes. Les débits instantanés sont obtenus à partir des hauteurs d'eau aux échelles, lues deux fois par jours, alors que les concentrations sont obtenues à partir des échantillons prélevés suivant les protocoles définis plus haut. Il est possible de mettre en relation les séries de débits et des concentrations mesurés aux mêmes instants. Les résultats pour chacun des six bassins sont présentés à la figure 8.12.

Aux six stations étudiées on observe une très grande dispersion des points. Tout d'abord cette dispersion est plus importante sur les bassins versants tropicaux (Mayo Tsanaga, Lom et Mungo). Sur le Lom, les points tendent à s'organiser suivant deux populations, caractérisant les échantillons de début de crue pour lesquels les concentrations sont plus fortes et ceux de la décrue pour lesquels les concentrations sont plus faibles. Sur les bassins versants bien couverts, en zone forestière (Ntem et Kienke), l'organisation des points semble s'harmoniser autour d'une courbe dont l'équation serait $C = aQ^b$, avec $b < 1$. La population des points sur le Nyong à Mbalmayo par contre, tend vers une indépendance entre les concentrations et le débit.

Afin de mieux représenter les relations entre les concentrations et les débits, et leurs variations au cours de l'année, on peut diminuer les taux de dispersion en calculant les concentrations mensuelles. A partir des séries de concentrations instantanées décrites précédemment et des débits, nous avons calculé pour chaque mois une concentration moyenne à partir des flux obtenus par les formules stochastiques comme nous le verrons par la suite. Le nombre d'échantillons varie de 2 à plus de 16 par mois ; nous avons calculé des moyennes pour les mêmes mois qui retracent l'évolution des concentrations au cours du cycle hydrologique, pour chaque bassin (figure 8.13).

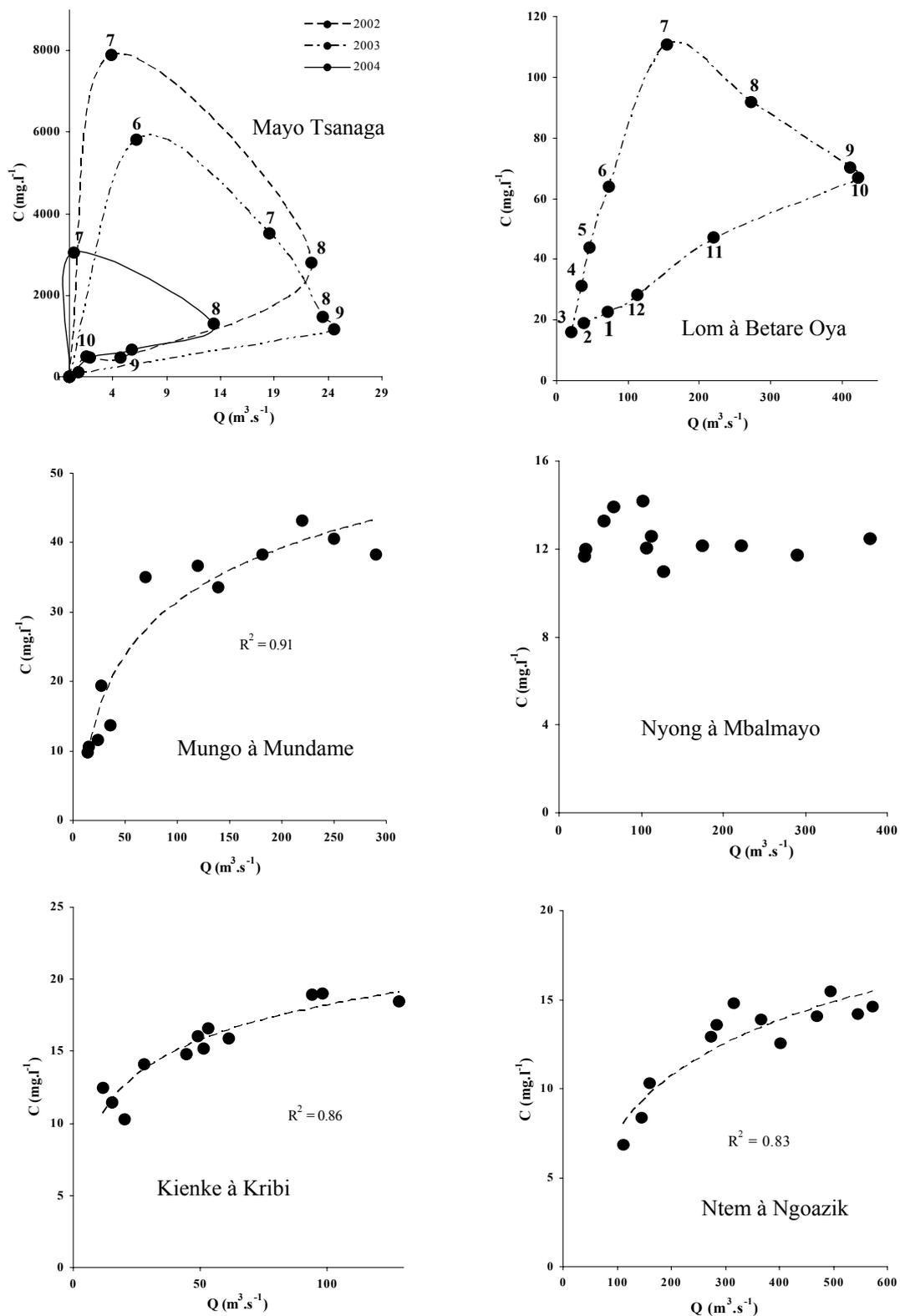


Figure 8.13 : Relations entre les débits et les concentrations mensuels à l'échelle annuelle sur les bassins étudiés ; les chiffres correspondent au rang du mois dans l'année calendaire.

On distingue, en fonction des régimes de concentrations, deux classes principales :

5.3.1. Les bassins tropicaux dont les sols sont peu couverts

Dans les bassins du Mayo Tsanaga et du Lom les régimes des MES sont parfaitement représentatifs. Les variations des concentrations mensuelles en fonction des débits retracent le schéma des hystérésis montrant un maximum de concentration avec celui du débit, que nous avons déjà rappelé et expliqué plus haut.

Sur le Mayo Tsanaga, les cycles d'hystérésis relatifs aux trois années ont à peu près les mêmes formes, mais leur amplitude paraît liée à l'hydraulicité de l'année, comme l'avait déjà constaté Picouet (1999). De ce fait, les années au cours desquelles les écoulements sont plus importants enregistrent des concentrations plus élevées, pour les mois du début des écoulements.

Des explications peuvent être énoncées, allant dans le même sens. On peut penser qu'une année de forte hydraulicité pourrait commencer aussi par des fortes crues continues, qui ont l'énergie suffisante pour mobiliser une quantité importante de matériaux pulvérulents sur les versants, avant le développement de la végétation. Ces crues fortes et violentes auraient aussi de grandes capacités de remettre en suspension les sédiments déposés dans le lit et d'éroder en même temps les berges. En fin d'écoulement, il est beaucoup plus plausible d'imaginer une plus importante diminution des quantités de sédiments facilement mobilisables. Pour les années de forte hydraulicité, les fortes crues lessivent au cours de la saison les versants jusqu'aux croûtes plus résistantes à l'érosion ; au contraire des années d'écoulements faibles où il pourrait subsister encore à la fin de la saison quelques sédiments susceptibles d'être transportés.

5.3.2. Les bassins équatoriaux dont les sols sont bien couverts

L'évolution des concentrations ne décrit pas un cycle d'hystérésis. Les concentrations tendent à augmenter lentement, d'un minimum moyen assez stable de 10 mg.l⁻¹ à Mundame et à Kribi et 7 mg.l⁻¹ à Ngoazik, jusqu'à un maximum variant plus avec les bassins, 15 mg.l⁻¹ à Ngoazik,

20 mg.l⁻¹ à Kribi et 45 mg.l⁻¹ à Mundame. A la différence avec les bassins peu couverts, ces extrêmes correspondent aux minimums et maximums des débits mensuels.

6. DETERMINATION DE LA CHARGE SOLIDE DES RIVIERES

Dans des situations le plus souvent rencontrées où l'information sur les débits et les concentrations n'est pas suffisante pour appliquer les modèles déterministes $C = f(Q)$, il a été présenté dans le chapitre 2 les principales méthodes utilisées pour calculer les charges de MES drainées dans les rivières. Le choix d'une d'elles est conditionné essentiellement par la nature et la quantité de l'information disponible.

Puisqu'il n'a pas été possible de mettre en évidence des relations $C = f(Q)$, pour les données collectées, les méthodes stochastiques sont probablement plus appropriées. Ces méthodes sont adaptées à des intervalles optimum d'échantillonnage dans le temps ; ce qui est parfaitement les fréquences d'observations effectuées ici. Mais il reste encore que plusieurs méthodes stochastiques peuvent être appliquées dans notre cas de figure.

Il n'existe pas de principe rigoureux pour le choix de l'une ou de l'autre des méthodes stochastiques de quantification des flux de matières dans une rivière, entre les temps t_1 et t_2 . Pourtant parmi les causes d'imprécisions, on cite souvent l'inadéquation des méthodes utilisées. Walling & Webb (1981) pensent qu'une méthode non adaptée peut sous-estimer ou surestimer les charges solides. C'est pour apporter une contribution à cette sensibilité des résultats aux méthodes de calcul, que Probst *et al.* (1992) ont utilisé trois méthodes différentes (deux stochastiques et un déterministe), sur des séries de concentrations mensuelles, sur le fleuve Congo et son affluent l'Oubangui. Ils en concluent que les résultats ne sont pas significativement différents.

Les données disponibles sont assez nombreuses et représentatives, pour permettre une analyse de cette sensibilité des résultats, d'une part vis-à-vis de la méthode de calcul et, d'autre part, vis-à-vis des fréquences des observations. De ce fait, nous avons retenu trois méthodes stochastiques, couramment utilisées pour les cours d'eau tropicaux, pour la détermination des charges de matières (Probst, 1983 ; Probst *et al.*, 1992 ; Boeglin & Probst, 1996 ; Laraque & Olivry, 1999).

Méthode 1 :

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=0}^{i=1} C_i}{n}$$

Méthode 2 :

$$M = \delta t \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{n}$$

Méthode 3 :

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i}$$

Dans ces formules, M représente la masse totale, δt l'intervalle de temps, Q_m le débit moyen pour la période considérée, Q_i et C_i sont les débits et les concentrations instantanés, n le nombre de mesures sur la période δt .

Dans le souci de garder des périodes sur lesquelles les débits et les concentrations varient peu et les fréquences d'observations sont assez homogènes, nous avons adopté un intervalle de temps mensuel pour le calcul des charges de matières en suspension.

Les charges solides mensuelles obtenues à partir des trois méthodes de calcul ne sont pas significativement différentes (tableau 8.13). Les écarts sont généralement inférieurs à 5 %. Sauf sur le Mungo où, en période de montée des eaux (avril à juillet), ces écarts ont souvent dépassé 10 %. Dans tous les cas, ces différences restent faibles au regard des irrégularités constatées sur les résultats de mesures des transports de matières. Ceci corrobore les résultats de Probst *et al.* (1992), pour les flux de matières dissoutes sur le Congo à Brazzaville et l'Oubangui à Bangui, son principal affluent. Les écarts sont inférieurs à la précision sur la mesure elle-même. Ces résultats semblent attester que la sensibilité des charges MES n'est pas significativement liée à un changement de la méthodologie de calcul.

Tableau 8.13 : Flux mensuels de matières en suspension ($\times 10^3$ tonnes) calculés pour cinq bassins versants étudiés, par trois méthodes stochastiques différentes.

	Année 2002						Année 2003											
	Juil	Août	Sepe.	Octo.	Nove.	Déce.	Janv.	Féve.	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sepe.	Octo.	Nove.	
Lom																		
1	-	-	69,8	64,6	25,9	8,1	4,8	2,1	1,1	3,0	2,3	11,8	37,7	77,7	85,9	87,1	27,7	
2	-	-	72,1	66,2	26,5	8,0	4,6	1,9	1,1	2,9	2,6	17,0	41,5	80,7	84,1	80,8	28,2	
3	-	-	70,1	65,6	27,4	8,3	4,8	2,0	1,1	3,0	2,6	16,4	40,4	79,5	85,3	86,4	28,1	
Mungo																		
1	-	-	-	-	15,9	1,6	0,5	0,4	0,3	1,0	9,4	12,1	26,4	21,2	32,1	19,6	7,6	
2	-	-	-	-	19,5	1,6	0,5	0,4	0,3	0,8	1,6	17,2	34,1	21,6	32,8	22,1	9,7	
3	-	-	-	-	17,7	1,7	0,5	0,4	0,3	1,0	10,9	16,2	30,8	23,5	35,0	20,7	9,3	
Kienke																		
1	-	-	6,3	5,7	5,1	2,0	0,5	0,5	0,9	1,6	2,5	3,9	4,1	3,6	5,7	5,4	4,2	
2	-	-	6,4	5,9	5,1	2,0	0,6	0,5	0,9	1,7	2,5	3,8	4,1	3,7	5,8	5,5	4,3	
3	-	-	6,5	5,8	5,2	2,1	0,5	0,5	1,0	1,8	2,5	3,9	4,1	3,7	5,7	5,4	4,3	
Nyong																		
1	5,0	4,8	5,6	9,7	15,5	8,5	3,9	1,2	1,4	1,7	2,5	3,6	2,9	3,7	5,5	8,4	9,3	
2	5,2	4,9	5,4	10,0	15,7	8,6	3,8	1,1	1,4	1,7	2,4	3,5	3,0	3,8	5,5	8,3	9,3	
3	5,0	4,8	5,5	9,8	15,6	8,5	3,8	1,2	1,5	1,7	2,5	3,6	2,9	3,7	5,5	8,4	9,3	
Ntem																		
1	11,0	7,0	22,3	29,5	39,0	19,8	7,9	1,9	4,7	12,3	11,2	13,2	19,0	16,2	18,8	21,5	19,5	
2	10,6	6,5	22,9	32,8	39,5	19,9	7,7	2,0	5,0	12,8	11,0	13,6	19,2	16,3	18,5	21,5	19,6	
3	11,0	7,1	22,2	31,8	39,1	19,5	7,7	2,1	4,8	12,5	11,3	13,5	19,5	16,2	18,8	21,5	19,6	

Compte tenu du grand nombre des échantillons collectés, on peut aussi envisager d'analyser, pour chacune des méthodes n°1, n°2 et n°3, quel pourra être l'effet d'une diminution de la fréquence des observations sur les résultats des charges mensuelles de matières en suspension. Pour cela, nous avons divisé les séries de données de concentration, à chacune des stations, en deux jeux suivant le schéma de la figure 8.14, en respectant au mieux une bonne répartition des échantillons dans le mois, pour chaque jeu de concentration.

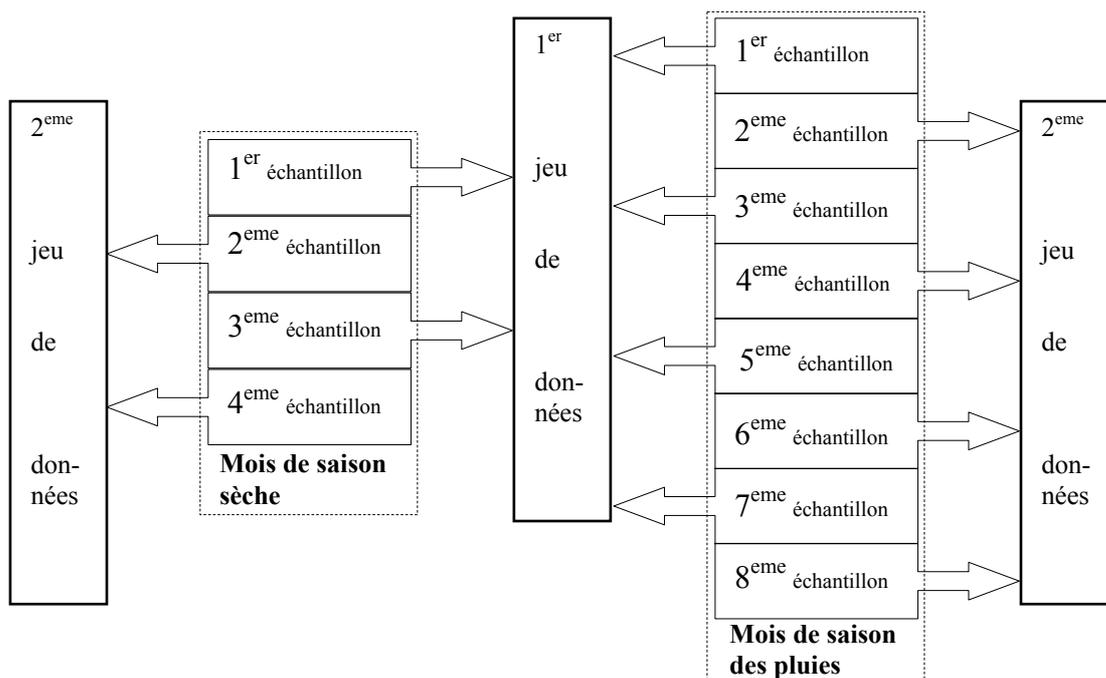


Figure 8.14 : Schéma montrant le procédé adopté pour séparer les concentrations en deux jeux de données.

Chacune des trois méthodes a été appliquée aux deux jeux de données de chacune des cinq stations. Ce qui a donné au total, trente combinaisons effectuées. Pour chaque méthode et à chacune des stations, les résultats obtenus pour les deuxièmes jeux de données sont comparés aux résultats des premiers jeux de données complètes. Le tableau 8.14 présente ces comparaisons pour seulement la méthode n°3 qui, pour la plupart des auteurs, donne des bilans plus précis que les deux autres méthodes ; dans la mesure où elle prend en compte à la fois le débit moyen sur la période de calcul, et les concentrations instantanées pondérées par les débits instantanés correspondants.

Les résultats montrent que les écarts peuvent être parfois considérables. Les disparités les plus importantes sont rencontrées dans les rivières tropicales. Pour plus de huit mois sur douze, on enregistre des inégalités sur le Lom et le Mungo. Elles sont moins fréquentes sur le Ntem et la Kienke (six mois), et beaucoup moins encore sur le Nyong (moins de trois mois). Les valeurs absolues des pourcentages de ces variations vont en ordre décroissant dans le même sens : généralement de 30 % à 50% sur le Lom et le Mungo, de 15 % à 25 % sur le Ntem et la Kienke et, pour le Nyong, 10 % à 20 % de variation.

Tableau 8.14 : Comparaison des charges mensuelles de matières en suspension calculées avec la méthode stochastique n° 3 ci-dessus et 2 fréquences de prélèvements différentes : (1) ; l'ensemble des échantillons (1^{er} jeu de données) et (2) ; 2 échantillons par mois en basses eaux et 4 par mois en hautes eaux (2^{ème} jeu de données).

		Année 2002				Année 2003											
		Sepe.	Octo.	Nove.	Déce.	Janv.	Féve.	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sepe.	Octo.	Nove.	
Lom	1	70,1	65,6	27,4	8,3	4,8	2,0	1,1	3,0	2,6	16,4	40,4	79,5	85,3	86,4	28,1	
	2	74,9	69,8	31,7	8,7	3,6	2,8	0,9	2,5	2,1	15,8	32,3	80,3	119,8	93,8	26,9	
Mungo	1			17,7	1,7	0,5	0,4	0,3	1,0	10,9	16,2	30,8	23,5	35,0	20,7	9,3	
	2			18,4	1,2	0,4	0,4	0,3	1,3	5,4	22,3	38,0	25,8	17,8	23,1	9,2	
Nyong	1	5,5	9,8	15,6	8,5	3,8	1,2	1,5	1,7	2,5	3,6	2,9	3,7	5,5	8,4	9,3	
	2	4,2	10,5	15,0	9,4	3,8	1,2	1,4	1,6	2,8	3,6	2,8	3,3	5,8	8,6	9,0	
Kienke	1	6,5	5,8	5,2	2,1	0,5	0,5	1,0	1,8	2,5	3,9	4,1	3,7	5,7	5,4	4,3	
	2	5,8	6,9	5,1	2,2	0,5	0,5	0,9	2,1	2,4	3,7	4,5	3,4	5,0	5,8	5,0	
Ntem	1	22,2	31,8	39,1	19,5	7,7	2,1	4,8	12,5	11,3	13,5	19,5	16,2	18,8	21,5	19,6	
	2	24,6	27,6	38,4	8,0	7,2	1,8	4,3	13,1	10,7	17,0	19,5	17,1	18,4	21,3	18,7	

Les mois de montée de crue sont les plus affectés. A priori, il n'existe pas une tendance à la diminution ou à l'augmentation des charges pour une diminution de la fréquence des données. Toutefois, les trois méthodes indiquent simultanément une diminution ou une augmentation pour un mois donné. Ce qui atteste une fois de plus de ce que pour une même fréquence de prélèvements, la méthode de calcul affecte peu le résultat.

Il semble que le moment de la prise d'échantillon soit déterminant pour la précision du résultat. On va alors surestimer les flux avec des prélèvements effectués aux moments des crues, et, inversement, sous-estimer les flux avec de prélèvements plus fréquents en inter-crues.

Les résultats ci-dessus montrent que les disparités des résultats sur les charges en matières dans les rivières sont peu liées au changement de la méthode de calcul. La sensibilité à une diminution de la fréquence de mesures paraît plus élevée. Une estimation vraisemblable des charges des matières dans les rivières requiert alors des mesures régulières, de façon à suivre

au mieux les variations de débit. Des mesures très espacées peuvent surestimer les flux si elles sont effectuées aux maximums des crues, ou les sous-estimer si elles sont effectuées en inter-crues.

Sur le Mayo Tsanaga à Bogo, la méthode de calcul utilisée susceptible de donner les meilleurs résultats pour des régimes à écoulement temporaire et torrentiel, où chaque crue a nécessité un minimum de trois prélèvements. Elle suppose que l'on dispose d'un enregistrement en continu du débit, et que ce sont les concentrations qui sont plus ou moins espacées. Ce qui n'est pas le cas pour le Mayo Tsanaga d'un enregistrement en continu du débit. Toutefois, les trois lectures d'échelle effectuées trois fois par jour nous permettent de disposer d'un hydrogramme très semblable à un enregistrement en continu.

Il est alors aisé de calculer sur des périodes de durée variable (appelées classes), pendant lesquelles le débit a peu varié, le volume V_i d'eau écoulé. Si C_i est la concentration moyenne des matières de chaque classe i ainsi définie, la charge M de matières sur la période d'observation comprenant n classes de débit s'écrit simplement :

$$M = \sum_{i=1}^n C_i V_i$$

La précision de cette méthode va dépendre du fait que la dispersion des concentrations ne soit pas trop élevée dans chaque classe, et que les concentrations soient mesurées sur l'ensemble des classes de débit. Balland (1983) a utilisé cette méthode sur un affluent du lac Léman. Elle a donné de bons résultats sur un petit bassin de Djitiko, bassin du fleuve Niger (Droux, 1999).

A la station de Bogo, nous avons défini des classes à pas de temps journalier. Le volume d'eau écoulé chaque jour est obtenu à partir de la moyenne des trois débits instantanés. La concentration de l'échantillon prélevé le jour est considérée comme représentative de la moyenne journalière, et, pour les jours où on a plusieurs échantillons, on calcul la moyenne arithmétique des concentrations instantanées. Dans le cas de cette étude où une concentration est mesurée tous les jours, cette méthode s'apparente bien avec une intégration du solidogramme à pas de temps journalier. Le flux de MES sur une période (mois, année) est obtenu par la somme des flux journaliers.

Il n'a pas été procédé à une étude des écoulements et de MES pour chaque crue sur le Mayo Tsanaga. Ceci n'entrant pas véritablement dans le cadre de ce travail, étant donné que le pas de temps de cette étude, pour les six bassins est mensuel. Une analyse à l'échelle de la crue pourra toujours être réalisée dans un autre cadre, dans un travail plus spécifique sur le bassin du Mayo Tsanaga.

7. FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION MESURES DE 2002 A 2004 ; BILAN DE PRODUCTION TOTALE DES SEDIMENTS SUR LE TERRITOIRE CAMEROUNAIS

L'un des objectifs de cette thèse était de compléter le réseau de mesures de MES dans les fleuves et rivières du Cameroun, en l'étendant aux zones côtières du sud-ouest et du sud (Mungo et Kribi), non encore étudiées. Dans ce paragraphe sont exposés les résultats de mesures des MES de 2002 à 2003, qui complètent les résultats antérieurs. Par la suite, l'ensemble des données (antérieures et actuelles) seront utilisées pour proposer une estimation de la production totale des sédiments sur le territoire camerounais.

7.1. Flux de matières en suspension mesurés de 2002 à 2004

La méthode n° 3 est retenue ici pour estimer les charges en MES dans le Lom, Mungo, Kienke, Nyong et Ntem. Elle paraît plus précise que les deux autres, comme précisé plus haut, en raison de ce qu'elle intègre à la fois le débit moyen sur la période de calcul, et les concentrations instantanées pondérées par les débits instantanés correspondants. De plus, Sigha-Nkamdjou (1994) a montré qu'à la station de Ngoazik, pour des concentrations bihebdomadaires en basses eaux et tous les deux jours en hautes eaux, cette méthode donnait des résultats proches de ceux obtenus par la méthode par intégration.

Le pas de temps de calcul est le mois. Les tableaux de 8.15 à 8.20 donnent les charges de MES mensuelles pour la période d'étude. Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, pour les bassins de Lom, Mungo, Nyong, Kienke et Ntem, seule l'année hydrologique 2003/2004 est complète, et permet d'établir un bilan annuel. Sur le Mayo Tsanaga par contre, nous avons pu suivre dans leur intégralité trois années de mesures.

Tableau 8.15 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur le Mayo Tsanaga à Bogo (S = 1535 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nove	Déce	Jan	Fév	An
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	-	3,9	22,5	4,7	1,5	-	-	-	-	2,7
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	81,7	168,2	5,8	2,0	-	-	-	-	257,7
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	7884,6	2791,2	477,8	499,3	-	-	-	-	3026,7
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	6,2	18,5	23,5	24,6	0,8	-	-	-	-	6,1
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	93,8	169,2	88,8	73,4	0,2	-	-	-	-	425,5
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	5819,9	3529,3	1457,4	1151,1	104,1	-	-	-	-	2211,7
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	-	0,4	13,3	5,7	1,8	-	-	-	-	1,8
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	3,2	45,3	9,9	2,3	-	-	-	-	60,7
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	3043,9	1311,1	666,5	478,7	-	-	-	-	1069,4

Tableau 8.16 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur le Lom à Betare Oya (S = 11100 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nove	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	9,4	20,5	40,1	80,1	195	248	454	367	206	104	64,6	33,3	152,6
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	-	-	70,1	65,6	27,4	8,3	4,8	2,0	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	59,3	65,7	48,4	29,1	28,0	26,6	-
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	17	35	32,8	72	144	305	474	478	234	123	78,2	42,8	170,1
	Flux (10 ³ t)	1,1	3,0	2,6	16,4	40,4	79,5	85,3	86,4	28,1	9,3	3,7	1,2	357,0
	Cm (mg.l ⁻¹)	24,1	32,5	25,8	63,0	97,3	95,2	69,9	68,0	45,7	27,7	17,7	11,4	66,5
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	22,5	36	58,3	75	164	241	308	-	-	-	-	-	-
	Flux (10 ³ t)	0,5	3,1	10,0	14,1	55,2	57,4	65,5	-	-	-	-	-	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	8,1	29,8	62,2	64,5	113,9	88,6	81,5	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.17 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur le Mungo à Mundame (S = 1435 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	137	38,6	25,9	19,1	-
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	-	-	-	-	17,7	1,7	0,5	0,4	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	44,8	15,9	7,2	8,8	-
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	14,5	25,2	76,7	139	220	277	290	181	103	34,2	21,3	10	116
	Flux (10 ³ t)	0,3	1,0	10,9	16,2	30,8	23,5	35,0	20,7	9,3	1,0	0,9	0,3	150
	Cm (mg.l ⁻¹)	8,8	15,9	45,8	33,5	43,1	28,6	38,3	38,3	28,4	11,4	16,0	10,8	41
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	15,4	28,9	61,4	130	-	223,4	-	-	-	-	-	-	-
	Flux (10 ³ t)	0,5	3,5	5,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	12,4	23,0	24,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.18 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur le Nyong à Mbalmayo (S = 13555 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	38,4	58,1	91,6	138	157	151	185	321	455	252	121	37,5	167,1
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	5,0	4,8	5,5	9,8	15,6	8,5	3,8	1,2	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	11,9	11,9	11,6	11,4	13,2	12,6	11,9	12,7	-
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	41,6	50,9	62,9	103	100	121	166	259	304,3	193	93,8	28,6	127
	Flux (10 ³ t)	1,5	1,7	2,5	3,6	2,9	3,7	5,5	8,4	9,3	6,1	3,1	0,9	49,1
	Cm (mg.l ⁻¹)	12,8	13,0	14,6	13,6	10,9	11,4	12,7	12,1	11,8	11,7	12,1	11,2	12,3
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	20,3	58,4	69,9	64	81,3	110	169	-	-	-	-	-	-
	Flux (10 ³ t)	0,6	2,1	2,5	2,2	3,3	2,8	-	-	-	-	-	-	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	10,5	13,5	13,2	13,0	14,9	9,7	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.19 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur la Kienke à Kribi (S = 2420 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	114	99	101	41,2	15,9	11,6	-
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	-	-	6,5	5,8	5,2	2,1	0,5	0,5	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	21,3	21,2	19,3	18,5	12,2	17,6	-
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	20,5	33,3	46,9	74,3	80,3	88,7	142	96,8	86,9	47,9	24,4	11,9	62,8
	Flux (10 ³ t)	1,0	1,8	2,5	3,9	4,1	3,7	5,7	5,4	4,3	1,6	0,6	0,2	34,7
	Cm (mg.l ⁻¹)	16,8	18,8	19,6	20,2	19,0	15,3	15,6	20,8	18,5	11,0	8,3	7,4	17,5
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	10,3	22,4	51,3	32,2	22,7	33,7	-	-	-	-	-	-	-
	Flux (10 ³ t)	0,2	0,8	1,8	1,0	0,8	1,5	-	-	-	-	-	-	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	6,2	9,4	12,6	12,9	11,4	16,5	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.20 : Charges mensuelles et annuelles de MES sur le Ntem à Ngoazik (S = 18100 km²).

		Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Septe	Octo	Nov	Déce	Janv	Févr	Annuel
2002/2003	Q (m ³ .s ⁻¹)	-	-	-	-	313	250	512	707	1030	464	229	108	-
	Flux (10 ³ t)	-	-	-	-	11,0	7,1	22,2	31,8	39,1	19,5	7,7	2,1	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	-	-	-	-	13,1	10,8	16,8	15,6	14,5	15,9	11,6	7,3	-
2003/2004	Q (m ³ .s ⁻¹)	178	353	320	367	470	403	494	573	545,9	285	161	111	355,1
	Flux (10 ³ t)	4,8	12,5	11,3	13,5	19,5	16,2	18,8	21,5	19,6	8,4	3,9	1,8	151,8
	Cm (mg.l ⁻¹)	9,36	13,4	13,1	13,9	14,9	14,3	14,1	13,6	13,8	11,2	8,9	6,4	13,6
2004/2005	Q (m ³ .s ⁻¹)	113	196	311	246	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Flux (10 ³ t)	2,2	6,5	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cm (mg.l ⁻¹)	7,3	12,4	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Il a été constaté en étudiant les concentrations instantanées, que les variations au cours du cycle hydrologique étaient moins marquées, notamment pour les bassins versants sous couvert forestier. Les différences entre les extrêmes mensuels expriment suffisamment les variations des charges au cours du cycle (tableau 8.21).

Tableau 8.21 : Comparaison entre les minimums de flux et débit (basses eaux), et les maximums (hautes eaux).

	Minimum (m)		Maximum (M)		Rapport (M/m)	
	Flux (10^3 t)	Débit ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Flux (10^3 t)	Débit ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Flux	Débit
Lom	1,1	17	86,4	478	78	28
Mungo	0,3	10	35	290	117	29
Nyong	0,9	28,6	9,3	304,3	10	11
Kienke	0,2	11,9	5,7	142	28	12
Ntem	1,8	111	21,5	573	12	5

Le flux mensuel maximum (en hautes eaux) est de 10 à 100 fois plus élevé que le flux minimum (en basses eaux). Les différences les plus importantes sont rencontrées sur les bassins versants tropicaux. Ce qui souligne une très grande variation des flux au cours de la saison. Contrairement aux variations saisonnières des concentrations, celles des flux sont plus élevées que les variations relevées sur les débits. Ceci atteste qu'au cours du cycle hydrologique, les flux de matières exportées seront contrôlés par les puissants débits des fleuves, et par conséquent, évolueront parallèlement.

Même dans les régions tropicales, le maximum de transport a lieu en période de crues. La charge des rivières est faible en basses eaux, généralement limitée à l'érosion des berges, ou à la remobilisation des dépôts dans les lits, lors du passage des troupeaux (zone soudanienne), ou lors des activités de pêche (zone forestière).

Cette relation entre les flux et les débits est en réalité une auto-relation, du fait que les concentrations varient peu au cours du cycle hydrologique, par rapport aux variations plus importantes du débit. Le facteur déterminant de la charge annuelle des rivières est de ce fait le volume d'eau écoulé. Ceci peut déjà permettre de penser que les variations interannuelles des flux de MES vont dépendre de celles de l'hydraulicité. Cet aspect sera développé plus loin sur

cet aspect. L'interprétation de la répartition spatiale sera basée sur le résultat de l'année moyenne 2003.

La répartition des flux spécifiques annuels sur les bassins étudiés (figure 8.15) suit le schéma déjà décrit au chapitre 6. On note des écarts assez importants entre les résultats des trois années observées sur le Mayo Tsanaga. L'année 2004 en particulier n'enregistre que $39,5 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$, un ordre de grandeur beaucoup plus faible, même comparé aux résultats antérieurs à cette étude. Toutefois, il est possible que ceci soit lié à la faible hydraulité de cette année. Le paragraphe 8, beaucoup plus consacré à la variabilité interannuelle de MES en fera plus de détail.

Globalement, les flux les plus faibles sont mesurés dans les rivières équatoriales, $8,4 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ dans le Ntem, $3,6 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ dans le Nyong. Ils sont plus élevés vers le nord, $32,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ dans le Lom, puis $277,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ dans le Mayo Tsanaga. Les régions côtières, aux mêmes latitudes, se distinguent par des charges plus élevées que les régions intérieures.

Le schéma climatologique du Cameroun, marqué par une diminution de la pluie vers le nord, avec cependant des distorsions dues à l'ouverture du pays à l'océan et au relief, paraît s'observer également sur les MES. La différence entre les flux de MES dans la Kienke (climat équatorial côtier) et dans le Mungo (climat tropical très humide) est très importante, alors que les bassins versants ont des superficies pas très différentes, qu'ils sont sous couvert forestier. Les facteurs qui les différencient, pouvant influencer les processus d'érosion, sont les totaux de pluies annuelles, le relief et la fragilité des sols. Cette répartition des flux de MES suit aussi celle des débits spécifiques (débit par unité de surface), qui garde encore la même configuration présentée par Olivry (1986).

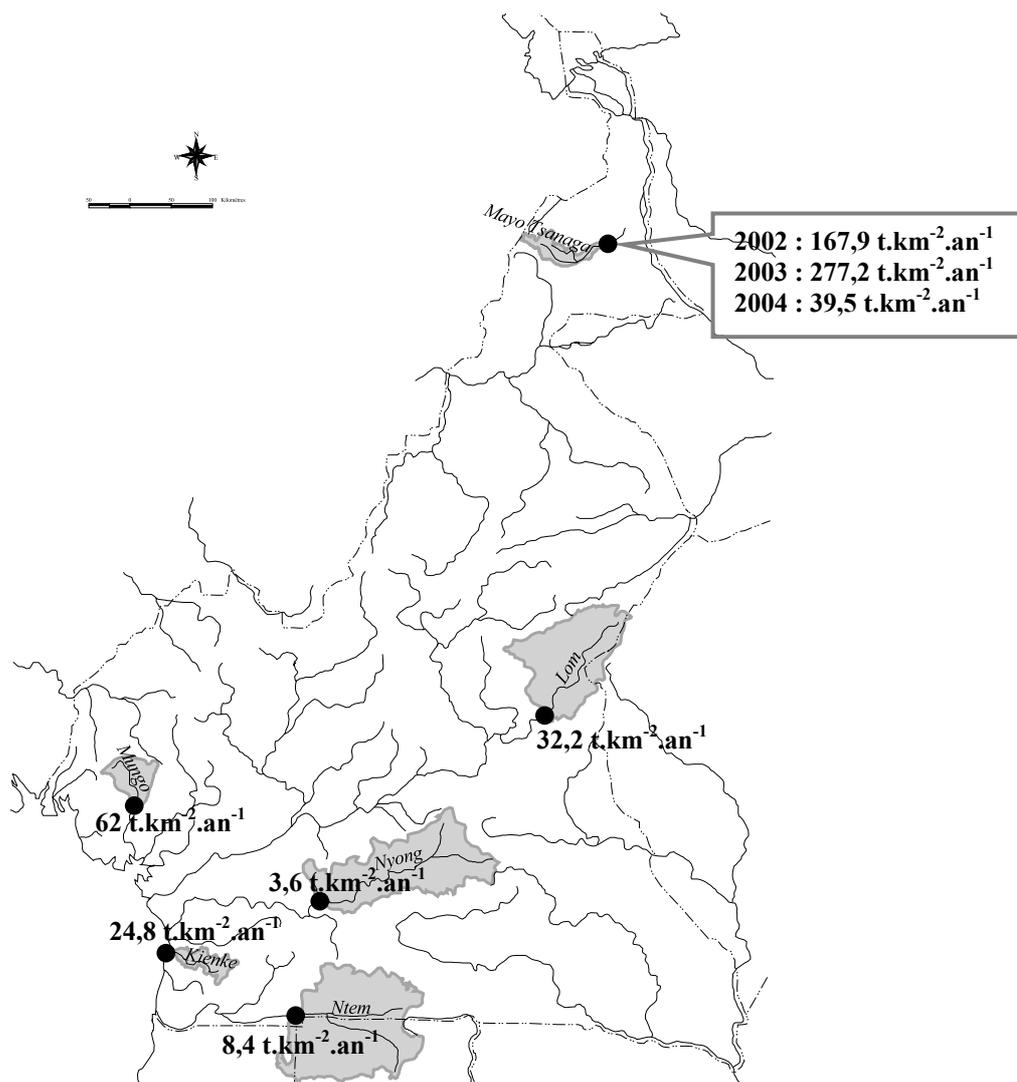


Figure 8.15 : Flux spécifiques calculés sur les bassins versants étudiés ; les valeurs sur le Lom, Mungo, Nyong, Kienke et Ntem correspondent à l'année hydrologique 2003/2004.

Les moyennes annuelles des concentrations, calculées à partir du rapport entre flux de MES et module annuel (figure 8.16) indiquent la même répartition. Les eaux du Mayo Tsanaga sont beaucoup plus turbides (2211,7 mg.l⁻¹). On retrouve des concentrations plus basses dans le Lom (66,5 mg.l⁻¹). Les plus faibles valeurs sont obtenues dans le Nyong et le Ntem (12,3 mg.l⁻¹ et 13,6 mg.l⁻¹). On retrouve de nouveau des turbidités plus élevées sur les côtes, 17,5 mg.l⁻¹ dans la Kienke et 41 mg.l⁻¹ dans le Mungo.

Toutefois, pour bien interpréter cette répartition spatiale, il faudrait, au-delà des facteurs environnementaux régionaux ou zonaux, tenir compte des facteurs physiques inhérents à chaque bassin versant.

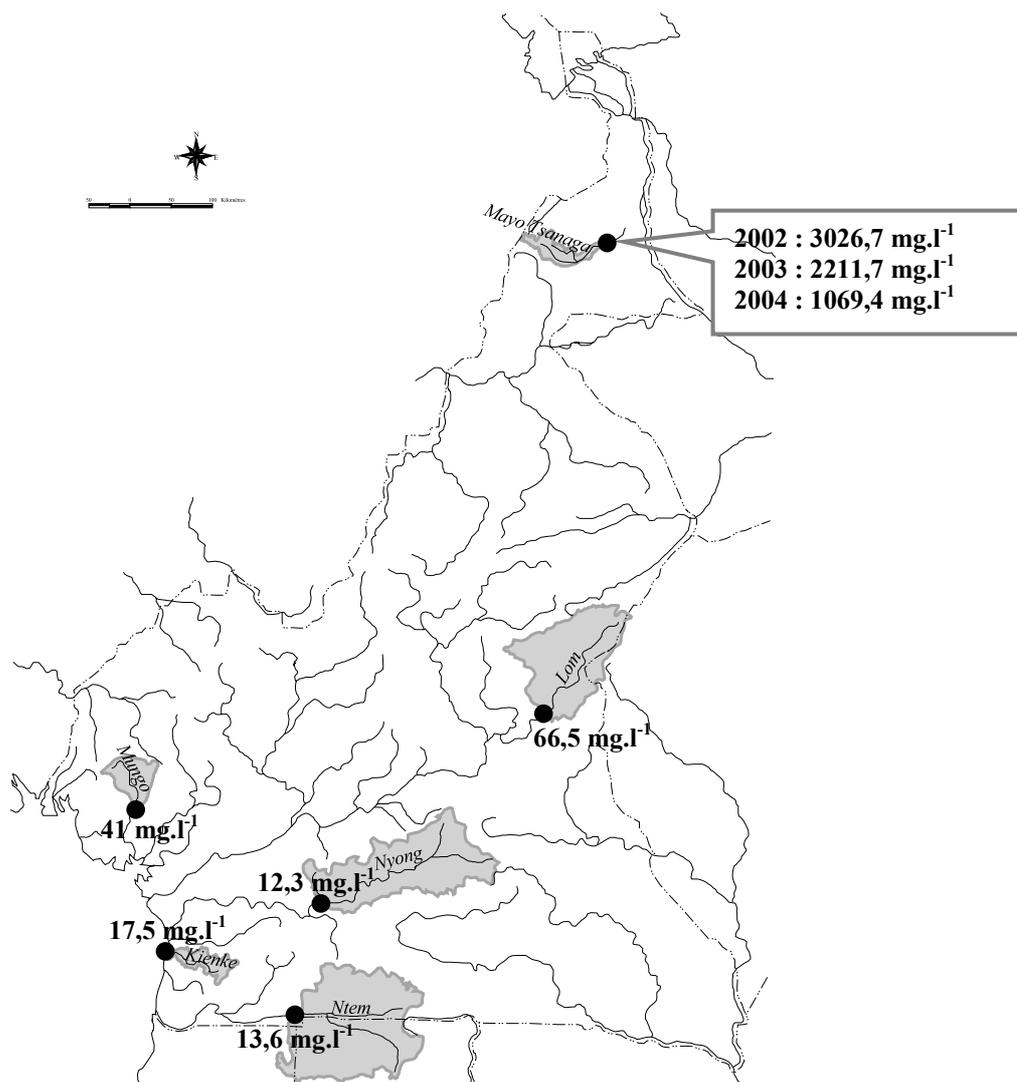


Figure 8.16 : Concentrations moyennes annuelles sur les bassins versants étudiés ; les valeurs sur le Lom, Mungo, Nyong, Kienke et Ntem correspondent à l'année hydrologique 2003/2004.

7.2. Bilan de production totale des sédiments sur le territoire camerounais

Les mesures effectuées de 2002 à 2004, précisent les résultats sur les flux de matière en suspension dans certaines régions du Cameroun où les travaux antérieurs étaient basés sur des mesures sommaires. Elles complètent le réseau d'observations pour certaines zones qui n'avaient pas encore été étudiées. Dès lors une assez importante quantité de données sur les MES est disponible sur le territoire camerounais, et suffisamment bien répartie dans les différentes unités climatiques.

Il peut alors être envisageable d'évaluer en moyenne pour une année, les quantités de MES transportées par chaque unité hydrographique et par la suite, d'en établir un bilan estimatif de la charge de matières en suspension évacuée sur le territoire camerounais. Cette opération est d'autant possible que, pour tous les grands bassins hydrographiques africains auxquels le pays appartient, les parties camerounaises se trouvent être en tête de bassin. Pour ce faire, nous avons considéré les grands systèmes hydrographiques tels que présentés dans les monographies du Cameroun et, du Nord vers le Sud nous distinguerons⁵ :

Le système du lac Tchad

Il est représenté au Cameroun par les Mayo de l'extrême-nord et le bassin versant du Logone occidental. Les transports de MES sont connus dans les Mayo depuis les études de Nouvelot, Olivry, Naah et cette étude. Le Logone occidental a été étudié à la station de Moundou entre 1969 et 1974 (Chouret, 1977), qui a trouvé un flux spécifique de l'ordre de $40 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ à la station de Moundou. En considérant un flux moyen de $210 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour les Mayo, on peut estimer à $4,85.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ les MES que l'ensemble des Mayo dirigent vers la plaine du Logone (Yaéré) et à $1,53.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ les MES évacués par le Logone occidental.

Le bassin de la Bénoué (fleuve Niger)

Les MES sont connues ici grâce aux travaux de Nouvelot, notamment à Lagdo et à Garoua. Le Faro n'a pas encore fait l'objet d'études de MES. Le milieu physique est semblable à celui de la Bénoué contrôlé à la station de Lagdo. Le flux spécifique de MES (en tonne par kilomètre carré) devrait alors être similaire au résultat obtenu à la station de Lagdo ($85 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$). L'ensemble des matières issues des résultats de mesures à la station de Garoua ($200 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et des estimations faites sur le Faro, donneraient $15,38.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ qui traversent la frontière nigériane. Il est important de noter ici qu'une partie de ces matières est susceptible d'être retenue dans le barrage de Lagdo (7,7 milliards de m^3).

⁵ Nous ne reviendrons plus sur les détails concernant les années des études et les références des publications, toutes ces informations ayant été données dans le tableau 6.2

Dans le bassin inférieur de la Bénoué au Cameroun, Tanyileke a fait des mesures sur la Metchum, avec un flux spécifique de $118 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Le Donga, bassin versant voisin coté nord présente à peu près les mêmes caractéristiques physiques que le bassin de la Metchum. Les rivières descendent en effet du flanc ouest de la ligne volcanique du Cameroun. On peut alors estimer à 2.10^6 t.an^{-1} les MES qu'elles transportent.

Le bassin de la Sanaga

C'est l'un des plus connus en MES sur le territoire camerounais, depuis les travaux de Nouvelot sur les parties amonts, du plateau de l'Adamaoua et hauts plateaux de l'ouest, jusqu'aux stations de Goura et Nachtigal. Puis ont suivi les études de Olivry, Sigha-Nkamdjou et nos mesures actuelles sur le Lom. En considérant les flux spécifiques de $85 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le bassin versant du Mbam à Goura et $28 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le reste du bassin versant, on peut trouver que la Sanaga déverse dans l'océan atlantique $6,1. 10^6 \text{ t.an}^{-1}$.

Le Système du Congo

Les affluents camerounais du fleuve Congo sont principalement la Ngoko, formée du Nja et de la Boumba, et son voisin du nord, la Kadéï. Le flux spécifique en MES dans la Ngoko ($12 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est connu grâce aux travaux de Sigha-Nkamdjou. La Kadéï n'a pas fait l'objet de mesures de MES. Le bassin de cette rivière est plus développé en milieu de savane, sur l'extrémité sud-Est de l'Adamaoua. Le flux spécifique de MES pourrait alors être plus proche des résultats obtenus sur le Lom ($32,2 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) que de ceux obtenus sur la Ngoko, bassin beaucoup plus sous couvert forestier. Les tributaires camerounais du Congo transporteraient $0,94.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ pour la Kadéï et $0,90.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ pour la Ngoko.

Les fleuves côtiers au sud de la Sanaga

Les plus importants sont le Nyong et le Ntem. Les données de MES sont disponibles sur ces deux bassins depuis les travaux de Boum sur le Ntem, Ndam-Ngoupayou sur le Nyong, et les

toutes récentes mesures dans le cadre de notre étude. Les flux spécifiques sont de 9 et 5 t.km⁻².an⁻¹, respectivement pour le Ntem et le Nyong. En ce qui concerne les trois plus petites rivières drainant juste le rebord du plateau Centre-Sud camerounais sous couvert forestier, nous disposons de nos résultats sur la Kienké (24,8 t.km⁻².an⁻¹). On peut alors évaluer à 0,64.10⁶ t.an⁻¹ de MES drainées vers l'océan sur la côte sud, soit 0,25.10⁶ t.an⁻¹ par le Ntem, 0,12.10⁶ t.an⁻¹ par le Nyong et 0,27.10⁶ t.an⁻¹ par la Kienke, la Lobe et la Lekounje.

Les fleuves côtiers à l'Ouest de la Sanaga

Ces fleuves drainent un ensemble de milieux ayant des physionomies beaucoup plus hétérogènes que les autres régions du pays. Les pentes des reliefs sont extrêmement diversifiées. Le Wouri, le Mungo et les petites rivières de la côte drainent des sols jeunes, issus des produits volcaniques, sur des pentes parfois très fortes. A l'inverse, la Cross river coule dans la large plaine de Mamfe, tournée vers le Nigéria, où le relief est plus doux. L'occupation de l'espace y est des plus diversifiées, avec le développement de grandes plantations industrielles. Il est alors plus délicat de faire une extrapolation spatiale à partir des résultats de transport de matières, même sur des bassins voisins. Toutefois, si nous accordons à la partie drainée par le Wouri, le Mungo et les torrents côtiers la valeur du flux spécifique mesuré sur le Mungo à Mundame (62 t.km⁻².an⁻¹), on peut vraisemblablement admettre le chiffre de 40 t.km⁻².an⁻¹ pour la plaine de Mamfe. Ce qui donnerait vraisemblablement 0,57. t.an⁻¹ de MES transportées par le Cross River et 1,46 t.an⁻¹ pour les rivières de la côte Nord.

La figure 8.17 présente un schéma du bilan des flux de sédiments aux exutoires des fleuves camerounais, sur la base des données disponibles de nos jours. L'importance de la concentration en sédiments trouvée le long de leur cours y est mentionnée. En additionnant les flux pour les différents bassins, on estime que le flux de MES total provenant du territoire Camerounais (475 000 km²) est d'environ 34,36. 10⁶ t.an⁻¹.

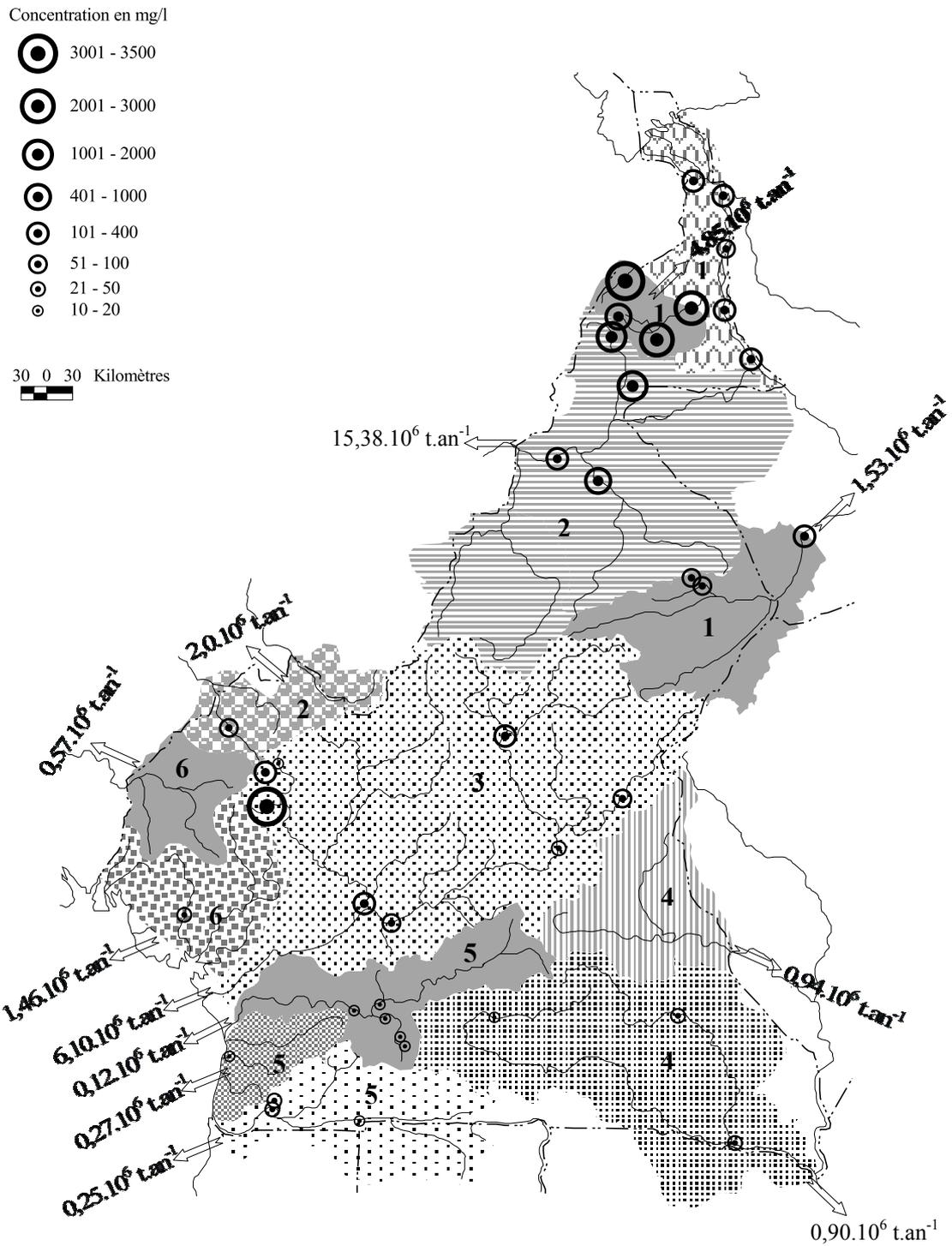


Figure 8.17 : Bilan des quantités de MES exportées annuellement sur le territoire camerounais : 1 - Système du lac Tchad ; 2 - Bassin de la Bénoué ; 3 - Système de la Sanaga ; 4 - Système du Congo ; 5 - Fleuves côtiers au sud de la Sanaga ; 6 - Fleuves côtiers à l'Ouest de la Sanaga.

A titre indicatif cette valeur est comparée à d'autres résultats obtenus ailleurs. Les superficies ne sont pas de même ordre de grandeur, mais nous rappelons que le bassin de l'Amazone ($6,1 \cdot 10^6$ km²) apporte annuellement $810 \cdot 10^6$ tonnes de sédiments dans l'océan atlantique (Guyot *et al.*, 2005). Il sort du territoire brésilien ($8,51 \cdot 10^6$ km²), couvert presque à moitié par le bassin de l'Amazone, $610 \cdot 10^6$ tonnes par an (Lima *et al.*, 2005). Le bassin du fleuve Congo tout près de nous ($3,7 \cdot 10^6$ km²) apporte à l'océan atlantique $22,8 \cdot 10^6$ tonnes de sédiments par an (Laraque *et al.*, 1995).

Bien entendu, les estimations que nous avons faites des transports de matières à l'échelle du Cameroun sont basées sur des données dont nous avons présenté certaines lacunes au chapitre 6 : discontinuités spatiales et temporaires, estimations parfois sommaires, Ces résultats néanmoins sont une bonne base de connaissances pour des futurs travaux sur les transports de matières, et aussi pour d'autres sciences de la terre qui s'intéressent à l'évolution des continents, telles que la géomorphologie, la sédimentologie etc.

Ces valeurs sont par ailleurs susceptibles de varier parfois de façon importante d'une année à une autre, compte tenu des conditions pluviométriques (répartition et totaux des pluies), hydrologiques (débit d'écoulement) et environnementaux (destruction des milieux naturels).

8. VARIATIONS INTERANNUELLES DES MATIERES EN SUSPENSION

L'analyse des variations interannuelles des transports de MES (concentrations et flux), en relation avec celles des écoulements, concernera le Mayo Tsanaga et le Ntem, sur lesquels des données sont disponibles pour certaines années antérieures. Quelques comparaisons, plus limitées dans le temps seront faites sur le Lom.

Les conclusions de nos analyses sur les débits et les régimes d'écoulement depuis le début des observations et au cours de la période d'étude montrent que cette période s'inscrit dans un contexte de sécheresse observée depuis environ 35 années. Les variations interannuelles des MES seront alors appréciées dans ce contexte hydro-climatologique.

8.1. Le bassin versant du Mayo Tsanaga

Les variations des MES au cours des trois années d'étude sont présentées, avant de les comparer aux résultats antérieurs.

8.1.1. Les variations des MES au cours des années 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Mayo Tsanaga

Les variations interannuelles des flux et des concentrations sont très importantes au cours des années 2002, 2003 et 2004. Celles des flux correspondent aux variations des débits au cours des trois années ; 167,9, 277,2 et 39,5 t.km⁻².an⁻¹ de 2002 à 2004, pour des modules respectifs de 2,7, 6,1 et 1,8 m³.s⁻¹.

En 2004 plus particulièrement, nous avons obtenu à la station de Bogo un flux annuel très faible par rapport à la moyenne de 210 t.km⁻².an⁻¹ antérieurement considérée.

Un premier constat c'est que ce flux correspond à un module annuel aussi très faible, proche du minimum de la série (1,2 m³.s⁻¹) enregistré en 1984 à la même station. Mais il n'a pas été effectué de mesures de MES à la station cette année là pour comparer.

Le deuxième constat c'est que la pluviométrie en 2004 (690,5 mm) est voisine de celle de 1984 (639,8 mm). Mais elle est légèrement supérieure à la pluviométrie de l'année 2002 (615,9 mm), au cours de laquelle nous avons mesuré 167,9 t.km⁻².an⁻¹.

Olivry *et al.* (1974) évoquaient déjà les conséquences d'un démarrage tardif des pluies et leur répartition au cours de la saison sur les transports de MES sur le bassin versant du Mayo Tsanaga.

Les écoulements des années 2002 et 2004 ont commencé tardivement, respectivement le 26 juillet 2002 et le 20 juillet 2004. La différence entre les deux années semble être la répartition des averses et leur intensité. Ceci se traduit assez bien sur les écoulements, comme on peut le constater sur les hydrogrammes des débits instantanés (figure 7.8). Bien que les écoulements débutent en fin du mois de juillet, l'année 2002 enregistre d'abord les plus grosses crues en

début de saison. Au contraire en 2004, les écoulements commencent par de toutes petites crues qui durent près d'un mois (jusqu'en fin août). Les petites pluies dites « agricoles » génératrices des ces petites crues, favorisent plutôt le développement de la végétation, dont on connaît le rôle protecteur contre l'érosion.

Il est possible que de faibles intensités de pluies, accompagnées d'un déficit d'écoulement important justifient le faible flux obtenu en 2004. D'autre part, le rôle érosif de ces petites pluies moins intenses se limite très souvent à des mobilisations à petites échelles (parcelles et petits bassins versants). Ceci peut être corroboré par des travaux effectués en 1985 sur le bassin versant du Mayo Boula, voisin du Mayo Tsanaga. Des mesures à différentes échelles d'espace indiquent un transport de MES déjà suffisamment important ($17 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$) au mois de mai, sur un petit bassin versant de $18,1 \text{ km}^2$ (Thébé, 1987), pourtant les écoulements n'atteignent la station principale (Dargala, 1517 km^2) qu'en fin juin (Naah, 1990).

Le faible taux de transport de matière en suspension obtenu sur le bassin versant du Mayo Tsanaga en 2004, lié probablement à des petites pluies moins intenses dites « agricoles » en début de saison, et à un écoulement tout aussi faible, tend à montrer que les flux de matières prises isolément, ne constituent pas un facteur suffisant à une description de la variation spatiale de transport de matières dans les cours d'eau. Il est nécessaire à chaque fois, d'y joindre les débits et même les pluies qui les ont générés, pour une meilleure interprétation des variations spatio-temporelles des processus d'érosion et de transport. De ce fait, une des causes des irrégularités signalées sur les résultats des flux de matières peut aussi être les variations de débits.

8.1.2. Comparaison des transports de MES au cours des années d'étude avec les résultats des travaux antérieurs

A l'échelle interannuelle, les résultats des huit années de mesures de MES à la station de Bogo entre 1968 et 2004 sont présentés dans le tableau 8.22. L'année 2004 se décale par son flux très faible ; mais qui correspond à un module également faible. Il est aussi remarquable que depuis 1973, les mesures sont réalisées au cours des années de faible hydraulicité, excepté l'année 2003 qui enregistre un débit moyen, mais n'atteignant pas le niveau des années 1968 et 1969.

Tableau 8.22 : Résultats de huit années de mesures de MES sur le Mayo Tsanaga à Bogo.

	Débits	Flux	Concentration moyenne	Flux spécifique
	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\times 10^3$ tonnes)	($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	Flux sp. ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
1968	8,6	293,2	1038	191,0
1969	8,8	328,9	1138	214,3
1973	5,3	271,3	1590	176,7
1985	5,2	320,5	1876	208,8
1986	5	250,4	1595	163,1
2002	2,7	257,7	3027	167,9
2003	6,1	425,5	2212	277,2
2004	1,8	60,7	1070	39,5

Sur les figures 8.18 et 8.19, nous avons porté les concentrations moyennes annuelles de MES et les flux annuels comparés aux modules annuels. Les traits représentent les tendances de chaque série de données. En dépit des irrégularités interannuelles des écoulements, très caractéristiques de la récente période sèche, les débits ont baissé pour les années de mesures. Ils passent des valeurs moyennes de $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit un déficit d'écoulement de plus de 50 %. Pourtant les concentrations évoluent de façon inverse (figures 8.18). D'une moyenne de $1050 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en 1968 et 1969, elles passent pratiquement à $2500 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ entre 2002 et 2004, excepté l'année 2004 dont on a évoqué la particularité plus haut.

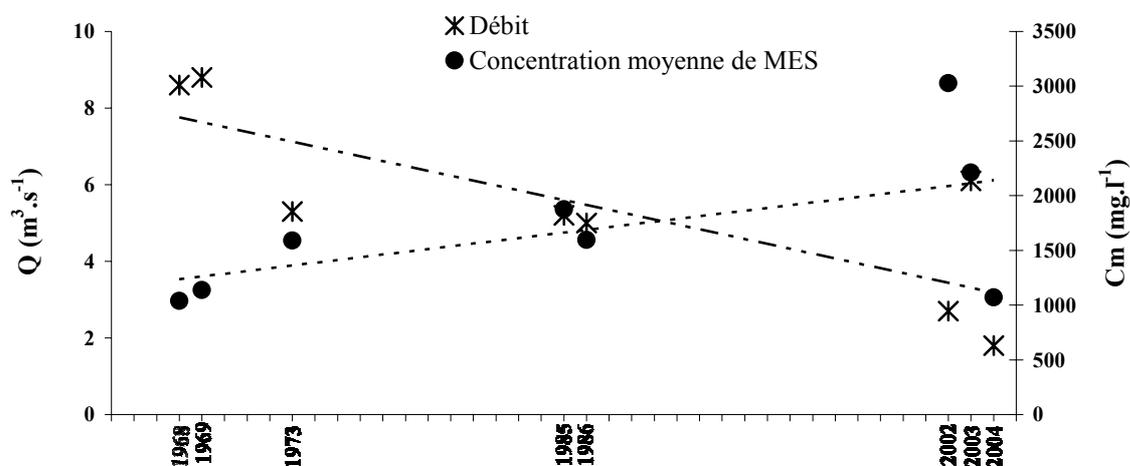


Figure 8.18 : Evolution des débits et des concentrations moyens annuels sur le bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo.

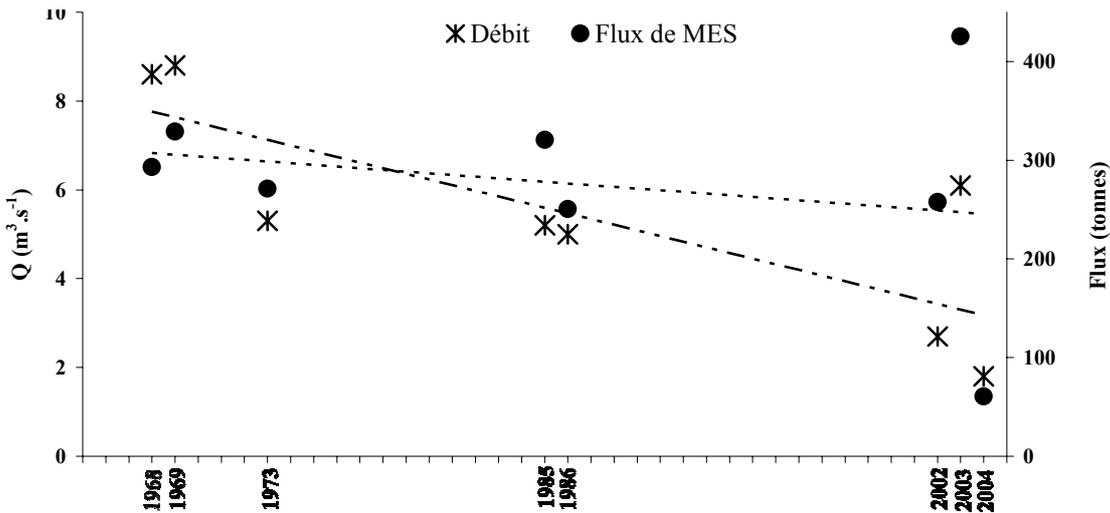


Figure 8.19 : Evolution des débits et des flux de MES annuels sur le bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo.

Par ailleurs, les flux de matières annuelles (en tonnes) ne suivent pas la tendance des concentrations (figure 8.19) et sont restés globalement constants, combinaison de concentrations élevées avec des débits faibles. A des modules plus faibles pendant la période sèche correspondent des flux qui sont équivalents, et parfois supérieurs à ce qu'on a mesuré en période humide. Ainsi l'année 2002, avec un module de $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, de moitié inférieur à celui de 1986 ($5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), a transporté la même quantité de MES (environ $250 \cdot 10^3$ tonnes). En 2003, le module de $6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ correspond à un flux de MES de $425 \cdot 10^3$. Ce chiffre est largement supérieur à la moyenne de $300 \cdot 10^3$ tonnes correspondant à 1968 et 1969, qui ont un module plus élevé ($8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

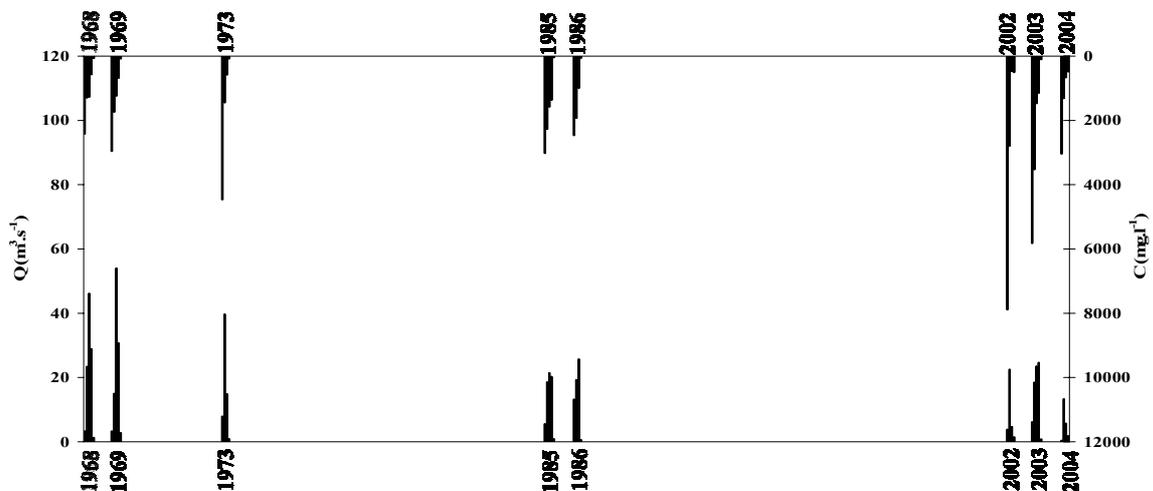


Figure 8.20 : Evolution des débits et des concentrations moyennes mensuelles sur le bassin versant de Mayo Tsanaga à Bogo.

Les tendances sont les mêmes pour les débits et les concentrations mensuels (figure 8.20). Il semble que les concentrations des mois de début de saison d'écoulements (juin ou juillet) ont augmenté de façon plus importante que les autres mois (figure 8.20). Ceci rejoint les résultats de Olivry *et al.* (1974) à la même station, qui constataient pour la campagne 1973 (année sèche) que les concentrations moyennes journalières de début de saison étaient beaucoup plus élevées que pour les années humides. Tout comme les valeurs annuelles, les flux mensuels en MES ont gardé les mêmes ordres de grandeurs (Figure 8.21).

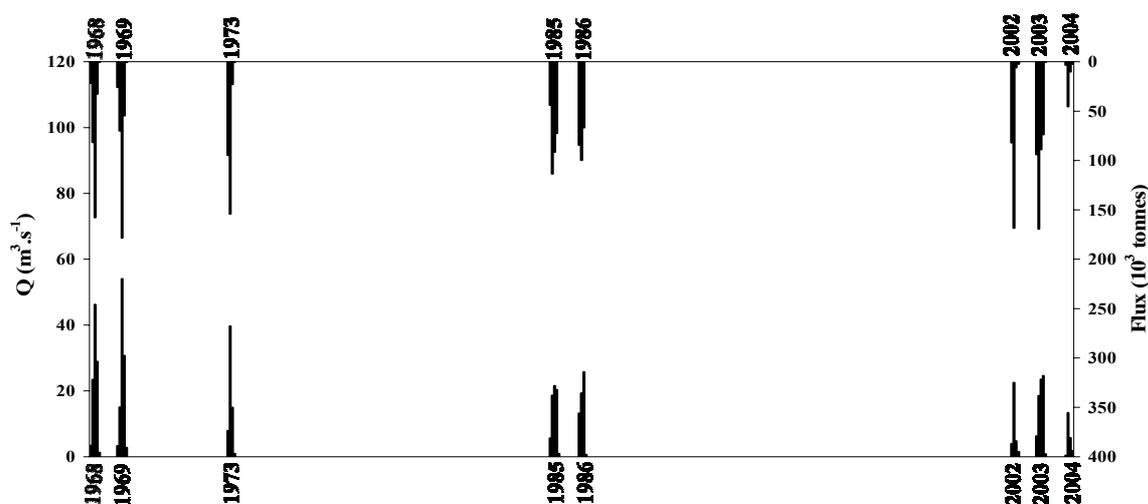


Figure 8.21 : Evolution des débits et des flux de MES mensuels sur le bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo.

Les observations ci-dessus renseignent sur les modifications environnementales sur le bassin versant de Mayo Tsanaga, dans le contexte actuel de sécheresse, et soulignent une dégradation plus importante du milieu naturel, avec des répercussions sur les transports de matières en suspension. L'augmentation des concentrations indique une mise à disposition sur les versants des quantités plus élevées de MES, suite probablement à la réduction du couvert végétal naturel et à une pression anthropique accrue sur des sols devenus plus fragiles. Mais les quantités de MES transportées restent à peu près les mêmes que celles d'avant la sécheresse, du fait de la faiblesse des écoulements. Pour des débits presque moyens, les quantités de MES transportées sont très élevées. On pourrait donc s'attendre au cours des années de forte hydraulicité, à des flux de MES atteignant le double des valeurs mesurées par le passé, soit environ $400 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

8.2. Le bassin versant du Ntem

Le tableau 8.23 présente les résultats à l'échelle annuelle des trois années de mesures de MES à la station de Ngoazik. Il apparaît que les flux de matières transportées changent peu au cours des ces trois années, même en 2003 où le module est bien plus élevé. La concentration moyenne annuelle obtenue est de près de 40 % plus faible. Ca pourrait indiquer que les quantités de matières à exporter restent relativement la même tous les ans. Des débits plus élevés ont alors un effet de dilution qui provoque des concentrations plus faibles.

Tableau 8.23 : Résultats de trois années de mesures de MES sur le Ntem à Ngoazik.

	Q (m ³ .s ⁻¹)	Flux (x 10 ³ tonnes)	Cm (mg.l ⁻¹)	Flux sp. (t.km ⁻²)
1981	236	183,5	24,6	10,1
1982	262	178	21,5	9,8
2003	355,1	151,8	13,5	8,4

La comparaison des débits mensuels avec les concentrations (figure 8.22) et avec les flux (figure 8.23) ne montre pas de changements remarquables sur les transports de MES mensuels, entre les années 1981, 1982, 2002 à 2004.

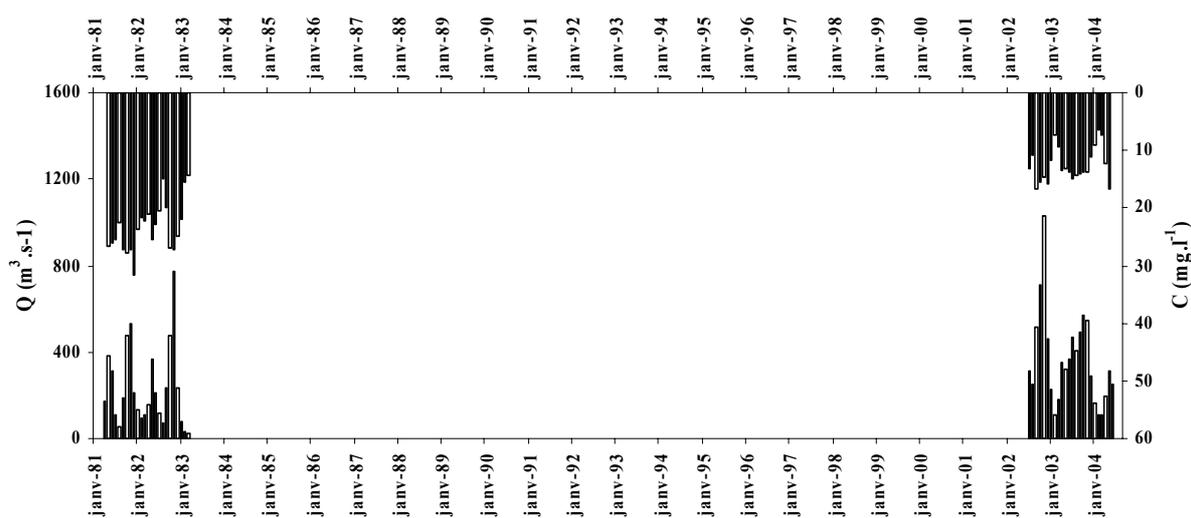


Figure 8.22 : Comparaison des débits et des concentrations mensuels sur le Ntem à Ngoazik.

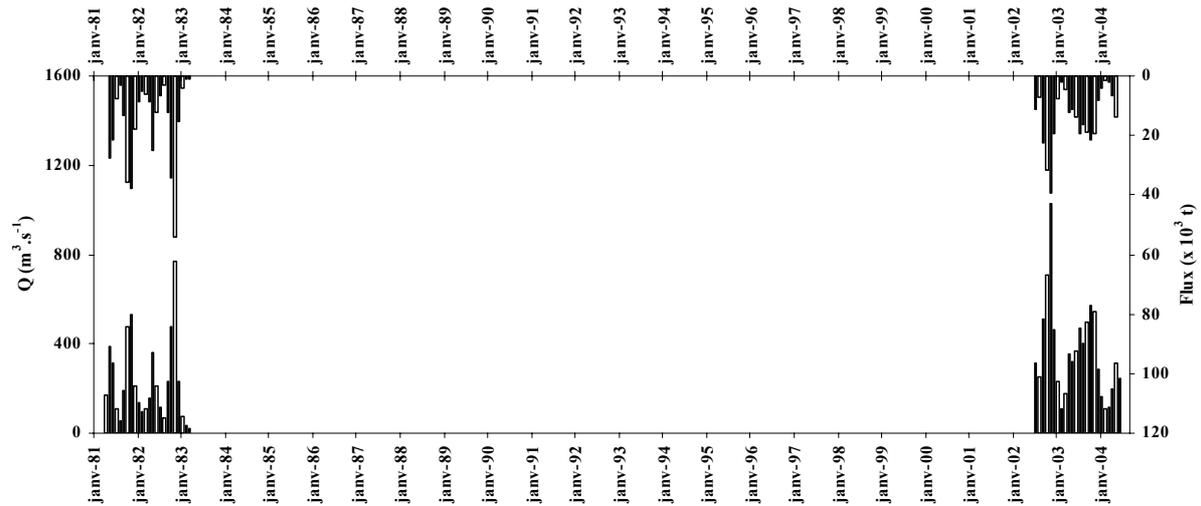


Figure 8.23 : Comparaison des débits et des flux mensuels sur le Ntem à Ngoazik.

Les trois seules années de mesures peuvent être insuffisantes pour déceler une variation des transports de matières dans le contexte déficitaire actuel dans le bassin versant du Ntem. Même les comparaisons mois par mois ne semblent pas indiquer une évolution significative des flux de MES sur ce bassin versant. Dans tous les cas, les nombreuses et diverses formes de destructions des forêts (coupes industrielles, créations de plantations, infrastructures routières etc.), en dépit de leurs conséquences désastreuses sur les structures forestières et l'environnement, n'auraient pas encore de répercussions sur les transports de MES, du moins à l'échelle du grand bassin versant.

CONCLUSION

Les calculs des concentrations dans les sections des rivières et des charges de matières transportées, sont adjoints aux estimations de la précision sur ces mêmes calculs ; en fonction d'une part du nombre de points dans la section et, d'autre part de la méthode de calcul et de la fréquence des prélèvements dans le temps. On sait depuis les travaux de Nouvelot (1972c) que ces précisions dépendent en partie des erreurs de mesures sur les concentrations et les débits. Les résultats corroborent ceux de Probst *et al.* (1992), et accordent moins d'importance au changement de la méthode de calcul des flux, notamment en ce qui concerne les grands fleuves. Ils attribuent de grandes conséquences à la variation de la fréquence de prélèvements,

en ce sens qu'elle peut entraîner des écarts supérieurs à 30 %. Il est de ce fait nécessaire d'ajuster les fréquences de prélèvements aux régimes hydrologiques, de façon à suivre au mieux les variations de débits. Egalement, la répartition des points de prélèvements lors d'un jaugeage de débit solide devrait se faire de manière à explorer tous les champs de concentrations dans la section du fleuve. Des erreurs dues à une répartition non adéquate des points de prélèvements peuvent dépasser 50 % dans les fleuves que nous avons étudiés.

La répartition spatiale des concentrations moyennes et des flux spécifiques sur les six bassins versants étudiés suit dans ses grandes lignes le schéma décrit dans les synthèses antérieures (Nouvelot, 1972a ; Olivry, 1977 ; Liéno *et al.*, 2005a). Les concentrations et les flux spécifiques augmentent dans les zones de fortes pentes et de densité de populations élevées et, varient inversement par rapport au couvert végétal.

On trouve dans cette étude un flux spécifique de $24,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la zone équatoriale côtière (bassin de la Kienke) et $62 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la zone tropicale très humide (bassin du Mungo), correspondant à des concentrations moyennes respectives de $17,5 \text{ mg.l}^{-1}$ et 41 mg.l^{-1} . Ainsi, le réseau d'observations de MES couvre globalement l'ensemble des unités hydroclimatiques, ce qui permet d'estimer à $34,36 \cdot 10^6$ tonnes la quantité de MES transportée annuellement hors du territoire camerounais.

Les comparaisons des résultats de cette étude avec les travaux antérieurs indiquent une augmentation des concentrations dans le bassin versant de Mayo Tsanaga, très importante pour les premiers mois de la saison des pluies. Les flux de MES restent à peu près comparables, du fait de la faiblesse des écoulements. La charge transportée est nettement plus élevée que celles des années antérieures, pour une hydraulicité plutôt moyenne, ce qui souligne une plus grande mobilisation des sédiments sur les versants, suite probablement à une augmentation de l'occupation du sol (réduction du couvert végétal naturel et pression anthropique plus intense). On pourrait s'attendre pour des débits équivalents à ceux de la période humide, à des flux spécifiques atteignant $400 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Sur le Ntem (en milieu équatorial), nos résultats donnent des ordres de grandeur de concentrations et de flux comparables aux mesures anciennes. Ceci supposerait que les modifications des régimes hydro-pluviométriques et les destructions des forêts n'ont pas encore de conséquences identifiables sur les transports de MES, du moins à l'échelle du grand bassin versant.

CONCLUSION GENERALE

Les dernières études en hydrologie à l'échelle du territoire camerounais datent de la fin des années 1970. Olivry a présenté une synthèse, à partir de 62 stations de mesures, dans son ouvrage de référence *Fleuves et rivières du Cameroun* (Olivry, 1986). Depuis, le CRH de Yaoundé a mené une activité minimale autour de quelques stations principales et des collaborations dans le cadre des programmes internationaux et bilatéraux, au cours desquelles d'autres travaux, plus localisés ont été menés (Thebe, 1987 ; Naah, 1990 ; Sigha-Nkamdjou, 1994 ; Ndam-Goupayou, 1997). Une actualisation des données de quelques stations pluviométriques et hydrométriques a fait état des variations durant les cinquante dernières années et des perspectives d'évolution (Sighomnou, 2004).

Le projet de cette thèse est développé dans le cadre du Programme VAHYNE de HydroSciences Montpellier et des activités des thèmes « Variabilité des ressources en eau » et « Dynamique des flux de matières » du projet FRIEND AOC. Il s'inscrit dans la suite des travaux en cours en Afrique de l'Ouest, visant à faire un bilan de la modification des régimes hydrologiques sur des bassins versants de taille petite à moyenne, avec leur implication sur les transports de matières, notamment en suspension.

Un rappel des résultats des travaux sur la variabilité des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et du Centre permet de se rendre compte de la persistance de la sécheresse qui sévit depuis environ 35 années. Elle est caractéristique par son intensité, sa durée et son extension, mais aussi et surtout par son hétérogénéité dans l'espace. La considération de l'impact des activités anthropiques rend les conséquences de l'évolution du climat plus complexes et souligne la nécessité des études à des échelles plus réduites. Le Cameroun présente globalement sur son territoire les principales unités de climat et de végétation des régions d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Son exposition au flux de mousson et son relief accentuent cette diversité climatique.

Il est alors possible, à partir d'un échantillon de bassins versants représentatifs, de montrer de quelle manière l'actuelle sécheresse a affecté chaque régime hydroclimatique. Ceci nous a permis de nous intéresser aux manifestations de la variabilité climatique en zone équatoriale, encore peu étudiée. De même, des mesures anciennes de matières en suspension, parfois avant la sécheresse, peuvent aider à analyser les répercussions de la sécheresse et de l'occupation des sols sur la qualité des transports solides par les rivières.

La variabilité climatique

Les informations pluviométriques et hydrométriques sont obtenues de plusieurs sources : CRH, IRD, CBLT, ABN, SIEREM, météorologie nationale, postes pluviométriques, monographies et recueils de données. Les données de débits n'ont pas pu être entièrement complétées à partir de 1988, malgré des tentatives de reconstitution, et les séries sont lacunaires à partir de cette année-là. L'étude pluviométrique couvre de ce fait la période 1950-2000 alors que l'étude des écoulements est limitée le plus souvent à la période 1950-1987.

Au travers de représentations graphiques, d'application de tests statistiques de détection de rupture et de tendance (corrélation sur le rang), et des calculs de déficits, l'analyse a porté, pour chaque bassin versant, sur des totaux pluviométriques moyens spatialisés par la méthode de Thiessen, et sur des débits et des coefficients d'écoulements, à différent pas de temps : mensuel, saisonnier et annuel.

La sécheresse qui sévit depuis environ 35 ans revêt un caractère très préoccupant dans les bassins tropicaux (Mayo Tsanaga, Lom et Mungo), où la baisse des pluies est tout aussi remarquable qu'en Afrique Occidentale. Elle entraîne une tendance à la diminution continue des ressources en eau, même au cours de la décennie 1990, où on observe une réduction des déficits pluviométriques. Les analyses sur le bassin versant du Mungo confirment l'importance des déficits dans cette région, où la relative abondance actuelle peut cacher un avenir inquiétant si les pluies continuent de diminuer. Les faibles déficits en valeurs relatives sont importants en valeurs absolues. A l'échelle mensuelle, les mois des saisons sèches enregistrent les déficits les plus importants, alors que les mois humides semblent ne pas être sensiblement touchés, sur la base des analyses statistiques. Il semble même que pendant des années globalement moyennes ou sèches, il ne soit pas exclu d'observer des événements journaliers, décennaires ou mensuels très exceptionnels (largement supérieurs aux valeurs de la période humide). On n'est donc pas à l'abri des catastrophes dues à des crues très importantes, bien que les valeurs annuelles suivent une tendance déficitaire.

Sur les bassins équatoriaux (Ntem, Nyong et Kienke), les effets de la sécheresse ne sont pas ressentis de la même façon à toutes les échelles de temps.

A l'échelle annuelle, la légère diminution des précipitations, beaucoup moins importante qu'en zone tropicale n'entraîne pas une tendance à la baisse continue des débits. Les phases aigües de la diminution des pluies, notamment celle des années 1980, se sont toutefois manifestées par un abaissement considérable des débits.

Les analyses des pluies et des modules aux échelles saisonnières et mensuelles, apportent des renseignements nouveaux à la compréhension de la variabilité climatique dans les régions forestières équatoriales d'Afrique. Au cours de la décennie 1970, un changement important semble être survenu dans le déroulement du profil saisonnier des précipitations en Afrique équatoriale, notamment centrale. Les précipitations de la « saison sèche » d'hiver ont diminué significativement et les précipitations de la « saison sèche » d'été ont augmenté, alors que les cumuls annuels n'ont pas statistiquement varié. Ces changements ont eu des répercussions sur le régime des cours d'eau, qui ont évolué vers une diminution des écoulements de la « saison des pluies » de printemps et une augmentation des écoulements de la « saison des pluies » d'automne. Ces variabilités montrent de grandes similitudes avec les résultats de Mahé *et al.* (1990) et Bricquet *et al.* (1997) sur certains fleuves gabonais et congolais, également en zone équatoriale.

Alors qu'en zone sahélienne, la décennie 1990 marque une légère reprise de la pluviométrie annuelle, toutefois toujours inférieure à la pluviométrie moyenne sur la période 1950-2000, (Paturel *et al.*, 2002, L'Hôte *et al.*, 2002, 2003), les modifications du régime pluviométrique saisonnier en milieu équatorial paraissent s'accroître encore : les écarts observés entre les totaux pluviométriques des saisons sèches d'hiver et d'été sont les plus élevés au cours de la décennie 1990.

L'abondance des précipitations et des écoulements en résultant dans les zones humides équatoriales masque cette variabilité des régimes. Pourtant, à long terme, elle est déterminante dans l'évolution floristique et faunistique des forêts équatoriales. Malgré la constance de leur couverture végétale, les forêts équatoriales pourront connaître de nombreuses disparitions et/ou mutations d'espèces du fait de la sélection et/ou de l'adaptation aux nouvelles conditions climatiques.

Il semble que ce phénomène atteigne les latitudes de Bafia et de Nanga Eboko à la bordure Nord du climat équatorial. Mais il est encore difficile de définir spatialement ses limites à

l'Est, où des études dans le bassin de l'Oubangui (Wesselink *et al.*, 1995) ont montré une variabilité semblable au domaine tropical humide. Pourtant il paraît plus généralisé dans la partie équatoriale littorale, où des analyses statistiques ont indiqué une rupture avec augmentation significative de module sur le bassin versant de la Lokoundje à Lolodorf, au nord de la Kienke (Servat *et al.*, 1998).

Les transports de matières en suspension

A l'instar des données de pluie et de débit, les résultats des mesures sur les transports de matières notamment en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun ont été rassemblés et gérés sous forme de base de données et gérés par un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), qui permettent un accès rapide et la possibilité d'y associer d'autres informations à caractères environnementaux. Ces mesures sont très souvent des résultats de jaugeages complets (prélèvements en plusieurs points de la section du cours d'eau) ou partiels (prélèvements en un ou plusieurs points représentatifs à la surface), à des périodicités variables. Elles permettent néanmoins de faire ressortir certaines caractéristiques spatiales des transports des matières en suspension.

Les concentrations journalières varient énormément au cours de la saison en zone tropicale sèche, passant de plus de 10000 mg.l⁻¹ en début de saison à 50 mg.l⁻¹ en fin de saison. Les variations sont beaucoup plus faibles en zones plus arrosées et à végétation dense, avec des valeurs comprises entre 50 et 150 mg.l⁻¹ en milieu tropical de montagne et entre 10 et 30 mg.l⁻¹ en milieu équatorial. A l'échelle mensuelle, on observe une rapide augmentation des concentrations en début de saison des pluies jusqu'à une valeur maximale, atteinte avant le maximum des débits, et plus ou moins stable suivant les régions climatiques.

L'analyse spatiale des transports en suspension fait ressortir une augmentation de la concentration moyenne annuelle vers les zones septentrionales. Les quantités de matières transportées ne semblent pas suivre une logique de répartition définie. Plusieurs facteurs tels que la végétation, la mise en culture des sols, la topographie locale et la répartition des pluies influencent simultanément la charge des cours d'eau. Ainsi, les mesures effectuées à l'exutoire des grands bassins ne reflètent qu'une partie de l'érosion locale des sols, car la

majeure partie des matériaux érodés se dépose en bas des pentes, dans les plaines alluviales et les lacs.

De nouvelles mesures sont effectuées entre 2002 et 2004, dans le but d'explicitier la répartition spatiale des transports de matières, de compléter le réseau de mesures aux climats équatorial côtier et tropical côtier, et d'analyser les effets des modifications du climat et/ou de l'occupation des sols sur la qualité des transports solides par les rivières. En définitive, des informations permettant de mettre en évidence les modifications de l'occupation des sols n'ont pas été disponibles, notamment sur les bassins versants sous couvert forestier. En zone tropicale sèche, quelques indices montrent une diminution du couvert végétal herbacé, avec augmentation des superficies des sols dégradés (Hardé).

Dans l'approche méthodologique, des estimations de la précision sur les résultats sont jointes aux calculs des concentrations dans les sections des rivières et des charges de matières transportées ; en fonction d'une part du nombre de points dans la section et, d'autre part de la méthode de calcul et de la fréquence des prélèvements dans le temps. Les résultats montrent la moindre importance d'un changement de la méthode de calcul des flux, notamment en ce qui concerne les grands fleuves. Les écarts considérables des résultats sont dus à la variation de la fréquence de prélèvements, en ce sens qu'elle peut entraîner des écarts supérieurs à 30 %. Il est de ce fait nécessaire d'ajuster les fréquences de prélèvements aux régimes hydrologiques, de façon à suivre au mieux les variations de débits. Egalement, la répartition des points de prélèvements lors d'un jaugeage de débit solide devrait se faire de manière à explorer tous les champs de concentrations dans la section du fleuve. Des erreurs dues à une répartition non adéquate des points de prélèvements peuvent dépasser 50 % dans les fleuves que nous avons étudiés.

Dans cette étude, les flux spécifiques sont de l'ordre de $24,8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la zone équatoriale côtière (bassin de la Kienke) et $62 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour la zone tropicale très humide (bassin du Mungo), ce qui correspond à des concentrations moyennes respectives de 17.5 mg.l^{-1} et 41 mg.l^{-1} . Ainsi, le réseau d'observations de MES couvre globalement l'ensemble des unités hydroclimatiques, ce qui permet d'estimer à $34.36 \cdot 10^6$ tonnes la quantité de MES transportée annuellement hors du territoire camerounais.

Les comparaisons de nos résultats avec les travaux antérieurs indiquent une augmentation des concentrations dans le bassin versant du Mayo Tsanaga, avec une réelle aggravation pour les premiers mois de la saison des pluies. Les flux de MES restent à peu près comparables, du fait de la faiblesse des écoulements. La charge transportée est nettement plus élevée que celles des années antérieures, pour une hydraulité plutôt moyenne. Ce qui souligne une plus grande mobilisation des sédiments sur les versants, suite à une réduction du couvert végétal naturel et à une pression anthropique plus intense. On pourrait s'attendre pour des débits équivalents à ceux de la période humide, à des flux spécifiques atteignant $400 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Sur le Ntem (en milieu équatorial), nos résultats donnent des ordres de grandeur de concentrations et de flux comparables aux mesures anciennes. Ceci supposerait que les modifications des régimes hydro-pluviométriques et les destructions des forêts n'ont pas encore de conséquences identifiables sur les transports de MES, du moins à l'échelle du grand bassin versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adejuwon, J.O., Balogun, E.E., Adejuwon, S.A. (1990) On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-saharian West-Africa, *Journal of climatology*, **10**, 839-848 p.
- Albergel J., 1986. Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne : Exemple du Burkina Faso. In : *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheres*, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai.
- Albergel, J., Valentin, C. (1986) Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien Kognere-Boulsa au Burkina Faso. *Colloque Nordeste-Sahel*. Uni. Paris III, 14p.
- Allen, P.B. (1979) Turbidimeter measurement of suspended sediment. U.S. Department of agriculture. ARR-S-4, 5 p.
- Anonyme (1978) Recensement 1976. Direction de la statistique nationale, Cameroun, Yaoundé.
- Anonyme (1990) Annuaire statistique de l'extrême-Nord, 1984-1988. Direction de la statistique nationale, Cameroun, Yaoundé.
- Anonyme (2003) Délégation de l'environnement et des forêts de l'Extrême-nord, rapport annuel 2002, Cameroun, Maroua.
- Arabi, M., Roose, E. (1989) Influence de quatre systèmes de production en région méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bulletin réseau érosion* **9**, 39-51, Orstom
- Ardoin, S., Lubès-Niel, E., Servat, E., Dezetter, A., Boyer J.F. (2003) analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem W., Leduc C. & Shakeel A.), 223-228. IAHS Publ. 278.
- Aubreville, A. (1959) Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale, Paris, Larousse.
- Balland, P. (1983) Méthodologie de quantification des flux de nutriments en rivières. In : *Dissolved loads of rivers and surface water quantity/quality relationships. Proceedings of a symposium held during the XVIII Assembly of the IUGG at Hamburg, August 1983* (ed. B. W. Webb), 333-345. IAHS Publ. 141.

- Beauvillain, A. 1995. Tableau de la pluviométrie dans les bassins du Tchad et de la Bénoué, de la création des stations à décembre 1994. *Travaux et documents scientifiques du Tchad. Document de recherche* **3**.
- Bep, B., Zahonero, P., Boli, Z., Roose, E. (1996) Evolution des états de surface et influence sur le ruissellement et l'érosion des sols ferrugineux tropicaux sableux du Nord Cameroun soumis à diverses techniques culturales. *Bulletin réseau érosion*. **16**, 59-77.
- Bessoles, B. (1969) Synthèse simplifiée des connaissances sur la Géologie du Cameroun. Bulletin de la Direction des Mines et de la Géologie, n°5, 218p.
- Bichara, D., Safi, A., Schneider, S. (1989) La précarité ou même l'absence d'alimentation de la nappe phréatique en zone nord-sahélienne du Tchad. Résultats d'un quart de siècle de surveillance piézométrique. *C. R. Acad. Sci. Paris* 493-496, t. 309, série 2.
- Bigot, S. (1997) Les précipitations et la convection profonde en Afrique centrale : cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation. Thèse Université de Bourgogne, 282 p.
- Bigot, S., Maron, V., Melice, J.L., Servat, E, Paturel, J.E. (1998) Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Contry. Proceeding of Abidjan'98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by E. Servat, D. Hugues, J. M. Fritsch, M. Hulme), 71-78. AISH Publ. 252.
- Billon, B. (1968) Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). *Cahiers Orstom série Hydrologie* **5(2)**, 3-13.
- Boeglin, J.L., Probst, J.L. (1996) Transports fluviaux des matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant en région tropicale: Le bassin amont du Niger au cours de la période 1990-1993. In : *Sci. Géol., Bull.*, **49**, 1-4, 25- 45.
- Boeglin, J.L., Ndam, J.R., and Braun, J.J. (2003) Composition of the different reservoir waters in a tropical humid area: example of the Nsimi catchment (Southern Cameroon). *J. of African Earth Sciences* **37**, 103–110
- Bolline, A. (1982) Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Université de Liège, 356 p.
- Bordas, M.P., Lanna, A.E., Semmelmann, F.R., (1988) Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires. In :

- Sediment Budget. Proceedings of a symposium held at Porto Alegre, December 1988* (ed. by M.P. Bordas & D.E. Walling), 359-368. AISH Publ. 174.
- Boum, J.P., Sigha-Nkamdjou, L., Ayissi G., Nwalal, J. (1983) Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Menve'ele. Rapport de synthèse, campagnes 1980/1983. Dgrst/Irgm, Yaoundé, 96 p.
- Boutrais, J. (1973) La colonisation des plaines par les montagnards au nord du Cameroun (Monts Mandara). *Travaux et Documents Orstom* **24**, Paris.
- Braun, J.J., Ndam, J.R., Viers, J., Dupré, B., Bedimo Bedimo, J.P., Boeglin, J.L., Robain, H., Nyeck, B., Freydier, R., Sigha Nkamdjou L., Ruiller, J., Muller, J.P. (2005) Present weathering rates in a humid tropical watershed: Nsimi, South Cameroon. *Geoch et Cosm Acta* 69, (2), 357–387.
- Bricquet, J.P., Mahé, G., Bamba, F. (1995) Changements climatiques et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier* (ed. by P. Chevallier et B. Pouyaud), 113-124. IAHS Publ. 238.
- Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M., Olivry, J.-C. (1997a) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des sciences de l'eau* **3**, 321-337.
- Bricquet, J.P., Mahe, G., Bamba, F., Diarra, M., Mahieux, A., Des Tureaux, T., Orange, D., Picouet, C., Olivry, J.-C. (1997b) Erosion et transport particulaire par le Niger: du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observation) In : *FRIEND'97 -Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management. Proceedings of the third FRIEND conference held at Postojna, Slovenia, September–October 1997* (ed. by A. Gustard, S. Blazkova, M. Brilly, S. Demuth, J. Dixon, H.V. Lamén, C. Llasat, S. Mkhanda & E. Servat) 335-346. IAHS Publ. 246.
- Brou Yao, T., Servat, E., Paturel, J.E. (1998) Activités anthropiques et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. In : *Conférence Internationale ABIDJAN'98 – Water resources variability in Africa during the 20th century. Proceeding of Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J.M. Fritsch et M. Hulme) 365-37. IAHS publ. n° 252.
- Cadet, D.L., Guillot, B. (1991) EPSAT, Estimation des précipitations par satellite. Orstom, 64 p.

- Callède, J. (1974) Bassin versant représentatif de Sarki (Republique centrafricaine) ; bilan de 5 années d'observations. ORSTON Bangui, 118 p. + annexes.
- Cans, R. (1994) La bataille de l'Eau. *Le Monde* (ed.), Paris, 219 p.
- Casenave, A., Valentin, C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Orstom, Paris, coll. *Didactiques*. 229 p.
- CBLT. (2000) Rapport final du schéma d'aménagement de la zone sahélienne camerounaise.
- Chamard, P. (1976) Essai sur les paléoclimats du sud-ouest saharien au cours du quaternaire récent. La désertification au sud du Sahara. Colloque de Nouakchott, 17-19 décembre 1973, *Nouvelles éditions africaines*. Dakar-Abidjan
- Chevallier, P. (1988) Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat, Université de Montpellier, 331 p.
- Chouret, A. (1977) Régimes des apports fluviaux des matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. Synthèse des études de l'Orstom en République du Tchad. Orstom N'djaména, 12p.
- Colombani, J. (1967) Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. *Cahiers Orstom Hydrologie* **4**(2), 27-36.
- Colombani, J., Olivry, J.-C., Kallel, R. (1984) Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride. In : *Challenges in African hydrology and water resources. Proceeding of the Harare Symposium* (ed. by Walling D.E., Foster S.S.D. and Wurzel P.) 295-301. IAHS publ. 144.
- Dagnélie, P. (1970) Théorie et méthodes statistiques. Les presses agronomiques de Gembloux. Vol. 2, 463 P.
- De Boissezon, J. (2000) Erosion des aménagements amont et envasement des petites retenues au Burkina Faso. In : Influence de l'homme sur l'érosion. *Bulletin du réseau érosion* **20**(2) Orstom, Gtz, 47-57 p.
- Demarée, G.R., Nicolis, C., (1990) Onset of the sahelian drought viewed as a climatic fluctuation induced transition. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc* **116**, 221-238.
- Descroix, L., Viramontes, D., Anaya, E., Poulenard, J., Gonzalez Barrios, J.L. (2000) L'impact du supaturage et du déboisement sur l'érosion des sols dans la Sierra Madre

- occidentale (Nord-ouest du Mexique). *Bulletin du réseau érosion* **20**(2), Orstom, Gtz, 218-231 p.
- Dessouassi, R. (2004) Note de synthèse sur la situation hydrologique 2003-2004 dans bassin du fleuve Niger (point au 31 mai 2004). <http://aochycos.ird.ne>.
- Diallo, D. (2000) Erosion des sols en zone soudanienne au Mali, transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (haut Niger). Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, France, 200 p.
- Diedhiou, A., Laurent, H., Janicot, S., Viltard, A. (1988) Approche composite de la variabilité synoptique atmosphérique en Afrique de l'ouest en relation avec les précipitations. In : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Contry. Proceeding of Abidjan '98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M.), 3-10. AISH pub.252.
- Dixon, R.K., Brown, S. A., Houghton, R. A., Solomon, A.M., Trexlex, M.C., Wisniewski, J. (1944) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* **263**, 185-190.
- Dogmo, J.L. (1981) Le dynamisme Bamiléké. CEPER, Yaoundé, 2 vol.
- Droux, J.P. (1999) Hydrologie et flux de matières solides particulières et dissoutes sur petit bassin versant du bassin du fleuve Niger au Mali. Thèse de Doctorat Université Louis Pasteur Strasbourg I, 251 p.
- Dubreuil, P., Guiscafre, J., Nouvelot, J.F., Olivry, J.-C. (1975) Le bassin de la Sanaga, *Monographies hydrologiques Orstom*. Paris, 350 p.
- Dunglas, J. (1993) Effet de serre et activités humaines (gaz à effet de serre d'origine anthropique). *Sécheresse* **4**, 211-220.
- Elena, H., Schwartz, D., Vincens, A. (1994). Pollen evidence of late Quaternary vegetation and inferred climate changes in Congo. *Palaeogeogr., Paleoclim., Paleoecol.* **109**, 403-410.
- Ellison, W.D. (1944) Etudies of raindrop erosion. *Agric. Eng.* **25**, 131-181.
- Etchanchu, D. (1988) Géochimie des eaux du bassin de la Garonne. Transfert de matières dissoutes et particulières vers l'Océan Atlantique. Thèse Doctorat Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 178 p.

- Fauck, R. (1954) Les facteurs et l'intensité de l'érosion en moyenne Casamence, Sénégal. In : *C. R. Congrès internat., AISS, Léopoldville, Congo belge, Tome 6, 376-379.*
- Favreau, G., (2000) Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du Kori de Dantiandou (Niger). Thèse Doctorat Université de Paris-Sud-Orsay, France, 250 p.
- Fontaine, B. (1990) La dynamique de mousson pluvieuse en l'ouest. *Cahier du Centre de Recherches de Climatologie* **13**.
- Fontaine, B., Janicot, S., Moron, V., Roucou, P., Trzaska, S. (1998) Anomalies de température de surface de la mer et précipitations : Synthèse de quelques travaux récents portant sur les précipitations au Sahel et dans le Nordeste. *La Météorologie 8^e série* **23**.
- Fournier, F. (1960) Climat et érosion. Thèse de Géographie. Université de France, Paris, 201 p.
- Frecaut, R. (1982) Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales. Tome 1 : Régions chaudes et humides des basses latitudes. Publications Université Nancy II, 147 p.
- Gac, J.Y., Pinta, M. (1973) Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropicale humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Etude du bassin versant de Ouham (République Centrafricaine). *Cah. Orstom, sér. Géol.* **5(1)**, 83-96.
- Gac, J.Y. (1980) Géochimie du bassin du lac Tchad. *Travaux et documents Orstom* **123**, Paris
- Gac, J.Y., Kane, A. (1986) Le fleuve Sénégal. I : Bilan hydrologique et flux continentaux des matières particulaires à l'embouchure. *Sci. Géol., Bull.* **39(1)**, 99-130.
- Gallaire, R. (1995) Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Naimy. In : *Grands bassins fluviaux périatlantiques* (ed. by J.-C. Olivry et J. Boulegue), édition Orstom, 317-332
- Genieux, M. (1958) Climatologie du Cameroun. In : Atlas du Cameroun, IRCAM, Yaoundé, 7 p.
- Gibbs, R.J. (1967) The geochemistry of the Amazon river system : 1. The factors that control the salinity and the composition and the concentration of the suspended solids. *Geol.Soc. Amer. Bull.* **78**, 1203-1232.
- Grégory, S. (1982) Spatial patterns of Sahelian annual rainfall 1961-1980. *Arch. Met. Geog. Bioklim., B.* **31**, 297-286.

- Guiscafre, J. (1959) Résultats sommaires sur l'érosion des terres noires au pays Bamiléké. Orstom, Yaoundé
- Guyot, J.L., Filizola, N., Laraque, A. (2005) Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos (Pará, Brésil) de 1995 à 2003. In : *Sediment Budgets I. Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005* (ed. by : Walling D.E., Horwitz A.J.), 161-171, IAHS Publ. 291.
- Haubert, M. (1975) Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Dranse de Belleaux, Haute Savoie. Thèse 3^e cycle, Université Paris VI, France.
- Heusch, B. (1988) Aménagement d'un terroir et lutte contre l'érosion. Technique de lutte contre l'érosion. CNEARC, Montpellier, France, 199 p.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A. (1987) Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology* **95**, 165-183.
- Hubert P., Carbonnel J.P. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries des précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology* **110**, 349-367.
- Hulme, M., Kelly, M. (1993) Exploring the links between desertification and climate change. *Environnement* **35**, 4-11 et 39-45.
- Humbel, F.X. (1972) Initiation à la pédologie et aux sols camerounais. Orstom-Yaoundé, 159 p.
- Jacques, G. (1996) Le cycle de l'eau. ed. Hachette, 157 p.
- Karambiri, H. (2003) Crues et érosion hydrique au sahel : étude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au Nord du Burkina Faso. Thèse Doc. Univ. Paris VI. 341 p.
- Kattan, Z., Gac, J.Y., Probst, J.L. (1987) Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin – estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *Journal of hydrology* **92**, 59-76
- Kinga Mouzeo (1986) Transport particulaire actuel du fleuve Congo et quelques affluents : enregistrement quaternaire dans l'éventail détritique profond (sédimentologie, minéralogie et géochimie). Thèse Doctorat Université Perpignan, France.

- Kite, G., 1989. Use of time series analysis to detect climate change, *Journal of hydrology* **111**, 259-279.
- Krishnamurti, T.N. (1971) Tropical East-West circulations during the northern summer. *Jour. Atm. Sci.* **28**, 1342-1347
- L'Hôte, Y., Dubreuil, P., Lérique, J. (1995) Carte des types de climats « en Afrique noire à l'ouest du Congo ». Rappel, et extension aux régimes hydrologiques. In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*. (ed. by Chevallier et Pouyaud) 55-65. AISH pub. 238.
- L'Hôte, Y., Mahé, G. (1996) Afrique de l'ouest et centrale : précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). Carte au 1/6 000 000, eds Orstom.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, **47**(4), 563-572.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B. (2003) The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, **48**(3), 493-496.
- Lamachère, J.M. (2000) Transports solides à l'exutoire d'un bassin versant sahélien (région de Bidi, Burkina Faso). *Bulletin réseau érosion* **20**, 112-126,.
- Lamb, H.H. (1966) Climate in the 1960's. *Geogr. Journ.*, **132**, 183-212
- Lamb, P.J. (1982) Persistence of sub-Saharan drought. *Nature* **299**, 46-47
- Laraque, A., Pandi, A., Berthelot, M., Mietton, M. (1994) Ecoulement et transports de matière dans le bassin versant du Djoué, affluent du fleuve Congo. *Hydrol. Continent.* **9**(2), 153-168.
- Laraque, A., Bricquet, J.P., Olivry J.C., Berthelot, M. (1995) Transports solides et dissous du fleuve Congo (Bilan de six années d'observations). In : *Grands Bassins Fluviaux périalantiques : Congo, Niger, Amazone* (ed. by Olivry J.C., Boulègue J.), Actes du colloque PEGI, éditions ORSTOM, 133-145 p.
- Laraque, A., Olivry, J.-C. (1996) Evolution de l'hydrologie du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique des transports solides et dissous. In : *l'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement* (ed by P. Chevallier et B. Pouyaud), 271-288. IAHS publ. 238.

- Laraque, A., Olivry, J.-C. (1999) Transports spécifiques dans le bassin du Congo. *Manaus '99 – Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River basins*. CD-Rom Manaus'99-HiBAm.
- Laraque, A., Mahé, G., Orange, D., Marieu, B. (2001) Spatiotemporal variations in hydrological regimes within central Africa during the XXth century. *Journal of hydrology* **245**, 104-117.
- Lavachery, P., Cornelissen, E., Moyersons, J., De Maret, P. (1996) 30000 ans d'occupation, 6 mois de fouilles : Shum Laka, un site exceptionnel en Afrique centrale. *Anthropologie et préhistoire* **107**, 293-325
- Le Borgne, J. (1990) La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Équateur. In *La dégradation des paysages en Afrique de l'ouest. Points de vue et perspectives de recherches*. Université Cheick Anta Diop, Dakar, 17-36.
- Leblanc, M., (2002) Gestion des ressources en eau des grands bassins semi-arides à l'aide de la télédétection et des SIG. Application à l'étude du bassin du lac Tchad, Afrique. Thèse Doctorat Université Poitiers, France, 225 p.
- Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P. (2001) Long-term rise in a Sahelian water-West Niger. *Journal of hydrology*. **243**, 43-54.
- Lefèvre, R. (1971) Mesures de l'inféro-flux du Mayo Tsanaga. Yaoundé, 21 p. + 10 graph.
- Leneuf, N. (1965) L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en côte d'Ivoire forsière : les sols qui en sols dérivés. Thèse Faculté Science Paris, 210 p.
- Leroux, M. (1980) Le climat de l'Afrique tropicale. Dakar. Thèse d'état. Université de Dijon. 3 t. 1427 p.
- Letouzey, R. (1958) Phytogéographie camerounaise. In : *Atlas du Cameroun*. Ircam, Yaoundé, 6 p. + carte 1/2000000.
- Letouzey, R. (1968) Etude phytogéographie du Cameroun. ed. Le Chevalier, Paris, 513 p., pl. h. t., 28 cart. h. t., tabl. Graph., bibliogr.
- Liéno, G., Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., (1999a) Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de la cuvette du lac Tchad en période d'étiage : Exemple des apports du fleuve Logone. *Collection GEOCAM 2*, 89-97, presses universitaires Yaoundé, Cameroun.

- Liéno, G., Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Djeuda Tchapinga, B., Tchoua, F. (1999b) Variabilité des écoulements à travers le territoire camerounais et le sud du Tchad au cours des trois dernières décennies. *Séminaire FRIEND-AOC*, Yaoundé, 30 nov. au 03 déc.
- Liéno, G., Sighomnou, G., Sigha Nkamdjou, L., Malou, R., Saos J.L. (1999c) Caractérisation des relations eaux de surface - eaux souterraines en milieu tropical sec : Exemple du bassin de la Néma (Sine Saloum, Sénégal). *Sud Sciences Technologies* **3**, 39-46.
- Liéno, G., Mahé, G., Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Ndam, J.R., Kegni L., (2002) Etude de cas : Régimes des flux de matières à l'échelle des principaux écosystèmes du Cameroun ; vers une constitution d'une banque de données des matières en suspension. *Communication orale*, atelier Friend/AOC/DynaFlux, 2-4 mai, Cotonou, Bénin.
- Liéno, G., Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., Mahé, G., Ekodeck, G.E., Tchoua, F. (2003) Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels. In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem w., Leduc C., Shakeel A.), 215-222, IAHS publ. 278.
- Liéno, G., Mahé, G., Olivry, J.-C., Naah, E., Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Servat, E., Ndam Ngoupayou, J.R., Ekodeck, G.E., Paturel J.E. (2005a) Régimes des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques* **50**(1), 111-123.
- Liéno, G., Mahé, G., Olivry, J.C., Naah, E., Paturel J.E, Servat, E., Lubès-Niel H., Sighomnou, D., Ekodeck, G.E., Dezetter A. (2005b) Changement des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact de la variabilité climatique en zone équatoriale. In : *Regional Hydrological impacts of Climatic Change – Hydroclimatic Variability. Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005* (ed. by : Franks S., Wagener T., Bøgh E., Gupta H.V., Bastidas L. & Nobre C. & Oliveira Galvão C.), 158-168, IAHS publ. 296.

- Liéno, G., Mahé, G., Servat, E., Tegofack, R., Sahagu, J., Nwalal, J., Issa, Olivry, J.-C., Ekodeck, G.E. (2005c) Transport de matières au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire. In : *Sediment Budgets I. Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005* (ed. by : Walling D.E., Horwitz A.J), 161-171, IAHS Publ. 291.
- Lima, J.E.F.W., Lopes, W.T.A., Carvalho, N.O., Vieira, M.R., Da Silva, E.M. (2005) Suspended sediment fluxes in the large river basins of Brasil. In : *Sediment Budgets I. Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005* (ed. by : Walling D.E., Horwitz A.J.), 355-363, IAHS Publ. 291.
- Lô, H. M. (1984) Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en milieu tropicale humide africain. Thèse Doctorat 3^e cycle, Université Nancy II, France, 396 p.
- Lubès, H., Masson, J.M., Servat, E., Paturel, J.E., Kouame, B., Boyer, J.F. (1994) Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etudes bibliographiques. UR2-CEC, Orstom, Montpellier.
- Lubès, H., Aka, A., Masson, J.M., Servat, E., Paturel J.E., Kouamé, B. (1995) Essai de mise en évidence d'une variabilité climatique par application de tests statistiques à des séries chronologiques de débits. Application aux grands fleuves de la Côte d'Ivoire. In : *Statistical and Bayesian Methods in Hydrological Sciences* (Proc. Int. Conf. in Honour of J. Bernier, September 1995).
- Lubès, H., Masson, J.M., Paturel, J.E., Servat, E. (1998) Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisées pour vérifier l'homogénéité des séries. *Revue des sciences de l'eau* **11**(3), 383-408.
- Mahé, G., Lérique, J., Olivry, J.-C. (1990) Le fleuve Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. *Hydrologie Continentale* **5**(2), 105-124.
- Mahé, G., Olivry, J.-C. (1991) Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. In : *Hydrology for the Water Management of Large River Basins. Proceeding Vienne Symposium August 1991* (ed. by van de Ven F. H. M., Gutknecht D., Loucks D. P. & Salewicz K. A.) 163-172. IAHS Publ. 201.

- Mahé, G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse, Université Paris XI-Orsay, *Coll. Etudes et Thèse*, ed. Orstom Paris, 438 p.
- Mahé, G., Citeau, J. (1993) Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire* **44**, 34-54.
- Mahé, G., Olivry, J.-C. (1995) Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* **6**(1), 109-117.
- Mahé, G., Olivry J.C. (1999) Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical coast of Africa (1951-1989). *C. R. Acad Sci. paris* **328**, 621-626.
- Mahé, G., Olivry J.C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F., Servat, E. (2000) Relations eaux de surface_eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad Sci. paris* **330**, 689-692
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J.C., Wotling, G. (2001) Trends and Discontinuities in Regional Rainfall of West and Central Africa - 1951 1989. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences hydrologiques* **46**(2), 211-226.
- Mahé, G., Dray, A., Paturel, J.E., Crès, A., Koné, F., Manga, M., Crès, F.N., Djoukam J., Maïga A.A.H, Ouedraogo M., Conway D., Servat E. (2002) Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina. In : *FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice. Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference held at Cape Town, South Africa, March 2002* (ed. by Van Lannen H. et Demuth S.), 69-76. IAHS Pub. 274.
- Mahé G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.E., Girard, S., Servat, E., Dezetter, A. (2003) Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem W., Leduc C. et Shakeel A.), 215-222. IAHS Publ. 278.
- Mahé, G., Paturel J.E., Servat, E., Conway, D., Dezetter, A. (2005) The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology* **300**, 1-4, 33-43

- M.A.H.R.H. (2003) Situation de remplissage des barrages au 20 août 2003. Rapport Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Direction Générale de l'Inventaire des Ressources en eau, Ouagadougou, Burkina Faso, <http://aochycos.ird.ne>.
- Maley, J., (1972) Sédimentation pollinique actuelle dans la zone du lac Tchad (Afrique Centrale). *Pollen Spores* **14**, 263-307.
- Maley, J., (1981) Etudes polynologiques dans le bassin du lac Tchad et paléoclimat de l'Afrique Nord tropicale, de 30000 ans à l'époque actuelle. *Travaux et Documents Ortom* **129**, 586 p.
- Maley, J., (1989) L'importance de la tradition orale et des données historiques pour la reconstitution paléoclimatique du dernier millénaire sur l'Afrique nord-tropicale. In : *Sud-Sahara-Sahel Nord*, Centre Culturel Français, Abidjan, 53-57 p.
- Maley, J. (1996) Les fluctuations majeures de la forêts dense humide africaine au cours des vingt derniers millénaires. In *L'alimentation en forêt tropicale : interactions bioculturelles et applications au développement*. M. Hladik et al. ed, 55-76. UNESCO, Parthenon Publ., Paris
- Maley, J., Brenac, P. (1998) vegetation dynamics, paleoenvironnements and climatic changes in the forest of West Cameroun during the last 28000 years. *Rev. Paleobot. et Polyno.* **99**, 157-188.
- Martin, J. et Thiery, D. (1986) Analyse d'une longue chronique piézométrique au Burkina Faso. Extension de données et première estimation de la charge par les pluies. *Note technique* n° 86/14, Brgm, 20 p.
- Martin-Rosales, W., Leduc, C. (2003) Variabilité de la dynamique des mares temporaires dans un système endoréique semi-aride (sud-ouest du Niger) In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem W., Leduc C. et Shakeel A.), 174-178. IAHS Pub. 278.
- Meade, R.H., Nordin, C.F., Curtis, W.F., Costa Rodrigues, F.M., Carlos, M., do Vale, Edmond, J.M. (1979) Sediments loads in the Amazon river. *Nature* **278**(5700), 161-163.
- Meade, R.H., Dunne, T., Richey, J.E., Costa Rodrigues, F.M., dos Santos, Salati, E. (1985) Storage and remobilisation of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil, *Science* **228**, 488-490.

- Meybeck, M., (1970) Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. Thèse 3^e cycle, Centre de Recherches Géodynamiques. Thonon-les-bains, France, 245 p.
- Mietton, M. (1988) Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. Université de Grenoble I, EDITEC 14, Caen, 511 p.
- Molinier, M. (1979) Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazaville. *Cahiers Orstom, Hydrologie* **16**(1), 55-66.
- Monteny, A.B., Barbier, J.M., Bermos, C.M. (1985) Determination of the energetic exchanges of a forest-type culture: Hevea Brasiliensis. Fore. Atmo. In : *Sécheresse 1968-1975*, colloque sur les Recherches Françaises en Météorologie et Télédétection sur le continent africain, Palaiseau.
- Monteny, A.B. (1986) Forêt équatoriale: relais de l'océan comme source de vapeur d'eau pour l'atmosphère. *Veille Climatique Satellitaire* **12**, 351-361.
- Moron, V. (1994) Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, France, 218 p.
- Moukolo, N., Laraque, A., Olivry, J.-C., Bricquet, J. P. (1993) Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaïre) et ses affluents de la rive droite. In : *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques* **38**, 2(4), 133-145.
- Moukolo, N. (2000) Le bassin du fleuve Congo : modalités des écoulements de surface et souterrain. Approche des échanges surface/souterrain en milieu continu. Thèse de Doctorat d'état. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 220 p.
- Naah, E. (1978) Etude hydrologique du Mayo Tsanaga à Minglia. Campagne 1977, rapport définitif, Onarest, 33 p.
- Naah, E. (1984) Etude hydrologique du Mayo Oulo à Goloza. Rapport définitif, Mesres, 125 p.
- Naah, E. (1990) Hydrologie du Grand Yaéré du nord-Cameroun. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université de Yaoundé, Cameroun, 326 p.
- Ndam Ngoupayou, J.R. (1997) Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique : du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du

- Nyong et de la Sanaga au Sud-Cameroun. Thèse Doctorat Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 260 p.
- Ngako, V. (1999) Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale ; Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Yaoundé I, 301 p.
- Nicholson, S.E. (1980) The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Mon. Wea. Rev.* **108**, 473-487
- Nicholson, S.E. (1981) Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 2191-2208.
- Nicholson, S.E. (1986) The spacial coherence of African rainfall anomalies: Interhemispheric teleconnections. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **25**, 1365-1381.
- Nkounkou, R.R., Probst, J.L. (1987) Hydrology and geochemistry of the Congo river system. In "Transport of carbon and minerals in major world rivers, Part 4, (ed. Dengens, S, Kempe et Gan Weibin), Mitt. Geol. Paläont. Int., Univ., Hamburd, SCOPE/UNEP Sond., helt **64**, 483-508.
- Nkounkou, R.R. (1989) Hydrogéodynamique du Congo et de l'Amazonie. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques (Deniers 600 millions d'années). Thèse Doctorat Université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 192 p.
- Nouvelot, J.F. (1969) Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers Orstom Hydrologie* **6**(4), 43-85.
- Nouvelot, J.F., Cadier, E., Olivry, J.-C. (1971) Hydrologie du bassin supérieur du Noun. Orstom, Yaoundé, Cameroun. 315 p.
- Nouvelot, J.F. (1972a) Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1961 à 1971. *Cahiers Orstom Hydrologie* **9**(1), 47-74.
- Nouvelot, J.F. (1972b) La Bénoué au site de Lagdo ; campagne 1971 (mesure de transport de sable. Note hydrologique. Orstom, Yaoundé, Cameroun. 29 p.
- Nouvelot, J.F. (1972c) Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. *Cahiers Orstom Hydrologie* **9**(1), 3-18.

- Nouvelot, J.F. (1972d) hydrologie des Mayos du Nord Cameroun : Monographie de la Tsanaga, rapport terminal. Orstom, Yaoundé, Cameroun. 215 p.
- Nouvelot, J.F. (1992) Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau. Centre Orstom Montpellier, 126 p.
- Nzenti, J. P. (1994) L'Adamaoua panafricain (région de Banyo, Cameroun). Une zone clé pour un modèle de la chaîne panafricaine au Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Dakar, 176p.
- Nzolang C., Kagami H., Nzenti J. P., Holtz F. (2003) Geochemistry and preliminary Sr-Nd isotopic data on the Neoprotozoic granitoids from the Bantoum area, west Cameroon: evidence for a derivation from a Paleoproterozoic to Archean crust. *Polar Geoscience, National Institute of Polar Research, Tokyo* **16**, 196-226.
- Ntoupka, M. (1999) Impacts des perturbations anthropiques (pâturage, feu et coupe de bois) sur la dynamique de la savane arborée en zone soudano-sahélienne nord du Cameroun. Thèse Doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier, 232 p.
- Olivry, J.-C. (1974) Les déficits hydropluviométriques au Cameroun pendant les années sèches 1972 et 1973. Orstom, Yaoundé, Cameroun. 71 p.
- Olivry, J.-C., Hoorelbecke, R., Andiga, J. (1974) Quelques mesures complémentaires de transports solides en suspension au Cameroun. Orstom, Yaoundé, Cameroun. 63 p.
- Olivry, J.-C. et Hoorelbecke, R. (1975) Etude hydrologique du haut-bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo (1974-1975). Rapport définitif. Institut de Recherches Hydrologiques, Géologiques et Minières, Onarest/Orstom, Yaoundé, Cameroun. 93 p.
- Olivry, J.-C. (1976) Transports solides en suspension au Cameroun. ONAREST, Yaoundé, Cameroun. 19 p.
- Olivry, J.-C. (1977) Transports solides et en suspension au Cameroun. In : *Erosion and solid matter transport in inland waters. Proceedings of a symposium held at Paris, July 1977*, 134-141. IAHS Publ. 122.
- Olivry, J.-C. (1978) Transports solides en suspension au Cameroun. Cahiers de l'Onarest **1**(1), 47-60.
- Olivry, J.-C., Naah, E. (1978) Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun méridional. Irtiss/Onarest, Yaoundé, 53 p.

- Olivry, J.-C. (1986) Fleuves et rivières du Cameroun. *Monographies hydrologiques*, Mesres/Orstom **9**, 733 p.
- Olivry, J.-C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-Casamance. In : *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources. Proceedings of a symposium held during the XIX Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics at Vancouver, August 1987* (ed. by S. I. Solomon, Beran M. & Hogg W.) 501-512. IAHS Publ. 168.
- Olivry, J.-C., Bricquet, J. P., Thiebaut, J.P., Sigha Nkamdjou, L. (1988) Transport de matière sur les grands fleuves de la région intertropicale : les premiers résultats des mesures de flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo. In : *Sediments budgets. Proceedings of a symposium held at Porto Alegre, December 1988* (ed. by Bordas M. P. & Walling D. E.) 509-521. IAHS pub. 174.
- Olivry, J.-C., Hoorelbecke, J. (1989) Erodibilité des terres noires marneuses de la vallée du Büech, France. *Cahiers Orstom Pédologie* **25**(11), 95-110.
- Olivry, J.-C., Bricquet, J.P., Thiebaut, J.P. (1989) Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. *La houille blanche* **3**(4), 311-315.
- Olivry, J.-C., Sircoulon J., Touré M. (1992) The ill rivers of Africa. In : *Colloque ICIC Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridas*. Fortaleza.
- Olivry, J.-C. (1993) De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. *Journées Hydrologiques, Centenaire Maurice Pardé*, Grenoble.
- Olivry, J.-C., Bricquet, J.P., Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In : *Hydrology of Warm Humid Regions. Proceedings of a joint IAMAS-IAHS symposium held at Yokohama, July 1993* (ed. by Stuart J. G.) 67-78. AISH pub. 216.
- Olivry, J.-C., Bricquet, J.P., Bamba, F., Diarra, M. (1994) Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In : *Quelques données préliminaires*

- sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sénégal.* (ed. by Olivry J.-C., Diallo Iam, M., Bricquet J.P.) Orstom/Cnrst, Novembre 1994.
- Olivry, J.-C., Gourcy, L., Toure, M. (1995) Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In : *Grands Bassins Fluviaux périalantiques : Congo, Niger, Amazone* (ed. by Olivry J.C., Boulègure J.), Actes du colloque PEGI, éditions ORSTOM, 251-292 p.
- Olivry, J.-C. (1996) Quelques aspects des études régionales sur les étiages et les tarissements en Afrique intertropicale. *XII^e Journées Hydrologiques Orstom*, Montpellier.
- Olivry, J.-C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J., Bricquet, J.P. (1996) Hydrologie du lac Tchad. *Monographie hydrologique 12*, Orstom
- Orange, D. (1992) Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Sci. Géol. Mém.* **93**, 206 p.
- Ouedraogo, M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat Université Montpellier II, France. 247 p.
- Pardé, M. (1933) Fleuves et rivières. 5^{ième} édition. Librairie Armand Colin. 241 p. paris.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Boyer, J.F, Lubès, H., Masson, J.M. (1995) Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse* **6**(1), 95-102.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M., Masson, J.M. (1997a) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two : An integrated regional approach. *Journal of Hydrology* **191**, 16-36.
- Paturel, J.E., Servat, E., Lubès, H., Kouame, B., Ouedraogo, M. et Masson, J.M. (1997b) Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *C. R. Acad. Sci.*, Paris 325, Série IIa, 779-782.
- Paturel, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M. (1997c) Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. Proceeding Rabat symposium April 1997* (ed. by Rosbjerg D., Boutayeb N., Gustard A., Kundzewicz Z.W. et Rasmussen P.F.) 21-30. IAHS Publ. 240

- Paturel, J.E., Servat, E., Lubes-Niel, H., Kouame, B., Travaglio, M., Lubes, H., Marieu, B., Masson, J.M. (1998) Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Sud Sciences Technologique* **2**, 44-52.
- Paturel, J.E., Koukponou, P., Ouattara, F., L'Aour, A., Mahé, G., Crès J.F. (2002) Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXeme siècle. *Sud Sciences Technologies* **8**, 41-49.
- Paturel, J.E., Ouedraogo, M., Servat, E., Mahé, G., Dezetter, A., Boyer, J.F. (2003) The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 48(1), 125-137.
- Pelleray, H., (1957) Etude des bassins versants expérimentaux de Mayo Kereng, Orstom, Yaoundé.
- Pias, J. (1970) Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. *Mémoire Orstom* **43**, 407 p.
- Pias, J. (1971) Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent (Rep. Du Tchad). *Mémoire Orstom* **43**, Paris, 407 p., fig., VIII pl., h. t., bibliogr., 2 cartes
- Picouet, C. (1999) Géodynamique d'un écosystème tropical peu anthropisé : Le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse Doctorat Université de Montpellier II, 386 p.
- Planchon, O. (1991) Etude spatialisée des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). *Document Orstom*, 340 p.
- Pouyaud, B. (1986) Estimations des apports annuels et des étiages avant et après la récente période de sécheresse de la Volta noire à Nounbel et de la Volta blanche à Bagré. In : *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai.
- Pouyaud, B. (1987) Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants de l'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. In : *The influence of climate change and climate variability on the water resources*.

- Proceedings of a symposium held during the XIX Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics at Vancouver, August 1987* (ed. by Solomon S. I., Beran M. & Hogg W.) 447-461. IASH publ. 168.
- Probst, J.L. (1983) Hydrologie du bassin de la Garonne : modèle de mélanges – bilan de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates. Thèse Doctorat 3^e cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse, France. 164 p.
- Probst, J.,L., Nkounkou, R.,R., Krempp G., Bricquet, J.P., Thiebaut, J.P., Olivry, J.-C., (1992) Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987-1989. *Journal of Hydrology* **135**, 237-257.
- Reynaud-Farrera, I., Maley, J., Wirrman, D. (1996) Végétation et climat dans les forêts sud-est Cameroun depuis 4770 ans B. P. : analyse pollinique des sédiments du lac Ossa. *C. R. Acad. Sci.*, série 2a 322, 749-755.
- Richards, K. (1986) Preliminary results of pollen analysis of a 6,000 year core from Mboandong, a crater lake in Cameroun. *Hull University Geography Dept Misc. Serie* 32, 14-40.
- Rishirumuhirwa, T. (1993) Facteurs anthropiques de l'érosion dans les régions des montagnes et hauts plateaux de la C.E.P.G.L. (Burundi-Rwanda-Zaïre). *Bulletin réseau érosion* **13**, 53-62.
- Rodier, J.A., Ribstein, P. (1986) Utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination ds crues et l'estimation des apports au Sahel. In : *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai 1986.
- Roche, M. (1972) Hydrologie de surface. Ed. Gauthier-Villars, Paris, 403 p.
- Rodier, J. (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. *Mémoire Orstom*, Paris.
- Roose, E., Jadin, P. (1969) Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao de moyenne Côte d'Ivoire, station IFCC près de Divo : 1. Milieu, dispositif et résultats des campagnes 1967-68. ORSTOM, Abidjan, 79 p.

- Roose, E. (1973) Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse doctorat Ingénieur, Fac. Sci., Abidjan. 125 p.
- Roose, E. (1977) Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt ans de mesure en parcelles expérimentales. *Travaux et Documents Orstom* **78**, Paris. 107 p.
- Roose, E. (1991) Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et production d'une nouvelle stratégie de LAE : la GCES. *Cahiers Orstom Pédologie* **26**(2), 145-181.
- Roose, E., Bertrand, R. (1991) Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. *Agronomie Tropicale* **226**(11), 1270-1283
- Roose, E. (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (CGES). *Bulletin pédologique de la FAO* **70**, 420 p.
- Schwartz, D. (1992) Assèchement climatique vers 3000 ans B.P. et expansion Bantou en Afrique centrale atlantique : quelques réflexions. *Bull. Soc. Géol.* **163**, 353-361.
- Segalen, P. (1962) Carte pédologique du Nord Cameroun à 1/100000. Feuille de Maroua. Ircam Yaoundé, Orstom Paris. 67 p. multgr. 1 carte couleur ht.
- Segalen, P., Valérie, M. (1963) Carte pédologique du Nord Cameroun à 1/100000. Feuille de Mokolo. Ircam Yaoundé, Orstom Paris. 72 p. multgr. 2 cartes couleur ht à 1/100000 et 2 cartes ht à 1/50000.
- Seignobos, C. (1982) Nord Cameroun, montagnes et hautes terres. *Coll. Architectures traditionnelles*. ed. parenthèses. Roquevaire France 188 p.
- Seiny-Boukar, L., Pontanier, R. (1993) Hydrodynamique des sols Hardé au Nord-Cameroun. Caractéristiques et comportement. In : *Les terres Hardé ; caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad. Mémoires et travaux de l'IRA* **6**, 37-43.
- Servant, M. (1967) Nouvelles données stratigraphiques sur le quaternaire supérieur et récent au Nord-est du lac Tchad (Kenem). *Congr. Panafr. Preh. et d'Etudes quat.*, Dakar 20 p., multgr.
- Servant, M. (1973) Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Thèse Doctorat Université Paris VI, Paris, *Travaux et Documents Orstom* **159**, 573 p.

- Servat, E. (1994) ICCARE - Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne – Présentation du programme. Rapport n° 1. Orstom, Abidjan, Côte d'Ivoire. 32 p.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubes, H., Lubès-Niel, H., Kouame, B., Masson, J.M. (1996) Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *C. R. Acad. Géosciences de surface* **324**, 835-838 p.
- Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Travaglio, M., Lubès, H., Marieu, B., Fritsch, J.M., Masson, J.M. (1997). Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne et conséquences sur les ressources en eau. In : *FRIEND'97 – Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management. Proceedings of the third FRIEND conference held at Postojna, Slovenia, September–October 1997* (ed. by Gustard A., Blazkova S., Brilly M., Demuth S., Dixon J., Van Lanen H., Llasat C., Mkhndi S., Servat E.), 241-248. AISH pub. 246.
- Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J.F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J.M., Masson, J.M., Marieu, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the Xth century. Proceeding of Abidjan '98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. et Hulme M.), 323-337. IAHS Publ. 252.
- Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Brou, K., Masson, J.M., Travaglio, M., Marieu, B. (1999) De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau* **12**(2), 363-387.
- Shinoda, M. (1990) Long-term variability of the tropical rainbelt and its relation to rainfall in the Sahel and Northern Kalahari. *Jour. Met. Soc. Japan*, **68**, 19-35.
- Siefferman, J.B. (1966) Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. *Mémoire Orstom* **66**, Paris, 183 p.
- Sigha-Nkamdjou, L. (1994) Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale : La Ngoko à Moloundou (Sud-Est du Cameroun). Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud (Orsay). *Travaux et Documents Microfichés* **111**, ed. Orstom, 378 p.

- Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Liéno G., Ayissi, G., Bédimo, J.P., Naah, E. 1998a Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. In : *Water Resources Variability in Africa during the Xth century. Proceeding of Abidjan '98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. et Hulme M.), 323-337. IAHS Publ. 252.
- Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Nia, P., Nwalal, J., Bedimo Bedimo, J.P., Nlozoa, J., Liéno, G., Braun, J.J. (1998b) Qualité de l'eau à certains sites du Lom, du Pangar et de la Sanaga. *Rapport de synthèse*, IRGM, Yaoundé, 58 p
- Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Liéno, G. (2002) Vers une approche de la gestion de la ressource comme solution aux crises d'eau des dernières décennies au Cameroun. In : *FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice. Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference held at Cape Town, South Africa, March 2002* (ed. by Van Lannen H. et Demuth S.), 337-3343. IAHS Pub. 274.
- Sighomnou, D., (2004) Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de doctorat d'état ès-sciences. Université de Yaoundé I. 290 p.
- Sircoulon, J. (1976) Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940. *Cahiers Orstom Hydrologie* **13**(168), 13-25.
- Sircoulon, J., Olivry J.-C. (1986) Caractérisation de la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest et centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières) In : *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai.
- Sircoulon, J. (1990) Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. *WMO/TD* **380**, 87 p.
- Shinoda, M. (1990) Long-term variability of the tropical rainbelt and its relation to rainfall in the Sahel and Northern Kalahari. *Jour. Met. Soc. Japan* **68**,19-35.

- Soba, D. (1989) La série du Lom : étude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 198 p.
- Solter, D. (1992) Les bases de la production végétale, le sol – le climat – la plante. Tome 2; Le climat : Météorologie - Pédologie - Bioclimatologie.
- Suchel, J.B. (1987) Les climats du Cameroun. Thèse d'état. Université de Bordeaux III, 2 tomes, 1186 p.
- Sultan, B., Servat, E., Maley, J., Mahé, G. (2001) Interactions entre les forêts tropicales et la variabilité climatique. Une synthèse des études récentes. *Sécheresse* **12**(4), 211-229.
- Tanaka, M., Weare, B.C., Navato, A.R., Newell, R.E. (1975) Recent African rainfall patterns. *Nature* **225**, 201-203.
- Tanyileke, G. (1988) Etudes hydrologiques de la Mentchum à Gulli. *Rapport provisoire, multigr.*, Irgm, Yaoundé.
- Tchotsoua, M., Bonvallet, J. (1999) L'érosion urbaine au Cameroun : processus, causes et stratégies de lutte. *Bulletin réseau érosion* **20**(2), 324-331.
- Temple, D.E. et Sundborg, A. (1972) The Rufiji River, Tanzania, hydrology and sediment transport. *Geografiska Annaler ser. A.* **54**, 345-368.
- Thebe, B. (1987) Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des facteurs d'échelle. Thèse d'université. Unité des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 238 p. + annexes.
- Toteu, S. F., 1990. Geochemical characterization of the main petrographic and structural units of northern Cameroon ; implication for the Pan-African evolution. *Journal of African Earth Sciences* **4**(10), 615-624.
- Triboulet, C. (1993) Evaluation des états de surface à partir d'images Spot/ cas des sols dénudés de la région de Maroua. In : *Les terres Hardé ; caractérisation et réhabilitation dans le bassin du lac Tchad. Mémoires et travaux de l'IRA* **6**, 29-36.
- Tsalefac, M. (1999) Variabilité climatique, crise économique et dynamique des milieux agraires sur les hautes terres de l'Ouest du Cameroun. Thèse de doctorat d'état, université de Yaoundé I, Cameroun, 564 p.

- UNESCO/OMM. (1987) Aspects hydrologiques des sécheresses. Publié par l'organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture, Paris, France.
- Viers, J., Dupré, B., Braun, J.J., Deberdt, S., Angeletti, B., Ngoupayou, J. N., and Michard, A. (2000) Major and trace element abundances and strontium isotopes in the Nyong basin rivers (Cameroon): constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments. *Chem. Geol.* **169**, 211–241.
- Vuillaume, G. (1969) Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne. *Cahiers Orstom Hydrologie* **6**(4), 87-131.
- Walling, D.E., Webb, B.W. (1981) The reliability of suspended sediment load data. *Proceeding of Florence symposium* 17-194, IAHS pub. 133
- Walling, D. E. (1984) The sediment yields of Africa. In : *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (ed. by Walling D. E., D. Foster S. S. & Wurzel P.), 265–283. IAHS Pub. 144.
- Walling, D.E. (1988) Mesuring sediment yield from river bassins. In : *soil Erosion Research Methods* (ed. by Lal R.). Soil and Water Conservation Society, 2nd edition, 39-82. Ankeny, Ohio, USA.
- Wesselink, A.J., Orange, D., Feizoure, C.T., Randriamiarisoa (1995) Les regimes hydroclimatologiques d'un bassin versant de type tropical humide : l'Oubangui (Republique Centrafricaine). In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement* (Mélanges à la mémoire de Jean rodier), 179-194.
- Yonkeu, S. (1993) Végétation des pâturages de l'Adamoua (Cameroun) : Ecologie et potentialités pastorales. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 197 p.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

1.1 : Afrique Occidentale et Centrale : la façade atlantique intertropicale de l'Afrique ; zone d'intérêt de nombreuses contributions.	- 18
1.2 : Répartition géographique des types de climats en Afrique de l'Ouest et du Centre. ..	- 18
1.3 : Modèle de base de la circulation générale selon Palmen (1950).	- 20
1.4 : Centres d'action atmosphérique.	- 22
1.5 : Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique vers le méridien origine.	- 23
1.6 : Déplacement vers le Sud des isohyètes, périodes 1951-1969 et 1970-1989.	- 27
1.7 : Variation de l'hydraulicité (variable centrée réduite) depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha).	- 29
1.8 : Exemple des hydrogrammes annuels du Chari à N'Djamena et du Lom à Betare Oya en année proche de la médiane 1970/1971, en année sèche 1972/1973 et en année minimum 1984/1985.	- 31
1.9 : Bassin du lac Tchad.	- 33
1.10 : Les surfaces inondées de la cuvette nord du lac Tchad à la fin de janvier de chaque année.	- 34
1.11 : Evolution des débits du fleuve Chari à Ndjaména.	- 35
1.12 : Variation mensuelle de la superficie du lac Tchad au cours des deux dernières décennies.	- 36
1.13 : Evolution du niveau d'une nappe dans les altérites superficielles au Burkina Faso.	- 37
1.14 : Fluctuations climatique déterminées à partir de la sédimentation fluviale et fluvio-lacustre et du remaniement éolien au cours du Quaternaire récent dans le bassin du lac Tchad.	- 42
1.15 : schéma des variations du niveau du lac Tchad au cours du dernier millénaire.	- 43

Chapitre 2

2.1 : processus d'érosion éolienne.	- 54
2.2 : Différentes phases de transport des matières solides.	- 57
2.3 : Correction entre la concentration d'un échantillon témoin et la concentration moyenne.	- 60
2.4 : Différentes cartes transport de matières en suspension proposées par trois auteurs pour l'Afrique.	- 68
2.5 : Quelques sites des travaux sur les matières en suspension en Afrique de l'ouest et du centre.	- 71

Chapitre 3

3.1 : Grands traits de l'oro-hydrographie du Cameroun.	- 79
3.2 : Esquisse géologique du Cameroun.	- 81
3.3 : Schéma phytogéographique du Cameroun.	- 84
3.4 : Variations latitudinales des précipitations mensuelles moyennes au Cameroun.	- 86
3.5 : Les grands traits de l'organisation zonale des climats sur le Cameroun.	- 87
3.6 : Les régions climatiques au Cameroun.	- 89
3.7 : Régimes hydrologiques naturels du Cameroun : production spécifique mensuelle. ...	- 92
3.8 : Régimes des écoulements au Cameroun.	- 94
3.9 : déficit observé sur les modules annuels des Bassins étudiés pour la période 1951-1980.	- 96
3.10 : Ecart de la pluviométrie des années 1972 et 1973 par rapport à la normale.	- 97
3.11 : Evolution des écoulements dans les trois principales zones climatiques du Cameroun.	- 99

Chapitre 4

4.1 : Stations ayant fait l'objet d'études de matières solides en suspension au Cameroun.-	105
4.2 : Présentation des stations suivant les modes d'échantillonnage.	- 113

4.3 : Variations des concentrations et des débits journaliers sur quelques bassins versants.	- 117
4.4 : Exemple de relation Concentration-Débits proposée pour le Niger à Kanlikoro.	- 119
4.5 : Variation des concentrations avec les débits en zone tropicale au cours du cycle hydrologique.	- 120
4.6 : Variation des concentrations avec les débits en zone équatoriale au cours du cycle hydrologique.	- 121
4.7 : Evolution comparée au cours du cycle hydrologique de la concentration et du flux de matières en suspension en fonction du débit (Sanaga à Nachtigal).	- 123
4.8 : Relations entre les flux des matières en suspension et les débits en zone tropicale. .	- 124
4.9 : Relations entre les flux des matières en suspension et les débits en zone forestière. .	- 125
4.10 : Augmentation de la charge solide des cours d'eau vers le Nord.	- 127
4.11 : Flux de matières en suspension à l'exutoire des bassins.	- 128
4.12 : Profil des concentrations d'amont en aval dans le bassin supérieur de la Sanaga. .	- 129
4.13 : Répartition comparée des concentrations moyennes annuelles des MES.	- 132
4.14 : Répartition comparée des productions moyennes annuelles des sédiments.	- 133
4.15 : Répartition comparée des épaisseurs moyennes de sols susceptibles d'être érodés en 100 ans.	- 134
4.16 : Concentrations, pluies et débits moyens mensuels sur les bassins versants du Mbam et du Mayo Tsanaga.	- 136
4.17 : Flux, pluies et débits moyens mensuels sur les bassins versants du Mbam et du Mayo Tsanaga.	- 137
4.18 : Situation du bassin versant de la Mifi sud, affluent du Noun.	- 144
4.19 : Principaux barrages de retenues d'eau du Cameroun (aménagement différents des lacs naturels).	- 146
4.20 : Estimation des volumes de sédiments déposés dans les barrages depuis leur mise en eau à 2005 et des pourcentages de comblement par rapport à leur capacité.	- 148
4.21 : Influence de la retenue de Mbakaou sur le transport solide : bassin versant supérieur de la Sanaga.	- 150
4.22 : Localisation des bassins versants tropicaux pour lesquels les données sont comparées à celles du Cameroun.	- 153

Chapitre 5

5.1 : Situation des bassins versants représentatifs étudiés par rapport aux principales zones climatiques.	- 161
5.2 : Profil en long des bassins étudiés.	- 170
5.3 : Esquisse phytogéographique des bassins forestiers.	- 172
5.4 : Esquisse pédologique des bassins forestiers.	- 175
5.5 : Comparaison des régimes hydrologiques des rivières étudiées : année hydrologique la plus humide et la plus sèche de la chronique d'observations : débits journaliers. ...	- 179

Chapitre 6

6.1 : Evolution du nombre de stations hydrométrique observé au Cameroun.	- 189
6.2 : Réseau des stations pluviométriques au Cameroun.	- 191
6.3 : Réseau pluviométrique retenu pour l'étude.	- 192
6.4 : Comparaison des régimes pluviométriques sur les bassins versants étudiés, plus Debundscha: polygones de Thiessen et postes pluviométriques utilisés.	- 206
6.5 : Différence entre les totaux pluviométriques de la saison des pluies de mars, avril, mai et juin (MAMJ) et de celle de septembre, octobre et novembre (SON) sur les bassins versants forestiers.	- 210
6.6 : Evolution interannuelle des cumuls des pluies annuelles sur les bassins versants et moyennes décennales.	- 214
6.7 : Variations des débits moyens annuels sur les bassins versants.	- 216
6.8 : Quelques aspects de la variabilité des précipitations annuelles sur les bassins versants étudiés.	- 219
6.9 : Evolution interannuelle des pluies estivales et hivernales sur les bassins versants. ...	- 221
6.10 : Comparaison entre les précipitations hivernales (p. DJF) et estivales (P. JA).	- 223
6.11 : Evolution interannuelle des pluies de MAMJ et de SON sur les bassins versants. .	- 224
6.12 : Comparaison des variations (Var.) par décennie des précipitations de printemps (P. MAMJ) et de celles d'automne (P.SON) sur les bassins versants équatoriaux.	- 225
6.13 : Evolution des débits moyens de JA et DJF.	- 230
6.14 : Evolution des débits moyens de MAMJ et SON.	- 231

6.15 : Comparaison entre les écoulements de printemps (Q.MAMJ) et de ceux d'automne (Q.SON) sur les bassins versants équatoriaux.	- 232
6.16 : Les coefficients d'écoulement de MAMJ baissent pendant que ceux de SON se rétablissent et dépassent parfois les valeurs d'avant la sécheresse.	- 235
6.17 : Quelques aspects des modifications des régimes hydrologiques en Afrique équatoriale centrale.	- 240

Chapitre 7

7.1 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Bogo.	- 247
7.2 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Betare Oya.	- 248
7.3 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Mbalmayo.	- 248
7.4 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Kribi-sciérie.	- 249
7.5 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Ngoazik.	- 250
7.6 : Photo, jaugeages et courbe d'étalonnage de la station de Mundame.	- 250
7.7 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002, 2003 et 2004 sur le Mayo Tsanaga à Bogo, comparées aux moyennes de 1950-1979 et 1980-2000.	- 253
7.8 : Mayo Tsanaga à Bogo ; hydrogrammes annuels des débits instantanés.	- 255
7.9 : Débits moyens mensuels des années 2002, 2003 et 2004 à Bogo, comparées aux moyennes avant et après la rupture.	- 257
7.10 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Lom à Betare Oya, comparées aux moyennes de 1950-1969 et 1970-1994.	- 260
7.11 : Débits moyens mensuels des années d'étude à Betare Oya, comparés aux moyennes de la période humide (1951-1970) et de la période sèche (1971-1993).	- 262
7.12 : Evolution comparée des débits moyens d'août, septembre, octobre (Qm ASO) et de février, mars, avril (Qm FMA) du Lom à Betare Oya (région centre du Cameroun).	- 264
7.13 : Pluies moyennes mensuelles des années 2002 et 2003 sur le bassin versant du Mungo à Mundame, comparées aux moyennes de 1950-1983 et 1984-2000.	- 261
7.14 : Répartition mensuelle de la pluie annuelle sur les trois bassins équatoriaux ; moyennes mensuelles calculées sur les deux années 2002 et 2003.	- 271

7.15 : Précipitations des deux saisons des pluies des années d'étude comparées à la moyenne interannuelle 1950-2000 sur Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik.	- 272
7.16 : Précipitations hivernales (DJF) et estivales (JA) des années d'étude (2002, 2003) comparées aux moyennes décennales depuis 1950 sur Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik.	- 273
7.17 : Débits moyens mensuels de la saison 2003/2004 sur les bassins versants équatoriaux.	- 275
7.18 : Hydrogrammes de l'année 2003 sur les six bassins versants étudiés, comparés à certaines stations du bassin versant du fleuve Niger.	-279
7.19 : Modifications des régimes d'écoulements de quelques fleuves et rivières du Cameroun ; impacts anthropiques et climatiques : production spécifique mensuelle.	- 282

Chapitre 8

8.1 : Situation des stations étudiées par rapport aux études antérieures.	- 288
8.2 : Bassin versant du Ntem à l'océan ; station de mesures de Ngoazik.	- 289
8.3 : Bassin versant du Nyong à Dehane ; station de mesures de Mbalmayo.	- 291
8.4 : Bassin versant de la Kienké à Kribi.	- 292
8.5 : Bassin versant du Mungo à Mundame.	- 293
8.6 : Bassin versant du Lom à Betare Oya.	- 294
8.7 : Bassin versant du Mayo Tsanaga à Bogo.	- 295
8.8 : Concentrations ponctuelles à différents points de prélèvement dans les sections de quelques rivières étudiées.	- 305
8.9 : Evolution des coefficients de variation par rapport aux concentrations moyennes obtenues lors de 17 effectués aux 6 stations de mesures.	- 307
8.10 : Comparaison des concentrations moyennes obtenues par une simple moyenne arithmétique et celles obtenues par la double intégration.	- 311
8.11 : Variations des débits et des concentrations instantanés sur la période d'étude.	- 317
8.12 : Relations entre concentrations instantanées et débits instantanés sur les bassins versants étudiés.	- 324

8.13 : Relations entre les débits et les concentrations mensuels à l'échelle annuelle sur les bassins étudiés ; les chiffres correspondent au rang du mois dans l'année calendaire.	- 326
8.14 : Schéma montrant le procédé adopté pour séparer les concentrations en deux jeux de données.	- 331
8.15 : Flux spécifiques calculés sur les bassins versants étudiés ; les valeurs sur le Lom, Mungo, Nyong, Kienke et Ntem correspondent à l'année hydrologique 2003/2004.	- 340
8.16 : Concentrations moyennes annuelles sur les bassins versants étudiés ; les valeurs sur le Lom, Mungo, Nyong, Kienke et Ntem correspondent à l'année hydrologique 2003/2004.	- 341
8.17 : Bilan des quantités de matières en suspension exportées annuellement sur le territoire camerounais.	- 345
8.18 : Evolution des débits et des concentrations moyens annuels sur le bassin versant de Mayo Tsanaga à Bogo.	- 349
8.19 : Evolution des débits et des flux de MES annuels sur le bassin versant de Mayo Tsanaga à Bogo.	- 350
8.20 : Evolution des débits et des concentrations moyens mensuels sur le bassin versant de Mayo Tsanaga à Bogo.	- 350
8.21 : Evolution des débits et des flux de MES mensuels sur le bassin versant de Mayo Tsanaga à Bogo.	- 351
8.22 : Comparaison des débits et des concentrations mensuels sur le Ntem à Ngoazik. ...	- 352
8.23 : Comparaison des débits et des concentrations mensuels sur le Ntem à Ngoazik. ...	- 353

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

1.1: Totaux pluviométriques annuels (en mm) et écarts à la normale (en %) Mauritanie.	- 25
1.2 : Déficit pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture.	- 27
1.3 : Ordres de grandeurs (en %) de certains déficits d'écoulement annuel calculés depuis la date de rupture observée dans les séries chronologiques par rapport à la période de référence 1950-1989.	- 30

Chapitre 3

3.1 : Déficit hydrologiques de certains cours d'eau camerounais au cours de la première phase de sécheresse (1972-1973).	- 98
--	------

Chapitre 4

4.1 : Mesures des matières solides en suspension au Cameroun : caractéristiques physiques de quelques bassins étudiés.	- 106
4.2 : Mesures des matières solides en suspension au Cameroun : Bassins versants, périodes des observations et auteurs.	- 108
4.3 : Organisation de la base de données en matières solides en suspension (MES) ; table des caractéristiques de quelques stations.	- 111
4.4 : Répartition des bassins étudiés suivant les zones climatiques.	- 112
4.5 : Expressions mathématiques de l'ajustement de la relation entre le débit (Q_l en $m^3.s^{-1}$) et le flux (Q_s en $kg.s^{-1}$).	- 126
4.6 : Quelques valeurs de flux de matières particulaires dans cours d'eau camerounais. ..	- 130
4.7 : Bassin du Mayo Tsanaga ; caractéristiques des années hydrologiques 1968, 1969, 1973, 1985 et 1986.	- 138

4.8 : Schéma décrivant les processus de production des matières en suspension sur le Mayo Tsanaga.	- 139
4.9 : Mbam à Goura : débits moyens annuels et érosion mécanique.	- 140
4.10 : Caractéristiques des bassins versants du Mbam et des monts Mandara.	- 142
4.11 : Principales retenues d'eau du Cameroun et leur taux de comblement.	- 147
4.12 : Bilan des apports de matières en suspension dans le Yaéré en 10 ⁶ tonnes.	- 151
4.13 : Estimation des valeurs du charriage au Cameroun. –	146
4.14 : Quelques valeurs de flux de matières particulaires sur quelques bassins fluviaux d'Afrique tropicale.	- 154

Chapitre 5

5.1 : Caractéristiques morphométriques des bassins étudiés.	- 162
5.2 : Différentes formations forestières mises en défens dans le bassin versant du Mayo Tsanaga (Anonyme (2003).	- 167
5.3 : Caractéristiques hydrologiques des cours d'eau étudiés.	- 178

Chapitre 6

6.1 : Relations entre les débits de mois de basses eaux à la station de Betare Oya.	- 195
6.2 : Caractéristiques des relations entre les débits mensuels du Lom à Bétaré Oya et ceux de la Kadéi à Batouri.	- 195
6.3 : Relations entre les débits mensuels aux stations de Mbalmayo et d'Olama.	- 196
6.4 : Relations entre les débits mensuels aux stations de Mbalmayo et de Bie.	- 196
6.5 : Relations entre les débits mensuels de la Lobe et de la Kienke à Kribi.	- 197
6.6 : Nombre de données de pluie utilisées pour le calcul de la pluie moyenne.	- 205
6.7 : Quelques caractéristiques des pluies moyennes mensuelles (1950-2000).	- 209
6.8 : Pluies moyennes saisonnières sur les bassins versants équatoriaux (moyenne calculée sur la période 1950-2000).	- 210
6.9 : Les mois secs suivant le diagramme ombrothermique de Gausson (moyennes de 1955 à 1980).	- 212

6.10 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux pluies et aux modules annuels et calculs des taux de variation.	- 217
6.11 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux totaux des précipitations estivales et hivernales, chronique de 1950 à 2000 et calcul des taux de variation.	- 222
6.12 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux pluies de printemps et d'automne, chronique de 1950 à 2000.	- 225
6.13 : Occurrence d'apparition du maximum pluvieux sur le bassin de la Kienke.	- 226
6.14 : Nombre de données de débit utilisées pour le calcul de la pluie moyenne.	- 228
6.15 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux débits moyens saisonniers.	- 233
6.16 : Résultats des tests de corrélation sur le rang et de Pettit appliqués aux paramètres de basses et hautes eaux.	- 233
6.17 : Tendances évolutives comparées des termes de bilan hydrique sur les bassins versants équatoriaux camerounais au cours des décennies 1980 et 1990.	- 238

Chapitre 7

7.1 : Pluies moyennes mensuelles et annuelles (en mm) sur le Mayo Tsanaga à Bogo. ...	- 252
7.2 : Ecart relatifs (en pourcent) de la pluie mensuelle des trois années d'étude par rapport aux moyennes pluviométriques de la série d'observations sur le Mayo Tsanaga à Bogo.	- 254
7.3 : Débits moyens mensuels et annuels en $m^3.s^{-1}$ à Bogo.	- 256
7.4 : Ecart relatifs (en pourcent) des débits des trois années d'étude aux moyennes mensuelles à la station de Bogo.	- 258
7.5 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant du Lom à Betare Oya.	- 259
7.6 : Ecart relatifs (en pourcent) de la pluie mensuelle des trois années d'étude par rapport à la moyenne pluviométrique de la période 1970-1994, sur le bassin versant de Lom à Betare Oya.	- 260
7.7 : Débits moyens mensuels et annuels à Betare Oya en $m^3.s^{-1}$	- 261

7.8 : Ecart relatifs (en pourcent) des débits des années d'étude aux moyennes mensuelles à la station de Betare Oya.	- 263
7.9 : Différences absolues entre les débits moyens mensuels de la période 1951-1970 et 1971-2003 à Betare Oya, en $m^3.s^{-1}$	- 264
7.10 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002 et 2003 sur le bassin versant du Mungo à Mundame.	- 265
7.11 : Ecart relatifs (en pourcent) de la pluie mensuelle des deux années d'étude par rapport à la moyenne pluviométrique de la période 1950-1983 et celle de la période 1984-2000, sur le bassin versant du Mungo à Mundame.	- 267
7.12 : Débits moyens mensuels et annuels à Mundame en $m^3.s^{-1}$	- 267
7.13 : Ecart relatifs (en pourcent) des débits de la période d'étude à la moyenne de 1970-1987 à Mundame.	- 268
7.14 : Pluies mensuelles et annuelles de 2002, 2003 et 2004 sur les bassins versants de la zone forestière ; Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik, en mm. .	- 270
7.15 : Ecart des pluies annuelles des années d'étude par rapport à la moyenne interannuelle sur les bassins versants forestiers.	- 270
7.16 : Débits moyens mensuels et annuels observés sur les trois bassins versants de la zone forestière du Cameroun, en $m^3.s^{-1}$: Nyong à Nbalmayo, Kienke à Kribi et Ntem à Ngoazik.	- 274
7.17 : Débits saisonniers sur les bassins versants étudiés et moyennes des deux ou trois années, en $m^3.s^{-1}$	- 275
7.18 : Coefficients d'écoulements saisonniers calculés sur les bassins équatoriaux.	- 277

Chapitre 8

8.1 : Résultat des études antérieures à la station de Ngoazik.	- 290
8.2 : Résultat de trois mesures effectuées antérieurement à la station de Bétaré Oya. Les pluies sont celles de la station de Ngaoundéré.	- 294
8.3 : Résultat des études antérieures à la station de Bogo ; valeurs moyennes mensuelles. Les pluies sont obtenues par la méthode de Thiessen.	- 297
8.4 : Quelques caractéristiques des données antérieures sur les bassins versants étudiés.	- 298
8.5 : Coefficients de variations des concentrations ponctuelles dans la section, pour les 17	

jaugeages effectués.	- 306
8.6 : Débits et concentrations moyennes des matières en suspension en fonction du nombre de verticales choisies pour le jaugeage.	- 309
8.7 : Résultats de jaugeages solides.	- 310
8.8 : Périodes de hautes et basses eaux des rivières étudiées.	- 312
8.9 Fréquences des prélèvements par mois et par station.	- 313
8.10 : Nombre d'échantillons prélevés par rivière et par mois.	- 314
8.11 : Comparaison des concentrations des échantillons de surface (C_i) et des concentrations moyennes (C_m) dans les sections de jaugeages.	- 316
8.12 : Quelques variables caractéristiques de la distribution des concentrations ponctuelles obtenues aux stations étudiées.	- 321
8.13 : Flux mensuels de matières en suspension ($\times 10^3$ tonnes) calculés pour cinq bassins versants étudiés, par trois méthodes stochastiques différentes.	- 330
8.14 : Comparaison des charges mensuelles de matières en suspension calculées avec la méthode stochastique n° 3 ci-dessus et 2 fréquences de prélèvements différentes. .	- 332
8.15 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur le Mayo Tsanaga à Bogo.	- 335
8.16 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur le Lom à Betare Oya.	- 335
8.17 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur le Mungo à Mundame.	- 336
8.18 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur le Nyong à Mbalmayo.	- 336
8.19 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur la Kienke à Kribi.	- 337
8.20 : Charges mensuelles et annuelles de matières sur le Ntem à Ngoazik.	- 337
8.21 : Comparaison entre les minimums de flux et débit (basses eaux), et les maximums (hautes eaux).	- 338
8.22 : Résultats de huit années de mesures de MES sur le Mayo Tsanaga à Bogo.	- 349
8.23 : Résultats de trois années de mesures de MES sur le Ntem à Ngoazik.	- 352

LISTE DES PHOTOS

Chapitre 2

- 2.1 : Erosion en nappe ; « mico-falaises » formées par des monticules de terre protégés contre les gouttes de pluies. (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire). - 51
- 2.2 : Rigoles et ravines créées par l'érosion linéaire. (Cap, Afrique du sud) - 52
- 2.3 : Nuage de poussières se déplaçant sur de grandes distances (Déou, Burkina Faso). -55

Chapitre 5

- 5.1 : végétation sub-sahélienne de la plaine de Diamaré, en équilibre avec les facteurs anthropiques récurrents. - 164
- 5.2 : Paysage cultural de la plaine de Diamaré en début de saison des pluies ; même les cultures ne protègent pas efficacement le sol contre l'érosion. - 166
- 5.3 : Reboisement d'un sol « *Hardé* » dans la plaine de Diamaré. - 166
- 5.4 : Savanes du plateau de l'Adamaoua, bassin versant de Lom. - 169
- 5.5 : La forêt du bassin versant du Mungo. - 171
- 5.6 : Couloir sinueux du Nyong dans la prairie marécageuse en amont de la station de Mbalmayo. - 174

Chapitre 8

- 8.1 : Séance de jaugeage complet sur le Ntem à Ngoazik. - 300
- 8.2 : Prélèvement de surface sur le Ntem à Ngoazik. - 301
- 8.3 : Pompe à vide montée sur 4 unités de filtration en série. - 302

ANNEXE I

Historiques et travaux effectués aux stations de mesures

La station de Bogo

La station a été installée en 1953, devant l'école du centre rural, en rive droite. L'échelle limnimétrique emportée par une crue le 18/8/1956, a été réinstallée le 12 juillet 1966 à environ 45 m en amont du radier de la route Maroua – Bogo, soit 500 m en aval de la précédente, le zéro étant à + 1,73 m.

Un limnigrphe OTT type X doublait cette échelle dont le zéro était à une altitude de 336,78 m. Cent quarante deux jaugeages ont été effectués de 1966 à 1973 entre les cotes 26,5 cm et 191/187 cm pour des débits de 3,5 l.s⁻¹ et 210 m³.s⁻¹. La liste de ces jaugeages et la courbe d'étalonnage sont présentées par Olivry (1986).

Les 70 jaugeages de 1973 ont permis de prouver l'instabilité de la station. Il n'est pas possible d'établir un barème d'étalonnage hauteurs-débits permanent.

Vingt deux jaugeages ont ensuite été effectués à cette station de 1975 à 1983, entre les cotes 24,5 cm et 109 cm, pour des débits de 3 l.s⁻¹ et 57,8 m³.s⁻¹. Ceux-ci figurent dans le tableau I.

Tableau I : Jaugeages, période 1975-1983

	Date	H. cm	Q. m ³ .s ⁻¹		Date	H. cm	Q. m ³ .s ⁻¹
1	19/08/75	109	51,2	12	04/11/76	43,5	1,7
2	18/10/75	39	0,508	13	05/08/77	64	19,5
3	01/11/75	24,5	0,003	14	12/08/77	101	57,8
4	15/07/76	98	57,5	15	20/07/78	64	19,6
5	10/08/76	78	31,55	16	24/08/78	99	50
6	25/08/76	67	19,28	17	12/09/78	51	6,1
7	29/08/76	59	11,24	18	26/10/78	48,5	4
8	01/09/76	98	49,84	19	01/08/81	51	6,3
9	13/09/76	71,5	23,2	20	25/08/81	67	22,1
10	21/09/76	57	8,58	21	15/08/83	78	6,8
11	14/10/76	50	6	22	28/08/83	50	1,7

Depuis juillet 1984, la station a été réinstallée toujours en rive droite, à 200 m environ en amont du radier de Bogo sur la route de Guirvidig. Elle était équipée de trois éléments

d'échelle et d'un limnigraphe. Le zéro de l'échelle se trouvait à 2,39 m en dessous du repère du CRH, constitué par le sommet d'un fer en T, solidement planté au pied du grand arbre le plus proche de la guérite du limnigraphe.

Trente six jaugeages ont été effectués à cette station de 1984 à 1986 entre les côtes 8,5 cm et 162 cm pour des débits de $0,225 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La liste est donnée dans le tableau II. Ils ont permis d'établir un barème de traduction hauteurs-débits pour cette période. La validité de ce dernier étalonnage a été vérifiée avec les jaugeages effectués en 1994 et 1998 (tableau III).

Tableau II : Jaugeages, période 1984-1986

	Date	H. cm	Q. $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		Date	H. cm	Q. $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		Date	H. cm	Q. $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	26/07/84	55	23,6	13	24/8/85	38	10,2	25	12/9/85	46	15,7
2	27/7/84	60	24,6	14	24/8/85	125	108	26	24/9/85	44	17,2
3	29/8/84	16,5	1,92	15	24/8/85	150	139	27	26/9/85	25	3,5
4	4/9/84	8,5	0,2	16	24/8/85	162	145	28	17/7/86	25	3,4
5	7/9/84	38	6,7	17	25/8/85	85	46	29	25/7/86	58	25,8
6	30/7/85	14	0,6	18	27/8/85	50	2,4	30	27/7/86	81	47,6
7	16/8/85	53	19,7	19	2/9/85	90	61,8	31	31/7/86	81	47,6
8	18/8/85	71	33,9	20	3/9/85	108	80,4	32	13/8/86	43	16,3
9	19/8/85	57	24	21	4/9/85	75	36,4	33	17/8/86	72	47,2
10	20/8/85	49	15,9	22	5/9/85	57	22,1	34	23/8/86	17	3,1
11	22/8/85	50	16,2	23	6/9/85	51	17,6	35	27/8/86	16	3
12	23/8/85	46	14,6	24	8/9/85	39	9,8	36	26/9/86	46	20,1

Tableau III : Derniers jaugeages de vérification de l'étalonnage 1984-1986

	Date	H. cm	Q. $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	25/09/94	42	20
2	20/08/98	107	67,6
3	24/08/98	148,5	110
4	24/08/98	134	93,8
5	27/08/98	67	29
6	29/08/98	55	16,5
7	24/09/98	39	11,2

Dans le cadre de nos travaux, nous avons effectué une tournée de reconnaissance dans le bassin de Mayo Tsanaga du 18 au 26 juillet 2002. La station n'avait plus été visitée depuis 1998 et nous l'avons trouvée détruite. Seul le repère du CRH et la guérite du limnigraphe sont restés en place. La nouvelle batterie d'échelles, installée sur le même site que l'ancienne est composée de trois éléments d'échelle, 0-1, 1-2 et 2-3, fixés sur des fers UPN 80 mm. Le zéro de cette station est placé à 2,75 m sous la borne CRH, soit 0,36 m en dessous de la précédente station. Trois jaugeages sont effectués entre 2002 et 2003, 48 cm et 117 cm (figure 7.1, page 228).

Le repère CRH qui constitue actuellement la référence de cette station n'est pas relié au nivellement national. Avant la disparition du repère CRH qui constitue actuellement la référence de cette station, il importe de le raccorder au nivellement national, afin de conserver une référence réelle de la station.

La station de Betare Oya

La station est située à 10 km à l'ouest de Bétaré oya, au bac sur la piste de Mararaba. Une échelle provisoire avait été installée par les travaux publics du Cameroun en 1946. Cette échelle a disparu la même année sans laisser de traces. L'échelle définitive a été mise en place le 1^{er} avril 1951 par l'ORSTOM, en rive gauche, à quelques mètres en amont du bac. Elle est composée des éléments d'échelle 0 à 6 m.

Plusieurs nivellements de calage et de contrôle ont été effectués au cours de la période d'observation. La station est calée à une borne en béton, située entre deux rôniers supports du câble du bac. Par rapport à ce repère (+ 100,00 m), le zéro de l'échelle est à la cote 94,125 m. Du 11 janvier au 10 juin 1968 et du 10 décembre 1968 au 03 juin 1969, l'échelle était doublée par un limnigraphe OTT type X.

23 jaugeages ont été effectués de 1951 à 1971 entre les cotes 26 et 535 cm, pour des débits respectifs de 23,6 et 560 m³.s⁻¹. La station est dans l'ensemble stable et l'ensemble des jaugeages a permis d'établir un barème hauteurs-débits permanent.

30 autres jaugeages ont été réalisés entre 1973 et 1982. Les lectures et l'entretien des échelles ont cessé depuis décembre 1986. Dès avril 1991, la prise en charge du fonctionnement de cette échelle est assurée par la SONEL. Mais ce n'est qu'en 1997 et 1998 que le CRH y a effectué des jaugeages de contrôle (Tableau IV).

Tableau IV : Derniers jaugeages de contrôle

Date	H (cm)	Q. m ³ .s ⁻¹
14/09/97	384-383	369
09/01/98	63	49,1
09/08/98	248-249	219

Dans le cadre de nos travaux, nous avons visité la station le 04 septembre 2002. Les échelles sont encore en place, à quelques mètres en amont du bac. La section de jaugeage reste assez bonne, au droit des échelles. Trois jaugeages y ont été effectués entre 2002 et 2003 (figure 7.2, page 229).

Les relevés de hauteurs d'eau que nous avons récupérés à la station montrent que depuis l'année 2000, le plan d'eau descend en dessous de l'élément 0-1 en étiage. L'installation d'un élément négatif à cette station est indispensable pour contrôler les basses eaux.

La station de Mbalmayo

Une première station a été installée en 1940 sur la culée du pont (aujourd'hui ancien pont), rive droite, coté amont. L'échelle limnimétrique était constituée d'un chevron en bois encoché tous les 5 cm. Elle a été observée de manière discontinue entre 1940 et 1947. Le 1^{er} février 1951, l'ORSTOM (IRD) cale au même zéro sur le chevron des éléments de tôle émaillée. Le 17 mars 1951, une nouvelle station est installée en rive droite et à 50 m du pont. Le zéro de l'échelle est à 35 cm en dessous du zéro de l'ancienne station, à l'altitude 633, 507 m, soit à 7,741 m sous le repère IGN, constitué par un piton situé à l'entrée du pont coté amont, rive gauche sur la partie extérieure de la maçonnerie (641,248 m, avril 1954). Par suite des détériorations dues au parc de bois, la station a été déplacée en amont à 200 m. Tous les éléments ont été scellés sur le quai, coté amont. Le zéro était alors de 633,47 m le 15/12/1971.

La section de jaugeage était en aval des échelles, entre le pont et le quai. Cinquante-neuf jaugeages a été effectués depuis l'origine de la station jusqu'à juin 1978, entre les cotes – 005 cm et 556 cm, correspondant respectivement à des débits de 12,4 et 551 m³.s⁻¹. Les cotes sont ramenées à l'échelle 1971. Ces jaugeages ont permis d'obtenir une courbe d'étalonnage avec une assez bonne précision.

Les échelles sont restées stables jusqu'en 1992. Plusieurs nivellements de contrôle et des jaugeages ultérieurs ont été effectués. Les jaugeages en amont des échelles (entre 1989 et 1991) ont montré la stabilité de la relation hauteurs-débits.

A la date du 19 février 1998, il restait de cette station un élément d'échelle négatif fixé sur la base du quai. Trois autres éléments (0-1, 1-2 et 2-3) ont été calés à partir de cet élément négatif et fixés sur des fers UPN 80 mm, alignés parallèlement au mur coté amont du quai. Les observations sont continues depuis cette date et se poursuivent dans le cadre d'un programme ORE, mais les jaugeages indiquent une légère modification de la relation hauteurs-débits, notamment pour les moyennes eaux.

Dans le cadre de nos travaux, la section de jaugeage a été conservée entre l'ancien pont et les échelles. Nous y avons effectué trois jaugeages (figure 7.3, page 229) qui s'inscrivent dans la tendance d'une inflexion de la courbe d'étalonnage, montrant une diminution des débits pour les cotes de moyennes eaux.

La station de Ngoazk

Installée par l'ORSTOM le 1^{er} juin 1953, en rive droite à l'amont du bac de la route vers la Guinée équatoriale, à 13 km d'Ambam, la station était équipée d'éléments d'échelle de 0 m à 5 m. Le zéro de l'échelle est à 3,765 m, sous une borne repère, et n'a pas varié au cours de la période d'observation. Mais le dossier de la station dans les archives du CRH indique 4,060 m sous la même borne, à partir du nivellement de 1983, soit un décalage de - 0,295 m. Cette borne est située sur la fondation du pylône qui soutient le câble du bac, à une altitude IGN de 538,762 m. Un limnigraphe OTT type X avait été installé le 08 juillet 1980 en amont du bac.

Une analyse des jaugeages sur les différentes périodes, fait remarquer que les jaugeages réalisés entre 1983 et 1985, à des cotes au-dessus de 200 cm, connaissent un décalage systématique de + 0,3 m, alors que ceux correspondant à des cotes inférieures s'alignent assez bien avec la courbe hauteurs-débits. Il nous semble alors que le nivellement de 1983 aurait été effectué en hautes eaux, sur des échelles légèrement affaissées, et que le zéro de la station est resté fixe, à 3,765 m sous la borne.

Quarante-deux jaugeages effectués de 1954 à 1981 entre les cotes 28 cm et 311 cm, pour une variation des débits de $32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $770 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ont permis de définir la relation hauteurs-débits de la station. De 1982 à 1987, vingt six jaugeages de contrôles ont été réalisés (tableau V).

Tableau V: Jaugeages de contrôle

	Date	H. cm	Q. m ³ /s		Date	H. cm	Q. m ³ /s
1	12/03/82	74-77	58	14	12/04/85	231-233	425
2	18/06/82	148	229	15	22/07/85	165	210
3	29/07/82	95,5	115	16	24/07/85	161	202
4	02/09/82	150	226	17	12/09/85	179	254
5	24/11/82	264	488	18	14/09/85	186	282
6	03/05/83	114	126,3	19	01/11/85	301	708
7	08/07/83	69	60,6	20	19/11/85	310	711
8	02/09/83	992	11,1	21	21/11/85	286-287	628
9	02/05/84	157,5	219	22	21/11/85	296	626
10	06/08/84	150	197	23	11/03/86	112	130,1
11	16/10/84	268	534	24	17/03/86	71	9,12
12	19/10/84	262	468	25	08/06/86	171	254
13	02/02/85	90	73	26	11/01/87	52	58

Lors de la tournée de reconnaissance de juin 2002, nous avons constaté que la station a été détruite par les travaux de construction de la route Ebolowa – Ambam – frontière Gabon.

Dans le cadre de nos travaux, la station est réinstallée, toujours en rive droite, à 50 m environ en amont du pont en construction. Elle est composée de 4 éléments d'échelle de 0 à 4 m, calés au repère IGN et fixés sur des fers UPN.

La station de Kribi

La station a été installée le 05 juin 1955 par l'ORSTOM en face de la pharmacie St Rachel, à deux km du port sur la route Kribi – Lolodorf, à l'intérieur de la scierie (SEFA), qui n'existe plus de nos jours. Elle était composée d'éléments de 0 à 5 m.

La section de jaugeage se trouvait à 30 m environ en aval des échelles. Vingt jaugeages ont été réalisés de 1962 à 1977 entre les cotes 208 cm et 404 cm, pour des débits de 8,93 à 149 m³.s⁻¹. D'autres jaugeages y ont été effectués par le CRH jusqu'en 1990.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons visité la station à la date du 23 août 2002. Un tronçonneau mort fait obstacle au droit de l'ancienne station, il a entraîné dans sa chute certains éléments d'échelle. Seul l'élément d'échelle 2-3 de l'ancienne station est repéré et a servi à caler les nouveaux éléments que nous avons installés. Trois jaugeages de contrôle entre 2002 et 2003 (figure 7.4, page 230) confirment la stabilité de la relation hauteurs-débits.

La station de Mundame

La station a été installée le 1^{er} décembre 1951 en rive gauche, au poste de l'ancienne douane française. Déplacée en 1952, elle est installée sur le mur du quai coté aval en rive droite, et se composait d'éléments de 0 à 10 m. Le zéro des échelles était à l'altitude 16,507 m.

Trente trois jaugeages ont été réalisés de 1953 à 1977 entre les cotes 56 et 586 cm. Les débits s'ordonnent autour d'une courbe d'étalonnage sans grande dispersion.

Dans le cadre de nos travaux, nous n'avons retrouvé que l'élément 0-1, fixé sur le vieux quai tombé en ruine, qui a servi à caler quatre autres éléments. Les trois jaugeages de 2002 à 2003 indiquent une relation hauteurs-débits acceptable (figure 7.6, page 231).

ANNEXE II

Systeme hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), Changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels.

Liénoù, G., Sighomnou, D., Sigha-Nkamdjou, L., Mahé, G., Ekodeck, G. E., Tchoua, F. (2003)

Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003 (ed. by Servat E., Najem w., Lduc C., Shakeel A.), 215-222, IAHS publ. 278.

Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), Changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels.

G. Liéno, D. Sighomnou, L. Sigha-Nkamdjou,

Centre de Recherches Hydrologiques BP 4110 Yaoundé (Cameroun) ; e-mail : liengast@yahoo.fr

G. Mahé

IRD, 01 BP 182 Ouagadougou Burkina Faso

G. E. Ekodeck, F. Tchoua,

Faculté des sciences, Université de Yaoundé I

Résumé

Ce travail porte sur les bilans des inondations et des matières en suspension d'une plaine d'inondation en milieu sahélien camerounais, dans des conditions hydrologiques déficitaires. Le système hydrologique du « Yaéré » est alimenté par les eaux torrentielles (Mayo) provenant des monts Mandara à l'ouest et des déversements des eaux de crue du Logone. La plaine est le lieu d'intenses activités agricoles et piscicoles qui conditionnent les différents secteurs d'activité économique. La diminution des apports en eau de surface, apparue au début des années 1970, a réduit considérablement les apports d'eau dans la plaine. Dans l'optique de restaurer les inondations, et de ce fait d'améliorer la productivité agricole, pastorale et halieutique, un barrage de retenue a été construit en 1979 dans la localité de Maga.

Après une présentation du bilan des flux liquides et des matières en suspension dans le « Yaéré », nous comparons les résultats antérieurs aux aménagements hydroagricoles d'une part et au début de la sécheresse d'autre part. Outre une actualisation du bilan hydrologique de l'hydrosystème, les résultats montrent que les aménagements hydroagricoles, tout en contribuant à l'accentuation du déficit en apport d'eau dans la plaine, ont participé à son appauvrissement en limons du fait du rôle de piège joué par le lac de Maga. Cet élément pourrait d'avantage expliquer la baisse de la productivité de la plaine que la réduction des apports en eau seule.

Mots clés : Cameroun, Plaine d'inondation, Logone, bilan hydrologique, matières en suspension

Introduction

Située en zone sahélienne, la province de l'Extrême-Nord Cameroun est occupée par une grande plaine qui s'étend des pieds des monts Mandara jusqu'aux limites sud du lac Tchad. La limite Est est marquée par les bourrelets de berge du fleuve Logone. Les activités humaines dans cette région du Cameroun sont liées à la présence de l'eau dans la plaine. Plusieurs travaux ont permis de comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème. Ainsi, en plus des apports dus aux précipitations directes (60%), la plaine reçoit ses eaux des Mayo des monts Mandara (5%), mais aussi et surtout des crues du Logone (35%) (Naah, 1990). Les effets des crues du Logone sont comparables à ceux du Nil en Afrique orientale ou des fleuves Niger et Sénégal en Afrique de l'ouest. Mais, la baisse de l'hydraulicité des fleuves est ressentie également dans les lacs et les plaines d'inondation qu'ils alimentent, avec des conséquences évidentes sur leur productivité (agriculture, élevage, pêche etc.). Suite à la baisse des précipitations, et à la

baisse des hydraulicités, les surfaces inondées se sont amenuisées considérablement, entraînant une dégradation de l'environnement, et par-là du tissu socio-économique. Des aménagements hydroagricoles intervenus dans la région, afin de réduire la dépendance de l'agriculture vis à vis des précipitations, ont modifié le bilan hydrologique tout en aggravant le déficit en alimentation en eau de la plaine (Sighomnou et Naah, 1997 ; Molinier *et al.*, 2000).

Cette plaine est la zone d'accumulation par excellence des particules transportées par les rivières. Ces dépôts constituent la principale source d'éléments fertilisants dans la plaine. En nous basant sur les données des stations de longue durée, nous faisons ressortir les parts de la sécheresse et des aménagements dans le déficit d'apport en eau dans la plaine. Un bilan des apports en matières en suspension sera aussi présenté. A la différence des travaux antérieurs, celui-ci met en évidence l'influence des aménagements sur les apports en eau et de matières dans la plaine.

Le milieu physique de l'Extrême-Nord et la dynamique des inondations du Yaéré

Milieu physique et données de l'étude

L'Extrême-Nord Cameroun, au-delà du 10^e parallèle, est une région contrastée géographiquement et climatiquement. Ainsi, les montagnes occidentales sur lesquelles l'érosion a provoqué la formation de modelés sauvages s'opposent à la plaine alluviale, à l'Est, que les eaux de pluies et les épanchements du fleuve Logone transforment en vastes marécages, les « Yaérés » (figure 1). Les monts Mandara sont aussi recensés parmi les régions de peuplement dense du Cameroun (plus de 100 habitants/km²).

La partie Ouest se distingue par ses massifs montagneux et inselbergs qui culminent à 1400 m, formés de roches cristallines et volcaniques. Ces formations sont couvertes d'arènes détritiques et de lithosols peu évolués, essentiellement sableux et mal protégés contre l'érosion. Les matériaux issus de la dégradation forment en zone de piémont, des alluvions à fortes proportions d'argiles à mesure qu'on avance vers la plaine.

Les données de débit utilisées pour cette étude sont issues des chroniques des stations de longue durée, certaines depuis le début des années 1950. Les observations faites sur les Mayo et les défluent du Logone n'ont commencé qu'à la fin des années 1960. Les moyennes pluviométriques sur la plaine sont établies à partir de trois stations de longue durée pour la période 1950-1969. Le réseau de calcul est élargi à six autres stations dont les observations ne commencent qu'au début des années 1970. Les mesures des matières en suspension ont été entreprises notamment pour le Mayo Tsanaga et le Mayo Motorsolo dès la fin des années 1960. Celles-ci ont permis d'estimer le transport spécifique dans la région des Monts Mandara (Nouvelot, 1969 ; Olivry *et al.*, 1974). Mais des mesures systématiques des matières en suspension sur l'ensemble des Mayo ont été effectuées au cours des années 1980 (Naah, 1990).

Dynamique des inondations

Les aménagements entrepris dans la région ont perturbé de manière assez significative le mécanisme de remplissage et de vidange de la plaine, décrit par Benech *et al.* (1982), Olivry (1986) et Naah (1990). Dès le mois de mai, les premières pluies saturent les sols argileux qui, en gonflant, ferment les fentes de dessiccation. La strate herbacée démarre son développement et les mares commencent à se remplir. A partir du mois d'août, les apports des Mayo provoquent les premiers écoulements sous forme de minces filets, suivant les fines dépressions dans la plaine. Aux mois de septembre et octobre, le Logone couvre plus ou moins la plaine de ses eaux de crue. En raison de la nature

argileuse des sols, les zones d'infiltrations sont réduites, limitées aux principaux axes d'écoulements. La nappe d'eau couvrant la plaine est alors, pour l'essentiel, reprise par l'évaporation. Une partie rejoint le lac Tchad, en année de bonne hydraulicité, par l'El Beid notamment.

Dans la localité de Maga, au sud-est de la plaine, une digue de 27 km de long, construite en 1979 retient dans une dépression les eaux du Mayo Tsanaga et du Mayo Boula essentiellement. Il est en outre prévu une alimentation contrôlée par une vanne à partir d'un défluent du Logone. Quatre ouvrages de prise d'eau aménagés sur la digue servent à irriguer par gravité les périmètres rizicoles. Le volume maximum annuel de prélèvement est de 340 millions de m³ environ (Naah, 1990).

Effets conjugués de la sécheresse et des activités anthropiques

Sur les écoulements de surface

Depuis le début des années 1970, le Yaéré subit la péjoration des régimes hydroclimatiques que connaissent les sous-régions d'Afrique occidentale et centrale. Le Logone constitue l'essentiel du réseau hydrographique de la région. Les informations disponibles sur les régimes des Mayo sont très limitées et discontinues. Néanmoins, l'analyse des débits du Logone dessine quelques tendances des régimes des inondations. Aussi, pour présenter l'impact de la sécheresse sur les crues du Logone et par voie de conséquence sur les inondations, nous avons comparé (figure 2) les débits moyens journaliers caractéristiques dépassés pendant un mois (DC11) aux stations de Bongor et Logone-Birni, entre lesquelles se produisent les débordements d'une part, et les écoulements de El Beid, principale voie de vidange de la plaine d'autre part.

Les DC11 à Bongor passent en moyenne de 1900 m³/s avant 1970, année de rupture climatique (Paturel *et al.* 1998), à 1150 m³/s pendant la période sèche, soit une baisse d'environ 40%. Pendant la récente période sèche, on peut classer les échanges entre le Logone et la plaine en trois catégories :

- la première catégorie est constituée par les années pour lesquelles les DC11 à Bongor sont supérieurs à la moyenne de 1150 m³/s. Les inondations sont suffisamment importantes pour atteindre le El Beid. Ses modules sont alors proportionnels aux modules du Logone à Bongor,
- la deuxième catégorie regroupe les années au cours desquelles les pertes du Logone ne sont pas assez importantes pour atteindre le El Beid. Les eaux d'inondation sont alors reprises principalement par l'évaporation,
- la dernière catégorie regroupe les années de recrudescence de la sécheresse telles 1972, 1984, 1987, 1992 et 1997. Les débordements sont pratiquement nuls. La plaine ne reçoit que les eaux de pluie et celles de quelques Mayo, qui suffisent à peine pour saturer le sol.

L'importance des Mayo dans l'alimentation de la plaine en eau et en matières issues de l'érosion, notamment des limons a été évoquée plus haut. Le Mayo Tsanaga et le Mayo Boula, drainent près de 50 % de la superficie des monts Mandara. La figure 3 indique, pour chaque année, les volumes d'eau écoulés par les deux rivières et qui transitent par le lac de Maga. Elle montre que les apports de ces deux Mayo dépassent la capacité du lac (600 millions de m³). Durant les années de bonne hydraulicité, un volume important d'eau excédentaire est évacué vers le Logone via le déversoir de Pouss. Ces pertes pour la plaine, sont estimées en année moyenne à $0,539 \cdot 10^9$ m³. Elles atteignent en années de forte hydraulicité $2 \cdot 10^9$ m³ (Sighomnou *et al.*, 1999).

Le tableau 1 présente le bilan des apports d'eau dans le Yaéré. La dernière ligne indique les volumes écoulés par l'El Beid. On note que depuis une trentaine d'années, les volumes d'eau reçus par la plaine s'amenuisent considérablement. La décennie 80 se

distingue par une absence presque totale d'inondation, due notamment aux aménagements (mise en eau du lac de Maga et endiguement des berges du Logone). Au total, si la baisse des volumes d'eau reçus par la plaine est imputable à la seule sécheresse au cours de la décennie 70, elle a été accentuée durant la décennie 80 par les aménagements. La prise en considération des conséquences de ces aménagements (Driver & Van Wetten, 1992) a conduit à la mise en place d'un projet de ré-inondation du Yaéré. Les premiers résultats obtenus pendant la décennie 1990 montrent une reprise progressive des inondations.

Sur les transports solides en suspension

La région des monts Mandara compte parmi les deux les plus érodables du Cameroun. Les concentrations des torrents en matières en suspension sont de l'ordre de 1600 g/m^3 et les flux moyens spécifiques sont de $210 \text{ t/km}^2/\text{an}$ avec des valeurs maximales pouvant dépasser $1000 \text{ t/km}^2/\text{an}$, surtout en début de saison des pluies. Ces matières transportées depuis les zones de cultures amont sont décantées dans la plaine à la faveur de la faiblesse des pentes et de la densité de la végétation herbacée. Ceci représente en année moyenne $1,6 \cdot 10^6$ tonnes de matériaux, essentiellement des limons. L'apport annuel du fleuve Logone en matières en suspension à la plaine d'inondation est estimé à $0,897 \cdot 10^6$ tonnes (Gac, 1980). Dans les conditions naturelles (sans influence anthropique), un total de $2,5 \cdot 10^6$ tonnes de matières en suspension transitent en année moyenne par la plaine. Cette valeur semble importante au regard des apports en suspension du fleuve Chari dans le lac Tchad, estimés à $2,83 \cdot 10^6$ tonnes (Gac, 1980).

Depuis la fin des années 1970, la retenue de Maga piège l'essentiel des matières en suspension transportées par du Mayo Tsanaga et du Mayo Boula, soit environ $0,716$ tonnes par an. Le tableau 2 présente le bilan des matières en suspension déposées dans la plaine avant et après le barrage.

Il ressort de ce tableau que, si la baisse des crues du fleuve Logone a inéluctablement entraîné celle des apports en suspension dans le Yaéré, le lac de Maga est responsable pour plus de 80 % du déficit de limons dans la plaine du nord Cameroun. Ce lac reçoit en année moyenne un volume de $0,55 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de matières en suspension.

Les études menées dans le haut bassin du Mayo Tsanaga (Olivry & Hoorelbecke, 1975) ont montré un important charriage de fond, représentant 46 % du transport en suspension. Ces résultats corroborent les observations directes faites aux stations de Maroua et de Bogo, où des bancs de sable sont déplacés après la crue. Ces phénomènes concourent à estimer les apports en matières solides au lac de Maga à $0,80 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par an, soit un taux de comblement de 0,15%.

Conclusion

Les inondations dans la plaine du Logone ont connu les effets de la baisse des écoulements observée au Sahel depuis le début des années 1970. Le bilan des apports montre que les aménagements entrepris dans le but d'une amélioration de la gestion de la ressource en eau insuffisante, ont contribué plutôt à accroître le déficit des apports à la plaine. Les études sur les transports des matières solides en suspension n'ont pas atteint l'ampleur qu'aurait mérité la complexité du système Mandara-Logone dans l'Extrême-Nord Cameroun. Mais il nous a paru nécessaire de présenter cette synthèse qui, en faisant le point sur les transports solides vers le Yaéré et le lac de Maga, apporte des éléments d'explication aux modifications du système environnemental survenues dans cette région. Une étude en cours permettra de mieux comprendre l'évolution des régimes liquides et solides du Mayo Tsanaga.

Remerciements Les auteurs remercient le Projet Waza-Logone, la Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie (DREM) du Tchad, la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT) et le Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) du Cameroun pour avoir mis à leur disposition les données récentes nécessaires pour cette étude.

Références

- Benech, A., Quensière, J., Vidy, G. (1982) Hydrologie et physico-chimie des eaux d'inondation de la plaine d'inondation du Nord Cameroun. *Cahiers ORSTOM, sér. Hydro.*, Vol. XIX, no 1, Paris.
- Drijver, C. A., Van Wetten, J. C. J. (1992) Les zones humides sahéliennes à l'horizon 2020. Modifier les politiques du développement ou perdre les meilleures ressources du Sahel. Un projet de Birdlife International, CML, Pays Bas.
- Gac, J. Y. (1980) Géochimie du bassin du lac Tchad. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 123, Paris, 251 p.
- Molinier, M., Sighomnou, D., Sigha-Nkamdjou, L. (2000) Perturbation du milieu naturel du Yaéré dans le nord Cameroun : Changements climatiques ou actions anthropique ? In: *Sociétés et Environnement au Cameroun ; Revue de Géographie du Cameroun* (eds. Sci. K. Fodouop et G. Courade), vol. 14, no 2, 155 – 170.
- Naah, E. (1990) Hydrologie du grand Yaéré du nord Cameroun. Thèse de doctorat ès sciences, Université de Yaoundé, Cameroun, 326 p.
- Nouvelot, J. F. (1969) Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. ORSTOM, Yaoundé, 48 p.
- Olivry, J.C., Hoorelbecke, R., Andiga, J. (1974) Quelques mesures complémentaires de transports solides en suspension au Cameroun. ORSTOM, Yaoundé, 63 p.
- Olivry, J.C., Hoorelbecke, R. (1975) Etude hydrologique du haut-bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo (1974-1975). *Rapport définitif*, Institut de Recherches Géologiques et Minières, ONAREST, ORSTOM, Yaoundé, 93 p.
- Olivry, J.C. (1986) Fleuves et rivières du Cameroun. *Collection Monographies Hydrologiques no. 9.*, MESRES, ORSTOM, Paris, 733 p.
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouame, B., Travaglio, M. (1998) Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale. *Sud Sciences & Technologies no 2*, EIER, Ouagadougou, p. 44-52.
- Sighomnou, D., Naah, E. (1997) Gestion des ressources en eau et développement durable. Un exemple dans la province de l'Extrême-Nord Cameroun. In: *Friend'97 – Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*, pub. IAHS no 246, 355-363.
- Sighomnou, D., Sigha-Nkamdjou, L., Molinier, M. (1999) Impacts des prélèvements pour l'irrigation sur l'hydrosystème du lac Tchad. Exemple des aménagements hydro-agricoles de la SEMRY dans l'Extrême-Nord Cameroun. In.: *Hydrological and Geochemical Processes in large river basins, Symposium International AISH*, Manaus, Brazil, 16-19 nov. 1999, CD-Rom Manaus'99-HiBAm.

Tableau 1 : Bilan des apports en eau dans le Yaéré (en 10^9 m³).

	Avant rupture (1950-1969)	Décennie 1970	Décennie 1980 (influence du lac)	Période 1990-1997 (influence du lac et ré-inondation)
Pluies	+ 4,92	+ 4,15	+ 3,56	+ 4,36
Logone à Bongor	17,29	15,27	8,42	11,12
Déversements	+ 4,73	+ 3,28	+ 0,16	+ 2,70
Mayo	---	+ 1,07	+ 0,38	+ 0,48
Volumes des sorties par El Beid (station de Tildé)	---	- 0,352	- 0,096	- 0,28

Tableau 2 : Bilan des apports en suspension dans le Yaéré en 10^6 tonnes

	Avant barrage 1969-1973	Après barrage 1983-1986	Déficit
Monts Mandara	1,6	0,884	0,716
Fleuve Logone	0,897	0,768	0,129
Total	2,497	1,652	0,84

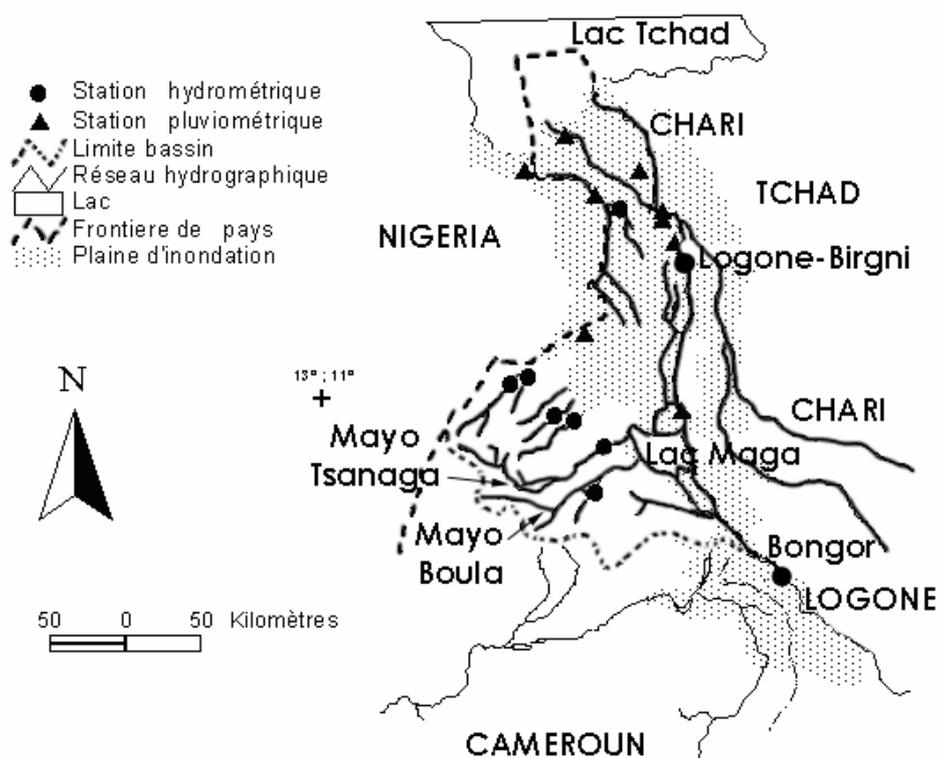


Figure 1 : Plaine d'inondation du Logone

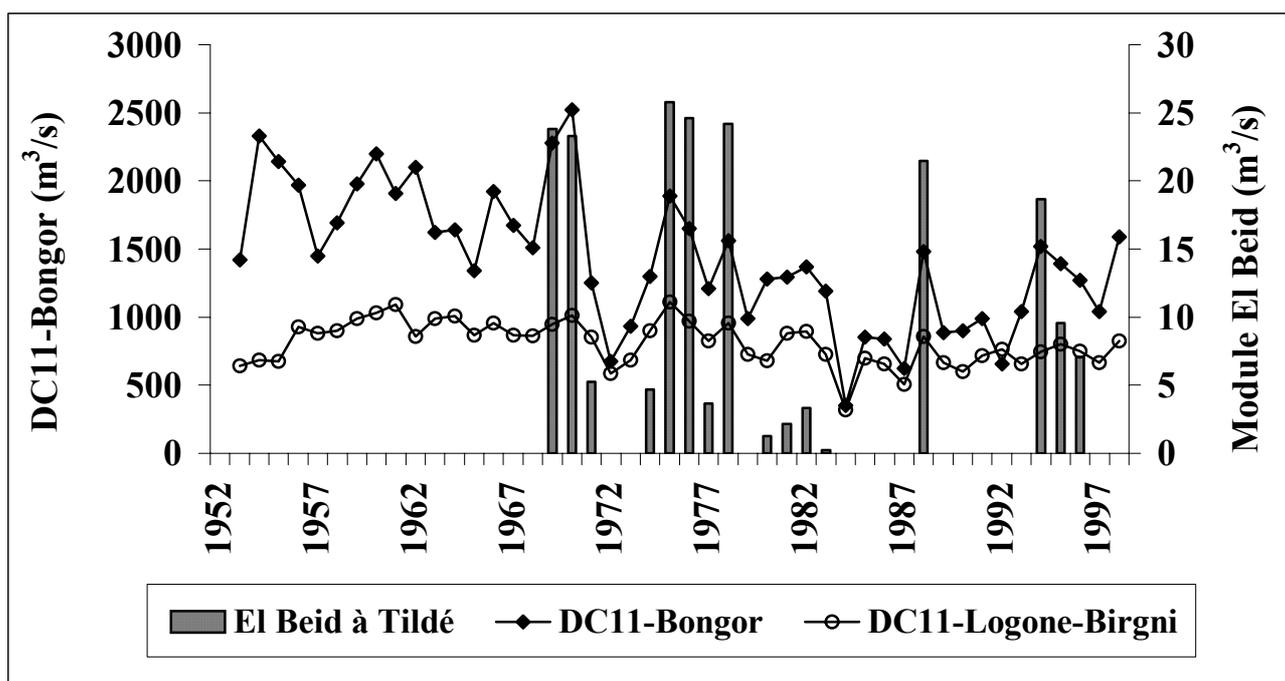


Figure 2 : Variations des crues du fleuve Logone (DC11) aux stations de Bongor et de Logone-Birni, conséquences sur les écoulements de El Beid

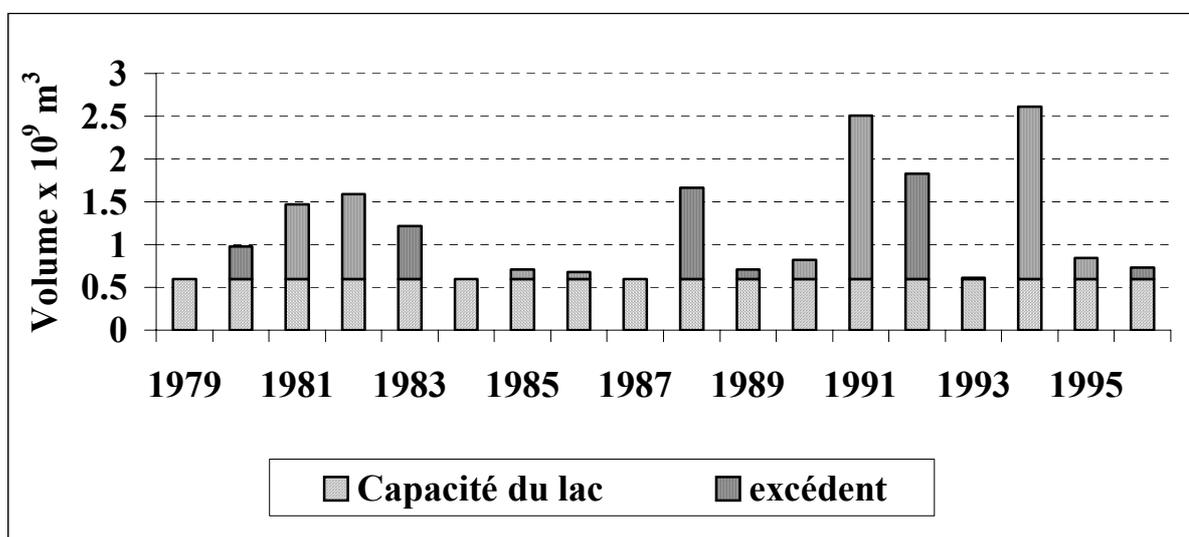


Figure 3 : Evolution des volumes d'eau annuels transitant par le lac de Maga

ANNEXE III

Régimes des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques.

Liénoù, G., Mahé, G., Olivry, J.-C., Naah, E., Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Servat, E., Ndam Ngoupayou, J.R., Ekodeck, G.E., Paturel J.E. (2005)

Hydrological Sciences-Journal-des Sciences hydrologiques **50**(1), 111-123.

Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun: revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes; diversité climatique et actions anthropiques

GASTON LIENOU¹, GIL MAHE², JEAN-CLAUDE OLIVRY²,
EMMANUEL NAAH³, ERIC SERVAT²,
LUC SIGHA-NKAMDJOU⁴, DANIEL SIGHOMNOU⁴,
JULES NDAM NGOUPAYOU¹,
GEORGES EMMANUEL EKODECK¹
& JEAN EMMANUEL PATUREL²

1 Université de Yaoundé I, c/o IRD BP 1857 Yaoundé, Cameroun
liengast@yahoo.fr

2 IRD, UMR HydroSciences, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

3 UNESCO, United Nations Offices, Block C, United Nations Avenue, Girigi, Nairobi, Kenya

4 Centre de Recherches Hydrologiques, BP 4110 Yaoundé, Cameroun

Résumé Des mesures des matières en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun sont réalisées depuis la fin de la décennie 1950. Ces mesures, bien que souvent ponctuelles, constituent un support privilégié pour une approche globale des régimes des transports solides en suspension dans les différentes rivières. On tente d'appréhender l'intensité du transport solide en suspension dans les rivières et d'en déterminer les principaux facteurs conditionnels à l'échelle des principales unités climatiques. L'influence de l'activité humaine est mise en évidence. Il ressort des analyses que les fortes pentes, la densité de la population, le travail du sol et l'élevage en sont les facteurs primordiaux. La charge solide des rivières croît avec la latitude, de 20–40 g m⁻³ en zone équatoriale, à 80–100 g m⁻³ dans les zones de transition et à 150–160 g m⁻³ en zone tropicale sèche. Le choix de la taille du bassin versant pour la caractérisation du taux d'érosion effectif est indispensable. En effet, à l'échelle des grands bassins (5 × 10⁴ km²), il y a une intégration des caractéristiques géomorphologiques, phytogéographiques, pédologiques et anthropiques hétérogènes en caractéristiques moyennes, qui ne rendent plus compte des influences locales des milieux sur le transport solide.

Mots clefs action anthropique; analyse spatiale; Cameroun; érosion; transport solide

Regimes of suspended sediment flux in Cameroon: review and synthesis for the main ecosystems; climatic diversity and anthropogenic activities

Abstract Since the end of the 1950s, suspended matter measurements have been carried out in the streams and rivers of Cameroon. Despite the fact that these are often point measurements, they provide a framework for a global approach towards studying the regimes of suspended sediment transport in these rivers. The objective here is to assess the intensity of sediment transport and to determine the principal factors which influence it, according to the main climatic units. The influence of human activities is pointed out. It appears that steep slopes, population density, soil cultivation and cattle grazing are the essential factors. The sediment load in these rivers is increasing with latitude with 20–40 g m⁻³ at the Equator, 80–100 g m⁻³ in the transition zones and 150–160 g m⁻³ in the dry tropical zones. The choice of drainage basin size for the characterisation of the rate of effective erosion is indispensable. In fact, in large drainage basins (5 × 10⁴ km²), there is an integration of heterogeneous geomorphological, phytogeographical, pedological and anthropogenic characteristics into average characteristics which do not show the influence of local conditions on sediment transport.

Key words anthropogenic action; spatial analysis; Cameroon; erosion; sediment transport

INTRODUCTION

Les premières mesures de transport solide au Cameroun ont été réalisées dans la partie nord en 1955/56. Dans les années 1960, quelques campagnes de mesures sont effectuées dans les bassins versants de la Sanaga, du Mbam et du Mayo Tsanaga, suivant une méthodologie mise au point par l'Orstom (Nouvelot, 1972a). Les résultats ont fait l'objet de plusieurs publications (Nouvelot, 1969; 1972a,b; Olivry *et al.*, 1974; Olivry, 1976, 1977). Les mesures ultérieures ont été réalisées à l'occasion des projets d'aménagement tels que le barrage hydroélectrique sur le Ntem (Boum *et al.*, 1983), le projet grand Yaéré (Naah, 1990), la retenue d'eau de Lom-Pangar sur le Lom (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998). D'autres travaux ont été effectués notamment en zone méridionale dans le cadre des programmes régionaux tels que PEGI et DYLAT (Sigha-Nkamdjou, 1994; Ndam Ngoupayou, 1997).

Cette étude fait le point sur l'ensemble des travaux réalisés à ce jour sur le sujet au Cameroun. Les analyses spatiales réalisées par Nouvelot (1972b) et Olivry (1976, 1977) n'ont pas pu tenir compte des travaux récents, notamment dans la partie méridionale. Aussi, était-il nécessaire, plus de 30 années après, de présenter et de compléter ces précédentes synthèses relatives aux régimes des transports solides en suspension dans les fleuves et rivières du Cameroun. Par une approche globale, cette étude tente d'appréhender l'importance du phénomène et d'en déterminer les principaux facteurs conditionnels à l'échelle des principales unités climatiques du pays.

MILIEU NATUREL

Situé en Afrique Centrale, le Cameroun couvre une superficie de 475 000 km², entre 2 et 13°N. Le pays est partagé en deux grands ensembles climatiques: le climat équatorial à quatre saisons dans la partie sud et le climat tropical à deux saisons au nord. Le relief accidenté du pays et son exposition aux flux de mousson atlantique, associe aux deux principaux climats des nuances maritimes et montagnardes (Fig. 1). Le couvert végétal se différencie du sud au nord, de la forêt dense humide à la steppe à épineux, en passant par les savanes. Le schéma de la phytogéographie du Cameroun décrite par Letouzey (1985) est de nos jours profondément modifié du fait de la pression anthropique. Les formations primaires longtemps soumises aux défrichements et feux ont disparu de manière quasi-irréversible, remplacées par des couverts forestiers secondaires. Dans des régions à cultures intensives, un nouveau paysage végétal s'est mis en place, fait de plantations d'arbres fruitiers ou de haies vives qui protègent de vastes plantations de cultures saisonnières. La population, estimée à 15 millions d'habitants en l'an 2000, est très inégalement répartie sur le territoire, la densité variant de moins de huit habitants par km² à plus de 200 habitants par km².

L'orographie est dominée par la grande barrière de l'Adamaoua, constituée d'une succession de plateaux et de reliefs importants. Dans la partie australe, se rencontrent de nombreuses petites collines séparées par des rivières à débit régulier. Au nord, la vallée de la Bénoué et la cuvette tchadienne constituent les basses terres du pays.

Les sols ferrallitiques rouges couvrent le plateau sud camerounais. Sur le massif de l'Adamaoua, on trouve des sols minéraux bruts sur blocs de cuirasses anciens. Sur les

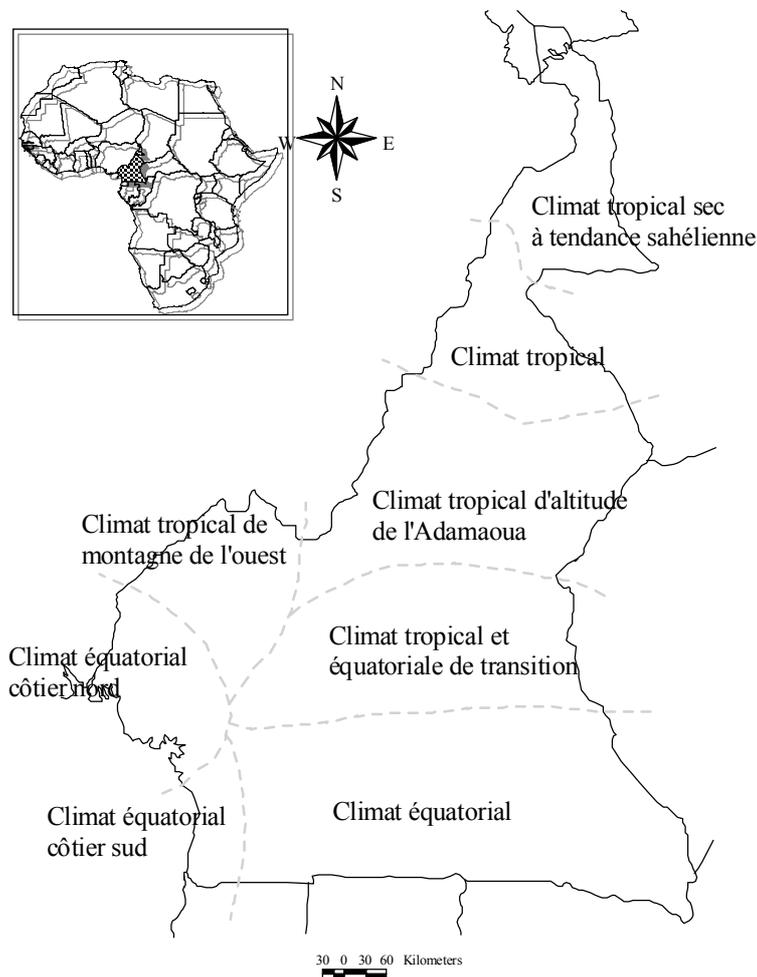


Fig. 1 Les facettes climatiques du Cameroun (dans Olivry, 1986).

dépôts sédimentaires du nord se développent les sols ferrugineux tropicaux et les lithosols, présentant parfois, dans la plaine du Logone, un pourcentage d'argile très élevé.

DES REGIMES CLIMATIQUES DIVERSIFIES

Les oscillations de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), déterminent sur le territoire camerounais deux principales zones de climat: le climat équatorial au sud et le climat tropical au nord. Au sud on observe un climat équatorial à deux saisons des pluies centrées en moyenne en mai et en octobre, mais il n'y a pas de mois sans pluies. Près de la côte (région de Kribi), on retrouve le régime bi-modal des précipitations, toutefois, l'abondance des pluies annuelles permet de définir une variante côtière. Les hauteurs des précipitations annuelles diminuent vers le plateau sud-camerounais.

Dans la partie occidentale, au nord du 5ème parallèle, le seul passage de la ZCIT au cours de l'année entraîne une seule saison des pluies centrée sur le mois d'août. La durée de cette unique saison des pluies diminue de huit mois sur le plateau central de l'Adamaoua à quatre mois dans l'extrême nord.

Dans la partie sud-ouest du pays, l'exposition au flux de mousson et l'effet orographique des montagnes définissent un type de climat particulier, caractérisé par un régime pluviométrique uni-modal centré sur le mois d'août, mais surtout par l'abondance des précipitations. Sur le versant sud-ouest du mont Cameroun, le gradient spatial des précipitations est d'environ 70 mm par km entre Tiko (3000 mm) et Debundscha (10 000 mm).

TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

Données

Une grande quantité de données issues des travaux sur les matières solides en suspension au Cameroun a été rassemblée. Pour certaines stations, les mesures se sont limitées à quelques prélèvements ponctuels. Les principales stations (Fig. 2) ont fait toutefois l'objet d'un suivi régulier au cours de périodes d'observations plus ou moins longues. La fréquence des mesures varie du pas de temps journalier au pas de temps mensuel, et plusieurs jaugeages ont permis d'établir une corrélation entre les concentrations des échantillons prélevés et les concentrations moyennes du cours d'eau. Les

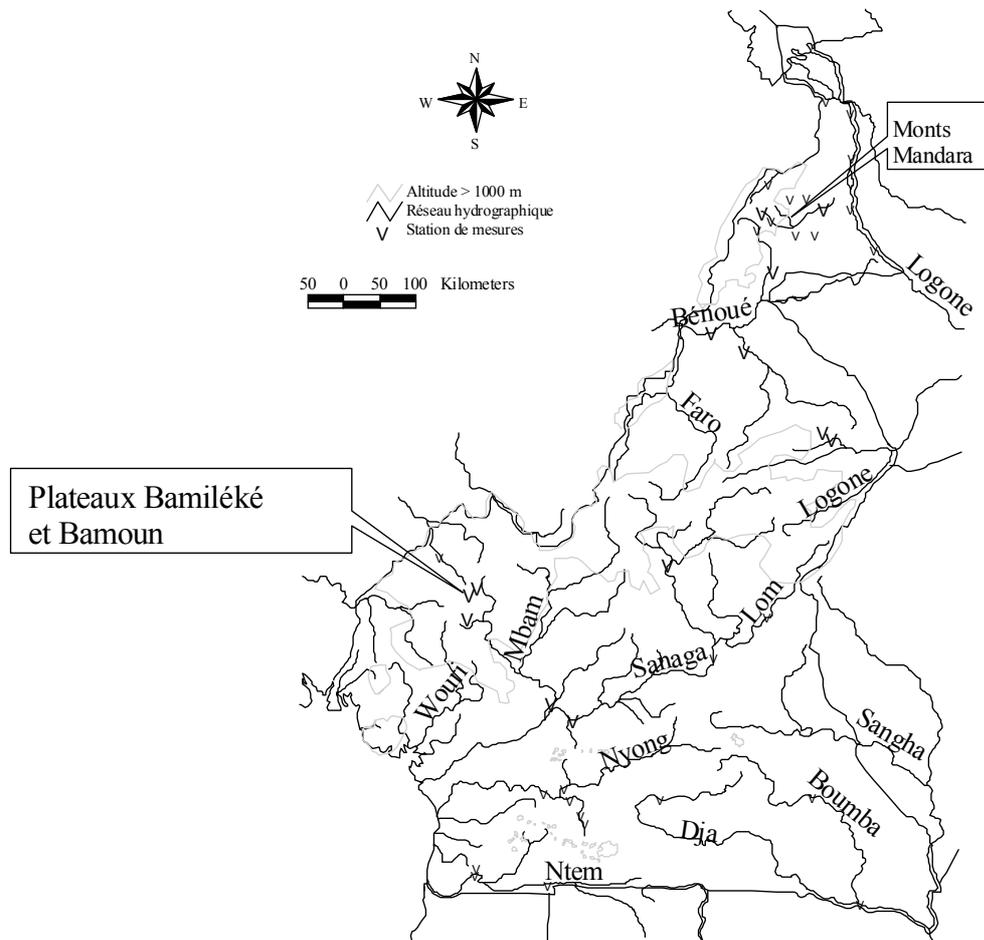


Fig. 2 Stations de mesures des matières solides en suspension.

bassins étudiés sont assez bien répartis dans les différentes facettes du climat camerounais à l'exception des deux variantes du climat côtier, auxquelles les études en cours permettent d'étendre le réseau de mesures.

Variations spatiales

La charge d'un cours d'eau résulte de l'érosion des matériaux sur les versants, par les précipitations et le ruissellement notamment. Plusieurs travaux d'agronomes et de pédologues ont montré que l'intensité de l'érosion sur parcelles et bassins élémentaires dépend des états de surface et en particulier du couvert végétal. Plusieurs incertitudes subsistent sur le passage entre l'érosion sur les versants et le transport solide que nous étudions. Il semble aussi que l'amenuisement du couvert végétal ait une influence prédominante sur la charge solide des cours d'eau à l'échelle des grands écosystèmes camerounais. La Fig. 3 présente la relation entre les latitudes et les concentrations des matières en suspension. L'équation est de la forme:

$$Y = a \times X + b \quad (1)$$

avec Y la concentration et X la latitude. Les paramètres a et b prennent les valeurs respectives de 17 et 21.

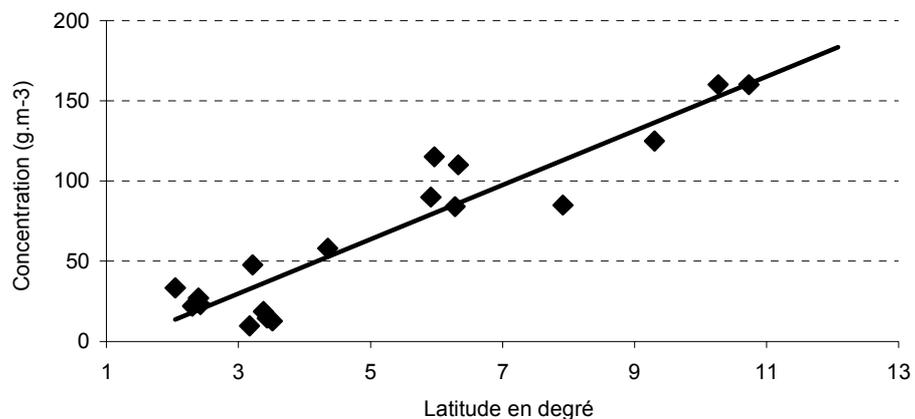


Fig. 3 Augmentation de la charge solide des cours d'eau vers le nord.

On remarque qu'au gradient de végétation se superpose du sud au nord un gradient inverse de concentration. Elle est comprise entre 20 et 40 g m⁻³ en milieu forestier, et passe à des valeurs de 80 à 100 g m⁻³ en zones de transition. Des valeurs beaucoup plus élevées (150–160 g m⁻³) sont obtenues en zone tropicale sèche.

La répartition des flux des matières en suspension qui caractérisent l'intensité de l'érosion est beaucoup plus complexe. L'allure générale semble indiquer une diminution des flux spécifiques à mesure que la taille des bassins augmente (Fig. 4). Une analyse plus poussée montre que les bassins de petite à moyenne taille (jusqu'à 20 000 km²) forment deux pôles de regroupement, les bassins forestiers présentant généralement les flux spécifiques les plus faibles. Les pentes des bassins versants auraient aussi une incidence non négligeable. Ainsi, l'érosion dans les zones non influencées par les activités humaines paraît conditionnée par un ensemble de facteurs

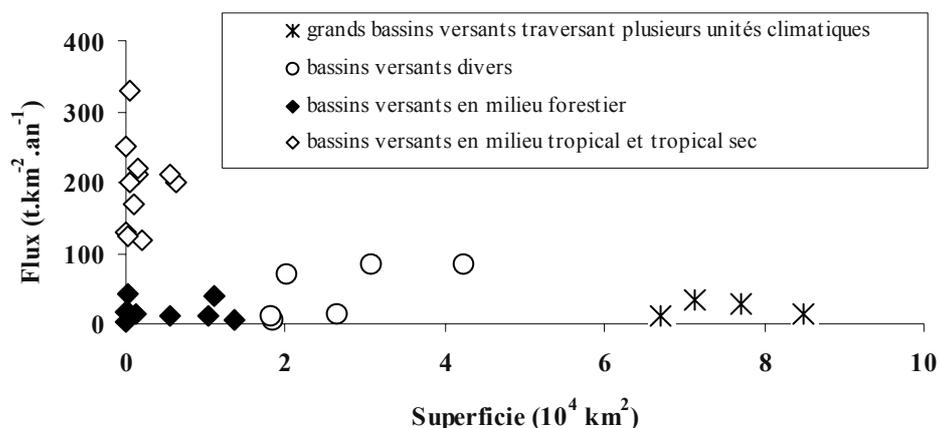


Fig. 4 Flux des matières en suspension en fonction de la taille des bassins et des unités climatiques.

Tableau 1 Estimation de l'importance relative des matières en suspension dans quelques cours d'eau camerounais.

Bassin	Superficie (km ²)	Période de mesures	Milieu climatique	Erosion (t km ⁻² an ⁻¹)	Références
Sanaga à Nachtigal	77 000	1967–1968	Tropical de transition	28	(1)
Nyong à Mbalmayo	13 555	1994–1996	Équatorial	5.2	(2)
Mengong Nsimi	0.58	1994–1996	Équatorial	2.9	(2)
Ntem à Ngoazik	18 100	1981–1983	Équatorial	10.6	(3)
Ngoko à Mouloundou	67 075	1989–1992	Équatorial	11.5	(4)
Mbam à Goura	42 300	1970–1974	Tropical de transition	85	(5)
Mifi-sud à Bamougoum	306	Estimation	Tropical de montagne	2000	(6)
Logone à Kousséri	85 000	1970–1974	Tropical sec	15	(7)
Mayo Tsanaga à Bogo	1535	1973	Tropical sec	210	(8)
Mayo Boula à Dargala	1517	1985–1986	Tropical sec	221	(9)

Note: Les valeurs des débits et des flux de matières en suspension sont mesurées au cours de l'année d'étude ou des moyennes sur des périodes continues.

(1) Nouvelot, 1969; (2) Ndam Ngoupayou, 1997; (3) Boum *et al.*, 1983; (4) Sigha-Nkamdjou, 1994; (5) Olivry *et al.*, 1974; (6) Olivry, 1976; (7) Gac, 1980; (8) Olivry *et al.*, 1974; (9) Naah, 1990.

qui impliquent aussi bien les paramètres climatiques que les caractéristiques physiques des bassins versants. Ces facteurs peuvent intervenir simultanément ou se succéder dans le temps et dans l'espace. Dans des bassins de très grande taille (60 000 km²), qu'ils soient en milieu équatorial ou tropical, il y aurait une intégration des caractéristiques géomorphologiques, phytogéographiques, pédologiques et anthropiques hétérogènes en caractéristiques moyennes, qui ne rendent plus compte des influences locales des milieux sur le transport solide. La taille du bassin versant devient dès lors un paramètre à considérer dans les analyses comparatives des bilans de flux de matières. Le Tableau 1 présente quelques valeurs de flux spécifiques (quantités évacuées annuellement rapportées au km²) mesurés dans des cours d'eau camerounais.

Ces valeurs ne sont qu'indicatives, les travaux sur bassins versants représentatifs ou à l'échelle des parcelles ayant indiqué des taux d'érosion beaucoup plus importants sur les versants. Thébé (1987) trouve 525 t km⁻² an⁻¹ sur un bassin de 18 km² à l'extrême-nord; les études pédologiques (Bep *et al.*, 1996) estiment sur des parcelles

de 100 m^2 , des transports supérieurs à $4000 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Mais les sédiments produits sont piégés dans le paysage tant et si bien qu'une infime partie seulement parvient à l'exutoire du grand bassin. Diallo (2000) a estimé à 7% la proportion des sédiments qui est transférée jusqu'à l'exutoire d'un bassin de 103 km^2 dans le haut Niger.

Variations saisonnières

A l'échelle saisonnière, les variations des concentrations et des flux de matières pour des bassins respectivement tropical (Sanaga) et équatorial (Ntem) sont présentées dans la Fig. 5(a) et (b). On retrouve le schéma d'évolution classique des concentrations en zone tropicale (Nouvelot, 1972b; Olivry, 1977; Briquet *et al.*, 1997). Les capacités

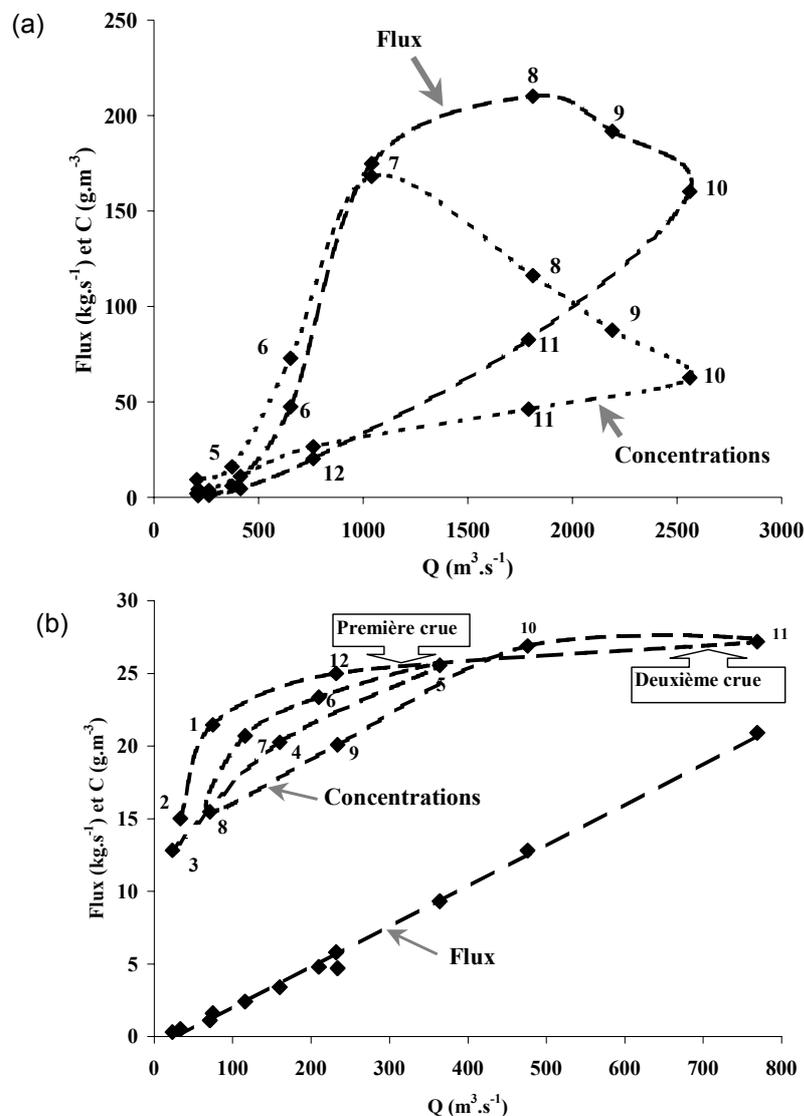


Fig. 5 Evolution comparée au cours du cycle hydrologique de la concentration et du flux de matières en suspension en fonction du débit: (a) bassin versant tropical (Sanaga à Nachtigal), et (b) bassin équatorial (Ntem à Ngoazik). Les nombres 1 à 12 représentent les mois de l'année (janvier à décembre).

d'érosion des bassins augment au début de la crue annuelle, beaucoup plus forts pour les bassins tropicaux, traduisant une mobilisation des sols nus pulvérulents non encore couverts. Olivry *et al.* (1974) montrent que cette charge solide des premières crues est encore plus élevée quand la saison sèche a été plus longue et plus rigoureuse. Par la suite, le développement de la strate herbacée protège le sol contre les agressions érosives des pluies et du ruissellement. Les deux cycles correspondant aux deux crues sont bien identifiables en zone équatoriale. A la différence des bassins tropicaux qui enregistrent les concentrations maximales trois mois avant la pointe de la crue, les deux pointes (concentrations et débits) sont synchrones dans les bassins équatoriaux. Les concentrations baissent par la suite progressivement pour atteindre les valeurs minimales en saison sèche, qui ne représentent plus que l'érosion des berges à laquelle peuvent s'ajouter les dépôts éoliens dans la partie septentrionale du pays.

La relation entre les flux de matières en suspension et les débits qui les véhiculent ne sont pas les mêmes dans les deux régimes climatiques. En milieu tropical (Fig. 5(a)) les variations saisonnières de flux sont similaires à celles des concentrations. Mais pendant la saison des pluies, pendant que les concentrations baissent rapidement par dilution des matières en suspension, les flux continuent à augmenter pour atteindre un palier, avant de décroître aussi rapidement en fin de saison avec les débits. Pour le bassin versant équatorial (Fig. 5(b)), une distinction peut être établie entre les relations concentrations-débits et flux-débits. Alors que les concentrations varient de manière cyclique au cours des crues, une relation linéaire étroite s'établit entre les flux et les débits qui les véhiculent. Aux débits (Q) plus élevés correspondent des valeurs de flux ($Flux$) plus élevées, suivant l'équation:

$$Flux = 0.028Q - 0.84 \quad (2)$$

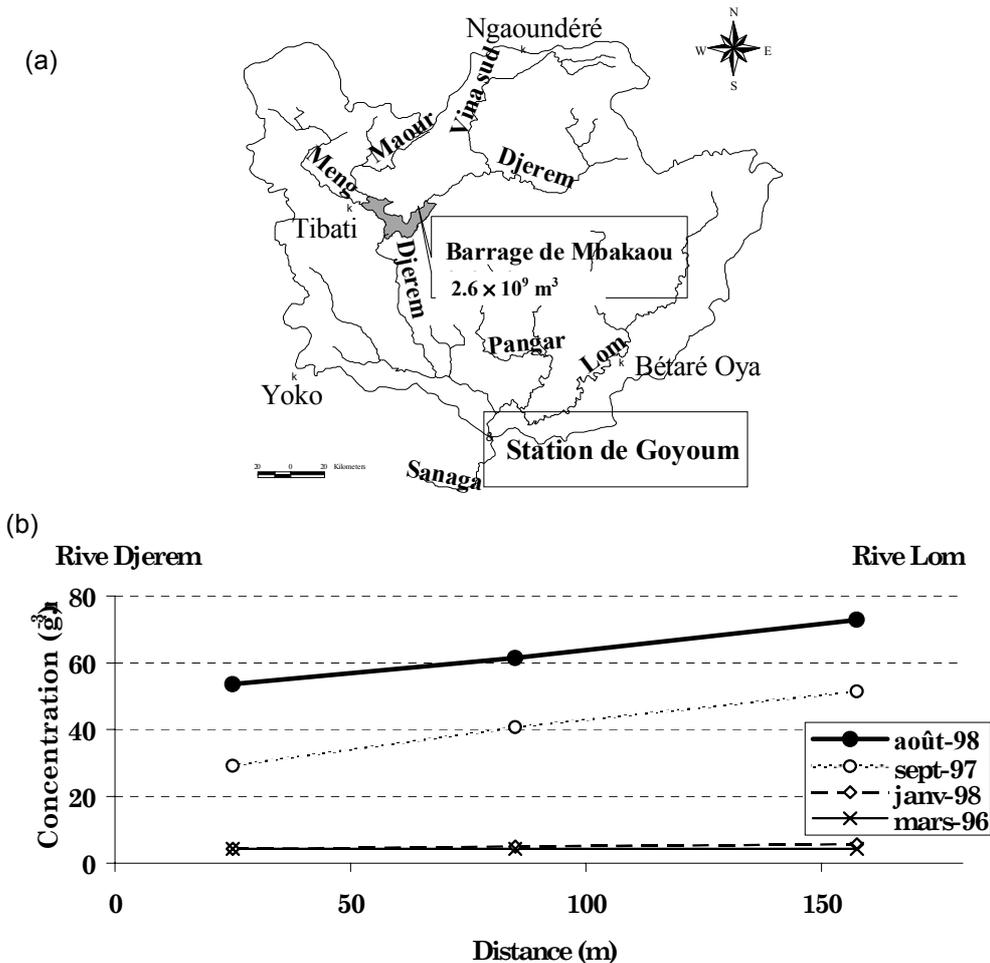
avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.99$, où $Flux$ est en $kg\ s^{-1}$ et Q est en $m^3\ s^{-1}$.

Actions anthropiques

Deux régions se distinguent par les valeurs élevées de flux de matières transportées par les rivières (Fig. 2). Il s'agit des monts Mandara, avec plus de $200\ t\ km^{-2}\ an^{-1}$ en moyenne (Nouvelot, 1969; Olivry *et al.*, 1974; Naah, 1990) et des plateaux Bamiléké et Bamoun, avec plus de $2000\ t\ km^{-2}\ an^{-1}$ (Olivry, 1976). Ces régions marquent de ce fait des nuances locales dans la distribution latitudinale des flux des matières en suspension. On constate, en analysant leurs caractéristiques (Tableau 2), qu'elles présentent d'assez grandes similitudes. Les principaux traits communs sont leur relief accidenté, la pression démographique élevée et des pratiques culturales intensives. Une réflexion menée par Olivry (1976) dans le but de comprendre le contraste entre l'érosion sur le Mbam et la Sanaga, bassins en milieu tropical et aux régimes hydrologiques semblables, a abouti à la conclusion selon laquelle les matières en suspension sur le Mbam sont déterminées par la région montagneuse volcanique des pays Bamiléké et Bamoun, où Guiscafre (1959) a obtenu, pour la même période, des valeurs très contrastées de $12000\ t\ km^{-2}$ sur parcelle nue avec billons dans l'axe de la pente contre $20\ t\ km^{-2}$ sur savane. Ces résultats bien que localisés montrent le rôle que peuvent jouer les zones cultivées mais aussi et surtout les pratiques culturales sur les pertes de terres.

Tableau 2 Caractéristiques des plateaux Bamiléké et Bamoun et des monts Mandara.

	Pays Bamiléké et Bamoun	Monts Mandara
Pluviométrie annuelle	2000–3000 mm	700–1000 mm
Régime climatique	Tropical de montagnes	Soudanien d'altitude
Sous-sol	Formations précambriennes (migmatites) et volcaniques (basaltes et syénites)	Massifs et inselbergs granitiques, roches détritiques meubles
Sols	Sols ferrallitiques et sols noirs d'origine volcanique	Sols minéraux bruts et sols peu évolués sur alluvions
Végétation	Formations d'origine anthropique (haies vives et cultures)	Steppe à épineux et cultures de graminées
Pentes	Assez fortes	Fortes pentes en amont des bassins versants
Coefficient d'écoulement	32%	20%
Écoulement spécifique	$17.1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$	$6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$
Densité de population	100–200 habitants km^{-2} (parfois plus)	100–200 habitants km^{-2}
Activités humaines	Agriculture intense toute l'année	Agriculture intense pendant la saison des pluies et élevage intensif

**Fig. 6** Bassin supérieur de la Sanaga: (a) situation du barrage de Mbakaou, et (b) répartition des concentrations en matières en suspension à la station de Goyoum.

Les matières érodées sur les versants ne sont pas toujours transportées par les cours d'eau jusqu'au milieu marin. De nombreuses rivières traversent de vastes marécages nés des conditions topographiques particulières, où les vitesses lentes induisent la décantation d'une grande partie des matières en suspension. Au-delà de ces cas de rétentions dues aux conditions naturelles, les aménagements d'origine anthropique, de gestion des ressources en eau, peuvent influencer la charge en suspension des rivières. Cet impact est mis en évidence à la station de Goyoum située en aval de la confluence du Djerem et du Lom, formant le bassin supérieur de la Sanaga (Fig. 6).

On constate pendant les hautes eaux des faibles concentrations sur la rive alimentée par le Djerem ($30\text{--}52\text{ g m}^{-3}$), par rapport à celles de la rive alimentée par le Lom ($52\text{--}73\text{ g m}^{-3}$). Or les régimes hydrologiques de ces deux rivières sont identiques. Les bassins versants sont soumis au même climat tropical de transition. La végétation, la couverture géologique et le relief sont tout à fait comparables. Les faibles concentrations en rive droite ne paraissent donc dues qu'à la rétention dans le barrage de Mbakaou d'une partie des matières en suspension. Cette incidence du barrage apparaît encore nettement entre les flux de matières mesurés à la station de Nachtigal, plus en aval, avant le barrage, $28\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ (Nouvelot, 1969) et après le barrage, $18\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ (Ndam Ngoupayou, 1997). En plus de l'effet de comblement, qui a des impacts sur leur durée de vie, la rétention des matières en suspension par les aménagements hydrauliques a des conséquences socio-économiques et environnementales graves du fait qu'il s'agit principalement des particules fines, nutriments essentiels pour la productivité des zones de cultures situées en aval des aménagements (Liéno *et al.*, 2003).

Comparaisons avec les bassins fluviaux d'Afrique tropicale

Entre les décennies 1970 et 1990, des mesures des matières en suspension ont été également faites dans certains cours d'eau en Afrique Centrale et Occidentale (Fig. 7). Les résultats présentés, concernant les fleuves et rivières du Cameroun, gagneraient à être comparés à ceux relatifs à des zones morphoclimatiques comparables.

Les travaux réalisés sur le fleuve Congo, notamment sur la rive droite, donnent des flux de matières en suspension compris entre $8\text{ et }10\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ (Laraque & Olivry, 1996; Olivry *et al.*, 1988). Les chiffres compris entre $2\text{ et }7\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ sont également indiqués pour les affluents de la rive droite du Congo, de 1988 à 1990 (Moukolo *et al.*, 1993). Ces valeurs sont assez proches des valeurs comprises entre $5\text{ et }14\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ obtenues en zone équatoriale camerounaise (Boum *et al.* 1983; Sigha-Nkamdjou, 1994; Ndam Ngoupayou, 1997).

En revanche, pour la zone tropicale (humide et sèche), caractérisée par le développement de la savane, les résultats sont différents. Les valeurs de $5.8\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$, $10.3\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$, $39\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ et $7.3\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ indiquées respectivement par Olivry *et al.* (1988) pour l'Oubangui à Bangui, Orange (1992) pour le Sénégal à Bakel, Gac (1980) pour le Logone à Laï, et Briquet *et al.* (1997) pour le Bani à Douna (Tableau 3), sont beaucoup plus faibles que les résultats obtenus au Cameroun, dans des zones climatiques comparables: $70\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ pour le Djerem à Mbakaou (Nouvelot, 1969), $85\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ pour la Bénoué à Lagdo (Nouvelot, 1969), plus de $100\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ pour le Noun supérieur (Nouvelot *et al.*, 1971), $210\text{ t km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ pour le Mayo Tsanaga (Olivry *et al.*, 1974).



Fig. 7 Quelques stations de mesures des matières en suspension en Afrique Centrale et Occidentale entre 1970 et 1995; les observations de périodes relativement courtes ne sont pas synchrones (voir Tableau 3).

Tableau 3 Quelques valeurs de flux de matières en suspension sur quelques bassins fluviaux d'Afrique tropicale.

Bassin versants	Stations	Superficies ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	Cycles hydrologiques	Débit ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Flux solide ($\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$)	Références
Sénégal	Sénégal à Bakel	218	1979–1987	308	10.3	(1), (7)
	Sénégal à Dagana	270	1981–1983	374	10.6	(2)
Gambie	Gambie à Gouloumbou	42	1983–1984	60	2.1	(3)
	Gambie à Kedougou	7.5	1987	59	7.9	(1)
Niger	Niger à Banankoro		1991–1994		6.2	(4)
	Niger à Koulikoro	120	1991–1994		5.2	(4)
	Bani à Douna		1991–1994		3.7	(4)
	Niger à Bamako	117	1990–1992	735	4.9	(5)
	Milo Kankan	9.6	1987	133	21.3	(6)
Lac Tchad	Ouham à Batangafo	44.7	1969–1970	326	9.3	(7)
	Logone à Laï	56.7	1969–1975	418	39.0	(8)
	Logone à Bongor	71.1	1969–1976	448	34.0	(8)
Congo	Oubangui à Bangui	500	1987	2840	5.8	(9)
	Lefini à Mbouambé	13.5	1987–1991	410,2	9.4	(10)
	Alima à Tchikapika	20.07	1987–1991	590	6.0	(10)
	Congo à Brazzaville	3500	1987–1991	8200	8.7	(10)

Note: Les valeurs des débits et des flux de matières en suspension sont celles mesurées au cours de l'année d'étude ou les moyennes sur des périodes continues.

(1) Kattan *et al.*, 1987; (2) Gac & Kane, 1986; (3) Lô, 1984; (4) Briquet *et al.*, 1997; (5) Boeglin & Probst, 1996; (6) Orange, 1992; (7) Gac & Pinta, 1973; (8) Gac, 1980; (9) Olivry *et al.*, 1988; (10) Moukolo *et al.*, 1993.

Plusieurs auteurs ont essayé d'estimer des flux de matières en suspension exportés annuellement dans d'autres régions de l'Afrique. Nous ferons référence à quelques travaux cités notamment par Walling (1984): au Nigéria voisin, les affluents de Sokoto

Rima transportent par an entre 155 et 438 t km⁻², alors que des chiffres compris entre 219 et 739 t km⁻² sont envisageables dans le bassin versant de Hadejiia-jamaare (Oyebande, 1981); Virgo & Munro (1978) proposent 1680 t km⁻² pour un bassin éthiopien de 150 km²; et Temple & Sundbord (1972) quant à eux trouvent pour un bassin versant tanzanien de 156 000 km² une valeur de 109 t km⁻² an⁻¹.

CONCLUSION

Fort de sa multitude de facettes climatiques due à l'extension latitudinale du territoire, son exposition au flux de mousson océanique et son relief accidenté, le Cameroun constitue un terrain intéressant pour une analyse spatialisée de l'érosion et des transports en suspension en fonction des régimes climatiques. Un ensemble de données collectées depuis les années 1960 a permis de définir quelques caractéristiques des régimes des transports solides en suspension dans les différentes rivières et de dégager certains facteurs conditionnels primordiaux.

A l'échelle des bassins versants de petite à moyenne taille (jusqu'à 20 000 km²), en milieu naturel, l'évolution du couvert végétal et la morphologie des bassins sont les facteurs déterminants des régimes des transports solides en suspension, la nature des sols ne jouant qu'un rôle secondaire. En milieu anthropisé, les activités humaines (mise en culture intensive des sols) tendent soit à augmenter la charge des rivières soit à la diminuer (rétention dans des aménagements hydrauliques). La taille des bassins étudiés est un facteur important à considérer dans les analyses comparatives des flux de matières. Pour les grands bassins (60 000 km²), il semble y avoir une intégration spatiale des caractéristiques hétérogènes en caractéristiques moyennes, qui ne rendent plus compte des influences locales des milieux sur le transport solide.

Remerciements Les auteurs remercient le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de Yaoundé et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour leur soutien financier. Ce travail a aussi été réalisé dans l'esprit de la synthèse régionale des connaissances initiée dans le cadre de FRIEND-AOC.

REFERENCES

- Bep, B., Zahonero, P., Boli, Z. & Roose, E. (1996) Evolution des états de surface et influence sur le ruissellement et l'érosion des sols ferrugineux tropicaux sableux du Nord Cameroun soumis à diverses techniques culturales. *Bull. Réseau Erosion* **16**, 59–77.
- Boeglin, J. L. & Probst, J. L. (1996) Transports fluviaux des matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant en région tropicale: le bassin amont du Niger au cours de la période 1990–1993. *Sci. Géol. Bull.* **49**(1–4), 25–45.
- Boum, J. P., Sigha-Nkamdjou, L. & Nwalal, J. (1983) Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Merve'ele. Rapport de synthèse, campagnes 1980/1983 DGRST/IRGM, Yaoundé.
- Briquet, J. P., Mahé, G., Bamba, F., Marra, M., Mahieux, A., Des Tureaux, T., Orange, D., Picouet, C. & Olivry, J. C. (1997) Erosion et transport particulaire par le Niger: du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observation). In: *FRIEND '97—Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management* (ed. by A. Gustard, S. Blazkova, M. Brilly, S. Demuth, J. Dixon, H. van Lanen, C. Llasat, S. Mkhandi & E. Servat), 335–346. IAHS Publ. 246, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Diallo, D. (2000) Erosion des sols en zone soudanienne du Mali: transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger). Université Joseph Fourier; IRD, Grenoble I, France.
- Gac, J. Y. (1980) Géochimie du bassin du lac Tchad. Travaux et documents de l'Orstom 123, Paris.
- Gac, J. Y. & Kane, A. (1986) Le fleuve Sénégal. I: bilan hydrologique et flux continentaux des matières particulaires à l'embouchure. *Sci. Géol. Bull.* **39**(1), 99–130.

- Gac, J. Y. & Pinta, M. (1973) Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Etude du bassin versant de Ouham (République Centrafricaine). *Cah. Orstom Sér. Géol.* **5**(1), 83–96.
- Guiscafre, J. (1959) Résultats sommaires sur l'érosion des terres noires au pays Bamiléké. *Rapport Orstom*, Yaoundé.
- Kattan, Z., Gac, J. Y. & Probst, J. L. (1987) Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin—estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrol.* **92**, 59–76.
- Laraque, A. & Olivry J. C. (1995) Evolution de l'hydrologie du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique des transports solides et dissous. In: *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement*. (ed. by P. Chevallier & B. Pouyau), 271–288. IAHS Publ. 238, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Letouzey, R. (1985) Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500 000. Inst. Carte Internationale Végétation, Toulouse & Inst. Rech. Agro., Yaoundé.
- Liéno, G., Sighomnou, D., Sigha-Nkamdjou, L., Mahé, G., Ekodeck, G. E. & Tchoua, F. (2003) Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques: conséquences sur le bilan des transferts superficiels. In: *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel), 403–409. IAHS Publ. 278, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Lô, H. M. (1984) Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en milieu tropical humide africain. Thèse 3ème cycle, Université de Nancy II, France.
- Moukolo, N., Laraque, A., Olivry, J. C. & Briquet, J. P. (1993) Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaïre) et ses principaux affluents de la rive droite. *Hydrol. Sci. J.* **38**(2) 133–145.
- Naah, E. (1990) Hydrologie du grand Yaéré du nord-Cameroun. Thèse de doctorat ès-Sciences, Université de Yaoundé.
- Ndam Ngoupayou, J. R. (1997) Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique: du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga au Sud-Cameroun. Thèse doctorat Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, France.
- Nouvelot, J. F. (1969) Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. Rapport Orstom, Yaoundé.
- 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.* **9**(1), 3–18.
- Nouvelot, J. F. (1972b) Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1961 à 1971. *Cah. Orstom Sér. Hydrol.* **9**(1), 47–74.
- Nouvelot, J. F., Cadier, E. & Olivry, J. C. (1971) Hydrologie du bassin supérieur du Noun. Rapport Orstom, Yaoundé.
- Olivry, J. C. (1976) Transports solides en suspension au Cameroun. ONAREST, Yaoundé.
- Olivry, J. C. (1977) Transports solides et en suspension au Cameroun. In: *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, 134–141. IAHS Publ. 122, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Olivry, J. C. (1986) *Fleuves et Rivières du Cameroun*. Collection Monographie Hydrologique 9, ed. Mesres-Orstom, Paris.
- Olivry, J. C., Briquet, J. P., Thiebaux, J. P. & Sigha Nkamdjou, L. (1988) Transport de matière sur les grands fleuves de la région intertropicale: les premiers résultats des mesures de flux particulières sur le bassin du fleuve Congo. In: *Sediments Budgets* (ed. by M. P. Bordas & D. E. Walling), 509–521. IAHS Publ. 174, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Olivry, J. C., Hoorelbecke, R. & Andiga, J. (1974) Quelques mesures complémentaires de transports solides en suspension au Cameroun. Rapport Orstom, Yaoundé.
- Orange, D. (1992) Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Sci. Géol., Mém.* **93**.
- Sigha-Nkamdjou, L. (1994) Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale: La Ngoko à Moloundou (sud-est du Cameroun). Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud (Orsay), France. *Travaux et Documents Microfichés* (111), ed. Orstom.
- Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou, D., Nia, P., Nwalal, J., Bedimo Bedomo, J. P., Nlozoa, J., Liéno, G. & Braun, J. J. (1998) Qualité de l'eau à certains sites du Lom, du Pangar et de la Sanaga. Projet Lom-Pangar, Convention MINREST/IRGM/CRH-SONEL, Rapport de IRGM, Yaoundé.
- Thébé, B. (1987) Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des facteurs d'échelle. Thèse d'université. Unité des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- Walling, D. E. (1984) The sediment yields of Africa. In: *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (ed. by D. E. Walling, S. S. D. Foster & P. Wurzel), 265–283. IAHS Publ. 144, IAHS Press, Wallingford, UK.

Reçu le 6 avril 2004; accepté le 21 septembre 2004

ANNEXE IV

Transport de matières au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire.

Liénoù, G., Mahé, G., Servat, E., Tegofack, R., Sahagu, J., Nwalal, J., Issa, Olivry, J.-C., Ekodeck, G.E. (2005)

Sediment Budgets I. Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005 (ed. by : Walling D.E., Horwitz A.J), 161-171, IAHS Publ. 291.

Transport des matières en suspension au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire

**GASTON LIENOU¹, GIL MAHE², ERIC SERVAT²,
RODRIGUE TEGOFACK³, JOSEPH SAHAGU³,
JACOB NWALAL³, ISSA³, JEAN-CLAUDE OLIVRY² &
GEORGES EMMANUEL EKODECK¹**

*1 Université de Yaoundé I, Département des Sciences de la Terre, c/o IRD BP 1857 Yaoundé, Cameroun
liengast@yahoo.fr*

2 IRD, UMR HydroSciences Montpellier, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

3 Centre de Recherches Hydrologiques, BP 4110 Yaoundé, Cameroun

Résumé On étudie les transports des matières, essentiellement en suspension, dans les fleuves et rivières du Cameroun. Un grand nombre de bassins versants, représentant les principales unités climatiques du pays, est suivi simultanément, avec des fréquences de prélèvements adaptées aux divers régimes hydrologiques. Cette étude vise à préciser les variations spatiales des processus de transport, mais surtout, à analyser l'évolution du transport des matières en suspension dans le contexte des changements climatiques et environnementaux (liés ou non aux activités humaines). Les mesures actuelles portent sur six rivières, drainant des bassins versants de superficie variant entre 1500 et 18 000 km². Dans ce premier article, la méthodologie utilisée d'une part pour l'estimation de la concentration moyenne dans la section et, d'autre part, pour le calcul de la masse totale exportée à l'exutoire des bassins versants est présentée. On s'appuie d'abord sur des tests de représentativité spatiale pour estimer les erreurs qui peuvent être commises en faisant varier le nombre de verticales le long de la section. Ensuite, on effectue des tests de représentativité temporelle pour estimer les erreurs commises en faisant varier d'une part la fréquence des prélèvements et d'autre part la méthode de calcul des flux sur une période. Les différences excèdent 50% en hautes eaux et 25% en basses eaux quand on passe d'un jaugeage de cinq à trois verticales. Pour les bilans des flux, les résultats de trois méthodes de calcul sont sensiblement identiques. En revanche, les écarts atteignent 20% quand la fréquence de prélèvement baisse de moitié, parfois plus de 30% en zone tropicale.

Mots clefs Cameroun; changement climatique; hydrologie; transport de matières

Suspended sediment transport in Cameroun in the context of a climatic water deficit

Abstract This contribution is concerned with the transport of sediment, primarily in suspension, by streams and rivers in Cameroun. A large number of drainage basins, representing the main climatic units of the country have been investigated simultaneously, with the frequency of sampling adapted to the range of hydrological regimes. These investigations aim to document the spatial variation of sediment transport and, more particularly, the impact of climatic and environmental change, both related and unrelated to human impact, on suspended sediment loads. The results presented here relate to six rivers with catchment areas ranging from 1500 to 18 000 km². In this initial study, the procedures used to calculate, firstly, the mean concentration in the cross section and, secondly, the sediment load at the basin outlet are considered. Attention is first directed to testing the spatial representativeness of measurements of sediment

concentration in the cross section, by considering the errors generated by varying the number of sampling verticals. Subsequently, temporal representativeness is considered by evaluating the errors introduced by varying the sampling frequency and the method employed for flux calculation. In the first case, errors of greater than 50% during high flows and 25% during lower flows are associated with a reduction in the number of sampling verticals from five to three. In the second case, the three methods employed for calculating the sediment flux are shown to produce very similar results. However, a reduction in sampling frequency by one half can introduce an error of 20%, and this can increase to 30% in the tropical zone.

Key words Cameroon; climatic change; hydrology; sediment transport

INTRODUCTION

Situé en Afrique centrale entre 2° et 13°N de latitude, et 8° et 16°E de longitude, pour une superficie de 475 000 km², le territoire camerounais couvre une grande diversité de facettes climatiques, liées à son ouverture au flux de mousson atlantique et aux grands traits de son relief. Ces distorsions oro-climatiques, associées au couvert végétal varié et aux activités anthropiques, règnent sur les divers processus dynamiques d'érosion et de transport des matières, notamment en suspension.

De nombreuses mesures de transports de sédiments, pour le plus part en relation avec des projets hydrauliques, avaient été effectuées dans les fleuves et rivières du Cameroun. Les premiers résultats obtenus notamment en zone tropicale ont été présentés (Olivry, 1977). Les données de plus de trente années ont été recueillies et une synthèse a repris et complété les précédentes (Lienou *et al.*, 2005). On en arrive à la conclusion que, si ces données fournissent une masse d'informations sur les débits solides dans les cours d'eau du pays, il n'en reste moins que les mesures n'ont pas été synchrones, effectuées pendant des années d'hydraulicités différentes, avec des méthodes de mesure et de calcul variées.

Des mesures entreprises de façon simultanée dans les principales unités climatiques et de végétation du Cameroun essayent de valider les résultats épars concernant les flux de matières aux exutoires des bassins versants, à partir d'une méthodologie adaptée aux régimes des rivières.

INCERTITUDES SUR LES MESURES DE TRANSPORT SOLIDE

La mesure des transports solides rencontre de nombreuses difficultés qui ne permettent pas d'avoir des données détaillées sur les concentrations des sédiments en suspension. De ce fait, diverses méthodes indirectes de calcul et d'interpolation sont utilisées pour estimer les quantités de matières transportées. Ces méthodes peuvent sous-estimer ou surestimer les débits solides (Walling & Webb, 1981). Ce qui peut entraîner des différences importantes entre les éléments de prise de décision proposés par certains auteurs (Walling, 1984).

Relativement peu d'études ont été faites sur la précision des mesures des transports solides. Parmi les sources d'erreurs, on distingue celles dues aux imperfections d'échantillonnage et des opérations de laboratoire, celles dues au plus ou moins grand nombre de points de contrôle dans une section, et celles dues à la répartition dans le temps des opérations de mesure.

Nouvelot (1972) a estimé pour certaines rivières du Cameroun, des erreurs dues à certaines techniques de prise d'échantillons et de laboratoire. Sur la base des données que nous avons collectées sur certaines rivières du Cameroun avec des densités assez élevées, on s'appuie d'abord sur des tests de représentativité spatiale pour estimer les erreurs qui peuvent être commises en faisant varier la répartition des points de prélèvement dans la section. Ensuite, sur des tests de représentativité temporelle pour estimer les erreurs commises en faisant varier d'une part la répartition des mesures dans le temps et d'autre part la méthode de calcul de la masse des sédiments transportés.

PRESENTATION DES BASSINS VERSANT ET CARACTERISTIQUES DES REGIMES HYDROLOGIQUES

Le choix des bassins versants à étudier est opéré en tenant compte : de la représentativité d'une unité climatique, de l'existence et de la qualité des données sur les matières en suspension, des bassins dont le régime hydrologique n'est pas excessivement modifié par des aménagements. Ainsi, six bassins versants sont retenus pour cette étude (Fig. 1).

Le bassin versant du Mayo Tsanaga représente le climat tropical sec à tendance sahélienne, caractérisé par six à sept mois de saison sèche, de décembre en mai. Les pluies qui tombent de juin en octobre sont généralement des averses orageuses et isolées. Le régime des écoulements est torrentiel, fait des crues intermittentes correspondant aux événements pluvieux. La végétation essentiellement steppique laisse de grands espaces de sols nus, soumis à diverses activités climatiques et anthropiques.

Dans la zone tropicale de transition, le Lom est la seule rivière qui ait fait l'objet de mesures antérieures de matières en suspension et dont le régime des écoulements n'est pas influencé par les aménagements hydrauliques. La saison des pluies est beaucoup plus longue, d'avril en octobre. Le régime des écoulements est du type tropical humide de transition, avec plus de 70% de l'écoulement annuel concentré entre juin et novembre.

Dans la zone équatoriale camerounaise, deux bassins sont retenus, celui du Nyong et celui du Ntem. Le bassin versant du Nyong, à la lisière septentrionale du climat équatorial, a la particularité de représenter la zone de transition entre la savane et la forêt, caractérisée par un milieu assez dégradé et anthropisé. Le bassin versant du Ntem présente en revanche un couvert forestier encore assez conservé. Les deux bassins ont un régime des écoulements du type équatorial, avec l'hydrogramme annuel divisé en quatre périodes : deux périodes de hautes eaux (mars-juin et septembre-novembre) et deux périodes de basses eaux (juillet-août et décembre-février).

Les zones côtières du Cameroun, entre l'embouchure du Ntem et la frontière nigériane, sont représentées, pour la partie sud, par le bassin versant de la Kienké et, pour la partie nord, par le bassin versant du Mungo. Ces deux bassins diffèrent par leur régime des précipitations et des écoulements. Le bassin versant de la Kienké garde les caractéristiques du régime équatorial, mais l'abondance des précipitations en fait une entité climatique différente de celle du Ntem, également en milieu équatorial. Sur le bassin versant du Mungo, proche du paroxysme pluviométrique du sud-ouest du pays, la répartition saisonnière des précipitations annuelles est encore à rattacher au climat tropical, en dépit de l'abondance des précipitations.

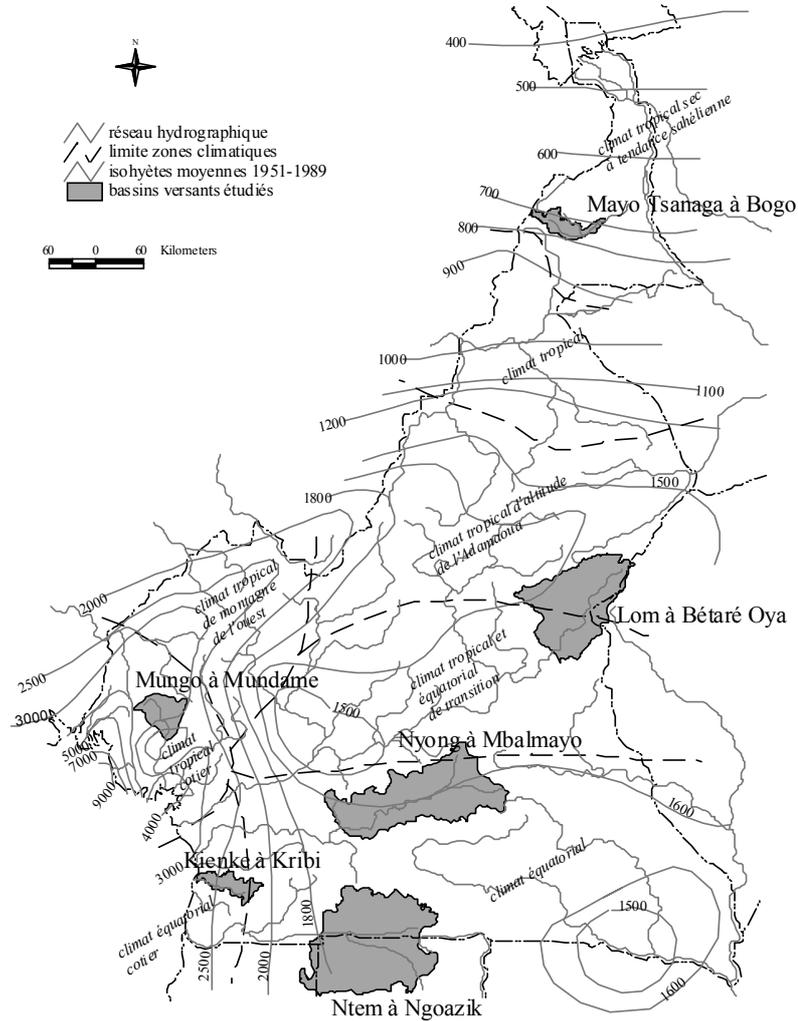


Fig. 1 Présentation des bassins versants étudiés; unités climatiques et isohyètes inter-annuelles

DONNEES ANTERIEURES SUR LES BASSINS VERSANTS ETUDIES

Quatre des six bassins versants retenus pour cette étude (Mayo Tsanaga, Lom, Nyong et Ntem) ont fait l'objet des études antérieures. Le Tableau 1 indique les périodes, les méthodes et les fréquences des mesures.

Ce tableau montre que les données antérieurement collectées, même si elles constituent un support pour des analyses spatiales du phénomène de transport de matière dans les rivières, elles n'ont pas été synchrones. On constate que les années au cours desquelles les mesures ont été effectuées sont différentes d'un bassin à l'autre. De ce fait et compte tenu de la bonne relation entre les flux de matière en suspension et les débits notamment en zone forestière (Lienou, 2005), l'hydraulicité d'une année peut avoir une influence non négligeable sur la quantité de matières transportées annuellement. De plus, il ressort toujours du Tableau 1 que les méthodes d'échantillonnage et la répartition dans le temps des mesures sont variées d'une part d'un bassin à l'autre, et d'autre part, pour le même bassin, au cours des projets de développement successifs pour lesquels ces études ont été faites.

Tableau 1 Quelques caractéristiques des données antérieures sur les bassins versants étudiés.

	Superficie (km ²)	Période de mesure de MES	Méthode de mesure	Répartition des mesures dans le temps	Auteurs
Mayo Tsanaga	1 535	1968, 1969, 1973, 1985, 1986	Jaugeages partiels et complets	Journalier	Nouvelot (1972) Olivry (1977) Naah (1990)
Lom	11 100	1997, 1998	Jaugeages complets	Trois mesures en 2 années	Sigha Nkamdjou <i>et al.</i> (1998)
Nyong	13 555	depuis 1994	Prélèvements en surface	hebdomadaire, bimensuelle et mensuelle	Ndam Ngoupayou (1997)
Ntem	18 100	de 1981 à 1983	Prélèvements corrigés par les jaugeages complets	Bihebdomadaire	Boum <i>et al.</i> (1983)
Mungo	2 420				
Kienke	1 435				

L'étude que nous entreprenons intègre les principales unités climatiques du pays. Les prélèvements d'eau pour la détermination des flux de matières solides à l'exutoire des cours d'eau sont simultanés depuis l'année 2002. Les techniques et les fréquences de mesures sont adaptées aux régimes des rivières étudiées. L'approche méthodologique utilisée repose sur deux paramètres essentiels: (a) la représentativité de la densité des points de prélèvement dans la section de mesure, et (b) la fréquence des mesures dans le temps.

PROTOCOLE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS D'EAU POUR LES MATIERES EN SUSPENSION

La mesure de la quantité des matières en suspension transportées par les rivières nécessite le contrôle de la variation des concentrations dans l'espace (section de la rivière) et dans le temps (fréquence des prélèvements). La mise en oeuvre d'un suivi continu de ces variations nécessiterait la mobilisation d'un important moyen humain et matériel pour des opérations longues et harassantes de terrain (jaugeages et prélèvements) et de laboratoire (filtrations).

Sur la base d'une méthodologie établie par Nouvelot (1972), nous avons élaboré un protocole d'échantillonnage des eaux, pour la détermination des matières en suspension transportées par les rivières étudiées. Les échantillons sont traités au laboratoire sur des filtres millipores Whatman de porosité 0.45 µm en acétate de cellulose. Les résidus secs pesés et ramenés à un litre donnent la concentration de l'échantillon.

PRECISION SUR LA CONCENTRATION MOYENNE DANS LA SECTION DE LA RIVIERE: DENSITE ET REPARTITION DES POINTS DE MESURE

Le contrôle de la répartition des concentrations dans les sections des rivières se fait au moins des jaugeages complets, qui consiste à prendre des échantillons à divers points, où

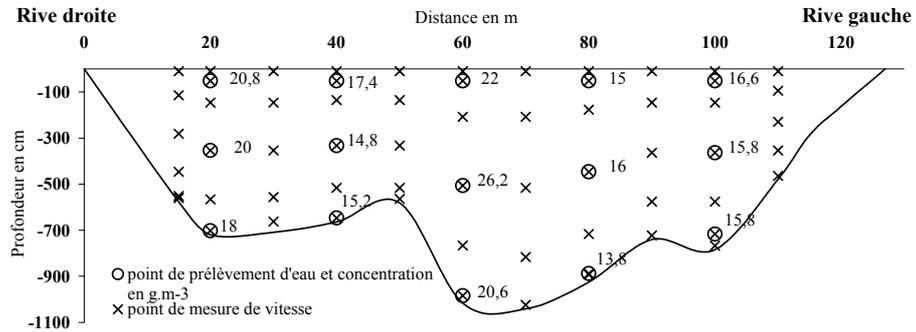


Fig. 2 Répartition des concentrations dans la section du Ntem à Ngoazik; jaugeage complet du 19 juin 2002.

on a mesuré les vitesses d'écoulement. Nous avons effectué des prélèvements en 15 points répartis sur cinq verticales: rive droite, rive gauche, milieu, et entre les deux (rive droite 1/3 et rive gauche 1/3), et trois points par verticale: fond, milieu et surface (Fig. 2).

En chaque point situé à une profondeur p d'une verticale placée à une distance l de la largeur de la rivière, sont mesurés à la fois la vitesse du courant v et la concentration des matériaux en suspension c . La répartition des concentrations en différents points de la section ne montre aucune variation notable des matières en suspension, tant sur la largeur que sur la profondeur. La verticale du milieu présente toutefois des valeurs de concentration légèrement plus élevées sur toute sa profondeur.

Le débit des matériaux en suspension Q_s est obtenu par double intégration des concentrations ponctuelles C_i pondérées avec les vitesses V_i , sur les verticales et sur la largeur:

$$Q_s = \int_0^l \int_0^p C_i V_i dl dp \quad (1)$$

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport:

$$C_m = Q_s / Q \quad (2)$$

Sachant qu'on ne peut en général pas effectuer un grand nombre de mesures, plusieurs choix sont possibles en fonction des caractéristiques des écoulements. Nous citons à titre d'exemple des mesures sur une seule verticale pour le bassin du fleuve Congo (Olivry *et al.*, 1988), des mesures sur trois verticales dans le bassin supérieur du fleuve Sanaga (Sigha Nkamdjou *et al.*, 1998). Suivant la répartition des concentrations ponctuelles dans la section de la rivière, la concentration moyenne des matières en suspension peut dépendre du nombre et de la position des verticales de mesure. Pour étudier cette influence, nous avons pour quelques jaugeages de moyennes et hautes eaux, calculé le débit solide et la concentration des matériaux en suspension en faisant varier le nombre et la position des verticales. Trois choix sont ainsi faits :

- dépouillement sur une verticale: seule la verticale du milieu est considérée;
- dépouillement sur deux verticales: rive droite 1/3 et rive gauche 1/3;
- dépouillement sur trois verticales: rive droite, milieu et rive gauche.

Le résultat de tous ces calculs est comparé à celui du dépouillement du jaugeage à cinq verticales pris comme la valeur vraisemblable. Le Tableau 2 présente les différents résultats.

Tableau 2 Débits et concentrations moyennes des matières en suspension en fonction du nombre de verticales choisies pour le jaugeage.

Station	Date	(1)			(2)			(3)			(4)		
		Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Q_s (kg s^{-1})	C_m (g m^{-3})	Q_s (kg s^{-1})	C_m (g m^{-3})	Q_s (kg s^{-1})	C_m (g m^{-3})	Q_s (kg s^{-1})	C_m (g m^{-3})	Q_s (kg s^{-1})	C_m (g m^{-3})	
Ntem à Ngoazik	19/06/2002	476	13.5	28.4	5.6	11.7	8.2	17.2	7.5	15.8			
Nyong à Mbalmayo	21/06/2002	160	3.6	22.5	2.0	12.5	3.5	22.0	3.0	18.8			
Kienke à Kribi	26/10/2002	91	0.5	5.5	1.0	11.0	0.6	6.6	0.8	8.8			
Mungo à Mundame	21/08/2002	354	10.0	28.3	13.6	38.4	11.2	31.6	12.7	35.9			
Lom à Bétaré Oya	23/10/2002	387	17.4	45.0	28.0	72.4	25.0	64.6	26.5	68.5			

(1) résultat du dépouillement sur la verticale du milieu;

(2) résultat du dépouillement sur deux verticales (rive droite 1/3 et rive gauche 1/3);

(3) résultat du dépouillement sur trois verticales (rive droite, milieu et rive gauche);

(4) résultat du dépouillement sur les cinq verticales;

Q débit liquide; Q_s débit solide; C_m concentration moyenne.

La concentration moyenne obtenue varie considérablement suivant le nombre et la position des verticales prises en compte pour le jaugeage. Il semble que les valeurs sont plus élevées au milieu de la section (28.4 g m^{-3} pour le Ntem et 22.5 g m^{-3} pour le Nyong) et plus faibles aux bords, pour les cours d'eau en zone forestière (Ntem et Nyong). Cette répartition peut être due à la végétation qui ralentit les écoulements et filtrent les matières en suspension vers le rivage. Pour la Kienke, la plus faible concentration (5.5 g m^{-3}) obtenue au milieu de la section est due à un îlot d'herbe en amont de la station de jaugeage, qui crée des champs de vitesse et de concentration plus élevées vers les bords (1/3 de la rive droite et 1/3 de la rive gauche). Les écarts par rapport aux concentrations moyennes probables (obtenues sur cinq verticales) sont de l'ordre de +20% à +80% pour le Ntem et le Nyong, et -38% pour la Kienke.

L'analyse de la répartition des matières en suspension dans la section des rivières montre que celles-ci peut aussi être influencée par la forme du profil en travers. En effet, les zones de grande profondeur concentrent généralement plus de matières, associées à des champs de vitesses élevées. Parallèlement aux champs de vitesses, la variation des concentrations dans la section semble un peu différente en étiage et en hautes eaux.

PRÉCISION SUR LA QUANTITÉ DE MATIÈRE TRANSPORTÉE: FRÉQUENCE DE MESURE ET MÉTHODES DE CALCUL

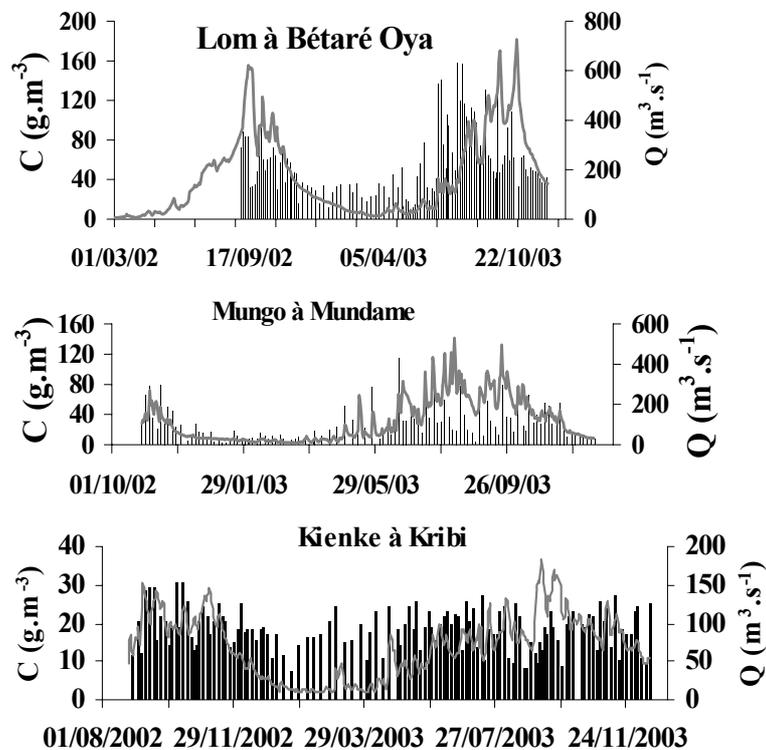
Nous avons adapté le protocole pour le suivi des variations temporaires des concentrations aux régimes hydrologiques et aux saisons. Le Tableau 3 résume les fréquences de prélèvements aux exutoires des bassins versants. En périodes de basses eaux, pendant lesquelles les débits varient peu, et les matériaux solides sont essentiellement liés à l'érodibilité des berges, les prélèvements sont espacés (un échantillon par semaine). En périodes de hautes eaux, pour pouvoir suivre au mieux les fluctuations des

Tableau 3 Fréquences des prélèvements par mois et par station.

Rivière	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sep.	oct.	nov.	déc.
Ntem												
Nyong												
Kienké												
Mungo												
Lom												
Mayo Tsanaga												



1 prélèvement par semaine en basses eaux
 2 prélèvements par semaine en eaux hautes
 1 prélèvement par jour et plusieurs en crue

**Fig. 3** Variation des débits (en courbe) et des concentrations (en histogrammes) sur trois des six rivières étudiées.

débits, deux prélèvements sont effectués chaque semaine, avec des prélèvements supplémentaires à la pointe des crues. Dans le cas particulier du Mayo Tsanaga, on effectue des prélèvements quotidiens pendant la période d'écoulement, et plusieurs pendant les crues intermittentes. Pour la première année de cette étude (septembre 2002–décembre 2003), nous avons obtenu à chaque station une série de débits et de concentrations (Fig. 3).

Les difficultés liées au transport, au stockage et au traitement des échantillons contraignent à réduire la fréquence des mesures pour la détermination des transports de

sédiments. Toutefois, afin de valoriser l'information lors du calcul de la quantité de matières transportées, des interpolations sont souvent faites sur des périodes sans mesures, en utilisant diverses méthodes de calcul, à partir des concentrations et des débits mesurés.

Parmi les facteurs qui influencent la précision des données sur les flux de matières, la fréquence des mesures et la méthode de calcul sont d'une grande importance (Walling & Webb, 1981; Walling, 1984). La plus part des flux de matières calculés pour les fleuves africains se sont basés sur de mesures généralement mensuelles. Nous avons effectué depuis plus d'un an des mesures de débits et de concentrations à des fréquences élevées (mesures quotidiennes de débits et au moins une mesure de concentration par semaine). De ce fait, nous avons retenu trois méthodes stochastiques couramment utilisées pour les cours d'eau tropicaux pour la détermination des flux de matières (Laraque & Olivry, 1999; Probst, 1983; Probst *et al.*, 1992; Boeglin & Probst, 1996).

Méthode 1

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=0}^{i=1} C_i}{n} \quad (3)$$

Méthode 2

$$M = \delta t \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{n} \quad (4)$$

Méthode 3

$$M = \delta t \cdot Q_m \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i} \quad (5)$$

Dans ces formules, M représente la masse totale, δt l'intervalle de temps, Q_m le débit moyen pour la période considérée, Q_i et C_i sont les débits et les concentrations instantanés, et n le nombre mesure sur la période δt . L'intervalle de temps δt choisi pour les calculs est le mois, dans le souci de garder une homogénéité pour les fréquences de mesure. Par ailleurs, il est possible de faire varier, pour la même méthode de calcul, la fréquence des observations.

Comme il montre le Tableau 4, les résultats obtenus en appliquant les trois méthodes de calcul ne sont pas significativement différents. Les écarts sont généralement inférieurs à 5%, ce qui corrobore l'observation de Probst *et al.* (1992), pour les flux de matières dissoutes sur le Congo et l'Oubangui son principal affluent. Par ailleurs, lorsque la fréquence des mesures est plus faible (une mesure toutes les deux semaines en basses eaux et une mesure par semaine en eaux hautes), l'écart entre les résultats des trois méthodes reste globalement constant, mais pour chaque méthode de calcul, les différences avec les résultats obtenus pour l'ensemble des données dépassent fréquemment 30% pour les rivières en zone tropicale.

Tableau 4 Flux mensuels des matières en suspension ($\times 10^3$ tonnes) calculés pour le Lom, le Mungo et la Kienke par trois méthodes différentes.

Méthode	Année 2002/2003						Année 2003/2004								
	sep.	oct.	nov.	déc.	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil	août	sep.	oct.	nov.
Lom															
1	69.8	64.6	25.9	8.1	4.8	2.1	1.1	3.0	2.3	11.8	37.7	77.7	85.9	87.1	27.7
2	72.1	66.2	26.5	8.0	4.6	1.9	1.1	2.9	2.6	17.0	41.5	80.7	84.1	80.8	28.2
3	70.1	65.6	27.4	8.3	4.8	2.0	1.1	3.0	2.6	16.4	40.4	79.5	85.3	86.4	28.1
Mungo															
1	-	-	15.9	1.6	0.5	0.4	0.3	1.0	9.4	12.1	26.4	21.2	32.1	19.6	7.6
2	-	-	19.5	1.6	0.5	0.4	0.3	0.8	12.6	17.2	34.1	21.6	32.8	22.1	9.7
3	-	-	17.7	1.7	0.5	0.4	0.3	1.0	10.9	16.2	30.8	23.5	35.0	20.7	9.3
Kienke															
1	6.3	5.7	5.1	2.0	0.5	0.5	0.9	1.6	2.5	3.9	4.1	3.6	5.7	5.4	4.2
2	6.4	5.9	5.1	2.0	0.6	0.5	0.9	1.7	2.5	3.8	4.1	3.7	5.8	5.5	4.3
3	6.5	5.8	5.2	2.1	0.5	0.5	1.0	1.8	2.5	3.9	4.1	3.7	5.7	5.4	4.3

Tableau 5 Bilan de transport de matière entre Septembre 2002 et Novembre 2003.

Rivière	Période de mesure	Flux ($\times 10^3$ tonnes)
Lom	sep. 2002–fév. 2003	178
	mars 2003–nov. 2003	339
Mungo	nov. 2002–fév. 2003	21
	mars 2003–nov. 2003	143
Kienke	sep. 2002–fév. 2003	21
	mars 2003–nov. 2003	33

Les variations saisonnières des flux de matières suivent celles des débits, avec des valeurs élevées en période de hautes eaux comparativement à la période de basses eaux. Pour tous les bassins étudiés, ces premiers résultats ne couvrent pas encore un cycle hydrologique complet. Le Tableau 5 présente les résultats partiels correspondant à la fin de l'année 2002/2003 et au début de l'année 2003/2004.

CONCLUSION

Le principal objectif du programme scientifique qui supporte ce travail vise à analyser l'évolution des flux de matières en suspension dans les principales unités climatiques du Cameroun, dans un contexte climatique et environnemental changeant, lié ou non aux activités humaines. Les données collectées durant cette première année du programme ne sont pas encore suffisantes pour discuter de ce problème et, de plus, la période observée ne cadre pas avec un cycle hydrologique complet. Néanmoins, au stade des premiers résultats, on retient quelques précisions concernant la méthodologie de collecte des données et de calcul des flux de matières en suspension.

Pour les rivières en zone forestière, les matières en suspension sont transportées majoritairement vers le milieu de la section, alors qu'en zone tropicale, les eaux sont plus concentrées vers les berges. La profondeur de la verticale de mesure et la répartition des

vitesses d'écoulement influencent aussi la distribution des concentrations. Des erreurs sur la concentration moyenne peuvent excéder 50% si le choix des points de mesure n'est pas fait de façon judicieuse.

Trois méthodes stochastiques de calcul des flux de matières sur une période donnent des résultats assez semblables, avec des écarts inférieurs à 5%. Toutefois, la fréquence des mesures est un facteur déterminant pour la précision des résultats. Des différences dépassent fréquemment 30% quelle que soit la méthode de calcul, pour des mesures moins fréquentes, notamment en zone tropicale.

Remerciements Ce programme est réalisé avec le soutien de la coopération française, de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et du CRH (Centre de Recherches Hydrologiques). Les auteurs remercient Monsieur Alain Laraque pour les éclaircissements sur la méthodologie de traitement des données.

REFERENCES

- Boeglin, J. L. & Probst, J. L. (1996) Transports fluviaux des matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant en région tropicale: Le bassin amont du Niger au cours de la période 1990–1993. *Sci. Géol. Bull.* **49**, 1–4, 25–45.
- Boum, J. P., Sigha-Nkamdjou, L., Ayissi G. & Nwalal, J. (1983) Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Menve'ele. Rapport de synthèse, campagnes 1980/1983. Dgrst/Irgm, Yaoundé, Cameroun.
- Laraque, A. & Olivry, J. C. (1999) Transports spécifiques dans le bassin du Congo. *Manaus'99-Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River basins*. CD-Rom Manaus'99-HiBAm.
- L'Hôte, Y. & Mahé, G. (1996) Afrique de l'ouest et centrale, précipitations moyennes annuelles (période 1951–1989). Carte à l'échelle 1/6 000 000. Orstom, Paris.
- Liéno, G. (2005) Impacts anthropiques et climatiques sur l'évolution récente de quelques bassins représentatifs au Cameroun: climatologie, hydrologie, érosion, transport de matière. (Thèse en cours, Université de Yaoundé, Cameroun.)
- Liéno, G., Mahé, G., Olivry, J. C., Naah, E., Servat, E., Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Ndam Ngoupayou, J., Ekodeck, G. E. & Paturel, J. E. (2005) Régimes des flux des matières solides en suspension au Cameroun: revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrol. Sci. J.* **50**(1), 111–123.
- Naah, E. (1990) Hydrologie du Grand Yaéré du nord-Cameroun. Thèse de Doctorat des Sciences, Université de Yaoundé, Cameroun.
- Ndam Ngoupayou, J. R. (1997) Bilans hydrogéo-chimiques sous forêt tropicale humide en Afrique: du bassin expérimental de Nsimi-Zoétélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga au Sud-Cameroun. Thèse Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France.
- Nouvelot, J. F. (1972) Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. *Cahiers Orstom Hydrologie* **9**(1), 3–18.
- Olivry, J. C. (1977) Transports solides et en suspension au Cameroun. In: *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters* (Proc. Paris Symp., July 1977), 134–141. IAHS Publ. 122, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P., Thiebaut, J. P. & Sigha Nkamdjou, L. (1988) Transport de matière sur les grands fleuves de la région intertropicale: les premiers résultats des mesures de flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo. In: *Sediments Budgets* (ed. by M. P. Bordas & D. E. Walling) (Proc. Porto Alegre Symp., December 1988), 509–521. IAHS Publ. 174. IAHS Press, Wallingford. UK.
- Probst, J. L. (1983) Hydrologie du bassin de la Garonne: modèle de mélanges—bilan de l'érosion, exportation des phosphates et des nitrates. Thèse Doctorat 3^e cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse, France.
- Probst, J. L., Nkounkou, R. R., Krempp, G., Bricquet, J. P., Thiebaut, J. P. & Olivry, J. C. (1992) Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987–1989. *J. Hydrol.* **135**, 237–257.
- Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Nia, P., Nwalal, J., Bedimo Bedimo, J. P., Nlozoa, J., Liéno, G. & Braun, J. J. (1998) Qualité de l'eau à certains sites du Lom, du Pangar et de la Sanaga. *Rapport de synthèse*, Irgm, Yaoundé, Cameroun.
- Walling, D. E. (1984) The sediment yields of African rivers. In: *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (ed. by D. E. Walling, S. S. D. Foster & P. Wurzel) (Proc. Harare Symp., July 1984), 265–283. IAHS Publ. 144. IAHS Press, Wallingford. UK.
- Walling, D. E. & Webb, B. W. (1981) The reliability of suspended sediment load data. In: *Erosion and Sediment Transport Measurement* (Proc. Florence Symp., June 1981), 17–194. IAHS Publ. 133. IAHS Press, Wallingford. UK.

ANNEXE V

Changement des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun : un impact de la variabilité climatique en zone équatoriale.

Liénoù, G., Mahé, G., Olivry, J.C., Naah, E., Paturel J.E, Servat, E., Lubès-Niel H., Sighomnou, D., Ekodeck, G.E., Dezetter A. (2005)

Regional Hydrological impacts of Climatic Change – Hydroclimatic Variability. Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005 (ed. by : Franks S., Wagener T., Bøgh E., Gupta H.V., Bastidas L. & Nobre C. & Oliveira Galvão C.), 158-168, IAHS publ. 296.

Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud-Cameroun: un impact de la variabilité climatique en zone équatoriale

**GASTON LIENOU¹, GIL MAHE²,
 JEAN-EMMANUEL PATUREL², ERIC SERVAT²,
 HELENE LUBES-NIEL², DANIEL SIGHOMNOU³,
 GEORGES EMMANUEL EKODECK¹ & ALAIN DEZETTER²**

¹ *Université de Yaoundé I, Département des Sciences de la Terre, c/o IRD BP 1857 Yaoundé, Cameroun*

liengast@yahoo.fr

² *IRD, UMR HydroSciences Montpellier, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

³ *Centre de Recherches Hydrologiques, BP 4110 Yaoundé, Cameroun*

Résumé Des données de pluie et de débit ont été collectées et mises à jour en zone équatoriale camerounaise, notamment pour la décennie 1990. A travers des représentations graphiques et l'application de tests statistiques de détection de rupture, l'analyse a porté sur des totaux pluviométriques, des débits et des coefficients d'écoulements, aux pas de temps mensuel, saisonnier et annuel. Les résultats montrent que les valeurs annuelles de pluie et débit ont diminué lors des phases aigües de sécheresse (1972–73, 1983–84). La variabilité climatique la plus significative résulte des modifications des pluies des "saisons sèches" qui induisent une tendance à un changement à long terme du déroulement du cycle hydrologique annuel. La diminution de la pluviométrie de la "saison sèche" d'hiver boréal (décembre à février) crée un déficit hydrique plus important qui entraîne une baisse des coefficients d'écoulement de la saison des pluies de printemps boréal (mars à juin). Inversement, l'augmentation des écoulements en automne (septembre à novembre), alors que la pluviométrie correspondante a peu varié, tient probablement au fait que les pluies de la "saison sèche" d'été (juillet et août) sont plus élevées depuis quelques décennies, ce qui entretient vraisemblablement une humidité du sol plus élevée favorable au ruissellement au début de la crue d'automne.

Mots clefs changement climatique; climat équatorial; séries chronologiques; sud Cameroun

Changes in the hydrological regime of the rivers of southern Cameroun: an impact of climate variability in the equatorial zone

Abstract Rainfall and flow data were collected and updated in equatorial Cameroon, notably for the 1990s. Rainfall, runoff and runoff coefficients were analysed at different time-scales: monthly, seasonal and annual, using graphical and statistical techniques to identify trends and changes in time series. The results show that the annual rainfall and runoff values declined during the acute drought periods of 1972–1973 and 1983–1984. The most significant climatic variation resulted from rainfall change during dry seasons, which over the long term induce a tendency for change to the regime of the annual hydrological cycle. The reduction of rainfall during the boreal winter dry season (December–February), creates an more important hydrological deficit that leads to lower runoff coefficients during the boreal spring rainfall (March–June). Conversely, the enhancement of flows during autumn (September–November), while the autumn rainfall does not significantly change, is probably linked to the increase of rainfall during the summer dry

season (July–August) for several decades, which keeps the soil more humid and favours runoff at the beginning of the autumn flood.

Key words Cameroon; climatic change; equatorial climate, time series

INTRODUCTION

Les conséquences souvent tragiques de la baisse persistante de la pluviométrie et des écoulements, sur les économies des pays en développement en Afrique de l'ouest et Centrale justifient l'intérêt constant porté sur l'analyse des changements climatiques. Même dans les régions équatoriales dites "humides", la sécheresse se fait ressentir, avec cependant un léger décalage dans le temps. La sécheresse constatée en Afrique humide, dont le climat est notamment tributaire de la façade atlantique, présente quelques analogies avec le domaine soudano-sahélien (Olivry *et al.*, 1993; Bricquet *et al.*, 1997; Servat *et al.*, 1999).

Cette zone équatoriale est un milieu hydrologiquement très contrasté (Mahé, 1993), avec une grande variabilité interannuelle des précipitations et un fort gradient de pluie annuelle entre la côte et l'intérieur (3000–1500 mm) (Fig. 1). Ce gradient est lié à la complexité du système océan-atmosphère qui génère les précipitations, complexité due à sa position à cheval sur les deux hémisphères. Pour ces différentes raisons, la variabilité du climat équatorial demeure mal connue.

Nous proposons une étude complète des variations des pluies et des écoulements sur trois bassins versants en climat équatorial camerounais. La décomposition du régime hydropluviométrique annuel en saisons des pluies et en "saisons sèches" permet de montrer que la variabilité la plus importante est enregistrée durant les "saisons sèches" (hiver et été boréal) et que cette variabilité constitue un signal déterminant de l'évolution des écoulements au cours des saisons des pluies (printemps et automne boréal).

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE, DES DONNEES ET DES METHODES

Cette étude porte sur le plateau sud-camerounais, approximativement entre le deuxième et le quatrième parallèle Nord, à la bordure septentrionale du grand massif forestier de la cuvette congolaise. Cette région est drainée par un ensemble de fleuves côtiers comme la Kienké (1435 km² à Kribi), le Nyong (13 555 km² à Mbalmayo) et le Ntem (18 100 km² à Ngoazik).

Par sa position près de l'équateur, le régime climatique équatorial y est régi essentiellement par la mousson atlantique qui s'engouffre dans le golfe de Guinée, entraînant un renforcement des précipitations sur la côte (Fig. 1). Les précipitations annuelles y dépassent fréquemment 3000 mm mais diminuent rapidement vers l'intérieur du continent. Cette diminution est due à l'altération du flux de mousson qui est renforcée par l'effet restrictif de quelques massifs dépassant 1000 m sur le plateau (Suchel, 1987).

Les données de pluies sont issues de la banque de données de la météorologie nationale du Cameroun et du Gabon. Les stations pluviométriques sont observées

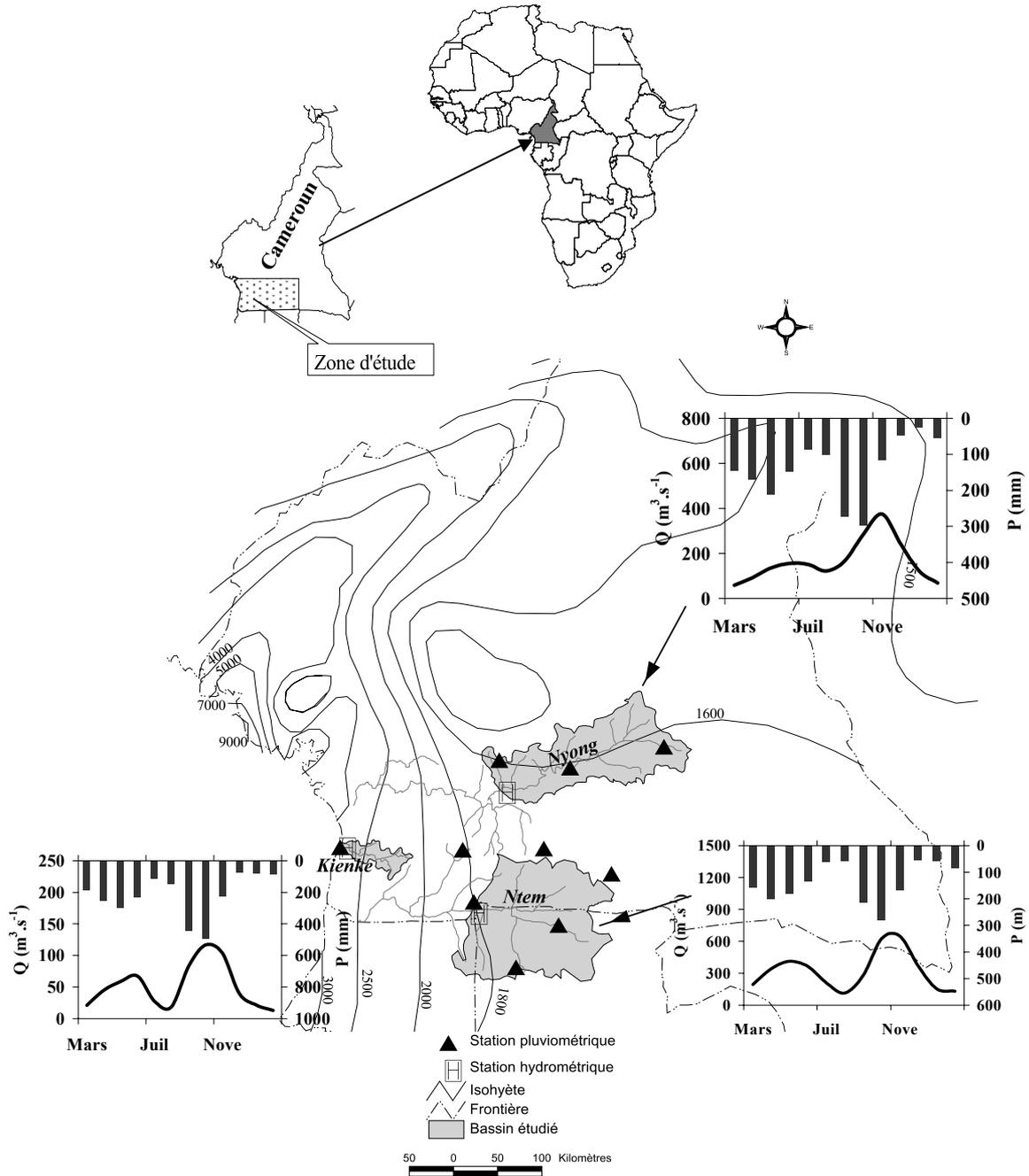


Fig. 1 Profils saisonniers des pluies et des écoulements sur trois bassins du sud-Cameroun.

parfois depuis 1930. Mais nous n'avons retenu que la période 1950 à 2000, pendant laquelle nous disposons des données de débit. Les pourcentages de lacunes sont faibles, inférieurs à 10% pour toutes les stations. Les données de débit n'ont pas pu être entièrement complétées à partir de 1988, malgré des tentatives de reconstitution, et, donc, les séries sont lacunaires à partir de cette année. L'étude pluviométrique couvre globalement la période 1950–2000 alors que l'étude des écoulements s'est limitée globalement à la période 1950–1987.

A travers des représentations graphiques et l'application de tests statistiques de détection de rupture (corrélation sur le rang et test de Pettitt (Lubès *et al.*, 1998), l'analyse a porté sur des totaux pluviométriques, des débits et des coefficients d'écoulements, à différent pas de temps: mensuel, saisonnier et annuel.

Les pluies moyennes mensuelles sont calculées sur chaque bassin versant et pour chaque mois par la méthode des polygones de Thiessen.

VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE OBSERVEE EN REGION ÉQUATORIALE CAMEROUNAISE

Répartition saisonnière de la pluviométrie annuelle

Le profil des précipitations mensuelles est directement lié aux migrations de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT). Le Tableau 1 reflète la répartition des précipitations annuelles en quatre saisons, caractéristique du climat équatorial. Les périodes de mars à juin et de septembre à novembre correspondent respectivement à la première et deuxième saison des pluies avec le maximum principal vers octobre. Les deux saisons des pluies contribuent pour plus de 80% aux précipitations annuelles.

Les deux "saisons sèches" constituent des phases originales du cycle climatique annuel en milieu équatorial: la prédominance de la direction des vents du quadrant sud-ouest traduit l'apport permanent des pluies par la mousson (Suchel, 1987) mais qui sont renforcées par le recyclage de la vapeur d'eau due à la biomasse forestière.

Tableau 1 Répartition saisonnière des précipitations annuelles en mm (1950–2000).

	Décembre à Février	Mars à Juin	Juillet à Août	Septembre à Novembre	Moyenne annuelle
Nyong	88	653	201	648	1590
Ntem	159	675	152	679	1665
Kienké	234	1002	454	1130	2820

Variation temporelle des pluies annuelles et saisonnières

Les comparaisons ont porté sur des séries chronologiques de totaux pluviométriques annuels et saisonniers par application de tests statistiques de tendance (corrélation sur le rang) et de détection de rupture au seuil de 95%.

Sur l'ensemble des trois bassins, l'évolution des précipitations annuelles et des deux saisons des pluies montre une tendance très modérée à la diminution entre les deux décennies 1950 et 1960 et leurs suivantes, en accord avec les observations faites à l'échelle régionale. Cependant les tests ne révèlent aucune modification statistiquement significative. Pour les cinq décennies de 1950 à 1990, les écarts par rapport à la moyenne 1950–2000 sont faibles et atteignent rarement 10% en valeur absolue (Tableau 2).

L'étude des pluies des "saisons sèches" (d'été et d'hiver boréaux) montre, quant à elle, que les quantités précipitées ont varié à partir de la décennie 1970 et, de façon plus accentuée, depuis la décennie 1980. Pendant les décennies 1950 et 1960, les

Tableau 2 Moyennes décennales des précipitations annuelles et celles saisons des pluies, et les écarts par rapport à la moyenne interannuelle sur quelques bassins versants au sud du Cameroun.

Décennie	Pluie annuelle (mm)	Ecart-type	Ecart à la moyenne (%)	Pluie de printemps (mm)	Ecart-type	Ecart à la moyenne (%)	Pluie d'automne (mm)	Ecart-type	Ecart à la moyenne (%)
Nyong									
1950	1559.3	107.8	-2.2	677.1	198.8	3.9	650.6	57.8	-0.2
1960	1677.6	204.1	5.2	674.4	124.9	3.5	686.2	77.6	5.2
1970	1573.6	203.4	-1.3	657.9	117.8	0.9	626.5	72.2	-3.9
1980	1572.2	194.7	-1.4	629.7	106.8	-3.4	646.6	87.4	-0.8
1990	1592.3	132.8	-0.2	619.7	69.9	-4.9	650.6	71.8	-0.2
Kienké									
1950	2989.0	486.5	8.3	1141.0	351.9	14.0	1260.2	277.9	10.9
1960	2814.0	355.8	2.0	1025.5	118.8	2.4	1237.1	255.0	8.9
1970	2648.3	378.5	-4.0	975.2	141.7	-2.6	1165.4	265.3	2.6
1980	2464.4	489.4	-10.7	868.7	243.7	-13.2	1013.0	215.7	-10.8
1990	2878.4	494.8	4.3	995.7	155.9	-0.5	1003.8	198.8	-11.6
Ntem									
1950	1567.2	212.0	-1.7	672.6	106.0	0.3	681.0	78.3	0.5
1960	1699.1	143.5	6.6	712.5	103.9	6.2	737.2	91.0	8.8
1970	1563.2	244.2	-1.9	670.4	110.3	-0.1	661.7	133.2	-2.3
1980	1595.0	169.4	0.1	669.5	70.2	-0.2	669.8	81.4	-1.1
1990	1545.4	243.9	-3.0	628.8	125.2	-6.3	636.9	112.2	-6.0

cumuls des précipitations présentent des fluctuations, traduisant l'irrégularité interannuelle. Entre 1972 et 1981, les pluies de la "saison sèche" d'été connaissent une rupture statistiquement significative se traduisant par une hausse des totaux pluviométriques. C'est le phénomène inverse que l'on observe sur la "saison sèche" d'hiver où les totaux pluviométriques diminuent nettement entre 1975 et 1978 (Fig. 2).

La modification la plus notable s'observe sur le Ntem: avant 1970, la "saison sèche" d'hiver était plus pluvieuse que celle d'été; à partir de 1972-1976, c'est l'inverse.

Sur le Nyong et la Kienké, alors que les totaux pluviométriques saisonniers étaient sensiblement identiques auparavant, ils diffèrent nettement à partir de 1975-1981. La "saison sèche" d'été est dorénavant plus pluvieuse que celle d'hiver.

L'augmentation relative des moyennes des précipitations de la "saison sèche" d'été, de part et d'autre de la rupture détectée, atteint 40% sur le Nyong et 62% sur le Ntem. Sur le bassin de la Kienké, les précipitations ont triplé entre la décennie 1950 et la décennie 1990, passant en moyenne de 250 mm à 750 mm mais les totaux saisonniers très importants des années 1998, 1999 et 2000 biaisent notre calcul.

La diminution relative des moyennes des précipitations de la "saison sèche" d'hiver, de part et d'autre de la rupture détectée, atteint 36% sur la Kienké, 41% sur le Ntem et 48% sur le Nyong.

Ce phénomène est en phase avec les résultats obtenus par Ouedraogo (2001) qui font ressortir dans les zones humides de l'Afrique de l'ouest une augmentation des pluies de la saison sèche (mois d'août), parfois supérieure à 80%. Mais ce qui

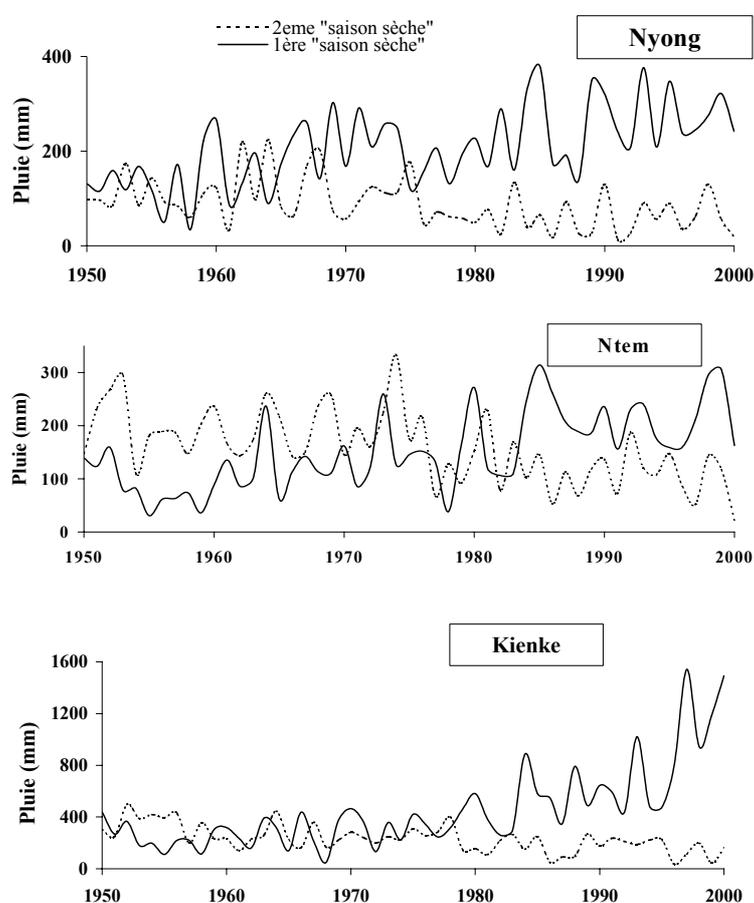


Fig. 2 Evolution de la pluviométrie des “saisons sèches” en zone équatoriale camerounaise sur la période 1950–2000.

différencie ces deux zones concernent les totaux annuels et saisonniers des saisons des pluies: en Afrique Centrale, ces caractéristiques n’ont guère évolué alors qu’en Afrique de l’ouest, les totaux annuels ont baissé significativement, jusqu’à 30% en moyenne (Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1999).

Répercussion de la variabilité pluviométrique sur les régimes des écoulements

Les régimes hydrologiques des cours d’eaux équatoriaux sont principalement caractérisés à partir de critères climatologiques. Le schéma des régimes équatoriaux est le suivant: une grande saison sèche pendant l’hiver boréal, une première saison de hautes-eaux, une petite saison sèche, une seconde saison de hautes-eaux. Parfois, la petite saison sèche disparaît, allongeant ainsi la période de hautes-eaux.

Les variables étudiées sont les débits moyens annuels, saisonniers et mensuels, des caractéristiques de hautes-eaux et de basses-eaux et les coefficients d’écoulement.

Les écarts à la moyenne interannuelle des modules annuels révèlent des fluctuations plus ou moins importantes (Tableau 3) mais les différents tests statistiques de détection de tendance et de rupture ne révèlent pas de modification significative

Tableau 3 Moyennes décennales des débits annuels et de ceux des saisons des pluies, et les écarts par rapport à la moyenne interannuelle sur quelques bassins versants au sud du Cameroun.

Décennie	Module annuelle ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Ecart-type	Ecart à la moyenne (%)	Débit de printemps ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Ecart-type	Ecart à la moyenne (%)	Débit d'automne ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Ecart -type	Ecart à la moyenne (%)
Nyong									
1950	144.3	19.7	-2.3	103.3	39.1	7.4	229.6	49.9	-10.7
1960	165.6	32.8	12.1	110.4	37.6	14.8	276.8	39.7	7.7
1970	134.3	25.5	-9.1	88.4	23.8	-8.2	245.7	45.8	-4.4
1980-87	146.5	45.7	-0.8	82.8	37.8	-14.0	276.0	83.2	7.4
1990-91	168.1	27.1	13.8	99.2	38.0	3.1	314.3	73.0	22.3
1998-01	134.8	32.7	-8.7	64.3	21.1	-33.2	241.0	52.4	-6.2
Kienké									
1955-59	50.4	11.0	1.6	45.0	18.5	5.8	92.0	19.1	-7.7
1960	51.4	8.9	3.7	48.0	14.3	13.0	101.0	21.0	1.4
1970	49.0	8.3	-1.2	40.8	9.8	-4.0	103.8	15.2	4.2
1980-87	47.9	12.8	-3.3	38.1	7.2	-10.2	99.5	20.8	-0.2
1990-91	49.2	13.6	-0.8	40.5	4.7	-4.6	102.0	12.2	2.4
Ntem									
1953-59	249.8	63.9	-5.5	246.9	92.8	-1.4	412.4	107.1	-11.2
1960	322.2	44.3	21.8	328.4	81.3	31.2	518.0	87.4	11.6
1970	244.1	27.8	-7.7	230.8	58.1	-7.8	444.3	86.9	-4.3
1980	241.6	51.1	-8.6	195.3	55.9	-22.0	482.4	107.4	3.9

dans les chroniques des débits annuels sauf pour le bassin du Ntem où on note un changement autour de l'année 1970. Ces résultats sur les modules annuels sont bien en phase avec ceux obtenus sur les précipitations annuelles.

En revanche, on constate de façon générale pour les trois bassins versants, que la diminution des débits saisonniers de printemps (mars à juin) est importante, alors que les débits saisonniers d'automne (septembre à novembre) ont parfois modérément augmenté (Tableau 3). Les procédures statistiques de détection de rupture et de tendance identifient un changement significatif dans les séries de débits de printemps, survenu entre 1970 et 1975, tandis que celles d'automne n'ont pas changé. Les débits ne sont pas continus pour la décennie 1990, mais les séquences pour lesquelles nous disposons des données s'inscrivent dans cette même logique (Fig. 3).

SYNTHESE

De façon quasi générale sur les trois bassins au sud du Cameroun, la variabilité des pluies et des écoulements présente quelques aspects particuliers: d'une part, la diminution intense des pluies de la "saison sèche" d'hiver et l'augmentation importante des pluies de la "saison sèche" d'été et, d'autre part une baisse des écoulements pendant la saison des pluies de printemps s'opposant à une augmentation des écoulements pendant la saison des pluies d'automne. Des observations similaires ont été faites pour des rivières voisines en territoire gabonais (Mahé *et al.*, 1990), et congolais (Bricquet *et al.*, 1997).

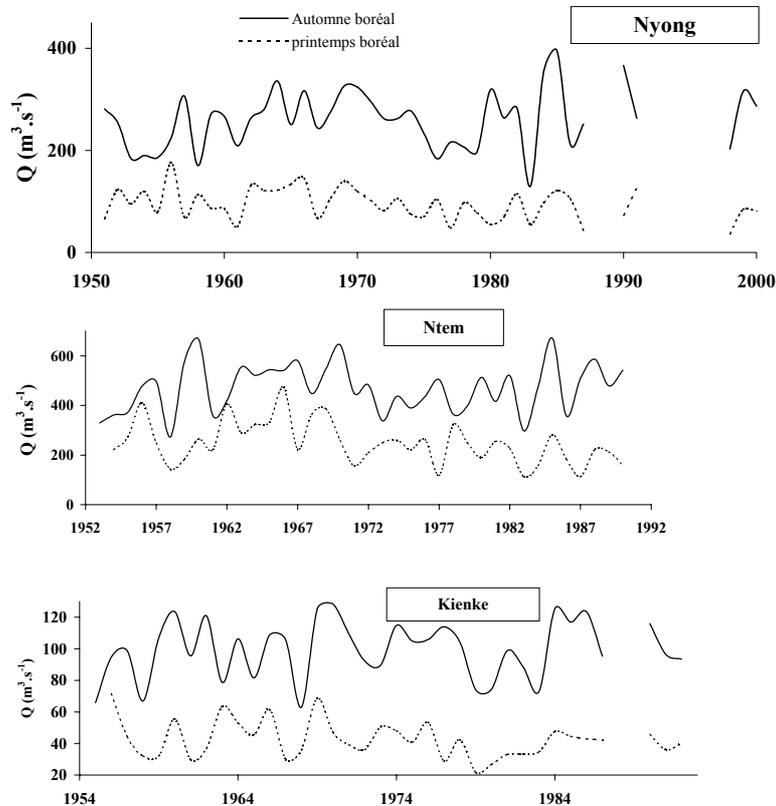


Fig. 3 Evolution des modules saisonniers des crues de printemps et d'automne sur la période 1951–1987.

L'évolution opposée à la baisse des débits de printemps et à la hausse des débits d'automne, découlerait de l'existence de conditions d'écoulement moins favorables au printemps et inversement plus favorables en automne. L'étude des coefficients d'écoulement, rapport de la lame d'eau écoulee à la pluie moyenne, au cours de ces saisons se révèle très instructive. A partir de la fin des années 1970 et début des années 1980, les coefficients d'écoulements augmentent en automne alors que ceux de printemps diminuent (Fig. 4). L'application du test de Pettit aux chroniques des coefficients d'écoulement révèle une rupture intervenue entre 1970 et 1975. Ces résultats ne sont pas en phase avec ceux obtenus sur la pluviométrie saisonnière et nous pousseraient à conclure à une modification très probable de la relation pluie-débit à l'échelle saisonnière.

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer la variation sensible du rapport entre les écoulements des deux saisons humides au sud-Cameroun. Mais il semble que les modifications du régime des précipitations, notamment celles des deux "saisons sèches", ont eu un impact prépondérant.

On peut raisonnablement admettre que si la baisse des précipitations de la "saison sèche" d'hiver entraîne un déficit de l'humidité du sol plus important qu'auparavant, les précipitations de la saison des pluies qui suit compensent ce déficit avant de générer un ruissellement. Cela entraîne donc une diminution des écoulements. Inversement, l'augmentation des précipitations de la "saison sèche" d'été maintient une humidité du sol importante qui favorise le ruissellement.

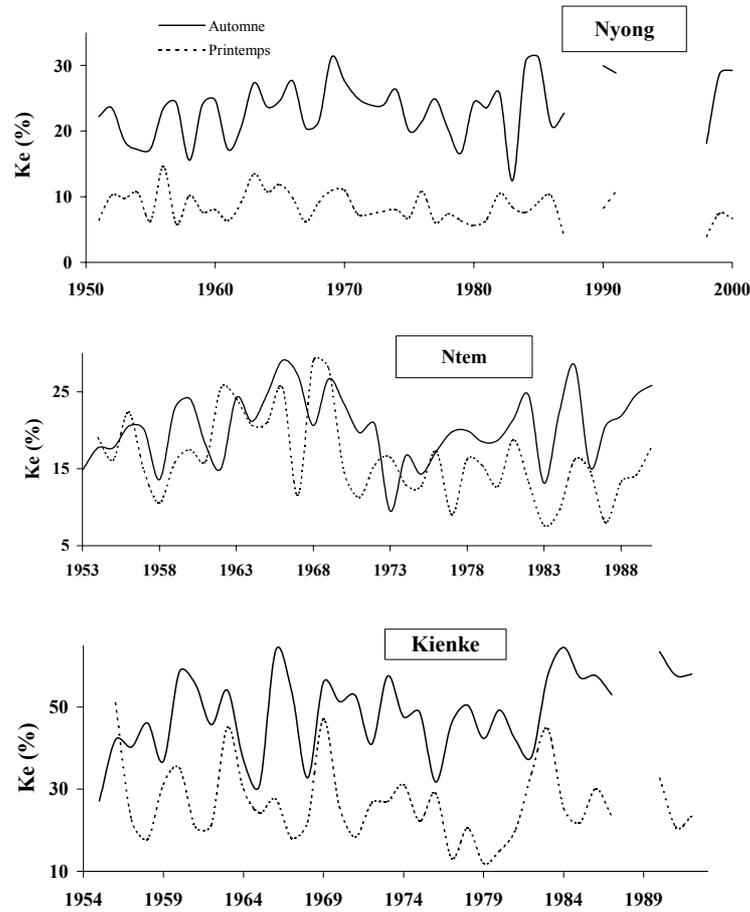


Fig. 4 Evolution des coefficients d'écoulements des crues de printemps et d'automne.

Tableau 4 Ecart par rapport à la moyenne interannuelle des débits mensuels de quelques bassins versants au sud du Cameroun.

Bassin versant	décennie	Printemps:				Automne:		
		mars	avril	mai	juin	septembre	octobre	novembre
Nyong	1950	19.4	11.9	4.4	11.1	-25.1	-13.3	-3.2
	1960	30.9	23.6	18.2	10.2	13.9	4.2	6.9
	1970	-8.8	-9.9	-5.5	-2.8	-5.4	-0.1	-8.1
	1980-87	-18.4	-12.7	-6.8	-13.0	8.9	7.3	5.9
	1990-91	-29.0	4.7	9.9	14.0	38.5	28.1	9.9
1998-01	-38.7	-37.9	-32.9	-24.5	-2.0	-8.9	-6.7	
Kienké	1955-59	61.3	34.9	0.0	-30.8	-22.7	-13.8	10.5
	1960	3.3	14.1	6.2	20.8	-0.9	-4.6	8.2
	1970	-9.4	-10.3	-1.4	-1.6	4.2	11.3	-7.8
	1980-87	-17.3	-16.4	-5.2	-9.8	2.3	0.3	-5.5
	1990-92	-15.2	-15.8	-2.2	3.2	13.0	-4.9	-0.5
Ntem	1954-59	1.6	-2.7	1.7	-2.2	-24.5	-9.9	-9.9
	1960	47.6	40.9	27.4	23.7	19.3	10.9	5.8
	1970	-9.4	-11.0	-5.8	-2.6	-3.3	-5.3	-11.9
	1980	-35.0	-26.4	-15.6	-17.2	7.2	1.2	2.0

Cette hypothèse de l'influence des "saisons sèches" sur les écoulements des saisons des pluies est d'autant mieux vérifiée que le phénomène est plus marqué en début de chaque saison des pluies. La comparaison des écarts par rapport à la moyenne interannuelle des débits mensuels montre, qu'à partir de la décennie 1970, les mois de début de la crue de printemps sont plus déficitaires que les mois de fin et, inversement, en ce qui concerne la crue d'automne (Tableau 4).

CONCLUSION

Au cours de la décennie 1970, un changement important semble survenu dans le déroulement du profil saisonnier des précipitations sur le plateau sud camerounais. Les précipitations de la "saison sèche" d'hiver ont diminué significativement et les précipitations de la "saison sèche" d'été ont augmenté, alors que les cumuls annuels n'ont pas statistiquement varié. Ces changements ont eu des répercussions sur le régime des cours d'eau, qui ont évolué vers une diminution des écoulements de la "saison des pluies" de printemps et une augmentation des écoulements de la "saison des pluies" d'automne.

Alors qu'en zone sahéenne, la décennie 1990 marque une légère reprise de la pluviométrie annuelle, toutefois toujours inférieure à la pluviométrie moyenne sur la période 1950–2000 (Paturel *et al.*, 2002; Ardoin *et al.*, 2003), les modifications du régime pluviométrique saisonnier en milieu équatorial paraissent s'accroître encore: les écarts observés entre les totaux pluviométriques des saisons sèches d'hiver et d'été sont les plus élevés au cours de la décennie 1990.

L'abondance des précipitations et des écoulements résultant dans les zones humides équatoriales masque cette variabilité des régimes. Pourtant, à long terme, elle est déterminante dans l'évolution floristique et faunistique des forêts équatoriales. Malgré la constance de leur couverture végétale, les forêts équatoriales pourront connaître de nombreuses disparitions et/ou mutations d'espèces du fait de la sélection et/ou de l'adaptation aux nouvelles conditions climatiques.

REFERENCES

- Ardoin, S., Lubès-Niel, E., Servat, E., Dezetter, A., Boyer J. F. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest: caractérisation de la situation de la décennie 1990. In *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel) (Proc. Symp., Montpellier, April 2003), 223–228. IAHS Publ. 278. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Bricquet, J. P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M. & Olivry, J. C. (1997) Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des sciences de l'eau* **3**, 321–337.
- Lubès, H., Masson, J. M., Paturel, J. E. & Servat, E. (1998) Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. Sci. Eau* **11**(3), 383–408.
- Mahé, G., Lérique, J. & Olivry, J. C. (1990) Le fleuve Ogooué au Gabon. Reconstitution des débits manquants et mise en évidence de variations climatiques à l'équateur. *Hydrol. Continentale* **5**(2), 105–124.
- Mahé, G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM Editions, Paris, France.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (ed. by John Stuart Gladwell) (Proc. Symp. Int. Assoc. Meteorol. Atmo. Physics and IAHS, Yokohama, July 1993), 67–78. IAHS Publ. 216. IAHS Press, Wallingford, UK

- Ouedraogo, M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, France.
- Paturel, J. E., Koukponou, P., Ouattara, F., L'Aour, A., Mahé, G. & Cres, F. N. (2002) Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXème siècle. *Sud Sciences Technologie* **8**, 41–49.
- Servat, E., Paturel, J. E., Lubes-Niel, H., Kouame, B., Masson, J. M., Travaglio, M. & Marieu, B. (1999) De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau* **12**(2), 363–387.
- Suchel, J. B. (1987) Les climats du Cameroun. Thèse doctorat d'état, Université de Bordeaux III, France.

