



HAL
open science

Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé, le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur

Cécile Picouet

► **To cite this version:**

Cécile Picouet. Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé, le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Hydrologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 1999. Français. NNT: . tel-00006189

HAL Id: tel-00006189

<https://theses.hal.science/tel-00006189>

Submitted on 3 Jun 2004

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

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

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE DE MONTPELLIER II
"SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC"

THESE

présentée à l'Université de Montpellier II "Sciences et Techniques du Languedoc"
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité :

Formation doctorale : Sciences de l'eau dans l'environnement continental

Ecole doctorale : Géosciences

**GEODYNAMIQUE D'UN HYDROSYSTEME TROPICAL
PEU ANTHROPISE
Le Bassin supérieur du Niger et son delta intérieur.**

Cécile PICOUET

Soutenue le 30 juin 1999

M. Jean-Marie Fritsch	Directeur de Recherche (IRD)	Rapporteur
M. Michel Meybeck	Directeur de Recherche (CNRS)	Rapporteur
M. Jean-Claude Olivry	Directeur de Recherche (IRD)	Directeur de thèse
M. Michel Desbordes	Professeur, Université Montpellier II	Examineur
M. Bernard Dupré	Directeur de Recherche (CNRS)	Examineur
M. Didier Orange	Chargé de Recherche (IRD)	Examineur

RÉSUMÉ

En se basant sur un suivi des flux hydriques, particuliers et dissous transportés par le fleuve Niger au Mali de 1991 à 1998, cette étude a établi des bilans hydrologique, sédimentologique et géochimique (éléments majeurs, traces) sur le bassin versant supérieur du Niger et son delta intérieur.

L'étude des apports hydriques du bassin amont a montré que la période d'étude était contrastée, représentative des fluctuations hydrologiques de ces 25 dernières années déficitaires. L'étude des flux de matières en suspension exportés vers le delta intérieur du Niger a permis de mettre en évidence la variabilité temporelle et spatiale des concentrations en MES et de proposer une modélisation simple des processus mis en jeu. L'étude de la chimie des eaux du Niger amont a montré que les cours d'eau étudiés sont très peu minéralisés et que la charge solide est essentiellement inorganique. A l'échelle globale, la lithologie (roches silicatées), la grande stabilité tectonique ayant permis le développement de sols résistants à l'altération, et la faiblesse de la lame écoulée, sont les principaux facteurs expliquant les faibles taux de transport particulaire et dissous observés. La vitesse d'approfondissement des profils d'altération a été estimée à 2.6 mm par 1000 ans pour le Niger amont. L'essentiel des résultats ont aussi confirmé la faiblesse actuelle de la pollution chimique de ce grand fleuve africain au Mali.

L'étude des bilans hydriques, particuliers et dissous entre les entrées et les sorties du delta intérieur du Niger ont confirmé le rôle important que joue cette zone sur le bilan hydrique (les pertes en eaux représentent de 30 à 45% des entrées) et dans la capture de quantités de matières particulières et dissoutes importantes, qui sont ainsi soustraites aux apports aux océans, tout ou moins de manière temporaire. Les pertes de matières particulières s'élèvent de 26 à 54 % des entrées, celles de matières dissoutes à environ 30% des entrées. L'influence du delta sur la composition chimique des produits fluviaux est en revanche limitée. Ce travail a également confirmé les fonctionnements hydrochimiques très différents du delta entre sa partie amont, proprement deltaïque, et sa partie aval, caractérisée par des zones inondées plus réduites et une morphologie différente.

Mots clés : érosion chimique et mécanique, matières en suspension, éléments majeurs, éléments traces, pollution anthropique, Fleuve Niger, delta intérieur du Niger, Mali.

GEOCHEMISTRY OF A LARGE RIVER : UPPER NIGER RIVER AND INLAND DELTA (MALI)

This work deals with the water quality assessment of large rivers in the world, and especially with tropical rivers. Through the monitoring of water discharge, suspended and dissolved matter fluxes over a seven year period (1991 to 1998), this study establishes water, sediment and geochemical budget in the two parts of the studied watershed : the upper Niger river, and his inland delta, a very large flood-plain.

The study of water discharge on the upper watershed shows that the monitoring period is contrasted and representative of the hydrological fluctuations over the 25 years of drought. The temporal and spatial variability of suspended matter exported to the inland delta also permits to propose a simple modelling of processes involved. The water quality study shows that the river Niger and its tributaries have very low concentrations of dissolved major and trace elements. At a global scale, lithology (silicate rocks), tectonic stability and weakness of annual runoff, are the principal factors explaining the low mechanical and chemical rates observed. The results confirm that the chemical pollution of the Niger river in Mali is currently low.

Estimation of water, sediment and dissolved discharge inputs and outputs through the inland delta proves that this zone plays an important role in the water balance (30 to 45% of input is lost) and for the fluvial deposits (they amount to 26 à 54 % of input for suspended matter and to about 30% for dissolved matter). These rates are directly or indirectly linked to the spatial and temporal variability of the inundation. This variability regulates the importance of complex processes occurring in the inland delta. This work also confirms that two zones must be distinguished in the functioning of the delta, a upper part which is specifically a deltaic zone, and a lower part which has a particular morphology with inundation of lesser extent. Differences between these two zones are particularly evidenced for high magnitude annual flood stages.

Table des matières

AVANT PROPOS

INTRODUCTION

PARTIE I : Milieu naturel et méthodes

CHAPITRE I. LE MILIEU NATUREL ET HUMAIN

1. LE CADRE NATUREL DU BASSIN SUPÉRIEUR ET DU DELTA INTÉRIEUR DU FLEUVE NIGER

FACTEURS CONDITIONNELS DE LA DYNAMIQUE HYDROLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE OBSERVÉE SUR LES COURS

D'EAU DU BASSIN DU NIGER : **6**

1.1. Cadre physique et géographique **7**

1.1.1. Le bassin supérieur du Niger et le bassin du Bani 7

1.1.2. Le delta intérieur du Niger 8

1.1.3. Influence de la morphologie sur les phénomènes d'érosion/sédimentation 10

1.2. Cadre géologique et pédologique **11**

1.2.1. Aperçu géologique de la région d'étude 12

1.2.2. Aperçu pédologique de la région d'étude 15

1.2.3. Influence de la lithologie et des sols sur les phénomènes d'érosion 18

1.3. Cadre hydrogéologique **21**

1.3.1. Les aquifères fissurés 22

1.3.2. Les aquifères généralisés à porosité intergranulaire 23

1.3.3. Faciès chimiques des eaux souterraines 24

1.4. Cadre Climatique **26**

1.4.1. Rappel sur la circulation atmosphérique générale de l'Afrique de l'Ouest 26

1.4.2. Les zones climatiques traversées par le Niger 28

1.4.3. Analyses de quelques facteurs climatiques sur le Bassin du Niger 29

1.4.4. Influence des facteurs climatiques sur les phénomènes d'érosion et la composition des eaux 32

1.5. La végétation **35**

1.5.1. Variabilité spatiale de la végétation 35

1.5.2. Variabilité saisonnière de la végétation 39

1.5.3. Influence de la végétation sur les phénomènes d'érosion/sédimentation et la composition des eaux 41

2. L'OCCUPATION DU MILIEU PAR L'HOMME **42**

2.1. Généralités **43**

2.2. Les sources ponctuelles de pollutions **45**

2.2.1. Les eaux usées domestiques et les ordures 45

2.2.2. Les eaux usées industrielles 46

2.2.3. Les eaux usées d'origine artisanales 46

2.2.4. Les rejets directs dans le fleuve 48

2.3. Les sources diffuses de pollutions **48**

3. CONCLUSIONS **49**

**CHAPITRE II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION DES DONNÉES,
MATÉRIEL ET MÉTHODES**

1. LE RÉSEAU D'OBSERVATION, LES MESURES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DES EAUX DU NIGER AU MALI - LES BANQUES DE DONNÉES	52
1.1. Quelques définitions	53
1.1.1. Le transport solide	53
1.1.2. Le transport dissous	54
1.2. Les stations du réseau (Données hydrométriques)	55
1.2.1. Les stations situées sur le Niger amont	56
1.2.2. Les stations représentatives des entrées dans le delta	57
1.2.3. Les stations du delta intérieur du Niger	58
1.2.4. Distance partielle entre chaque station	59
1.3. Les mesures de la qualité des eaux	60
1.3.1. Historique des mesures	60
1.3.2. Mesure des matières en suspension	61
1.3.3. Analyse des éléments majeurs	62
1.4. Critique des données	62
1.4.1. Les éléments majeurs	62
1.4.2. Les matières en suspension	66
1.5. Méthode de calcul des flux	71
1.6. Conclusions sur les mesures du réseau	73
2. ACQUISITION DE DONNÉES ANALYTIQUES COMPLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE	74
2.1. Collection des échantillons - Protocole d'échantillonnage et de filtration.	74
2.1.1. Prélèvements dans les eaux de surfaces	75
2.1.2. Prélèvements des eaux de pluies	79
2.2. Analyses et préparation des échantillons	81
2.2.1. Analyse des éléments majeurs	81
2.2.2. Analyse des éléments en traces	81
2.2.3. Analyse du carbone organique	84
3. CONCLUSION	84

PARTIE II : Les apports du bassin amont

**CHAPITRE III. ÉLÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE
DU NIGER SUPÉRIEUR ET DU BANI**

1. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT AMONT	87
1.1. Le Haut-Niger	88
1.2. Le Bani, affluent principal du Niger	89
2. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPÉRIEUR ET DU BANI	90
2.1. Éléments du régime hydrologique du Niger supérieur et du Bani	91
2.1.1. Le régime des crues	91
2.1.2. Variabilité saisonnière des débits	92
2.1.3. Evolution spatiale des modules	96
2.2. Bilan de l'eau sur les BV amonts et variations interannuelles	98
2.2.1. Bilan hydrique	98
2.2.2. Evolution interannuelle et contexte hydroclimatique des dernières décennies	99
3. CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES DES ANNÉES ÉTUDIÉES	104

3.1. Contexte hydroclimatique des années 1991 à 1998	104
3.2. Caractéristiques hydrologiques sur la période 1991-98	105
3.3. Caractéristique de chaque hydrogramme annuel	106
4. CONCLUSIONS	110

CHAPITRE IV. RÉGIME DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION SUR LE BASSIN AMONT DU FLEUVE NIGER

1. CONCENTRATIONS EN MES DANS LES EAUX DU BASSIN AMONT	112
1.1. Résultats dans les eaux du bassin amont	112
1.1.1. Statistiques générales sur les données en MES	112
1.1.2. Evolution des concentrations au cours du cycle hydrologique	112
1.1.3. Variabilité interannuelle des concentrations en MES	120
1.2. Recherche de modélisation des relations MES/Débits	123
1.2.1. Modélisations de l'érosion et du transport solide existantes.	123
1.2.2. La modélisation empirique statistique	126
1.2.3. Le modèle conceptuel	134
2. VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES FLUX	143
2.1. Flux de matières particulaires mesurés de 1991/92 à 1997/98	143
2.2. Flux de matières particulaires calculés de 1991/92 à 1997/98	145
3. EVOLUTION SPATIALE DES CONCENTRATIONS EN MES ET DES FLUX ASSOCIÉS	148
3.1. Evolution spatiale des concentrations et des flux de MES	148
3.2. Evolution des concentrations et des flux de MES transportées sur le cours du Niger	150
3.3. Différences entre Bani et Niger	156
3.3.1. Comparaison des relations MES/Débits	156
3.3.2. Comparaison des flux exportés	157

CHAPITRE V. CHIMIE DES PRÉCIPITATIONS EN ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE : ÉLÉMENTS MAJEURS ET TRACES

1. RÉSULTATS DANS LES PLUIES	159
1.1. Composition chimique de la phase dissoute	160
1.2. Les éléments traces de la phase totale	161
1.3. Facteur d'enrichissement	163
1.3.1. Définition et résultats	163
1.3.2. Existe-t'il des enrichissements en éléments?	164
1.3.3. Evolution des FE en fonction de la quantité de fer	167
1.4. Spectre des terres rares	169
1.5. Matrice de corrélation	170
1.5.1. Les éléments majeurs dans la phase dissoute	170
1.5.2. Les éléments majeurs et traces dans la phase totale	171
2. SOURCES DES ÉLÉMENTS	174
2.1. Origine marine	174
2.2. Origine crustale	176
2.3. Origine biogénique	177
2.4. Origine anthropique ?	179
3. ESTIMATION DES DÉPÔTS HUMIDES	180
3.1. Dans la phase dissoute	180
3.2. Dans la phase totale	181
4. CONCLUSIONS	182

**CHAPITRE VI. CHIMIE DES EAUX DU NIGER AMONT : CATIONS ET ANIONS
MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, SUSPENSIONS**

1. RÉSULTATS DANS LES EAUX DU NIGER ET DU BANI - CARACTÉRISTIQUES	
GEOCHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN AMONT	185
1.1. Composition chimique de la phase dissoute (CD)	186
1.1.1. Les éléments majeurs	186
1.1.2. Les éléments traces	189
1.1.3. Variabilité temporelle de la composition de la phase dissoute	195
1.2. Composition chimique de la phase en suspension	199
1.2.1. Minéralogie de la MES	199
1.2.2. Carbone Organique Particulaire (COP)	200
1.2.3. Les éléments traces dans la phase particulaire	202
2. BILAN DES ÉLÉMENTS EN TRACES DANS LE NIGER AMONT - CONTRIBUTIONS	
ANTHROPIQUES ?	208
2.1. Distribution entre les deux phases	209
2.2. Facteur d'enrichissement	214
2.2.1. Groupe des éléments a priori d'origine crustale	220
2.2.2. Groupe des éléments "enrichis" par rapport à la croûte continentale	221
2.2.3. Comparaison avec les précipitations et entre stations	227
3. EROSION CHIMIQUE SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER	228
3.1. Typologie des eaux du Niger	229
3.2. Influence des apports atmosphériques	229
3.2.1. Principe de la correction des apports atmosphériques	230
3.2.2. Teneurs en chlorures dans les eaux de surfaces	231
3.2.3. Résultats de la correction atmosphérique océanique (Apport marin)	231
3.3. Influence de la lithologie	232
3.3.1. Principe des diagrammes normalisé à Na	232
3.3.2. Résultats sur les eaux du bassin du Niger amont	233
3.4. Bilan de l'altération chimique sur le bassin amont	235
3.4.1. Vitesse d'approfondissement des profils	235
3.4.2. Taux de TDS d'origine silicaté	240
CONCLUSION PARTIE II : COMPARAISON DES TAUX D'EXPORTATION	
CHIMIQUE ET MÉCANIQUE SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER	
Bilan d'érosion sur le bassin amont du Niger	243
Transport de TDS	243
Transport de MES	244
Importance relative de chaque type de transport	244
Vitesse de progression des fronts d'altération	246
Approche par TDS sil	247
Approche par le calcul des vitesses d'approfondissement des profils	248

PARTIE III : LE delta intérieur du Niger

**CHAPITRE VI. ÉLÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE
DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER**

1. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ET INONDATIONS	253
1.1. Le réseau hydrographique	254
1.1.1. Le delta Amont	254
1.1.2. Le delta Aval	255
1.2. Description sommaire de l'inondation dans le delta	256
1.2.1. Modalités de l'inondation	256
1.2.2. Extension spatiale de l'inondation	259
2. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	260
2.1. Propagation de la crue amont - aval	261
2.1.1. Estimation des temps de transfert	261
2.1.2. Evolution des hydrogrammes des entrées à Nantaka	263
2.1.3. Evolution des hydrogrammes de Nantaka à Diré	264
2.2. Perte en eau dans le DIN	265
2.2.1. Perte annuelle	266
2.2.2. Perte mensuelle et différence année humide (H) et sèche (S)	267
2.3. Bilan hydrologique	272
2.3.1. Importance de l'évaporation et de l'évapotranspiration vis à vis de l'infiltration	272
2.3.2. Bilan hydrologique	274
2.4. Modélisation des superficies des zones inondées	275
2.4.1. Principe	276
2.4.2. Quelques résultats	277
2.4.3. Limites du modèle	278
3. CONCLUSIONS	279

**CHAPITRE VIII. TRANSPORT ET DÉPÔTS DE SÉDIMENTS
DANS LE DELTA INTÉRIEUR**

1. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN MES DANS LE DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	282
1.1. Statistiques générales sur les données de MES	282
1.2. Evolution des concentrations au cours du cycle hydrologique	285
1.2.1. Evolution temporelle générale.	285
1.2.2. Relation entre les MES et les débits (Q)	287
1.3. Variabilité interannuelle des concentrations	290
2. BILAN DES FLUX DE MATIÈRES TRANSPORTÉES DANS LE DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	291
2.1. Flux annuels de MES transportées de 1992-1993 à 1997-1998	292
2.2. Bilans annuels des flux de matières transportés	294
2.2.1. Bilans annuels des MES dans le DIN - Sédimentation et reprise	294
2.2.2. Variabilité interannuelle des bilans de MES	295
2.3. Bilans mensuels de MES dans le delta intérieur du Niger	297
2.3.1. Le Delta (des entrées à Diré)	299
2.3.2. Le delta amont et le delta aval :	300

3. PROCESSUS MIS EN JEU DANS LES BILANS DE MES	301
3.1. Arrivée de la saison pluvieuse et de la crue	302
3.2. L'étalement de la crue	303
3.3. Décrue et vidange des plaines d'inondation	304
3.4. Peut-on calculer des taux de sédimentation?	305

CHAPITRE IX. CHIMIE DES EAUX DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER : CATIONS ET ANIONS MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, MES

1 CARACTÉRISTIQUES GEOCHIMIQUES DES EAUX DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	307
1.1 Composition chimique de la phase dissoute	307
1.1.1 Les éléments majeurs et le COD	308
1.1.2 Les éléments traces	310
1.1.3 Variabilité spatio-temporelle de la composition de la phase dissoute	313
1.2 Composition chimique de la phase en suspension	322
1.2.1 Minéralogie de la MES	322
1.2.2 Carbone Organique Particulaire (COP) - Variation des apports organiques solides	323
1.2.3 Les éléments traces dans la phase particulaire et totale	324
2 BILAN DES FLUX D'ÉLÉMENTS LORS DE LA TRAVERSÉE DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	326
2.1 Résultats des flux de TDS et d'éléments majeurs	327
2.2 Bilan des flux de TDS dans le DIN	329
2.2.1 Bilan annuelle de TDS	329
2.2.2 Bilan mensuelle de TDS	331
2.3 Bilan des flux dissous élément par élément dans le DIN	333
2.4 Pertes relatives entre éléments	338
3 FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER	339

CONCLUSIONS	345
--------------------	------------

TABLES DES ILLUSTRATIONS	353
---------------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE	367
----------------------	------------

ANNEXES	
----------------	--

Avant Propos

"La vie ne se mesure pas à la longueur du cou du chameau "

Toute chose à une fin. La vie est longue
(Sagesse Africaine - M. Hima)

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire d'hydrologie de l'IRD (ex-ORSTOM) à Montpellier et du laboratoire des eaux continentales de l'IRD à Bamako (Mali).

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Jean Claude Olivry qui m'a accueilli avec enthousiasme au sein du programme qu'il dirige à l'IRD. Ses conseils avisés, le temps qu'il a consacré pour suivre et orienter mes recherches, les moyens techniques qu'il a mis à ma disposition, ainsi que ses vastes connaissances et sa grande expérience dans le domaine de l'hydrologie tropicale dont il m'a fait profiter, m'ont permis d'effectuer les travaux présentés ici et de faire mes premières armes d'hydrologue, du terrain à la rédaction.

Je remercie aussi vivement Michel Desbordes, Professeur à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, et responsable de la formation doctorale "Sciences de l'eau dans l'environnement continental" qui m'a accueillie au sein du DEA et par la suite en thèse. Il a accepté d'être membre du Jury et je l'en remercie.

Je tiens aussi à remercier Bernard Dupré, pour son accueil chaleureux au sein du laboratoire de géochimie des "36 ponts" à Toulouse dans lequel j'ai pu réaliser l'ensemble des analyses des éléments traces. Malgré la distance, il a toujours montré de l'intérêt pour mon travail et a su me faire partager sa passion pour la géochimie des grands fleuves du globe. Grâce aussi aux conseils et à l'aide de Michel Valladon et de l'ensemble de l'équipe du laboratoire de géochimie, mes missions à Toulouse ont ainsi toujours été d'une grande richesse scientifique et technique.

Je remercie fortement messieurs Jean-Marie Fritsch et Michel Meybeck qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Je tiens également à remercier Didier Orange, pour son soutien scientifique et technique lors de mon séjour au Mali. Ses corrections et remarques constructives, notamment lors de la période de rédaction de ce mémoire m'ont été précieuses.

Je voudrais aussi fortement remercier Henri Etcheber et son équipe, pour le formidable accueil auquel j'ai eu le droit au laboratoire de géochimie marine (DGO) à l'université de Bordeaux I, au sein duquel j'ai pu réaliser une partie des analyses de carbone organique. Je les remercie pour le temps

qu'ils m'ont accordé lors de mes missions sur Bordeaux, qui furent toujours un réel plaisir, et pour leurs compétences techniques et scientifiques dont ils ont bien voulu me faire profiter.

Cette étude n'aurait pas pu être menée sans l'aide financière de l'IRD, qui m'a permis de partir en expatriation au Mali et a pris en charge les nombreuses campagnes de terrain ainsi qu'une partie des frais d'analyse. Ceci m'a permis de réaliser à l'aide de l'équipe en place au Mali, un échantillonnage conséquent des eaux du fleuve Niger au Mali. Je voudrais ainsi remercier Francis Sondag, responsable du laboratoire des formations superficielle de l'IRD à Bondy ; laboratoire dans lequel les analyses de majeurs ont été faites.

Je remercie Jean-Pierre Bricquet de m'avoir accueilli, lors de la première année de mon séjour au Mali, dans son équipe d'hydrologues. Grand merci à Bertrand Marieu pour la rapidité avec laquelle il a toujours répondu à mes questions incessantes sur l'hydrologie du fleuve Niger. Je le remercie aussi pour les nombreux trajets dans son taxi brousse personnel entre le quartier de l'hippodrome et le centre IRD de Bamako. Je tiens aussi à remercier, Michel Gréard, pour son soutien logistique et humain lors de l'ensemble de mon séjour au Mali, Arber Dicko, et Kaye Koumaré, en compagnie desquels je suis souvent partie en brousse lors des missions de terrain et qui ont toujours été de précieux compagnons de route ; André Mahieux, pour sa disponibilité à répondre dans l'urgence aux problèmes techniques ; Lassine pour sa gentillesse sans limite ; ainsi que toutes les autres personnes du centre IRD de Bamako qui ont participé à me faire aimer ce pays.

Je n'oublierai pas mes amis "bamakois" pour l'ambiance chaleureuse et amicale dans laquelle ils m'ont plongée : Sophie Boulanger, Gil Mahé, et leurs filles; mes compagnons de la "case Orstom", Flore et Jean-François, mais aussi ceux des cases d'à côté, Nathalie, Didier et Katia, Olivier, Philippe, Anne... Je n'oublierais pas non plus le sourire et la bonne humeur de Bella, ni les cours de danse dans la concession ouverte à tous avec la troupe Don, ni les enfants rencontrés sur ma route.

Que toute l'équipe du laboratoire d'hydrologie de l'IRD de Montpellier veuille bien m'excuser pour tout ce temps où ils ont du me supporter. Qu'ils soient assurés de ma gratitude pour leur soutien et leurs encouragements et pour m'avoir permis de travailler dans des conditions optimales. Je pense aussi à Isabelle, Ana, Dunia, Léonardo, Guillaume, Geoffroy, Ekasit, Juan, Drissa, Wenceslao, David..., mes compagnons de labeur d'hier et d'aujourd'hui, que je tiens à remercier d'avoir été tout simplement là. Je souhaite notamment à ceux qui y sont encore (...) beaucoup de courage et de persévérance. Merci aussi à mes très chers amis d'ailleurs qui, malgré mon silence radio prolongé, ne m'ont pas oublié et sont prêt à me relancer dans le tourbillon de la vie.

Grand merci à mes parents, Annie et Michel, et mon frère, Pierre, pour leur soutien inconditionnel durant mes longues années d'étude. Ils savent, ainsi que ma famille et belle-famille, combien j'ai hâte de les revoir plus souvent après ces séparations géographique puis "scientifique".

Enfin, je voudrais te remercier, Benoît, de tout mon coeur, car ce que j'ai fait pour toi, tu me l'a rendu au centuple, avec d'autant plus de courage que tu aurais sans doute aimé être à vingt mille lieues de là. Une étape de notre vie est aujourd'hui achevée,... à nous l'avenir !

Introduction

Par son action sur l'environnement, l'homme tend à accélérer ou déstabiliser certains des processus naturels observés à la surface du globe. L'industrialisation, l'agriculture intensive et la croissance démographique ont davantage transformé l'environnement au cours de ces cinquante dernières années que pendant les deux mille ans qui ont précédé l'époque contemporaine. Le cycle de l'eau n'échappe pas à ces transformations. La ressource en eau et les milieux aquatiques comptent pour une bonne part des préoccupations actuelles des Etats, ces préoccupations étant exprimées dans de nombreuses conférences internationales. De Rio en 1992 à Paris en 1998, les recommandations se multiplient et abondent dans le sens d'un « développement durable respectant l'environnement », paradigme nouveau, aujourd'hui incontournable et propre à mobiliser les sociétés et leurs scientifiques. La diminution sans doute incontournable au cours des prochaines décennies du volume d'eau annuel moyen disponible pour chaque habitant de la planète pose un problème de quantité et de qualité des ressources dont l'approche est éminemment variable suivant les pays et les zones climatiques.

La gestion intégrée des ressources en eau, tenant compte des usages des populations, de leur environnement et de l'intérêt économique des sociétés, est d'autant plus cruciale que l'on observe généralement sur la planète une dégradation des milieux aquatiques continentaux, et en particulier des rivières, avec pour conséquences une dégradation des conditions économiques, sanitaires et sociales pour les populations riveraines. Les activités humaines responsables directement ou indirectement de ces dégradations sont bien identifiées. Une des préoccupations scientifiques actuelles est de contribuer à déterminer les poids respectifs des changements d'origine anthropique et des changements d'origine naturelle dans l'optique d'un développement durable et dans le souci d'apprécier les modifications acceptables pour notre environnement.

Si cette thèse n'a pas une telle ambition, elle s'inscrit néanmoins dans cette logique. L'ensemble du delta intérieur du fleuve Niger et de son bassin versant est une zone stratégique pour le Mali. La concentration des ressources renouvelables liée à la présence de l'eau explique que cette zone soit un lieu d'activité rurale intense (pêche, production agricole irriguée, élevage) et le « grenier » qui nourrit toute une région. Depuis une vingtaine d'années, la zone soudano-sahélienne est touchée par un déficit pluviométrique qui a provoqué une diminution de la ressource en eau et, ainsi modifié et amplifié les tensions qui s'exercent sur les différents types de ressources du delta et entre les différents utilisateurs de la ressource en eau.

L'objectif de cette étude est donc de fournir des connaissances scientifiques sur les flux de matières qui règlent le fonctionnement et l'évolution de cet hydrosystème (ressource en eau, qualité de

l'eau, transfert et dépôt d'alluvions) en relation avec la variabilité climatique de ces dernières années. Elle permet de caractériser un milieu qui est susceptible de se dégrader dans la prochaine décennie et de jeter les bases d'un suivi futur de cette dégradation.

C'est pour essayer de comprendre le fonctionnement actuel de cet hydrosystème complexe, que nous avons organisé notre étude en deux étapes :

- La première est entièrement axée sur le bassin amont du Niger, défini comme étant le bassin d'alimentation du delta intérieur du Niger. Cette étude consiste à identifier, qualifier et quantifier les flux liquides et de matières exportés par le bassin amont vers le delta intérieur.
- La deuxième étape est essentiellement axée sur le delta intérieur et son fonctionnement. Il s'agit de comprendre ce que deviennent les flux liquides et les flux de matières lors de leur traversée du delta et d'en décrire la dynamique. Il s'agit aussi de caractériser les différents facteurs modifiant la qualité de l'eau.

L'ensemble des travaux que nous avons menés s'appuie sur les observations réalisées dans le cadre du réseau de surveillance des flux particuliers et dissous transportés par le Niger au Mali, mis en place en 1990 grâce à un programme de coopération entre l'ORSTOM et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, Mali). Le programme EQUANIS (Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel) mené de 1990 à 1997 s'inscrit dans le programme PEGI (Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale, INSU/ORSTOM) qui vise principalement à évaluer de manière qualitative et quantitative les apports continentaux aux océans.

La thèse s'articule en 3 parties et 9 chapitres :

- Dans une première partie, nous décrivons et caractérisons tout d'abord les milieux naturel et humain relatifs au bassin étudié (**chapitre I**). Nous rappelons alors les principaux facteurs pouvant influencer les flux transportés par les cours d'eau. Le **chapitre II** permet ensuite de présenter le matériel et les méthodes utilisés pour accéder aux nombreux paramètres et données étudiés dans cette thèse. Celui-ci nous a permis d'engager une réflexion sur la problématique de la surveillance de la qualité des eaux.
- Une deuxième partie dont la problématique est axée sur les taux d'érosion et de transport de matières, est consacrée aux apports du bassin amont. Le **chapitre III** donne un aperçu du régime hydrologique des deux principaux cours d'eau drainant le bassin amont du Niger (Niger et Bani). Le **chapitre IV** présente une étude complète sur la variabilité des concentrations et des flux de matières en suspensions sur ces bassins. Après avoir traité les résultats sur la chimie des pluies dans le **chapitre V**, nous nous sommes attachés à comprendre les processus réglant la composition chimique des eaux du Niger et du Bani et les mécanismes d'altération sur ces bassins versants (**chapitre VI**). Une conclusion spécifique à cette partie nous a permis de comparer les taux d'exportation chimique et mécanique entre les deux cours d'eau du bassin amont du delta.
- Une troisième partie traite du devenir des flux, caractérisés précédemment, lors de la traversée du delta intérieur du Niger. Le **chapitre VII** a pour but de compléter dans un premier temps la description géomorphologique du delta entamée dans le chapitre I et d'exposer le fonctionnement

hydrologique de cet hydrosystème très particulier. Après avoir réalisé le bilan de matière particulaire entre entrées et sorties du delta, nous avons été conduits à aborder les questions relatives à la variabilité spatiale et temporelle des bilans de matières (gains, pertes) pour finalement conclure sur les phénomènes dominants qui se produisent lors de la traversée du delta (**chapitre VIII**). Le même type de démarche a été adopté dans le **chapitre IX** pour les éléments chimiques, qu'ils soient dans la phase particulaire ou dissoute. L'évolution de la composition chimique des eaux du Niger lors de la traversée du delta est en particulier étudiée dans ce dernier chapitre.

PARTIE I : MILIEU NATUREL ET METHODES

Cette partie vise à présenter d'une part le milieu naturel du bassin amont et du delta intérieur du fleuve Niger et d'autre part les techniques et méthodes utilisées pour étudier l'influence de ce milieu sur la qualité de l'eau et les transports de matières. Nous décrirons donc dans cette partie le milieu d'étude et ce qui fait son originalité, avec d'une part le cadre naturel du bassin du Niger amont et son delta intérieur et d'autre part le contexte « anthropique ». La description de ces différentes caractéristiques nous permettra d'aborder les facteurs qui peuvent influencer la composition chimique de l'eau d'une rivière. Le deuxième objectif est de présenter le réseau d'observation des flux de matières dissoutes et particulaires mis en place par l'ORSTOM de 1991 à 1998, ainsi que les données ponctuelles obtenues de 1996 à 1997, et les diverses techniques et méthodes utilisées pour obtenir des résultats de qualité. C'est à partir de ces données que le travail de thèse a été mené, avec notamment l'établissement des bilans de diverses matières transportées par le Niger.

Chapitre I. Le milieu naturel et humain

Nous insisterons, dans ce chapitre, sur l'opposition permanente entre le bassin supérieur du fleuve Niger et son delta intérieur, dualité qui structure l'ensemble de ce travail, et sur les facteurs influençant l'hydrologie du système et les phénomènes d'érosion chimique et mécanique. Ces facteurs vont commander la plus ou moins grande abondance des flux hydriques et régir la composition des contenus dissous et particuliers des eaux naturelles¹

En abordant la description des processus physiques, chimiques, biologiques, et les perturbations anthropiques, qui peuvent agir sur les processus d'érosion, notre présentation n'a aucune prétention d'exhaustivité. Elle est volontairement limitée aux aspects pouvant intéresser ce travail, étant entendu que des développements ultérieurs pourront compléter l'information ébauchée ici. Elle comprend cependant, quelques développements plus généraux auxquels il pourra être fait référence dans la suite de cette étude.

La structuration du chapitre s'appuie sur la succession logique, : des caractéristiques du milieu « récepteur » (cadres géographique, géologique et pédologique), dont son érodibilité, mais aussi le cadre hydrogéologique et la chimie de ses eaux souterraines ; des caractéristiques du climat, intervenant extérieur modelant le milieu, responsable de ses transformations, dont le pouvoir érosif des précipitations ; du cadre biologique résultant des cadres précédents avec en tout premier plan la végétation venant à son tour interférer sur les processus étudiés dans ce travail. L'ensemble a été réuni sous l'intitulé « facteurs conditionnels de la dynamique hydrologique et géochimique ».

Les perturbations anthropiques sont évoquées dans une dernière partie : "l'occupation du milieu par l'homme", avec un bref aperçu de géographie humaine et un accent mis sur les sources ponctuelles et diffuses de pollution. Il convient de préciser que les aspects « eau, environnement, santé », avec tout ce qui concerne la bactériologie et les vecteurs de maladies, sortent du cadre de cette étude.

¹ Il existe une échelle dans la recherche des différents facteurs contrôlant la qualité de l'eau et leur importance respective à partir d'études de terrain : une échelle globale (étude des grands fleuves) où les contrastes climatiques et/ou lithologiques sont les principaux facteurs de différenciation des taux de production de sédiments ; une échelle plus petite (versants, parcelles...), où les conditions climatiques et géologiques peuvent être constantes et permettent d'étudier des facteurs plus locaux (modalité des pluies, sols, végétation, utilisation des terres...) qui peuvent affecter la qualité de l'eau d'une rivière.

1. LE CADRE NATUREL DU BASSIN SUPERIEUR ET DU DELTA INTERIEUR DU FLEUVE NIGER

Facteurs conditionnels de la dynamique hydrologique et géochimique observée sur les cours d'eau du bassin du Niger :

L'existence du fleuve Niger est déjà évoquée dans l'antiquité (Ptolémée, II^e siècle après J-C), puis par les voyageurs historiens arabes comme Ibn Battûta au XIV^e siècle. Il apparaissait alors comme un tributaire du Nil issu de l'Afrique de l'Ouest (cartographie qui sera reproduite en Europe jusqu'au XVIII^e siècle). Il est également reconnu par les voyageurs européens entre la Guinée et Tombouctou tels que Mungo Park (1796) puis René Caillié (1828).

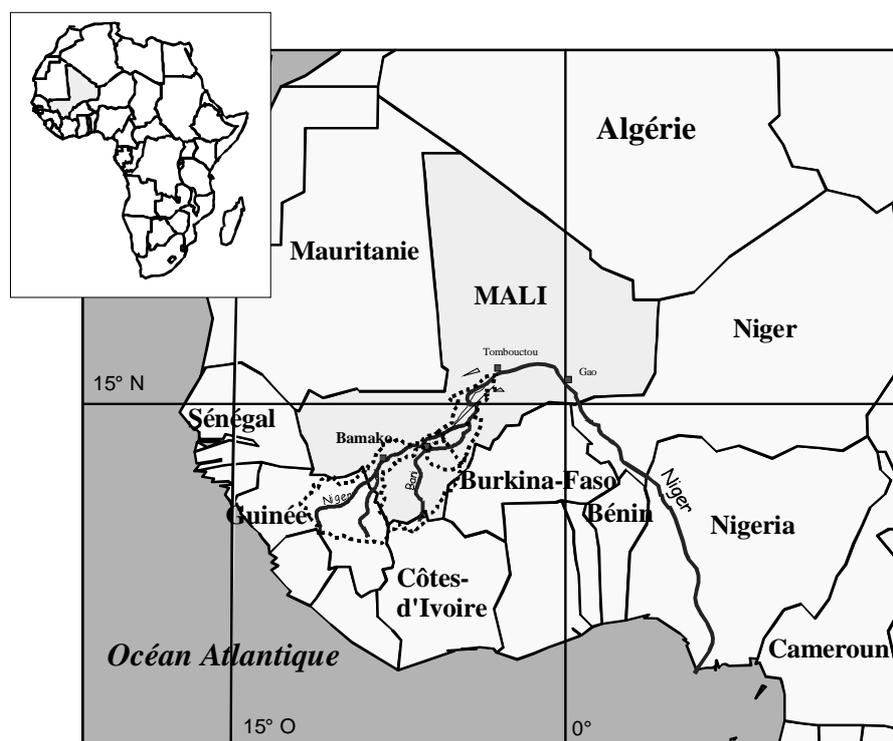


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude

Issu de la Dorsale Guinéenne qui sépare la Moyenne Guinée et la Guinée Forestière du Sierra Léone et du Libéria, le Niger, est le troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 km) après le Nil et le Congo. Il s'écoule suivant une direction générale Nord-Est jusqu'aux confins du Sahara. Il décrit alors une grande boucle dans sa traversée des régions sahéliennes et subdésertiques formant un delta intérieur (plus de 40 000 km²) où il perd une part importante de ses apports hydriques. Le cours du Niger retrouve ensuite la route de l'océan au fond du golfe de Guinée où il se jette, après la traversée d'un grand delta maritime, de 20 000 km² (Figure 1). Le Niger traverse quatre pays (Guinée, Mali, Niger, Nigeria), mais avec ses affluents, son bassin versant intéresse aussi le Cameroun, le Bénin, le Burkina-Faso, et la Côte d'Ivoire. Huit pays sont donc concernés par le régime hydrique du Niger.

1.1. Cadre physique et géographique

La partie du bassin du Niger qui intéresse cette étude comprend le bassin supérieur du fleuve Niger proprement dit et le bassin du Bani, puis le delta intérieur du Niger (en amont donc du Niger moyen et du bas Niger) et s'étend entre le 9° et le 17° de latitude Nord. Cette zone couvre une superficie de 342 000 km² (**Error! Reference source not found.**). Elle se situe principalement en Guinée (28%) et au Mali (62%), ainsi que de faibles superficies en tête de bassin en Côte d'Ivoire (environ 7%) et au Burkina-Faso (autour de 3%).

La région du delta intérieur du Niger, zone tout à fait particulière du cours du Niger, s'étend des environs de Ségou à Tossaye, le long du fleuve, bien que le delta intérieur proprement dit s'arrête à Korioumé (port de Tombouctou). Cette zone forme un grand parallélogramme d'axe SO-NE de 400 km de longueur et 125 km de largeur, sans limites de bassin versant bien établies (cf. chapitre VII).

1.1.1. Le bassin supérieur du Niger et le bassin du Bani

Le bassin du Niger supérieur se limite vers l'aval à la région de Ségou et forme un ensemble qui s'étend entre 8°35' et 14° de latitude nord et 4° et 11° 30' de longitude ouest, il est essentiellement constitué d'une zone de plateaux s'inclinant progressivement vers le nord-est, encadré au nord-ouest par le plateau Mandingue qui vient longer le fleuve, à l'ouest par le massif du Fouta-Djallon et au sud-ouest par les nombreuses chaînes d'origines géologiques très différentes qui viennent s'y raccorder.

Le fleuve Niger prend sa source en Guinée, à 800 mètres d'altitude. Il draine, avec ses affluents et sous affluents, presque 100 000 km² du territoire guinéen, correspondant aux régions naturelles de la Haute Guinée constituées essentiellement de plateaux. Ces plateaux, situés à une altitude moyenne de 400 m, s'étalent sub-horizontalement vers l'est, des contreforts du Fouta-Djallon à l'Ouest et de la dorsale Guinéenne au sud. Le reste du bassin descend en pente douce vers le nord-est entre les cotes 400 et 300 m, constituant une pénéplaine. La monotonie du relief, due à la longue érosion subie par les roches, est rompue par endroits par des buttes latéritiques à surface horizontale au sud-ouest et des plateaux gréseux dominant de vastes étendues de collines et plaines. A partir de là, le Niger coule à travers un paysage de plus en plus plat sur des dépôts continentaux quaternaires.

Le cours du Bani, principal affluent du Niger (constitué par la confluence du Baoulé et du Bagoé), se situe presque entièrement dans la zone Mali-Sud (85% de son bassin à Douna). Cette zone est caractérisée par des plateaux très plats et de faible altitude (entre 280 et 400 m). Le Plateau Dogon, ou plateau de Bandiagara à l'est, s'étirant de Koutiala jusqu'à Douentza, constitue le seul relief important de la zone (791 m vers Koutiala sur le rebord est). Peu après la confluence entre le Baoulé et le Bagoé, le Bani coule sur les alluvions quaternaires pour finalement atteindre la plaine deltaïque avant Sofara, puis rejoindre le Niger à Mopti.

Ces quelques lignes montrent que l'hypsométrie des deux bassins du Niger et du Bani est donc bien différenciée. Le Tableau 1 permet de mieux apprécier la répartition des altitudes pour le bassin du Niger à Koulikoro et celui du Bani à Sofara.

Altitude (m)	Surface du Bassin du Niger à Koulikoro (120 000 km ²) (%)	Surface du Bassin du Bani à Sofara (129 400 km ²) (%)
> 900	0,95	
800-900	1,4	
700-800	2,5	
600-700	5,9	
500-600	13,6	1,7 (> 500m)
400-500	43,9	12,9
300-400	31,7	69,8
< 300	0,05	15,6

Tableau 1. Répartition des altitudes pour le bassin du Niger à Koulikoro et celui du Bani à Sofara (d'après Brunet-Moret *et al.*, 1986 et modifié).

1.1.2. Le delta intérieur du Niger

A partir de Ségou pour le Niger et de Douana pour le Bani, le cours du Niger entre dans une immense plaine alluviale comblée par différents dépôts du quaternaire. Cette zone, connue sous les différents noms : delta central, cuvette lacustre, cuvette intérieure, ou **delta intérieur du Niger**, se caractérise par une géomorphologie qui rappelle les deltas rencontrés habituellement à l'embouchure des fleuves (dépôts d'alluvions et ramifications multiples). Géographiquement, les limites du delta sont définies par l'extension des eaux de crue (Ce thème sera plus amplement abordé dans le chapitre VII). Cette extension est toutefois limitée (outre les phénomènes hydrologiques), à l'est, par les reliefs du plateau de Bandiagara, dont l'altitude moyenne est de 700 m, soit à 400 m au dessus du delta ; à l'ouest, par le "delta mort", zone de dépôts anciens au dessus de l'actuel delta et enfin au nord, par une série de dunes orientées est-ouest (Gallais, 1967).

La morphologie du delta intérieur du Niger se présente en quatre grands types morphologiques aux caractéristiques distinctes, largement décrits par ailleurs (Gallais, 1967 ; Gallais, 1979 ; Jaccoberger, 1987, 1988 ; Blanck & Lutz, 1990 ; McCarthy, 1993 ; Poncet, 1994).

- (1) le "haut delta" s'étend au sud d'une ligne schématique Tenenkou-Kouakourou-Sofara. Le milieu hydrique de cette zone comprise entre les deux tributaires du delta (Niger et Bani) s'organise autour de grands troncs hydrographiques permanents ou semipermanents bien marqués au tracé assez rectiligne. Pour Gallais (1967) la dynamique dominante était l'ablation des matériaux par les grands cours d'eau qui rongent leurs rives escarpées et déblayent les dunes aplaties. Les chenaux sont larges et bien tracés, stabilisés entre de hautes berges constituées par les dépôts alluviaux anciens. Ces derniers, forment des levées massives, exondées en permanence et à dominante sableuse.

DELTA INTERIEUR DU NIGER

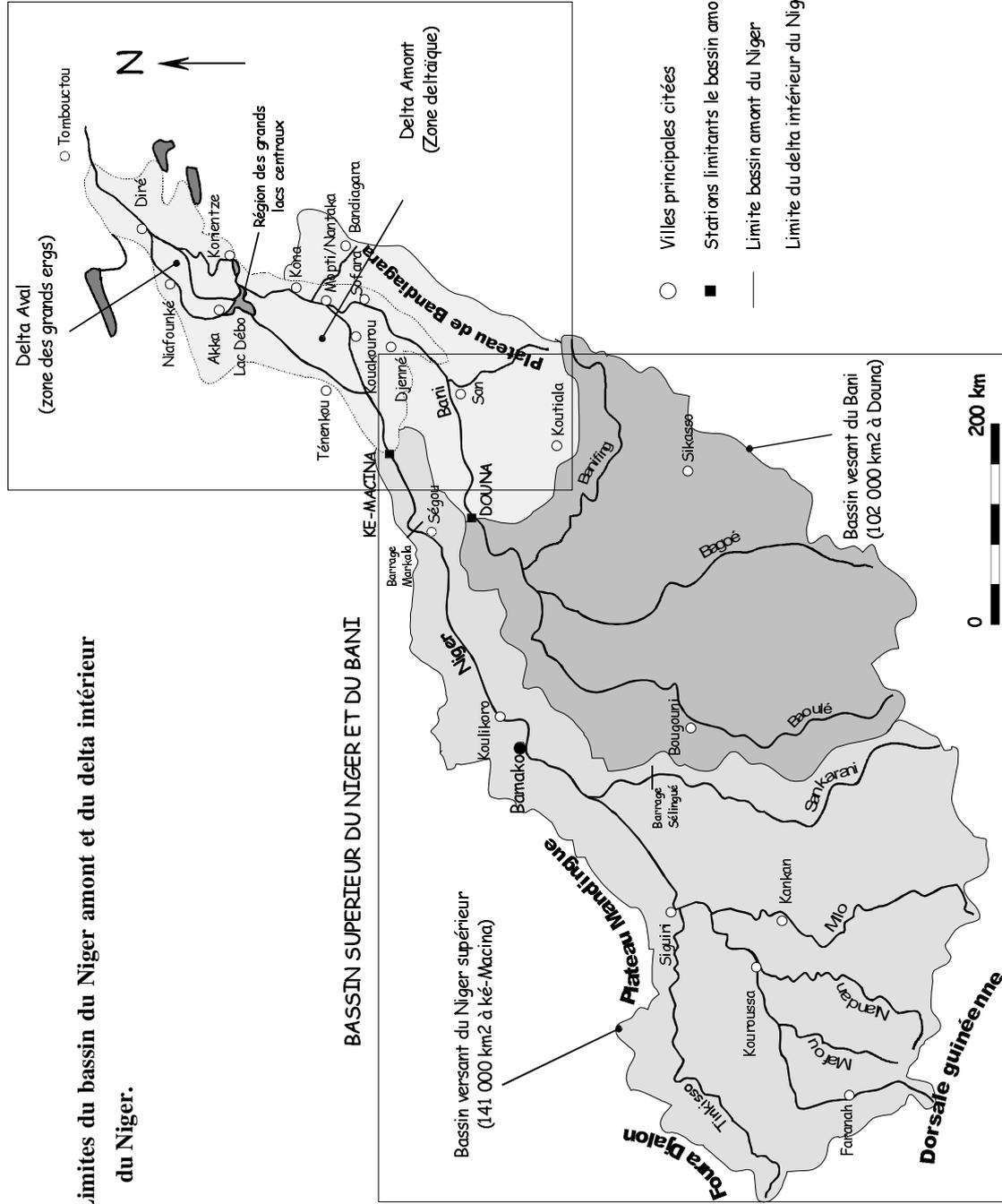


Figure 2. Limites du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger.

- (1) Le "delta moyen" qui s'étend en aval du précédent jusqu'à la latitude de Kona, possède une morphologie différente, caractérisée par de nombreux méandres, chenaux, mares, plaines inondables... sans hiérarchie apparente. Les phénomènes d'accumulation et d'ablation semblent s'y équilibrer sur de courtes distances (Gallais, 1967). Le cours du Niger dans cette zone, malgré de nombreuses défluences, garde un aspect longitudinal avec une tracé bien marqué.
- (2) Le "bas delta" est la zone des dépôts alluviaux et de colmatage à proximité des lacs centraux (Walado, Débo, Korientze), qui constituent de vastes bassins de décantation.
- (3) Le "nord dunaire" ou delta aval s'entend de la bordure nord du lac Débo jusqu'à Korioumé. Cette zone, aussi dénommée par les géomorphologistes "erg inondé" ou "erg de Niafunké", se caractérise par l'apparition de grandes dunes orientées est-ouest qui ont perturbé l'orientation sud-nord du système fluvial durant le quaternaire (paragraphe X). Les eaux fluviales apportées par les crues annuelles du Niger s'y sont insinuées : les eaux ont envahi les bas-fonds longitudinaux en se frayant un passage en "cluse" à travers celles-ci.

Des bourrelets de berges sont en constante formation, tantôt sur une rive, tantôt sur une autre. La formation de ces bourrelets, liée à la faible pente ainsi qu'à la sédimentation dans le lit du fleuve entraîne un endiguement naturel et un exhaussement du lit de transit par rapport aux plaines d'inondation voisines (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Ce phénomène est très atténué pour les petits cours d'eau et les bras abandonnés des zones plus éloignées (McCarthy, 1993).

1.1.3. Influence de la morphologie sur les phénomènes d'érosion/sédimentation

Les phénomènes d'érosion chimique et mécanique, ou les dépôts qui leur sont liés, trouvent à des degrés divers des éléments d'explication dans la morphologie et le relief des bassins versants. Les quelques concepts généraux présentés ici sont tirés de travaux dont les références récentes ont été sélectionnées.

En faisant varier la surface d'exposition (surface de contact entre le minéral et la solution), le relief va avoir une influence sur l'altération chimique des roches (Berner & Berner, 1987, Viers, 1998). Cependant, si l'étude de Summerfiel & Hulton (1994) indique bien que la variabilité des taux de dénudation chimique sur 30 grands fleuves s'explique par un paramètre de relief, cette influence sur l'érosion chimique reste un sujet de controverse (difficulté à isoler son rôle des autres facteurs influençant l'altération).

L'importance de la pente sur l'érosion mécanique et son rôle relatif par rapport aux phénomènes climatiques, sont également difficiles à résoudre à l'échelle globale (Walling & Webb, 1996). De nombreuses études sur les écoulements et les matières en suspension transportées par les cours d'eau ont cependant montré une relation étroite entre le relief et la morphologie des bassins d'une part, et l'érosion mécanique d'autre part (e.g. Pinet & Souriau, 1988 ; Milliman & Syvitski, 1992 ; Summerfield & Hulton, 1994 ; Ludwig & Probst, 1996). Cette relation souligne le lien entre les taux de sédiments transportés par les rivières et la tectonique globale, facteur difficilement numérisable dans les études statistiques précédentes (Milliman & Syvitski, 1992). A l'échelle du versant, le plus

souvent, l'érosion augmente avec la pente, se développant en rigoles, dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (Roose *et al.*, 1998). La vitesse des filets liquides et le pouvoir érosif de l'eau de ruissellement sont évidemment directement proportionnels à la pente du versant (Tardy, 1998). Ainsi, les bassins de grande taille sont-ils souvent caractérisés par une pente plus faible et par un taux d'érosion mécanique également plus faible que leurs bassins emboîtés. De plus, les bassins de grande taille présentent généralement un aval de faible pente et des plaines inondables où l'alluvionnement est favorisé.

Le fleuve Niger n'échappe pas à ce schéma. Cette relation inverse (le taux d'érosion mécanique semble diminuer alors que la superficie du bassin augmente) a été largement décrite dans la littérature (e.g. Walling, 1983 ; Milliman & Meade, 1983 ; Walling & Webb, 1996...). Mais elle n'est pas universelle : Dedkov & Mozzherin (1992), cités par Walling & Webb (1996) ont en effet montré que la relation inverse est également rencontrée pour certains bassins versants où le phénomène d'érosion des berges est la principale source de sédiments de la rivière. Cet aspect ne devra pas être négligé sur le cours du Niger et du Bani et de leurs défluent dans le delta intérieur du Niger.

L'importance de la pente et de la morphologie dans les phénomènes de sédimentation renvoie à cette dimension de l'érosion qui est traitée, notamment, dans les recherches de géomorphologie fluviale. Celle-ci est la résultante des processus d'érosion, de transport et de dépôt (Petts & Bravard, 1993 ; Derruau, 1996 ; Bravard & Petit, 1997). Le profil en long d'une rivière (diminution progressive de la pente vers l'aval) et les caractéristiques géométriques des tronçons de celle-ci (largeur, profondeur, pente du chenal, style fluvial, rugosité) vont jouer sur les vitesses d'écoulement de l'eau (longitudinalement et transversalement) et par la suite sur le transport et/ou la sédimentation des matériaux. L'érosion et le transport de sédiments sont presque entièrement fonction de la compétence du cours d'eau, et vont donc se produire dans des secteurs caractérisés par des vitesses fortes. Au contraire, une zone comme le delta intérieur du Niger, se situant dans les points bas du bassin versant et caractérisé par une morphologie très particulière (dont des très faibles pentes) et des faibles vitesses d'écoulement, va être le siège de sédimentations allochtone (sédimentation des apports des tributaires) et autochtone (pour les dépôts organiques et les précipitations chimiques). Les caractéristiques hydrographiques du bassin amont et du delta intérieur du Niger seront plus amplement abordées respectivement dans les chapitres III et VII.

1.2. Cadre géologique et pédologique

La géologie du secteur d'étude est présentée succinctement dans le cadre général de l'Afrique de l'ouest, et de manière plus détaillée pour la partie du bassin du Niger dont la carte géologique est tirée et modifiée de Brunet-Moret *et al.* (1986). La présentation des sols et formations pédologiques, qui lui sont associées, sera abordée en s'appuyant notamment sur trois ouvrages sur la zone tropicale (Banque Mondiale, 1986 ; Riou, 1990 ; Casenave & Valentin, 1989).

1.2.1. Aperçu géologique de la région d'étude

La région du sud-ouest saharien apparaît comme un vaste craton, considéré stabilisé depuis l'orogénèse éburnéenne à 2,1 GA, sur lequel repose l'immense bassin de Taoudénni (Figure 2, d'après Guiraud *et al.*, 1987). L'histoire géologique de la région fait encore l'objet d'interprétations nouvelles et ne sera pas abordé ici (se référer aux nombreux articles, ouvrages et revues sur le sujet comme Bessoles, 1977). L'histoire du cours du fleuve Niger sera tout de même abordée même si elle reste encore largement hypothétique.

Figure 2. Carte schématique des principaux ensembles géologiques de l'Afrique de l'ouest et du nord (d'après Guiraud *et al.*, 1987).

1.2.1.1. Histoire du cours du Niger et formation de son delta intérieur

Au cours du mésozoïque puis au tertiaire, périodes des ajustements tectoniques associés à l'ouverture de l'Atlantique, les grès précambriens sont progressivement soulevés puis entaillés par les réseaux hydrographiques pour former les actuels plateaux de Tambaoura, Manding, et Dogon Ailleurs, comme dans les régions de Ségou et du Macina, ils subissent au contraire une subsidence et la dépression ainsi créée, est progressivement comblée par des apports sédimentaires (Quensière, 1994).

Les détails de la mise en place du delta intérieur du Niger actuel ne sont pas encore connus avec certitude et différentes interprétations ont été proposées. Pour les spécialistes de la question, il est certain aujourd'hui que, vers la fin du tertiaire, le Niger se dirigeait vers le nord, pour se jeter au niveau de Tombouctou dans la dépression de l'Azaouad, par un delta aujourd'hui mort (Riser, 1986 ; Petit-Maire *et al.*, 1987 ; Rognon, 1989 ; Blanck & Tricart, 1990 ; Fontes *et al.*, 1991 ; Quensière, 1994). L'actuel delta, au nord-est de Ségou devait être également partiellement inondé. Le bassin du Niger semble avoir alors été endoréique, comme celui du Chari et du lac Tchad en Afrique Centrale.

Au quaternaire, le fleuve Niger a été profondément influencé par les changements climatiques. A la dernière période glaciaire maximum pour l'hémisphère nord, (entre 14 000 et 18 000 ans a.v. J.-C), le refroidissement de l'océan Atlantique a provoqué une intensification des alizés. De surcroît, la migration du front polaire vers l'équateur a activement poussé la zone aride du Sahara vers le Sud, dans l'actuel Sahel. Des dunes de sable actives s'étendent vers le sud, bloquant ainsi, de manière efficace, le fleuve Niger dans la région actuelle de Tombouctou, à 300 km au nord est de Mopti.

La période de reprise du cours du Niger vers l'est (au niveau actuel,) épisode appelé "la capture du Niger par le Tilemsi", reste largement hypothétique : une des hypothèses de capture postule les déversements vers l'est d'un lac postérieur à la dernière ère glaciaire des régions tempérées (lac Arouâne). Les eaux suivant le relief dunaire débordent au dessus du seuil de Tossaye (qui sera ensuite profondément entaillé par le fleuve) et rejoignent ce qui va constituer la dernière partie de la grande boucle du Niger (qui n'est encore que la rivière Tilemsi rejoignant l'océan Atlantique). Une autre hypothèse est que l'écoulement du Niger vers l'est pourrait aussi correspondre à un surcroît de débit lors des périodes humides. La forme très particulière du cours du Niger, l'identification d'un delta mort à l'ouest du delta intérieur, la présence de sédiments lacustres dans la cuvette d'Arouane, l'existence d'un seuil profondément entaillé à Tossaye (en 10 000 ans seulement), sont autant d'éléments qui continuent à nourrir les controverses sur la datation de la capture du Niger par le Tilemsi.

Le delta intérieur du Niger est donc géologiquement relativement jeune. C'est un exemple classique de l'hydrologie "faux-deltaïque", résultant de l'alternance de périodes arides et humides au quaternaire ; les période humides étant marquées par la morphogenèse fluviale et le colmatage des fossés d'effondrement (dépôts des deux tributaires Niger et Bani), et les phases sèches par des dépôts éoliens de matériaux d'origine saharienne.

1.2.1.2. Formations géologiques traversées par le Niger

Depuis les sources des différentes branches constituant le Niger et le Bani jusqu'au niveau du delta intérieur du Niger, les cours d'eau qui s'écoulent globalement vers le nord-est (à l'exception du Banifing, affluent du Bani, qui s'écoule vers le nord-ouest) traversent successivement les unités géologiques suivantes (Figure 3) :

- (1) des formations du socle précambrien inférieur ou dahomeyen. Ce bouclier éburnéen (formé par un complexe gneissique et granitoïdes, ainsi que de séries gneissiques, volcano-sédimentaires ou molassiques) représente le soubassement de tout le haut bassin du Niger et du Bani, au dessous d'une ligne Bamako-Sikasso.
- (2) des formations birrimiennes pour lesquelles, la distinction entre d'une part, des micaschistes et, d'autre part, des schistes et quartzites, est généralement faite. Ces formations couvrent près de la moitié du bassin supérieur du Niger ; elles représentent le lit rocheux des branches supérieures du Bani bien que ce soit l'ensemble granito-gneissique ci-dessus, qui affleure dans la majeure partie du bassin supérieur du Bani. Les schistes dominant à l'est et à l'ouest du bassin (Tinkisso, Niger, Milo et Bagoé) alors que les micaschistes affleurent principalement au centre du bassin (Sankarani et bassin du Baoulé). Les formations birrimiennes, plus ou moins métamorphisées,

sont recoupées par des granites et surtout des dolérites (cours inférieur du Niandan). Au dessous de la zone d'altération, toutes ces roches sont imperméables. Entre les granites damoyen et le birrimien, à l'ouest de Kankan, la chaîne Niandan-Banie comprend des roches vertes, des schistes et des quartzites.

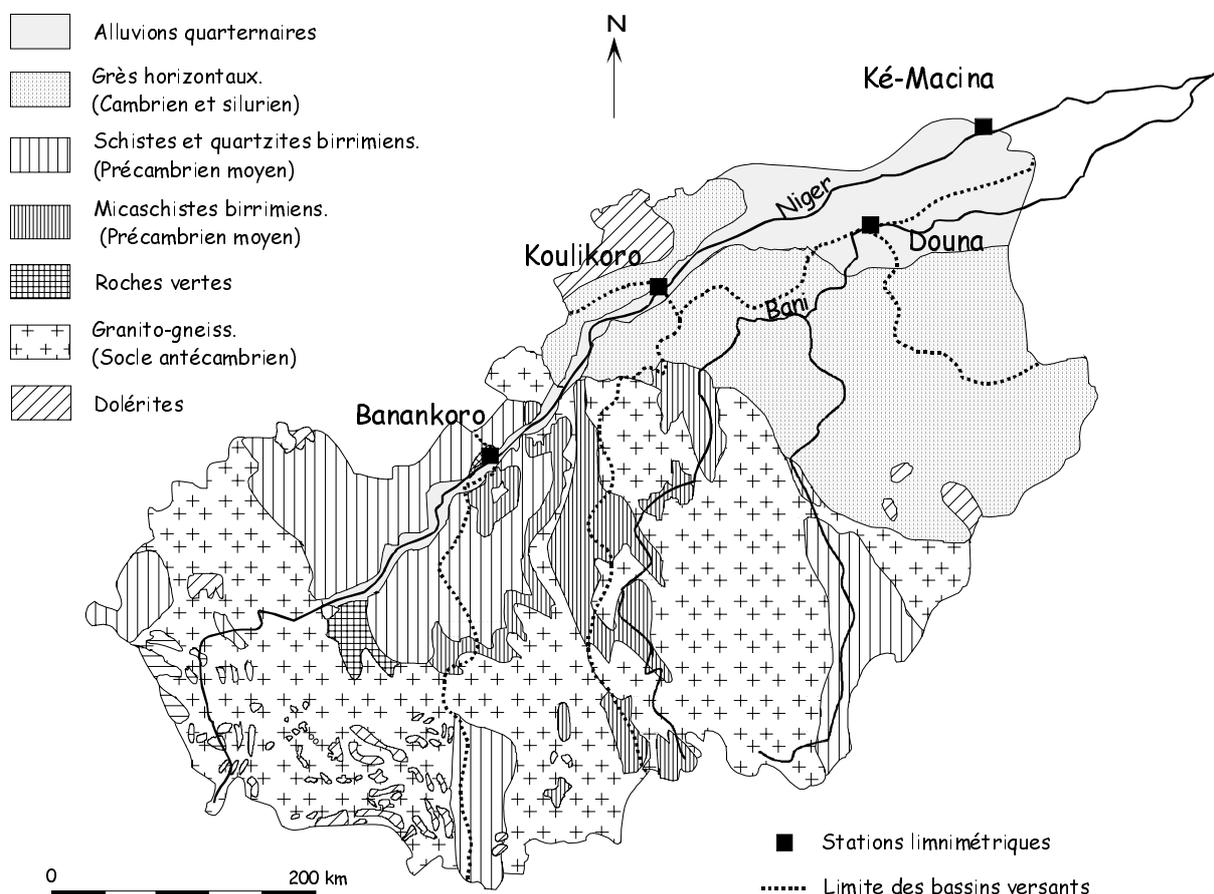


Figure 3. Carte géologique du bassin versant du Niger en amont du delta intérieur (d'après Brunet-

Moret et al. (1986), modifié). Les stations limnimétriques de Ké-Macina et Douna représentent les limites amont du delta.

(4) des formations cambriennes et ordoviciennes, représentées par des grès horizontaux, recouvrent les parties les plus septentrionales des bassins du Niger supérieur, du Baoulé, et du Bagoé et constituent tout le bassin versant du Banifing et des affluents inférieurs du Bani.. Les différentes unités apparaissent sous forme d'auréoles sensiblement concentriques autour du delta intérieur du Niger. Du sud au nord et de bas en haut de la série, la différenciation des types de terrains en fonction de l'âge permet de distinguer :

- les grès de Sikasso, les grès de Sotuba, qui constituent le lit du Niger sur plus de 100 km à l'amont de Koulouba, et les grès de Koulouba. Ces ensembles sont recouverts par des

formations latéritiques dont l'épaisseur dépend de la nature géologique de la roche mère et des conditions climatiques.

- les grès de Kati, de Koutiala et de Bandiagara. Les grès de Bandiagara sont puissants ; dans le delta intérieur, ils sont démantelés et affleurent peu alors que les grès de Koutiala, correspondant à l'étage inférieur des précédents, en constituent le radier (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

(5) des formations sédimentaires cénozoïques et quaternaires, à caractère continental, ont comblé la vaste dépression paléozoïque. Elles se distinguent de bas en haut, en trois grands types :

- le continental indifférencié comprenant des grès, des sables et des argiles ;

- le continental terminal essentiellement gréseux. Ces deux ensembles ont jusqu'à 100 mètres de puissance ;

- les formations quaternaires ; au niveau des cours d'eau, elles sont constituées d'alluvions dont la largeur ne dépasse guère quelques kilomètres ; au niveau du delta, elles sont caractérisées par des sables, des graviers, des argiles d'origine fluviatile, des sables fins et argiles poudreuses d'origine éolienne, et des diatomites (au fond des lacs).

1.2.2. Aperçu pédologique de la région d'étude

La plupart des sols de l'Afrique de l'Ouest sont développés sur les vastes surfaces sub-horizontales appartenant au vieux socle cristallin. La majorité d'entre eux ont atteint le stade ultime de leur pédogenèse. Ce sont généralement des sols très lessivés, riches en oxydes de fer, pauvres en humus et peu fertiles. Du point de vue physico-chimique, ces sols ont tendance à s'acidifier avec l'augmentation de la pluviosité, tandis que le taux de matière organique décroît avec la croissance d'aridité. A l'échelle continentale, les grands types de sols se répartissent en fonction des zones climatiques qui conditionnent plus ou moins grossièrement celles de la végétation. Les deux principaux types de sols à complexe d'altération kaolinique sont d'une part, les sols ferrallitiques formés sous climat chaud et humide et couvert forestier, d'autre part les sols ferrugineux tropicaux formés sous les climats à fort contraste saisonnier et couvert naturel de savane (Riou, 1990).

1.2.2.1. Formations pédologiques rencontrées sur le bassin du Niger

La Figure 4 montre que trois grands types de sols se rencontrent sur le bassin du Niger (y compris dans le delta intérieur) selon la classification française des sols (CPCS, 1967, cité par Banque Mondiale, 1986) : sols ferrallitiques, sols ferrugineux tropicaux, et sols hydromorphes. Des cuirasses ferrugineuses peuvent se rencontrer en surface ou à faible profondeur sur l'ensemble des deux premiers types de sols ; elles sont particulièrement répandues en Guinée et dans le sud du Mali. Cet horizon concrétionné et durci résulte d'une migration ascendante des oxydes de fer à l'état ferreux, puis de leur précipitation plus ou moins superficielle à l'état ferrique. Quelques rares taches de sols bruns tropicaux ou d'argiles noires tropicales (vertisols) se rencontrent. Les sols sableux dunaires caractérisent la partie nord de la zone d'étude (delta aval).

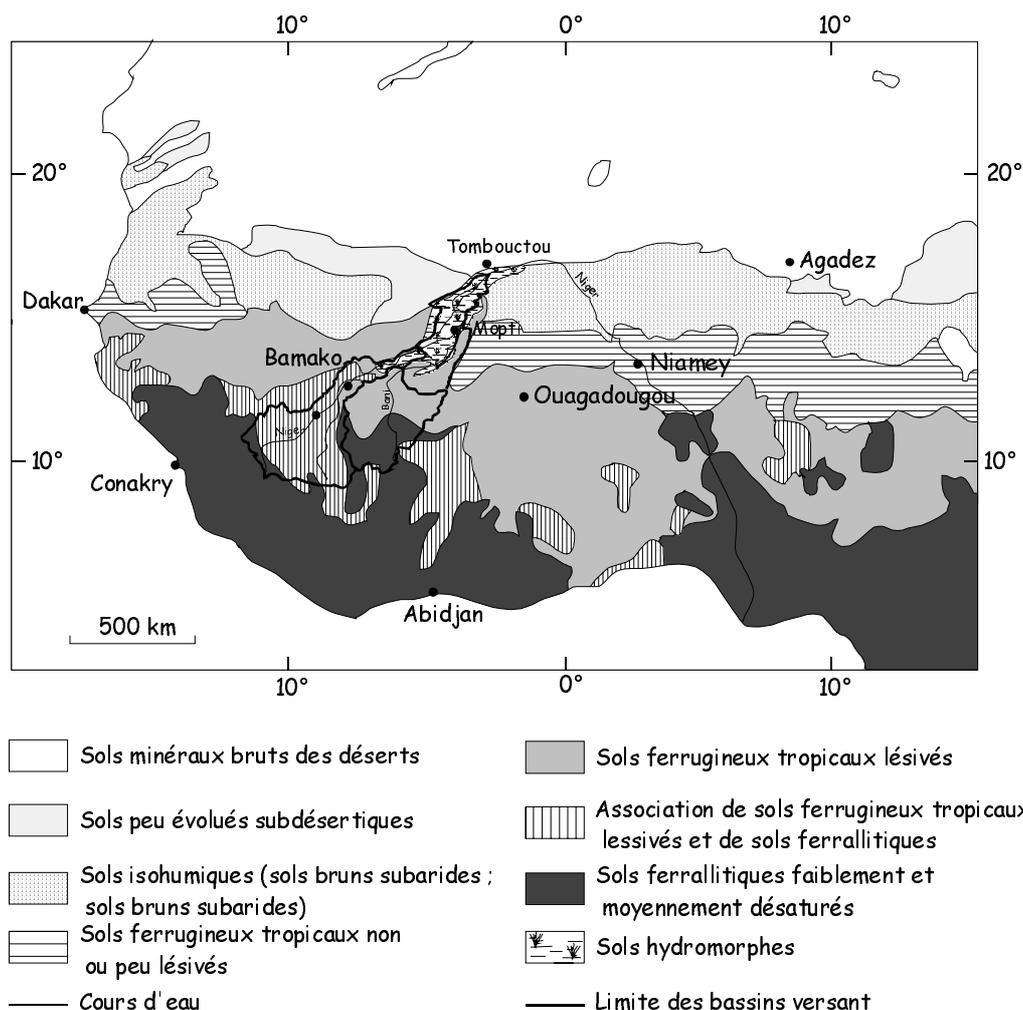


Figure 4. Carte schématique des sols de l'Afrique de l'Ouest avec localisation du bassin supérieur du Niger et de son delta intérieur (d'après Banque Mondiale, 1986 ; et modifié)

- (1) Les sols ferrallitiques représentent les sols observés sur l'extrême ouest du bassin guinéen du Niger et au sud du bassin du Bani. Ce sont des sols épais (de 3 à plus de 10 m) où l'altération géochimique est très poussée et étalée sur des périodes de temps extrêmement longues (plusieurs millions d'années). Suivant les cas, il y a dominance de kaolinite néoformée (monosiallisation) ou bien ce sont les sesquioxydes d'aluminium qui deviennent dominants, sous forme de gibbsite (allitisation). En fait, les sols sur la majeure partie du bassin amont sont, soit une association (résultant du jeu des facteurs topographiques et lithologiques) de sols ferrallitiques cités ci-dessus avec des sols ferrugineux tropicaux lessivés, soit seulement ces derniers.
- (2) Les sols ferrugineux tropicaux lessivés sont observés sur le nord du bassin du Bani et en association avec les sols ferrallitiques sur le bassin du Niger supérieur (comme cité ci-dessus). L'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, caractéristique du climat du bassin versant, induit une altération discontinue de la roche dans le temps. Les profils d'altération ont une épaisseur variable mais plus faible que les sols ferrallitiques (< 3 m). La formation de la kaolinite est entravée (pluviosité limitée) ; elle s'associe à des argiles gonflantes à meilleure

capacité d'échange telles que les illites et les montmorillonites. Ces types de sols sont fréquents sur toute la région étudiée et sont souvent liés à des glacis ou des reliefs tabulaires (PIRL, 1988).

- (3) Les sols hydromorphes, liés à la présence d'une nappe temporaire ou permanente plus ou moins proche de la surface, se rencontrent dans des conditions particulières du milieu (cuvettes, lits des cours d'eau, basses plaines argileuses...). Ils représentent la presque totalité des sols du delta intérieur du Niger (74% des sols sont franchement inondés de façon saisonnière dans la zone du delta vif, PIRT, 1986). Sur les bords de ce dernier, de grandes superficies de sols nus, lessivés et encroûtés se développent.

1.2.2.2. Sols rencontrés dans le delta intérieur du Niger

Les sols rencontrés plus spécifiquement dans le delta intérieur du Niger sont décrit de façon plus complète dans deux ouvrages auquel le lecteur peut se reporter (PIRL, 1988, Poncet, 1994).

Brièvement, deux types d'accumulations alluviales se rencontrent dans le delta intérieur du Niger et correspondent à la limite delta amont et delta aval :

- Les dépôts anciens correspondent aux grandes levées d'accumulation, dont les parties les plus hautes ne sont pas soumises aux inondations. Elles se situent en bordure de cours d'eau du Niger et du Bani ou encadrent des axes d'écoulement ancien en amont du lac Débo et présentent un matériel argileux et limoneux. A coté de ces hautes levées, associées aux grands défluent, on trouve deux unités morphopédologiques essentielles : un système de petites levées qui représente une transition entre les levées alluviales exondées et les basses plaines. Les sols sont argileux - limoneux sur les aires les moins profondes, à tendance vertique ailleurs. Localement on peut trouver des nodules calcaires. C'est aussi l'aire des rizières. Les cuvettes de décantation constituent les zones les plus basses des plaines alluviales actuellement encore inondées . Elles occupent la majeure partie des plaines alluviales du delta "vif". Elles ont été le siège d'une sédimentation de matériaux très fins, argiles et limons fins. Ces argiles ont évolué en milieu confiné en donnant naissance à des minéraux gonflant de type montmorillonite. Les dépôts gleyfiés en surface témoignent de l'inondation régulière et prolongée de ces zones.
- Les alignements dunaires (qui constituent les dunes de l'erg de Niafouké), caractéristiques du delta aval, sont séparés par de grandes dépressions colmatées par des dépôts fins argileux ou argilo-limoneux. Les eaux de l'Issa Ber se répandaient dans ces couloirs interdunaires, transformés en cuvettes d'inondation (Blanck & Lutz, 1990). Dans les parties les plus profondes se sont développés des vertisols, découpés en surface par des fentes de dessiccation, de 2 à 4 m de largeur. Ailleurs, à la saison sèche, des encroûtement calcaires tapissant le fond des cuvettes ont été observés par Blanck & Lutz, (1990). Dans certains couloirs interdunaires moins creusés, ces mêmes auteurs ont trouvé une cuirasse ferrugineuse affleurante, formant des plages, plus ou moins étendues, couvertes de gravillons ferrugineux. Cette cuirasse est recouverte par des épandages limoneux à argilo-limoneux, discontinus. Des nodules de carbonates sont également signalés sur les franges sableuses du delta (Mc Carthy, 1993). Le Lac Faguibine est quant à lui caractérisé par 30 000 ha de diatomites qui tapissent le fond du lac.

1.2.3. Influence de la lithologie et des sols sur les phénomènes d'érosion

La géologie permet, en caractérisant la nature du substratum, d'évaluer l'intensité des phénomènes d'érosion de la croûte terrestre continentale qui peuvent se produire. Le phénomène va être plus particulièrement actif dans les régions montagneuses et dans les zones où une orogénèse récente a porté en altitude des matériaux sédimentaires tendres et altérables; elle est en revanche plus lente sur les vieux boucliers plats et constitués de roches plutoniques dures et peu solubles (Tardy, 1998), comme c'est le cas sur le bassin du Niger.

1.2.3.1. Influence de la lithologie

La nature des roches présentes sur le bassin versant est un paramètre essentiel pour expliquer la composition chimique des eaux naturelles par l'entremise des phénomènes d'érosion chimique (e.g. Meybeck, 1987 ; Probst, 1990 ; Sigg *et al.*, 1994 ; Appelo & Postma, 1993, Tardy, 1998). L'altération chimique (ou *weathering* des anglo-saxons), qui consiste en réactions de dissolutions des roches les plus abondantes, peut être une dissolution congruente si aucune phase secondaire solide ne se forme (par exemple pour la calcite ou le quartz) ou incongruente s'il y a formation de minéraux secondaires insolubles qui forment une phase résiduelle s'accumulant dans les sols (par exemple l'altération de l'albite peut conduire à la formation de kaolinite).

Comme la sensibilité à l'altération chimique est variable d'une roche à une autre (elle dépend de la solubilité des minéraux qui constituent la roche - Tableau 2, d'après Meybeck *et al.*, 1996b), les eaux drainant des terrains carbonatés et/ou des évaporites (qui vont se dissoudre rapidement) vont être significativement enrichies en éléments solubles, tandis que les eaux drainant des terrains silicatés (qui se dissolvent lentement) vont subir des changements moins importants. Cette influence de la lithologie sur la chimie des eaux et des taux de dénudation chimique a été clairement mise en évidence par Meybeck (1987). L'ordre d'altérabilité décroissant mis en évidence est : évaporites, calcaires, marnes, argiles, schistes, grès, granites.

Cet ordre est également celui de la résistance à l'érosion mécanique. Les phénomènes d'érosion mécanique peuvent donc aussi être influencés par la lithologie : les taux d'érosion les plus intenses sont, par exemple, caractérisés par des roches de type loess (e. g. fleuve Jaune, Zhang *et al.*, 1990) rencontrées dans les régions tropicales ou subtropicales ; tandis que les taux d'érosion mécanique les plus faibles se rencontrent sur les roches ignées et métamorphiques. Dedkov *et al.*, (1996) ont cependant montré que les faibles taux d'érosion observés sur ces derniers n'étaient pas seulement dus aux caractéristiques physiques et chimiques des roches et des sols, mais aussi au fait que ces surfaces sont moins intensément cultivées (par rapport à des terrains plus fertiles comme les loess).

L'aperçu sur les unités géologiques de la région d'étude a permis d'identifier les grandes classes lithologiques présentes sur le bassin versant : granites et gneiss, schistes, micashistes et quartzites, grès, roches vertes, dolérites, et alluvions (essentiellement composées de quartz, d'argile kaolinique, d'opale et d'oxyde ferrugineux).

	Minéraux (Stallard)		Roches (Meybeck)		
	nom	éléments libérés ⁽¹⁾	nom	Σ^+ ⁽²⁾	principaux éléments libérés ⁽¹⁾
Très soluble	Halite	Na ⁺ , Cl ⁻	évaporites	20	Na ⁺ , Cl ⁻ , Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻
	Gypse	Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻		000	
Soluble et /ou altérable	Pyrite	cations, SO ₄ ²⁻	schistes pyriteux	5 000	Na ⁺ , Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻
	Calcite	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻	calcaire, craie, marbre dolomie	4 000	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻
	Dolomite	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻	marnes calcaire, flysh	4 000 3 000	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻
Peu altérable	amphibole	Ca ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	serpentinite	1 500	Mg ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻
	olivine	Mg ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	amphibolite	1 500	Ca ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻
	anorthite	Ca ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	basalte	600	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻
	albite	Na ⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	rhyolite	400	Ca ²⁺ , Na ⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂
	orthose	K ⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	trachyandésite	400	Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂
	micas	Mg ²⁺ , K ⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	schistes micaschistes	500 400	Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂ Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂
Très peu altérable	montmorillonite	Na ⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	granites calcoalcalins, gneiss calcoalcalins	300	Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂
	kaolinite	Na ⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻	granites alcalins, gneiss alcalins	150	Na ⁺ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂
	quartz	SiO ₂	argiles pures	300	cations, SiO ₂ , HCO ₃ ⁻
			grès quartzeux	150	cations, SiO ₂ , HCO ₃ ⁻

(1) Les bicarbonates proviennent entièrement du CO₂ atmosphérique lors des réactions d'altération sauf pour l'altération de la calcite et de la dolomite où la moitié provient de la dissolution des minéraux.

(2) Somme des cations libérés en $\mu\text{eq.l}^{-1}$. Valeur moyenne mesurée sur des petits bassins monolithologiques non pollués français (Meybeck, 1987), sans influence majeure des aérosols océaniques.

Tableau 2. Ordre de solubilité des roches et des minéraux principaux (d'après Stallard, 1988 ; Meybeck, 1986, dans Meybeck *et al.*, 1996b)

Parmi ces roches, deux familles chimiques sont présentes, les roches acides (granites, grès, et quartzites) et les roches basiques (dolérites et roches vertes). Leur sensibilité vis à vis de l'érosion chimique, mais aussi mécanique, varie donc de l'une à l'autre. Le Tableau 2 montre que les roches présentes sur le bassin du Niger sont en majorité des roches peu à très peu altérables. Une différence dans les pourcentages de recouvrement des types de roches entre les deux bassins du Niger et du Bani pourra sans doute expliquer les différences de la chimie des eaux de ces affluents. Le bassin du Bani est par exemple caractérisé dans toute sa partie basse par des grès ; alors que cette formation géologique ne représente qu'une faible partie du bassin du Niger supérieur (entre Koulikoro et Ké-Macina) où ce sont les granites, très peu altérables, qui dominent (Tableau 3).

Bassin versant	Station	Classes lithologiques					
		Granite	Grès	Schistes	Roches vertes	Dolérites	Alluvions
Niger	Banankoro	53%	0%	33%	3%	6%	6%
Niger	Koulikoro	50%	4%	35%	2%	4%	6%
Niger	Ké-Macina	40%	9%	33%	1%	6%	12%
Bani	Douna	42%	38%	17%	0%	1%	2%

Tableau 3. Répartition des classes lithologiques par bassin versant (en %), delta intérieur du Niger non compris.

Aussi, comme la succession des mêmes formations s'observe au niveau du bassin versant du Bani et du Niger en amont de la cuvette lacustre, il n'y a donc pas à priori de différences significatives entre la nature du matériel détritique d'origine terrigène véhiculé par le Niger d'une part, et le Bani d'autre part (Censier, 1995).

1.2.3.2. Influence des sols

Les sols, leur nature et leur épaisseur, vont jouer un rôle direct sur l'érosion mécanique, qui est de loin la principale source de matériaux en suspension dans les rivières et un rôle "indirecte" sur l'érosion chimique (concept de l'érosion chimique limitée). Les réflexions sur ce dernier point sont notamment tirées de Viers (1998).

Dans le premier cas, les sols et les densités du couvert végétal qui leurs sont associées, vont influencer considérablement l'érosion mécanique. De nombreuses études de laboratoire ou à l'échelle de la parcelle et sous pluies simulées ont mis en évidence l'influence déterminante des organisations superficielles des sols sur le comportement vis-à-vis de l'eau (Riou, 1990 ; Casenave & Valentin, 1989). L'érodibilité des sols va dépendre de leur mode de formation (pédogenèse), mais surtout de leur texture, des matières organiques et de la stabilité de leur structure, ces deux dernières caractéristiques évoluant avec le mode d'exploitation (Roose *et al.* ; 1998). Riou (1990) a représenté l'indice de stabilité structurale (c'est un facteur essentiel du rapport ruissellement-infiltration et donc de l'érodibilité ou non d'un sol) de quelques groupes de sols de l'Afrique de l'Ouest : les propriétés physiques sont excellentes pour les sols ferrallitiques et les sols bruns eutrophes, et moyennes pour les sols ferrugineux tropicaux lessivés et réellement mauvaises quand apparaissent les caractères vertiques ou de salinisation. Ainsi, les sols rencontrés sur la partie nord des bassins du Niger et du Bani sont des sols plus sensibles à l'érosion mécanique. Le rôle de la végétation (notamment les arbres) sur la dynamique des sols est considérable (Roose, 1981 ; 1984) : les litières de feuilles et d'humus à la surface du sol jouent un rôle de barrière à l'impact des gouttes de pluie et l'abondance de matière organique favorise une meilleure agrégation des horizons supérieurs du sol en les rendant ainsi plus résistants. L'action humaine (défrichements, méthodes de labours) va influencer les propriétés physiques du sol et va donc jouer sur son érodibilité.

Dans le second cas, du point de vue de l'érosion chimique, les sols de l'Afrique de l'Ouest, qui résultent d'une "histoire" ancienne (il faut de 20 000 à 100 000 ans selon les auteurs pour que se réalise

la kaolinisation complète d'un mètre de granite), jouent un rôle important dans la régulation des interactions entre les agents d'érosion (eau, végétation) et le substratum rocheux. En effet, les sols très épais, induits par un régime d'érosion "transported-limited" (où la quantité de matériel généré par l'altération dépasse le seuil de matière qui peut être exportée par le système) peuvent isoler la roche mère des eaux de percolation et réduire l'altération chimique. C'est ce mode d'altération qui domine dans le bassin du Congo (Gaillardet *et al.*, 1995). Roose estimait déjà en 1981, que sur les sols ferrugineux tropicaux dans la zone des savanes soudano-sahéliennes à climat tropical sec du centre du Burkina-Faso, le drainage profond était réduit et le ruissellement important. L'influence de la roche mère sur la charge soluble des eaux superficielles est alors faible, les minéraux altérables étant profondément enfouis sous la couverture kaolinique. Un sol au contraire peu épais, induit par une érosion chimique limitée par l'altération (le régime "weathering-limited" correspond à une capacité d'exportation par le transport supérieur à ce que peut produire l'érosion chimique), permet aux eaux de percolation de réagir avec les minéraux frais de la roche mère.

Ces différents concepts seront utilisés et discutés par la suite dans la partie de cette thèse consacrée aux bilans de l'érosion actuelle sur les bassins versants du Niger et du Bani.

1.3. Cadre hydrogéologique

Les eaux souterraines du bassin situé en Guinée (où il n'existe d'ailleurs pas de réseau piézométrique national) n'ont pas fait l'objet d'une étude systématique. Les seules données d'évaluation dans ce domaine sont ponctuelles et obtenues essentiellement dans le cadre de projets d'alimentation en eau potable et ne seront pas discutées.

La description des différents aquifères du bassin supérieur du Niger est donc pour l'essentiel tirée de la synthèse sur l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest (Guiraud & Travi, 1990) et de la Synthèse Hydrogéologique du Mali (1990). Très schématiquement, le bassin compte 4 principaux systèmes aquifères correspondant aux deux grandes subdivisions géologiques. Selon le type de gisement des eaux souterraines, on peut distinguer :

- **Les aquifères de type fissuré**, qui sont semi-continus ou discontinus, représentés par les formations cristallines et sédimentaires du Précambrien et du Quaternaire,
- **Les aquifères de type généralisé** à porosité intergranulaire, rencontrés dans les formations peu ou non consolidées constituées de dépôts d'origine continentale.

Leur répartition est illustrée par la Figure 5. Les différents types d'aquifères rencontrés dans les limites du bassin supérieur du Niger et du Bani, et du delta intérieur, font partie de ces deux grands types d'aquifères :

- avec deux aquifères fissurés (tous deux surmontés par des **aquifères de recouvrement argilo-latéritiques**), qui sont :

- les aquifères du socle granitique et métamorphique,
- les aquifères de l'infracambrien tabulaire grés-schisteux,
- et deux aquifères de type généralisé, localisés dans la partie septentrionale du bassin du Niger (delta intérieur du Niger), celui du Continental terminal/Quaternaire, et celui, plus ancien et de moindre importance du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.

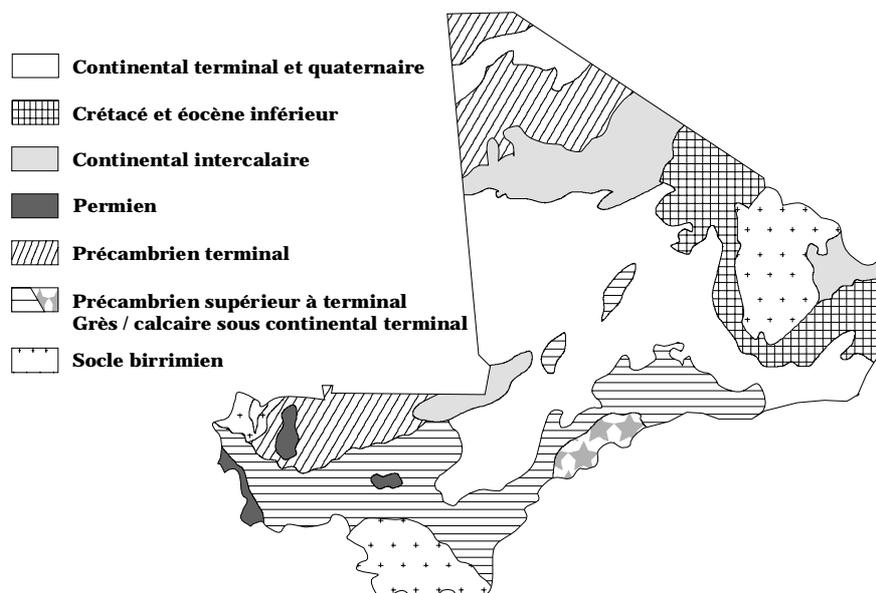


Figure 5. Répartition et types des aquifères rencontrés sur le bassin supérieur du Niger et dans le delta intérieur du Niger (d'après Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).

1.3.1. Les aquifères fissurés

Les aquifères discontinus à perméabilité de fissures sont présents un peu partout dans la zone d'étude (ils couvrent près de la moitié de la superficie du Mali), excepté dans le delta intérieur du Niger. Ils sont associés au socle granitique ainsi qu'aux formations sédimentaires anciennes. Leurs caractéristiques hydrauliques dépendent beaucoup de leur lithologie, de l'épaisseur et de la granulométrie des formations de recouvrement (Sidoro *et al.*, 1993) ; celles-ci étant en étroite relation avec les conditions géomorphologiques et pluviométriques.

- (1) Les aquifères fissurés du socle. Ces aquifères se situent notamment dans la région du sud du Mali (région de Sikasso) correspondant aux sources du Bani. Ils sont recouverts par une épaisse couverture d'altérite (20 à 50 m) en grande partie saturée d'eau avec un niveau piézométrique peu profond (40 m), même en fin de saison sèche. Cette région bénéficie de précipitations plus importantes, ce qui permet une recharge de l'aquifère malgré une percolation lente des eaux d'infiltration (Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990, Sidoro *et al.*, 1993).

- (2) Les aquifères fissurés de l'infra-cambrien tabulaire. Dans l'ensemble, les aquifères de l'infra-cambrien tabulaire sont les plus importants et les plus exploités avec plus de la moitié des forages au Mali. Ils sont localisés dans les plateaux gréseux occupant la partie méridionale de la zone climatique soudano-sahélienne. Ils sont constitués de formations gréso-schisteuses en disposition monoclinale, caractérisées par un développement important de perméabilité secondaire. A l'exception du plateau Dogon où les grès affleurent, les aquifères infra-cambriens sont recouverts, comme ceux du socle, en quasi totalité par un recouvrement latéritique argilo-sableux, qui permet une bonne perméabilité verticale.

1.3.2. Les aquifères généralisés à porosité intergranulaire

Les aquifères généralisés sont multicouches à porosité intergranulaire et généralement associés à des formations détritiques peu ou non consolidées et d'origine essentiellement continentale qui se sont accumulés dans les bassins sédimentaires au Secondaire et au Tertiaire.

- (1) Les aquifères du Crétacé supérieur/Eocène inférieur sont limités par les affleurements de l'infra-cambrien de la dorsale de l'Azaouad et du Gourma. Le fleuve Niger les recoupe sur toute sa longueur. Les liaisons entre la nappe et les eaux de surface sont limitées à la bordure nord du delta intérieur, entre Goundam et Tombouctou (Guerre *et al.*, 1989).
- (2) Les aquifères du Continental terminal/Quaternaire s'étendent entre Ségou et Mopti, sur la plaine alluviale située entre le fleuve Niger et le Bani et au sud du Bani jusqu'à la bordure des plateaux gréseux de San et de Bandiagara ; ainsi que dans l'ensemble du delta intérieur du Niger. Les dépôts continentaux souvent argileux, reposent directement sur des couches plissées du Précambrien, et ont des épaisseurs variant de 30 à 80 m, et jusqu'à une centaine de mètres au coeur de la dépression. Les formations quaternaires d'origine alluviale, lacustre ou éolienne ne sont aquifères et en liaison hydraulique avec la nappe principale que dans les zones inondables. Les formations du Continental terminal sont représentées par des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables fins grossiers, souvent en disposition particulière et localement grésifiés.

Des coupes schématiques (Figure 6) des aquifères (Guiraud & Travi, 1990) montrent, entre autre, les fluctuations approximatives des niveaux piézométriques entre la saison des pluies et la saison sèche. Il est très intéressant de remarquer que le type de nappe que l'on rencontre dans la région du Haut-Niger (nappes du socle) présente un horizon superficiel d'altérite épaisse perméable. Celui-ci favorise un écoulement latéral de type ruissellement différé qui est évacué par le réseau de surface (Guerre & Aranyossy, 1990).

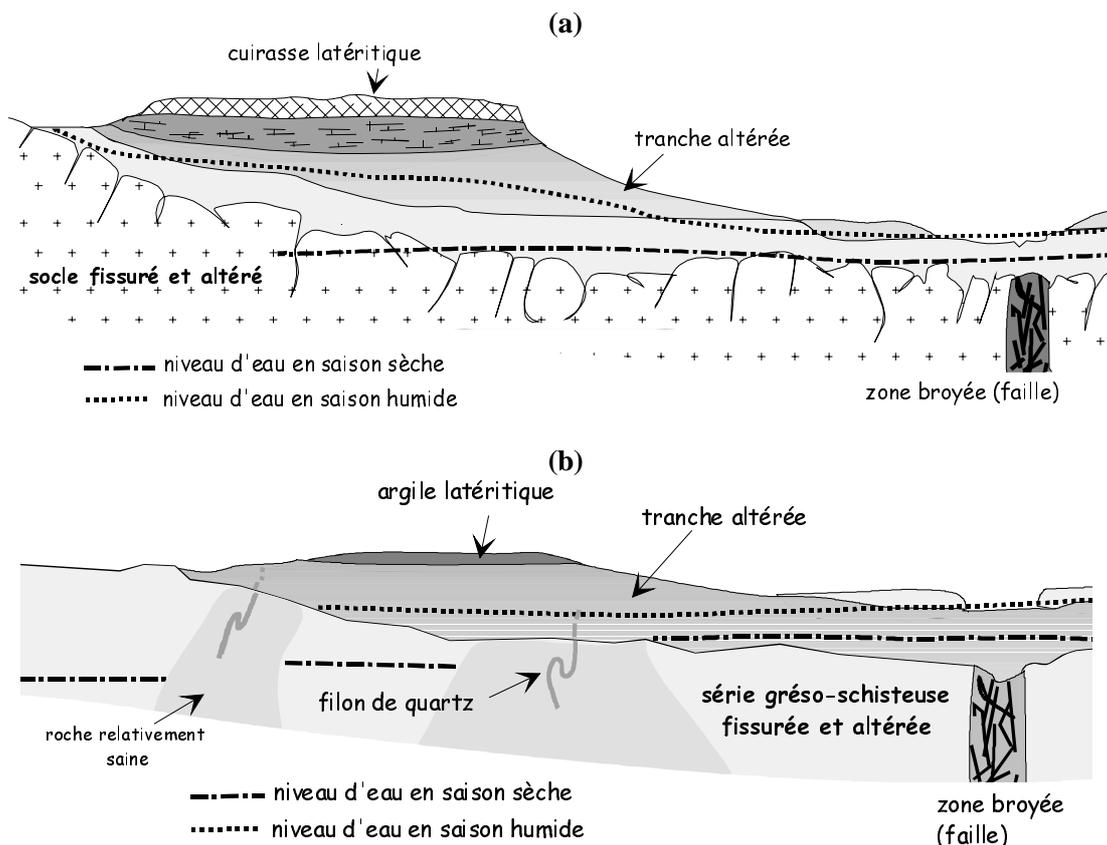


Figure 6. Croquis hydrogéologiques des aquifères des formations granitique (a) et de la tranche d'altération superficielle en région schisteuses (b) (d'après L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest, 1990 ; et modifié).

1.3.3. Faciès chimiques des eaux souterraines

L'étude du faciès hydrochimique des eaux souterraines rencontrées sur le bassin du Niger sera abordée rapidement. Celle-ci est limitée à la région malienne du bassin versant et se base essentiellement sur plusieurs documents (CIEH, 1976 ; Travi *et al.*, 1986 ; Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990). Les analyses chimiques, réalisées sur des forages ou dans des puits, sont nombreuses mais inégalement réparties : certaines provinces hydrogéologiques très peuplées (aquifères fissurés du socle ou de l'infrcambrien), sont les plus étudiées tandis que d'autres n'ont fait l'objet que de prospections fragmentaires.

La minéralisation des eaux souterraines, liée à la nature de la lithologie du réservoir, est en général bicarbonatée calcique ou mixte (calcique, magnésienne, sodique). Ces faciès peuvent évoluer sous l'effet de l'évaporation. La prédominance de l'ion bicarbonate est fréquente ; elle correspond à l'action prépondérante de l'altération de silicates lors de l'acquisition de la charge saline des eaux dans la zone d'aération.

Les caractéristiques hydrochimiques moyennes de différents aquifères rencontrés au Mali sont présentés dans le Tableau 4.

Aquifère	Unité hydro géologique	Nb d'analyse	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	C (μS.cm ⁻¹)
Socle	Sankarani	118	19	13	5.5	2.3	0.3	3.6	9	131	2.9	7.3	226
	Baoulé	240	18	12	3.9	4.1	0.7	3.3	3.6	123	1.8	6.9	219
	Bagoé	188	23	14	3.8	1.4	1	6.7	4.9	151	0.2	7.1	263
Infracambrien Tabulaire	Plaeau Dogon	7	37	15	1.6	-	0.6	11	27	195	0.1	7.3	420
	San-Kourtiala	127	7.7	5.6	0.9	1	0.4	3.9	4.1	36	0.3	6.3	96
	Bani-moyen	278	24	18	2.4	2.3	1	3.2	5.9	125	3	6.7	240
Continental Terminal /Quaternaire	delta intérieur (secteur sud)	27	13	14	5.6*			35	17	117*	-	219	

* Na⁺ + K⁺

* HCO₃⁻+NO₃⁻

Tableau 4. Exemple de caractéristiques hydrochimiques moyennes de différents aquifères rencontrés au Mali (d'après Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990)

- (1) Les eaux du socle, au sud du Mali (hauteurs du bassin du Bani et du Sankarani), sont caractérisées par des conductivités faibles (< 350 μS.cm⁻¹) et sont généralement acides. Elles présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien et des teneurs en sulfates et en chlorures inférieures à 20 mg.l⁻¹. La présence de sulfures décelés dans quelques aquifères schisteux est probablement liée à l'abondance de la pyrite. Dans les zones où les pluies dépassent 1200 mm.an⁻¹ (climat soudanien), les aquifères fissurés sont surmontés d'une épaisse couche d'altérites saturées d'eau et ne sont donc pratiquement pas soumis à l'évaporation. La recharge saisonnière importante et la nature semi-continue de l'horizon aquifère profond permettent une circulation des eaux souterraines drainées par le réseau hydrographique qui explique la faible minéralisation de ces aquifères.
- (2) Dans les aquifères gréseux de l'infracambrien tabulaire, les conductivités sont en général inférieures à 300 μS.cm⁻¹. Dans certains secteurs où les grès sont dominants et les zones fissurées peu profondes (Unité de San-Kourtiala), la conductivité est inférieure à 100 μS.cm⁻¹; en présence d'intercalations schisteuses, elle peut atteindre 1000 μS.cm⁻¹. Les eaux ont un faciès bicarbonaté calcique et magnésien ou sodique avec des teneurs en chlore très faibles.
- (3) Les eaux de la nappe phréatique du delta intérieur du Niger (continental terminal et quaternaire) sont douces. Les conductivités sont inférieures à 500 μS.cm⁻¹ et les eaux ont un caractère

bicarbonaté calcique et sodique. En général ces eaux sont plus minéralisées que celles du fleuve Niger. En effet, la combinaison d'une évaporation importante de la nappe, dont la surface piézométrique est peu profonde, ainsi que la diminution de la recharge par les eaux de surface au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fleuve, pourraient expliquer cette forte minéralisation (Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).

L'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies introduit des variations dans ces caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines. Par exemple, le phénomène de dilution, remarquable en fin de saison des pluies, est provoqué par les apports d'eau météoriques.

1.4. Cadre Climatique

Le climat exerce une influence prépondérante sur les différents aspects du milieu naturel du bassin du Niger, qu'il s'agisse du régime hydrologique ou des phénomènes d'érosion à la surface du continent.

L'étude des caractéristiques climatiques rencontrées sur le bassin du Niger est principalement inspirée des travaux de Leroux (1996), pour la circulation générale et des travaux de Brunet-Moret *et al.* (1986), des annuaires de la Météorologie nationale du Mali et Olivry *et al.* (1995a), pour la partie plus spécifique du bassin du Niger.

1.4.1. Rappel sur la circulation atmosphérique générale de l'Ouest

Le climat en Afrique intertropicale dépend des relations entre deux grands anticyclones subtropicaux plus ou moins permanents : l'anticyclone du Sahara, qui donne naissance à un vent sec et chaud de secteur est, "l'harmattan", et l'anticyclone de Sainte Hélène, responsable de la "mousson" qui est un vent maritime tiède et très humide de direction sud-ouest. Le contact dynamique de ces deux masses d'air chaud et sec provenant du nord (harmattan) et humide provenant du sud (mousson) est la zone de convergence intertropicale (ZCI ou ITCZ chez les anglo-saxons). Sa trace au sol est appelé le Front Intertropical (FIT)². La surface de contact entre les deux masses d'air peut être assimilée à un plan incliné s'élevant en pente douce vers le sud. Le FIT suit une direction générale sud-nord-sud au cours de l'année en accompagnant, avec un décalage de quelques semaines, les oscillations apparentes du soleil de part et d'autre de l'équateur. En altitude, la circulation est caractérisée en période humide par des noyaux de vents forts : Jets d'Est Africain (JEA) dans les couches moyennes, et Jet d'Est Tropical (JET) dans les couches supérieures.

² Cette terminologie (FIT, ZIC) est en fait inadaptée pour décrire la circulation générale, mais elle est consacrée par l'usage. Il est aujourd'hui plus judicieux de privilégier la notion d'Equateur météorologique (EM) (Leroux, 1996).

Le déplacement du FIT selon le mouvement saisonnier délimite la position de la ligne de convergence des vents. En janvier, le FIT occupe sa position la plus méridionale : il passe au nord de Conakry à Bouaké au tiers de la Côte d'Ivoire. A partir de février-mars, il remonte lentement vers le nord et occupe fin août sa position la plus septentrionale qui correspond sensiblement au 20^{ème} parallèle. Il apporte alors l'humidité océanique et les pluies sur le continent : c'est la saison des pluies ou hivernage. Au début de septembre, il redescend vers le sud pour rejoindre la position de janvier, en poussant la sécheresse de l'Harmattan sur une grande partie de l'Afrique de l'Ouest : c'est la grande saison sèche.

Lorsque le FIT se déplace vers le nord, il se comporte comme un front froid (l'air équatorial et humide se trouve au dessous de l'air tropical chaud et sec). La confluence de ces masses d'air s'accompagne, en avant du front, de courants ascendants qui provoquent la formations de nuages verticaux et des pluies à caractère orageux et souvent abondantes . Les averses violentes le long de ces perturbations sont appelés "lignes de grain". Elles sont responsables, dans une grande proportion, des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest. En arrière, s'installe un régime de précipitations plus stable et continu. Au sud du front, l'influence de l'anticyclone de Sainte Hélène se fait sentir et il n'y a plus de précipitations.

La Figure 7 reprend le schéma général classique des masses d'air en Afrique de l'Ouest. (Leroux, 1996). Ce schéma général met en évidence l'importance capitale pour l'Afrique de l'Ouest de la latitude atteinte vers le nord par le FIT qui détermine, non seulement le début, la durée et la fin de la saison des pluies, mais aussi la hauteur des précipitations et la nature même des précipitations, avec pour corollaire la détermination des grands ensembles climatiques latitudinaux.

Figure 7. Schéma général des masses d'air en Afrique de l'Ouest (Leroux, 1996).

1.4.2. Les zones climatiques traversées par le Niger

Le Tableau 5 présente les correspondances entre les deux types de classification simple, familières aux hydrologues, pour décrire le climat en l'Afrique de l'Ouest et Centrale. La classification utilisée est celle de Rodier reprise et mise à jour par l'Hôte *et al.* (1996). Elle a été préférée à celle décrite par Maley (1982), car elle sera par la suite employée pour décrire le régime hydrologique du Niger et du Bani.

Précipitation annuelle (mm)	Classification climatologique de l'Afrique Occidentale	Classification climatologique
> 1200	Soudanien II et III	Tropical de transition
750 - 1200	Soudanien I	Tropical pur
300-750	Sahélien sud	Sahélien (Tropical semi-aride)
150 - 300	Sahélien nord	Subdésertique (semi-aride)
<100-150 mm	Saharien	désertique (aride)

Tableau 5. La succession des types de climat du sud au nord (d'après Maley, 1982 ; l'Hôte & Mahé, 1996; et modifié).

La durée et l'abondance plus ou moins grandes des précipitations et l'extension des différentes zones climatiques intéressant le bassin du Niger supérieur et du delta intérieur du Niger, permettent de distinguer (Figure 8) :

- (1) Le climat tropical de transition qui concerne les têtes de bassin du Niger et de ses affluents jusqu'à environ une ligne Siguiri-Bougouni-Sikasso. Les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 1000 mm. La saison des pluies dure au moins 6 mois (de mars-avril à octobre-novembre). Il y a une seule saison sèche.
- (2) Le climat tropical pur situé au nord de la région de Ségou. La hauteur de pluie annuelle moyenne est comprise entre 1000 et 700 mm qui se répartissent sur une seule saison des pluies de 6 mois au plus. 5-6 mois reçoivent plus de 50 mm en moyenne.
- (3) Le climat tropical semi-aride correspond au domaine sahélien, avec des précipitations comprises entre 400 et 700 mm et réparties sur 3 à 4 mois, qui intéresse les régions de Mopti et la partie sud de la cuvette lacustre.
- (4) Le climat semi-aride (ou subdésertique), recevant autour de 250 mm de précipitations (100 - 400 mm) réparties sur les 3 mois d'été, qui intéresse la majeure partie du delta intérieur du Niger. 1 à 2 mois reçoivent plus de 50 mm en moyenne.

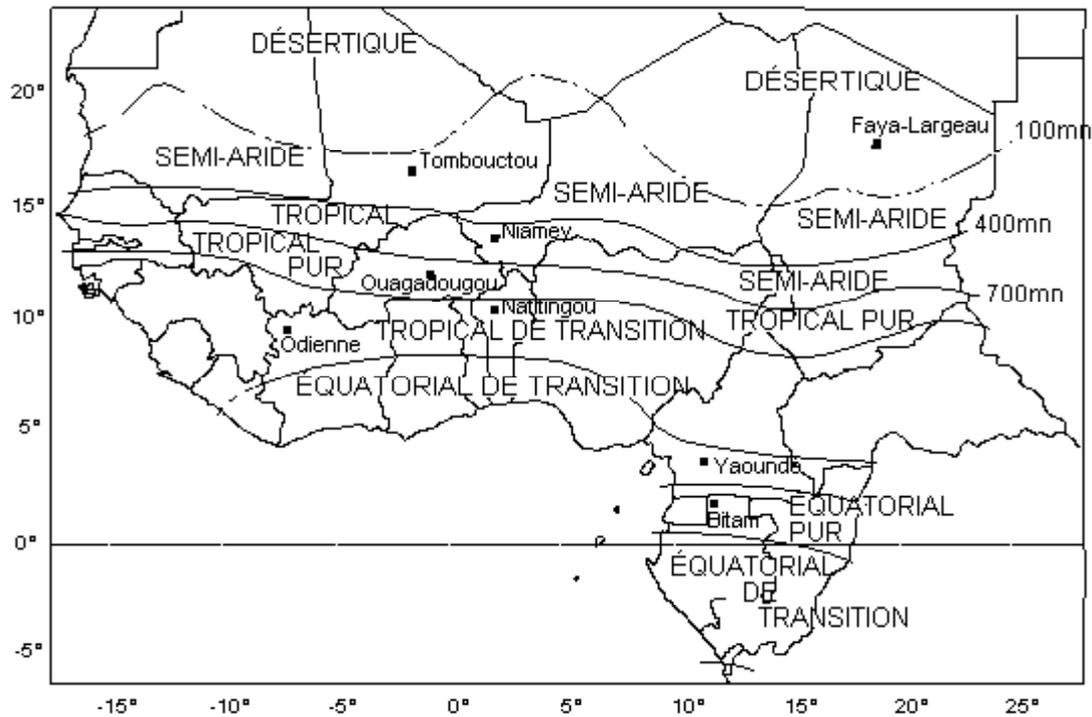


Figure 8. Répartition géographique des différents types de climat (d'après l'Hôte *et al.*, 1996)

1.4.3. Analyses de quelques facteurs climatiques sur le Bassin du Niger

Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger sont reprises dans le Tableau 6 (d'après Olivry *et al.*, 1995a).

Paramètres	Guinée			Mali			
	Macenta	Kankan	Siguiiri	Bamako	Ségou	Mopti	Tombouctou
T° moy. ann.	24,0	26,0	26,9	28,5	28,6	27,7	29,1
T° x mois (x)*	(3)34,6	(3)36,2	(3)38,0	(4)39,4	(4)41,2	(5)40,0	(5)43,2
T°n mois (n)*	(12)14,0	(12)14,2	(1)13,8	(1)17,6	(1)15,4	(1)14,0	(1)13,0
Üx ann% **	96	90	85	73	74	75	54
Ûn ann% **	58	45	39	33	32	31	21
1/2 (Üx+Ûn) % mars	69	51	40	26	31	30	21 (avril)
1/2 (Üx+Ûn) % août	85	82	81	79	80	78	68
P (Précipitations interannuelles) mm	2100	1508	1250	985	650	415	180
Nbre de mois secs ***	1 à 2	4 à 5	6	7	8	8 à 9	10

* Entre parenthèses, le numéro du mois de température maximum (x) et minimum (n)

** Üx et Ûn sont respectivement les humidités relatives moyennes annuelles maximale et minimale ; $(\bar{U}_x + \bar{U}_n)/2$ correspond aux humidités relatives moyennes du mois le plus sec (mars) et du mois le plus humide (août).

*** Suivant la définition de Gausson, un mois est dit sec lorsque $P_{mm} < 2T^\circ C$.

Tableau 6. Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger (d'après Olivry *et al.*, 1995).

1.4.3.1. Les précipitations.

Pour toutes les régions climatiques, la saison des pluies est centrée sur le mois d'août et s'étale sur une plus ou moins grande durée suivant la zone climatique. La pluviométrie moyenne sur la zone d'étude sur la période 1951-1989 a été évaluée par Bamba *et al.* (1996a et b) à partir de la banque de données de l'ORSTOM constituée par Mahé (1993) (Figure 9). Durant cette période, la variabilité des quantités de pluies tombée d'une décennie à l'autre sont variables. De nombreuses études ont en effet montré que depuis les années 1970 un déficit pluviométrique frappait toute l'Afrique de l'Ouest et Centrale (e.g., Olivry, 1987 ; Mahé & Olivry, 1991 ; Olivry *et al.*, 1993 ; L'Hôte & Mahé, 1996, Leroux, 1996 ; Servat *et al.*, 1998 ;...). La sécheresse s'est traduite non seulement par la diminution des précipitations et un glissement des isohyètes vers le sud mais aussi par une chute du nombre d'événement pluvieux (Carbonnel & Hubert 1992 ; Lebarbé & Tapsoba, 1996).

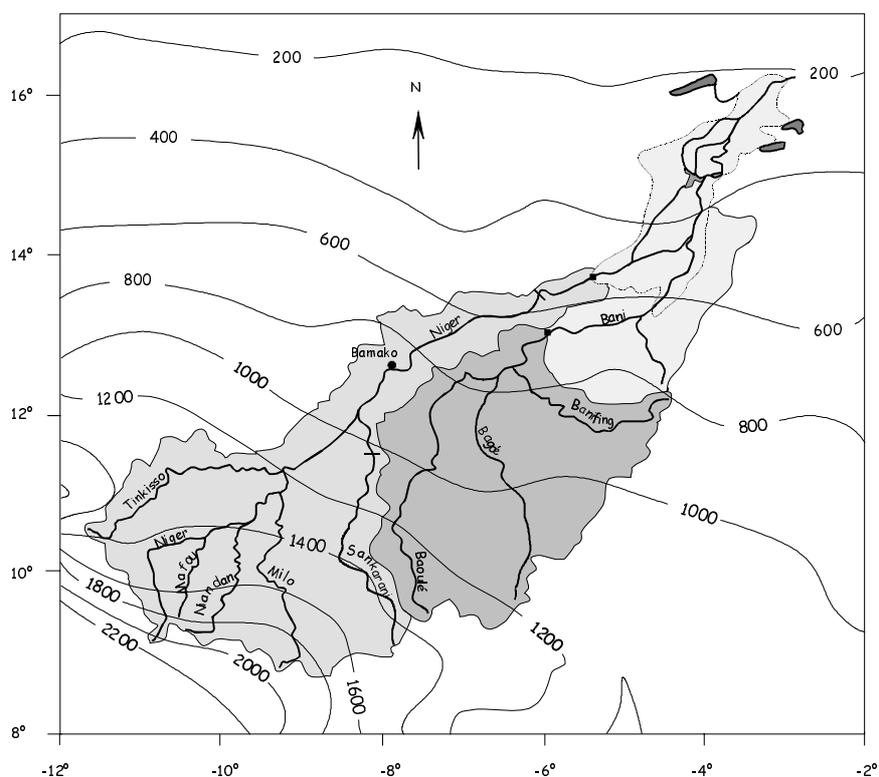


Figure 9. Pluviométrie moyenne interannuelle de la zone d'étude sur la période 1971-1989.

L'essentiel des pluies de la zone soudano-sahélienne résultant des lignes de grains, les caractéristiques de ces vastes systèmes convectifs, peuvent entraîner des variations considérables de la pluviométrie entre deux postes pluviométriques même très proches (Au Burkina-Faso, Le Barbé & Tapsoba 1996, et au Niger, expérience EPSAT-Niger, notamment, Lebel *et al.*, 1996 ; Taupin *et al.*, 1998). Dans ces études, le caractère erratique des précipitations persiste dans les champs des cumuls saisonniers. En revanche, le cumul sur plusieurs années fait apparaître un gradient nord-sud, traduction du gradient latitudinal observé dans toute la bande sahéenne. Cette hétérogénéité spatiale est cependant très atténuée à l'échelle d'un bassin comme le Niger.

1.4.3.2. Le régime des vents

Les considérations sur la circulation générale de l'Afrique de l'Ouest, apportent l'élément de réponse principal sur le régime des vents : pendant la saison sèche domine l'Harmattan, vent de l'est et du nord-est ; tandis que pendant la saison humide, c'est la mousson venant du sud-ouest ou du sud qui souffle. En général les vents sont plus forts dans la zone soudano-sahélienne que dans la zone soudanaise. Il faut ajouter à ces vents réguliers, qui soufflent pendant plusieurs heures, les coups de vents très brefs qui précèdent les tornades et qui ont des vitesses très élevées et des effets souvent dévastateurs (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

1.4.3.3. Les températures

Sur l'ensemble du bassin, les températures les plus élevées sont enregistrées en avril et mai, tandis que les minimales sont observées dans la période de décembre à janvier. Les fortes températures de la saison sèche conduisent à une évaporation intense. Les températures assez élevées d'octobre et novembre sont également de nature à accélérer le tarissement dans la moitié nord du bassin versant (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

1.4.3.4. L'humidité relative

L'humidité relative (rapport entre la tension de vapeur d'eau dans l'atmosphère et la tension de vapeur saturante à même température) est, contrairement aux températures, plus faible au nord, qu'au sud du bassin : elle est en moyenne de 40 % dans la région de Ségou-Markala-Mopti, et se situe autour de 60 % au sud du bassin.

1.4.3.5. L'évaporation et l'évapotranspiration

Afin de lever toute ambiguïté pour la suite, il est nécessaire de préciser ce qu'on entend par ces notions. Les définitions sont tirées de l'ouvrage de Burman & Pochop (1994) qui compile l'ensemble des connaissances sur ce sujet. Nous distinguons donc 3 phénomènes :

- L'évaporation est le processus par lequel un liquide (l'eau) est transformée entièrement en gaz (la vapeur d'eau).
- La transpiration est le processus où l'eau liquide dans les plantes est transformée en vapeur d'eau dans l'air environnant la plante.
- L'évapotranspiration est la combinaison des phénomènes d'évaporation à la surface des sols et des plantes d'une part, et de la transpiration à travers les plantes d'autre part.

En général les valeurs de l'ETP sont assez fortes au sud mais encore plus élevées dans le nord du bassin notamment pendant la période mars-mai. Cette caractéristique résulte de l'effet conjugué des températures souvent élevées, des humidités relatives faibles et surtout de l'effet desséchant de l'Harmattan. On verra que ce phénomène va être d'une importance capitale dans un système tel que celui du delta intérieur du Niger.

1.4.4. Influence des facteurs climatiques sur les phénomènes d'érosion et la composition des eaux

1.4.4.1. Les pluies, source d'éléments chimiques

Comme les pluies constituent l'entrée des eaux dans le système du bassin versant, et qu'il est maintenant reconnu que ces eaux ne sont pas "chimiquement pures", il est généralement nécessaire de les caractériser dans les études sur le chimisme des rivières. La composition des eaux de pluies qui tombent sur le bassin versant est influencée par les diverses sources des constituants atmosphériques (particules et gaz). Une revue bibliographique sur les connaissances actuelles sur les aérosols et les gaz atmosphériques (sources et formation) est présentée par Freyrier (1997). Le chapitre V de ce mémoire est entièrement consacré aux apports atmosphériques humides.

1.4.4.2. Erosion chimique et mécanique/phénomènes de dissolution et de précipitation

L'érosion chimique et les types de produits qu'elle va induire (pour l'érosion silicatée), sont essentiellement influencés par la quantité de précipitations qui tombe sur le sol et l'intensité de drainage (c'est-à-dire à la quantité d'eau qui percole au travers du profil d'altération). Dans les climats secs, la montmorillonite est préférentiellement formée, tandis que dans les zones de précipitations intenses où le sol est bien drainé c'est la gibbsite qui se forme (Appelo & Postma, 1993). A l'échelle des bassins versants, si les effets de la lithologie sont éliminés, l'érosion chimique, dans un bassin considéré, sera d'autant plus importante que la lame écoulée sera élevée (Bluth & Kump, 1994).

Après la pluviosité, la température est le facteur climatique qui va jouer sur la vitesse de dissolution des minéraux constituant les roches silicatées. Cette dernière augmente avec la température (Rimstidt et Barnes, 1980 ; Lasaga, 1984 ; Tester *et al.*, 1994 ; cités dans Viers, 1998). Cependant, à l'échelle des grands cours d'eau, Gaillardet *et al.* (1998) montrent qu'il est difficile d'isoler l'effet de la température sur l'altération. L'évapotranspiration peut par exemple, masquer l'effet réel de la température en concentrant les solutions du sol.

Ce dernier phénomène (évaporation et/ou transpiration des végétaux) est un des facteurs qui va influencer de manière notable la composition des eaux en augmentant les concentrations. Suivant la composition des eaux de départ et l'intensité de l'évaporation, il peut y avoir une précipitation de sels ; la séquence des minéraux précipités est très variable mais commence généralement par CaCO₃ (Hardie & Eugster, 1970, cités dans la plupart des ouvrages qui suivent ; Al-Droubi, 1976 ; Vallés *et al.*, 1989 ; Tanji, 1990 ; Risacher, 1992 ; Appelo & Postma, 1993). La Figure 10 reprend le diagramme théorique de Hardie & Eugster (1970) pour les eaux soumises à l'évaporation : suivant la valeur de l'alcalinité résiduelle³ la solution évoluera vers la voie alcaline ou neutre.

³ L'évolution des eaux par évaporation dépendant des proportions relatives entre le calcium et les espèces carbonatées initiales, la notion d'alcalinité résiduelle (comparaison de l'alcalinité à 2Ca²⁺) est souvent utilisée dans un but qualitatif pour comprendre l'évolution du faciès chimique des solutions naturelles soumises à évaporation et permet de prévoir de façon rigoureuse l'évolution de la solution.

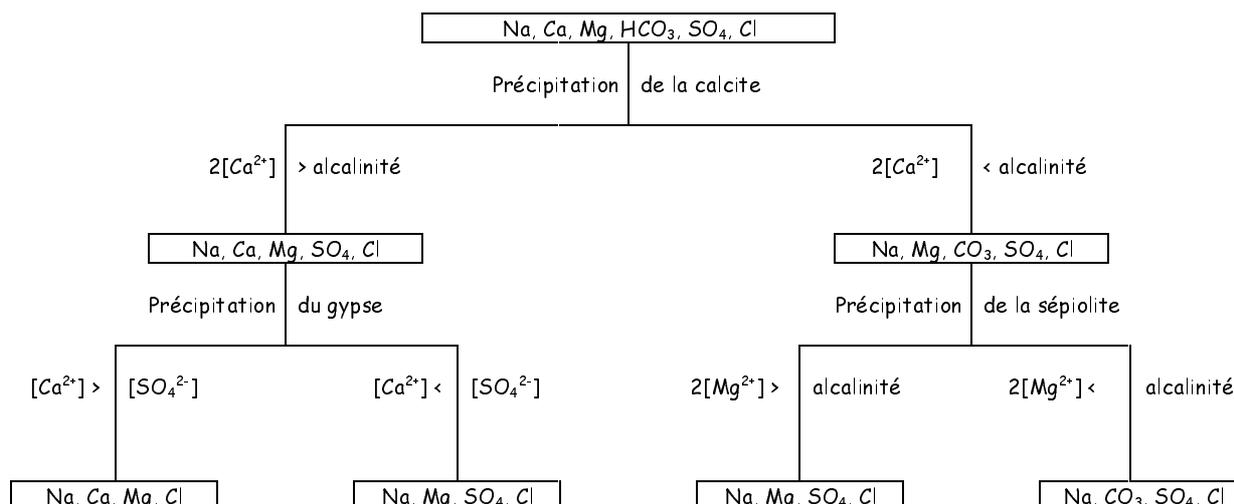


Figure 10. Diagramme théorique des eaux soumises à l'évaporation (d'après Hardie & Eugster 1970, cité par Tanji, 1990).

Ce sont ces phénomènes dans les eaux de surface, de milieux confinés, qui ont conduit à la formation de bassin à évaporites tels que les salars de l'altiplano bolivien étudiés par Risacher (1992). La précipitation de minéraux sous l'effet de l'évaporation et l'évapotranspiration peut notamment conduire à des problèmes de salinisation des sols et des eaux souterraines. Ceux-ci sont effectivement observés dans les zones arides mais où il y a aussi une intensification de l'agriculture et de l'irrigation (e.g. Tanji, 1990 ; Marlet *et al.*, 1996 ; Condom *et al.*, 1998). Etant donnée la forte évapotranspiration sur le delta intérieur du Niger, qui agit non seulement sur l'eau de surface mais aussi sur l'eau du sols, il pourra se produire des précipitations de minéraux et la formation de minéraux dans les sédiments.

Un des principaux facteurs d'ordre climatique qui règle l'importance de l'érosion mécanique à l'échelle de la parcelle ou des versants est l'érosivité des pluies (ampleur, force et distribution des pluies). Elle est liée au travail de la pluie sur le sol, qui comprend, l'impact des gouttes de pluie sur le sol et l'énergie cinétique à leur arrivée sur le sol, (c'est l'effet *splash*). Une étude sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale a montré que les pluies tropicales peuvent être en moyennes 20 à 100 fois plus agressives que celles des régions tempérées (Roose, 1977). Le ruissellement de surface (qui dépend de nombreux facteurs dont l'ampleur des précipitations..) est le vecteur essentiel de l'érosion mécanique aussi bien à l'échelle expérimentale de la parcelle ou des versants, qu'à l'échelle des grands bassins fluviaux. La relation positive, plus ou moins bien définie, qui existe entre l'érosion spécifique et les précipitations annuelles (et/ou le débit spécifique) est généralement observée dans la littérature (e.g. Milliman & Syvitski, 1992 ; Summerfield & Hulton, 1994 ; Walling & Webb, 1996 ; Ludwig & Probst, 1996 ; Dedkov *et al.*, 1996). Cependant, davantage de travaux sont nécessaires pour clarifier l'importance relative du relief par rapport aux facteurs climatiques, dans leurs influences à l'échelle globale sur les taux d'érosion mécanique (Walling & Webb, 1996).

1.4.4.3. Erosion éolienne et transport des poussières atmosphériques

Les transport solides par le vent font également partie des processus liés à l'érosion. En région aride, le vent peut jouer un rôle d'arrachement, de transport ou de dépôt, tous ces phénomènes étant

associés à un tri granulométrique des particules. C'est ainsi qu'à l'échelle de l'Afrique, le Sahara, et ses bordures, est connu comme étant le plus grand pourvoyeur de poussières du globe dont l'agent de transport vers le sud est l'Harmattan (e.g. Maley, 1982 ; Coudé-Gausson & Rognon, 1983 ; Clark *et al.*, 1997 ; Guerzoni & Molinaroli, 1998), et la zone de l'Afrique subsaharienne comme une région de dépôts (e.g. Drees *et al.*, 1993 ; Nickling *et al.*, 1993 ; Bleich *et al.*, 1994 ; Stahr *et al.*, 1994 ; Orange *et al.*, 1993 ; Rajot, 1998 ; Orange *et al.*, 1998). La Figure 11 présente de manière schématique la circulation des apports atmosphériques transportées par l'Harmattan.

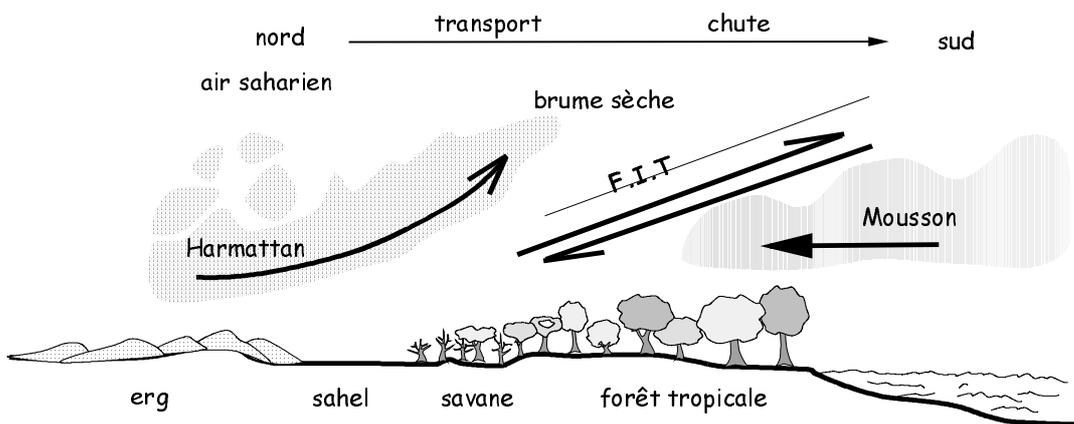


Figure 11. Schéma de la circulation des poussières sahariennes.

La remobilisation de poussières locales a également été observée de mai à juillet dans la zone soudano-sahélienne (Herrmann, *et al.*, 1997 ; Rajot, 1998 ; Orange *et al.*, 1998). Elle s'explique par l'installation de la mousson et de forts vents turbulents accompagnant le passage des lignes de grains alors que les sols ne sont pas encore protégés par la végétation. Le vent peut aussi jouer un rôle à l'échelle de la parcelle. Une étude au Niger (Rajot, 1998), a établi que les pertes en terres par érosion éolienne (phénomène de reptation notamment) pouvaient être considérables en juin. Cependant la masse de sédiments ainsi mobilisée ne l'est que sur de faibles distances. La Figure 12 présente les différents mouvements des particules possibles sous l'effet du vent : comme pour le ruissellement c'est la vitesse du vent qui va déterminer, pour une taille de particule donnée, l'arrachement, le transport ou le dépôt.

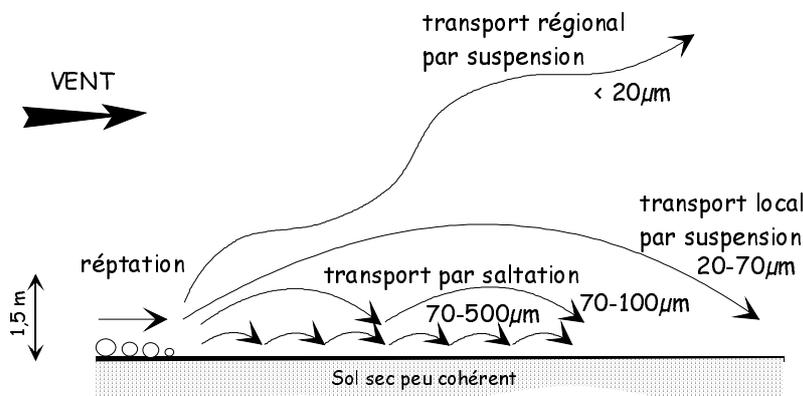


Figure 12. Modes de transport des particules sous l'effet du vent (D'après Casenave & Valentin, 1989 et Stahr *et al.*, 1994 et modifié).

L'influence de ces poussières sur la chimie des pluies et par la suite sur la chimie des rivières est donc susceptible d'être importante dans la zone étudiée. Cet aspect sera développé par la suite.

1.5. La végétation

D'un point de vue régional, le climat est le premier facteur mis en cause dans la répartition des grands ensembles de végétation en Afrique de l'Ouest. C'est pourquoi ce critère est généralement utilisé pour la classification de la végétation. La connaissance du cycle saisonnier de la végétation est un élément important par le rôle de protection du sol que peuvent jouer certains couverts végétaux (sur le bassin amont par exemple), ou le rôle de filtre et de rétention de matière que peuvent jouer les végétaux aquatiques dans le delta intérieur du Niger. Ces deux thèmes seront abordés.

1.5.1. Variabilité spatiale de la végétation

Le bassin versant du Niger et le delta intérieur du Niger seront traités séparément étant donnée les conditions morpho-hydrologiques du delta vif, qui confèrent à cette zone une position particulière, hors de la classification bioclimatique habituelle.

1.5.1.1. Les formations végétales rencontrées sur le bassin du Niger

Les enseignements de la classification proposée dans le cadre du Programme d'Inventaire des Ressources Ligneuses du Mali (PIRL, 1988) seront notamment utilisés pour décrire les espaces naturels au Mali. La couverture végétale dans le bassin supérieur du fleuve Niger offre une densité décroissante du sud vers le nord qui se superpose aux zones climatiques, avec le passage progressif de la savane boisée à la steppe arbustive en passant par tous les types de savanes.

Les forêts claires se retrouvent sous le climat soudanien au sud. Les savanes arborées, arbustives, herbeuses, occupent la partie soudanienne du bassin versant du Niger au sud du delta.

- (1) Les forêts "fermées" (recouvrement du sol supérieur à 80%) telles les galeries forestières à caractère guinéen ou soudanien et sur sols hydromorphes ou non, bordent de manière sporadique les marigots et se rencontrent en bandes de faible largeur le long de différents cours d'eau de la région du bassin du Niger supérieur. Ces formations se caractérisent par de grands arbres souvent dotés de contreforts à la base (hauteur dominante supérieure à 17 m). Les forêts denses sèches ne se trouvent plus qu'à l'état relictuel.
- (2) Les forêts claires (formations ouvertes = recouvrement du sol inférieur à 80%) qui sont des formations mixtes (ligneuses/herbeuses) sont sans doute des formations dérivées de forêts denses sèches par l'action du feu. La strate arborée dominante a une hauteur moyenne de 12 à 17 m et un couvert compris entre 40 et 60%. La strate arbustive (<8m) est plus ou moins développée. Le rapport « biomasse ligneuse / biomasse herbacée » est supérieur à 2 ce qui les

rattache aux formations à dominante ligneuse. La couverture de graminées existe toujours même si parfois elle est réduite. Ce sont les formations rencontrées dans la région naturelle de la Haute Guinée et au sud du Mali (sous le climat soudanien). Mais ces espaces ont été très dégradés en raison de l'accroissement des besoins en bois de feu et/ou bois d'œuvre des populations. Ils sont également victimes des défrichements et des feux de brousse. Ainsi ce sont plutôt les savanes (arborées, arbustives et herbeuses) qui dominent dans cette région du bassin du Niger (cf. ci-dessous).

- (3) Les différents type de savanes (boisées, arborées, arbustives et herbeuses) sont des formations herbeuses ou mixtes herbeuses/ligneuses où le rapport « biomasse ligneuse / biomasse herbacée » est inférieur à deux. La strate herbeuse peut être dominée par une strate ligneuse (composée de buissons, d'arbustes ou d'arbres) qui sont en général de petite taille ou de taille moyenne, et qui du fait de cette taille limitée n'influencent pas la strate herbeuse dans son ensemble. Suivant l'importance de la strate ligneuse, il est commun de distinguer plusieurs types de savanes : les savanes herbeuses (exemptes de ligneux) sont composées essentiellement d'Andropogonées ; les savanes buissonneuses ont des buissons de taille inférieure à 5 m ; pour les savanes arbustives les ligneux peuvent atteindre 8 m de hauteur ; et enfin, les savanes boisées ou arborées possèdent une strate ligneuse composée d'arbres et d'arbustes, avec des arbres dominants qui peuvent atteindre 12 m de hauteur. Il existe également des savanes parcs ou savanes vergers d'origine anthropique qui correspondent aux formations savaniques découlant des champs cultivés où l'on retrouve ainsi toutes les espèces utiles conservées et domestiquées dans le parc cultivé par les paysans.

Les savanes arborées, arbustives, herbeuses, occupent la partie soudanienne du bassin versant du Niger au sud du delta (au dessus d'une ligne Ségou-San). Plus au nord, le bassin versant du Yamé drainant le plateau Dogon est recouvert par une savane très lâche ou bien la roche affleure. Il existe aussi des savanes arbustives lâches au niveau des zones exondées (tougéré) du delta amont, ou des savanes arbustives lâche dans les zones plus basses.

- (4) Les steppes sont des formations de zones arides (pluviométrie inférieure à 400 mm) et se rencontrent au niveau du delta intérieur du Niger (partie aval) et plus au nord. Elles sont constituées par une strate lâche de ligneux de petite taille généralement xérophiles (épineux, succulents ...). La couverture de graminées y est rare, souvent contractée, éminemment fugace dans le temps (essentiellement graminées annuelles), voire dans certains cas absente. Un autre type de steppe, rencontrée sur le bassin amont, sont les bowé (sing. bowal). Ce sont des formations soudanaises caractéristiques des affleurements cuirassiques. La strate herbacée est à dominante annuelle, entrecoupée par la présence de quelques plantes vivaces et d'arbustes rabougris.
- (5) D'autres formations végétales existent sur le bassin du Niger, notamment les brousses tigrées, qui sont déterminées par des conditions édaphiques particulières (termitières effondrées, lithosols,...).

La végétation a subi de profondes modifications suite aux profondes transformations de la société (croissance démographique, intensification/extensification agricole, urbanisation et besoins des villes etc.) qui ont impliqué une conquête continue de nouvelles terres : c'est le facteur essentiel de déboisement en zone sèche. Corréliées à ces évolutions, les conséquences de la sécheresse, des feux de brousse et des modifications des systèmes de production (culture du coton sans jachère) font que la déforestation est très préoccupante au Mali (Leisinger & Schmitt, 1995 ; Bazile, 1998). Les modifications de la végétation sont alors une diminution des surfaces boisées toutes formations confondues, une disparition progressive des jachères et une diminution de la densité des arbres du parc.

1.5.1.2. Les phytocénoses aquatiques du DIN (Macrophytes uniquement)

Le delta intérieur du Niger, situé en pleine zone sahélienne, présente des systèmes végétatifs particuliers influencés par le rythme saisonnier de la crue du Niger. D'après les nombreux travaux sur les plaines inondées du delta intérieur du Niger et reprises et améliorées par Wuillot (1994), le remplacement d'une communauté par une autre dépend principalement de la profondeur maximale et de la durée de l'inondation (Figure 13).

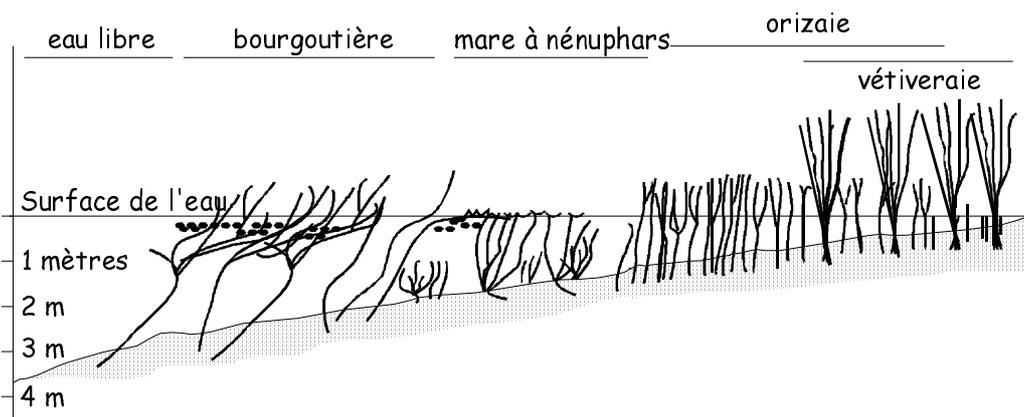


Figure 13. Représentation schématique de la répartition des macrophytes dans une plaine inondée lors de l'étalement de la crue (d'après Wuillot, 1994)

Suivant l'intensité croissante de l'inondation, plusieurs phytocénoses se distinguent :

- (1) Les Vétiveraies se développent sur les zones peu soumises à l'inondation annuelle (avec une hauteur d'eau comprise entre 0 et 0,6 m et une durée d'inondation allant jusqu'à 2 mois) et forment des touffes plus ou moins denses dont le recouvrement varie entre 50 et 100%. D'autres graminées s'associent à cette phytocénose.
- (2) Les Oryzaies où le riz sauvage vivace domine largement avec un recouvrement toujours supérieur à 75%. D'autres héliophytes sont présentes de manière diffuse. La hauteur est comprise entre 0 et 1 m. Aux environs du Walado, l'inondation peut durer jusqu'à 4 mois, entre septembre et décembre. Cette phytocénose est souvent défrichée pour la culture du riz.

- (3) Les mares à nénuphars se développent sur de petites surfaces, pour des hauteurs d'eau maximum de 1,2 et 1,8 m pour des durées d'inondation d'environ 5 mois.
- (4) Les Bourgoutières sont largement dominées par une espèce (le Bourgou ou *Echinochloa stagnina*). La croissance du Bourgou est rapide, en phase avec la montée des eaux. Il peut subsister jusqu'à des hauteurs maximales comprises entre 2 et 4 mètres pour une inondation qui dure généralement de 6 à 7 mois. Une autre espèce d'herbacée à tige flottante est également présente. Ces deux plantes sont très répandues et jouent un rôle important dans l'écologie des mares ; elles constituent aussi un excellent fourrage, apprécié par le bétail.

Il ne reste dans la zone du delta intérieur du Niger plus que quelques forêts inondées, comme la forêt à *Acacia kirkii*. La Figure 14 montre comment, sur un secteur du delta intérieur amont, se répartissent spatialement les unités végétales en liaison avec les caractères morphologiques.

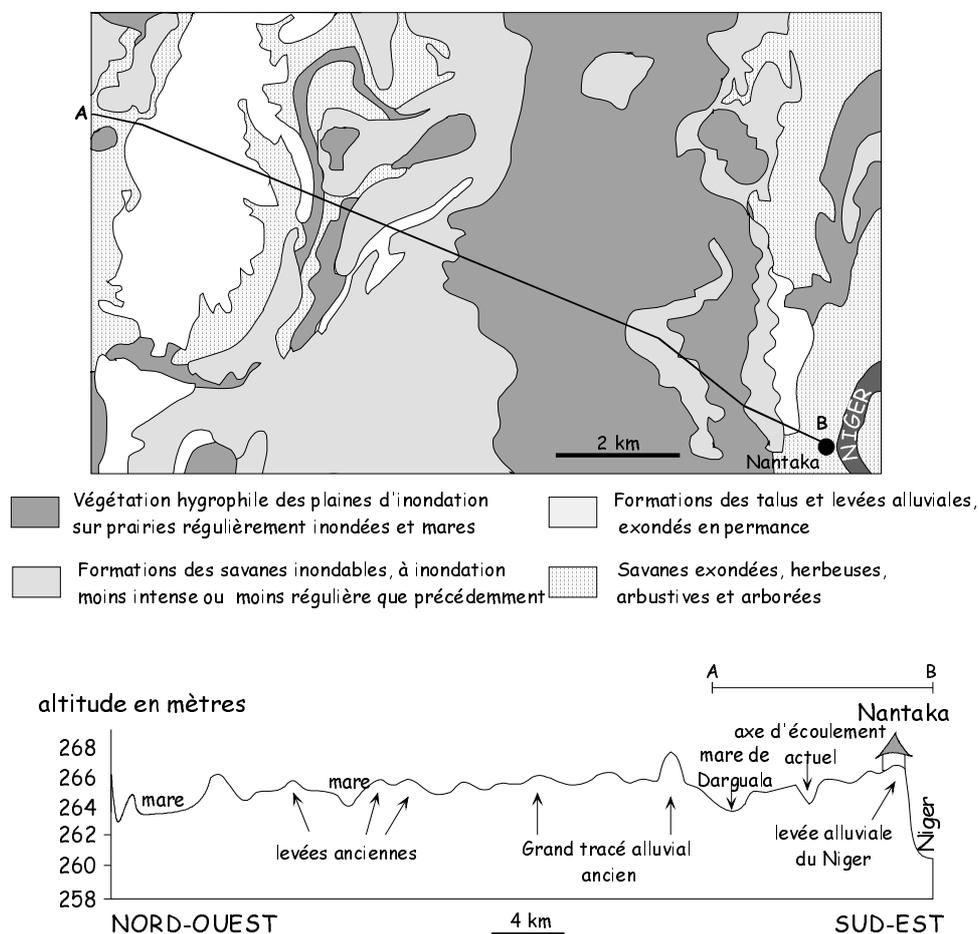


Figure 14. Unités végétales et croquis morphologique d'un secteur du delta intérieur du Niger : la région de Nantaka- mayo Donguel (d'après Wuillot , 1994 ; et modifié).

La sécheresse qui sévit en Afrique de l'Ouest s'est traduite par des bouleversements au niveau des phytocénoses aquatiques du delta intérieur du Niger mais aussi au niveau des comportements humains. Ces changements sont dus à une diminution des apports en eau et des effets secondaires qu'elle a induits (diminution de la hauteur d'eau maximum, de la durée...) (Wuillot, 1994 ; Chamard *et al.*, 1997).

1.5.2. Variabilité saisonnière de la végétation

Un aspect intéressant est la dynamique saisonnière de la végétation. Celle-ci est conditionnée par des facteurs externes dont le plus important est, plus ou moins directement, le climat. Il existe ainsi un gradient climatique sud-nord dans le cycle végétatif des plantes lié à la disponibilité en eau (Fournier, 1990). Le maximum de production correspond à la saison des pluies tandis que la saison sèche correspond à une période de dormance plus ou moins marquée selon la zone climatique. En zone de savanes, caractéristiques du bassin du Niger, les rythmes saisonniers affectent l'ensemble de la végétation et sont assez marqués. La période de dormance se caractérise par une disparition souvent totale du couvert végétal vivant. D'une manière générale, la durée d'existence de la matière vivante est plus longue pour le couvert arboré que pour le couvert herbacé (Grouzis, 1992).

Dans les savanes de la zone sahélienne, le couvert herbacé, surtout composé de graminées pérennes, se développe avec les premières pluies discontinues de mai-juin ; mais la croissance continue des végétaux ne commence qu'avec les pluies suffisamment régulières et rapprochées à la mi-juillet (Grouzis, 1992). Les feux de brousse peuvent jouer un rôle important, en particulier dans le domaine guinéen pour les savanes à herbes pérennes (ce milieu se limite aux hauts bassins du Niger).

Les différentes cartes de la Figure 15, montrent l'évolution de l'indice NDVI⁴ (Indice de végétation normalisé) sur le bassin du Niger et dans le delta intérieur du Niger pour une saison agricole moyenne (1982-1993).

L'évolution sur le bassin amont est évidemment synchrone avec la montée du FIT, en revanche le delta intérieur du Niger, montre un décalage notoire avec la saison des pluies. Alors que le couvert végétal sur le reste du bassin versant est faible (il ne pleut plus depuis 2 mois), la zone du delta aval montre un indice élevé, significatif d'une production végétale importante. En effet, la végétation du DIN suit un rythme saisonnier, celui de la crue annuelle du Niger qui arrive dans le delta avec du retard et atteint son maximum lors de la période maximum d'inondation (paragraphe précédent).

⁴ l'indice NDVI est l'indice de végétation le plus fréquemment utilisé dans l'observation spatiale de la végétation. Il utilise les propriétés de réflectance comme caractéristiques du couvert végétal. Il est de la forme

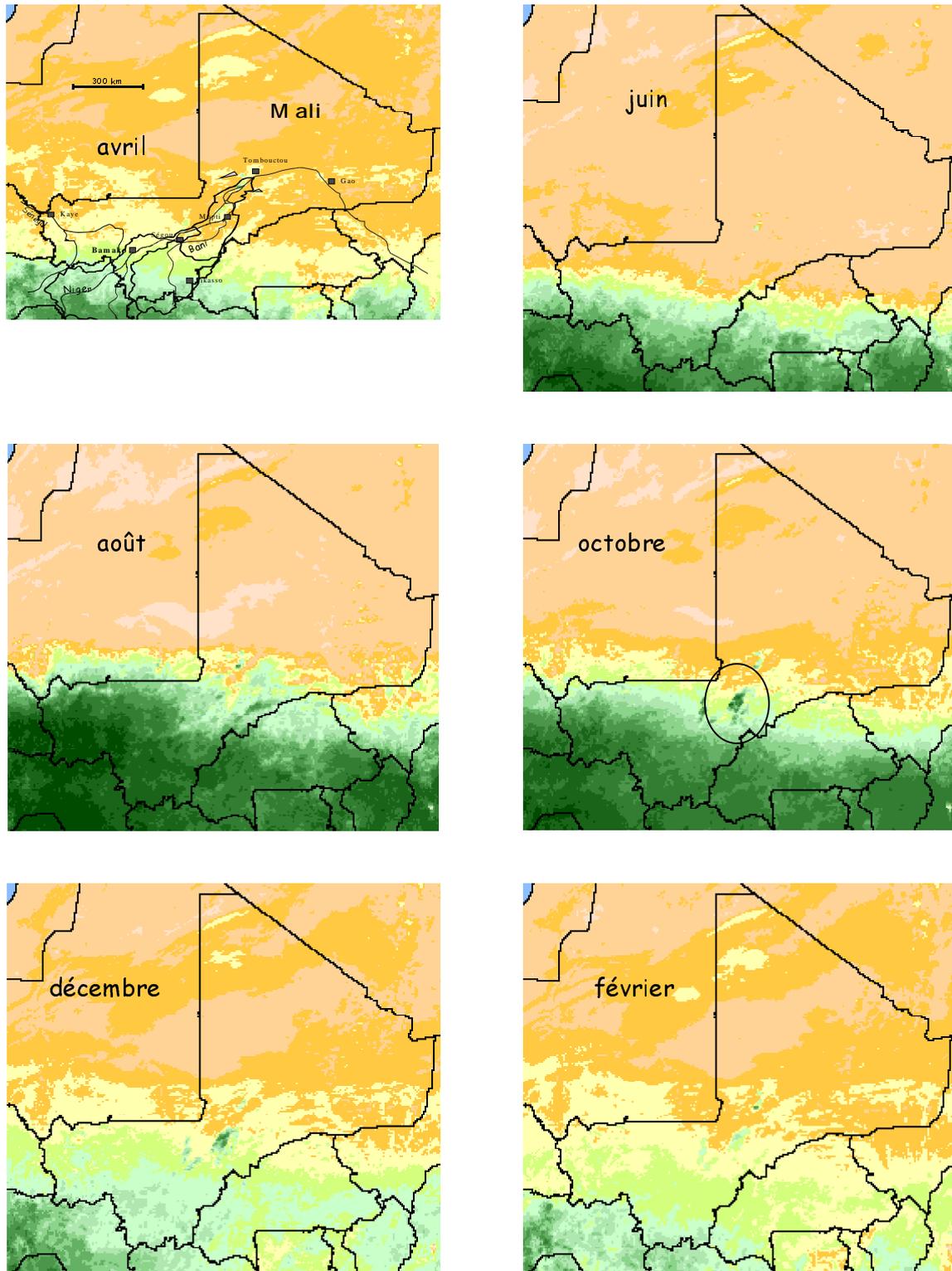


Figure 15. Evolution de l'Indice NDVI sur le bassin du Niger (1982/93). Dernière décade de chaque mois indiqué. Plus la couleur tire vers le vert foncé est plus l'indice est fort (d'après site Internet de la FAO : <http://193.43.36.7/waicent/faoinfo/economic/giews/french/basedocs/afouest.htm>)

1.5.3. Influence de la végétation sur les phénomènes d'érosion/sédimentation et la composition des eaux

L'importance de la végétation (et notamment de la strate herbacée) sur les phénomènes d'absorption d'énergie des pluies et du ruissellement a été montrée dans la littérature, aussi bien à l'échelle de la parcelle (e.g. Roose, 1977 ; Lelong *et al.*, 1984 ; Albergel *et al.*, 1986) que sur des petits bassins expérimentaux (Thébé, 1987 ; Droux, 1997, 1999). A l'échelle des grands bassins fluviaux, la végétation est rarement prise en compte seule, elle est généralement englobée avec les facteurs climatiques dont elle est dépendante. Ces deux facteurs sont d'ailleurs en compétition vis à vis de l'érosion mécanique qui augmente avec l'intensité des précipitations, alors que la végétation qui augmente avec les précipitations, protège au contraire les sols contre l'érosion mécanique (Probst, 1990). Les effets du couvert végétal sur l'érosion mécanique sont alors plutôt ressentis lorsque celui-ci est dégradé par l'action de l'homme : mise en cultures, déforestations, surpâturage... (e.g. Dedkov *et al.*, 1996 ; Walling & Webb, 1996). Il y a alors dégradation des sols, augmentation du ruissellement et érosion plus intense... Il faut enfin noter que l'effet de la végétation sur l'écoulement et l'infiltration et donc sur les phénomènes d'érosion va varier au cours de la saison des pluies à cause du développement du couvert végétal et en particulier de la strate herbacée et arbustive (paragraphe précédent).

Sur la majeure partie du bassin du Niger et du Bani, les couvertures végétales, essentiellement les couverts herbacés, ont une action efficace contre le ruissellement et l'érosion mécanique qui en découle. Cela n'est plus le cas pour les terres cultivées. Une étude sur 3 petits bassins au Mali en zone de savanes humides (< 120 km²) a montré que le bassin le plus cultivé s'avère être le plus ruisselant ce qui favorise l'exportation de matière en suspension (Droux *et al.*, 1997). Mais l'extension de ces terres cultivées est sans doute suffisamment faible sur le bassin du Niger pour que l'effet de la mise en culture des versants, soit atténué par l'alluvionnement dans sa partie inférieure.

Le rôle de la végétation sur la protection des sols contre l'érosion mécanique est évidente, mais le couvert végétal a aussi un effet sur l'altération chimique en augmentant la surface de contact des minéraux avec la solution du sols. A une échelle encore plus fine, l'eau du sol provenant des pluies, va changer de composition et se charger en produits émis par l'activité racinaire ou résultant de la dégradation des tissus végétaux par l'intermédiaire des micro organismes (protons , acides organiques H₂CO₃, MO, pCO₂...) ce qui peut donc avoir une influence sur la cinétique de l'altération (+Bluth & Kump, 1994). Par exemple, c'est le cas des aluminosilicates dont la vitesse de dissolution augmente avec le pH en milieu basique. Une revue bibliographique sur l'influence de la végétation et de la matière organique sur l'altération est présentée dans Viers (1998). La végétation a ainsi deux effets opposés sur la composition chimique des rivières (Drever, 1982 ; cité par Berner & Berner, 1987). Elle peut d'une part augmenter la cinétique de l'altération chimique mais d'autre part, comme elle protège également les sols de l'érosion mécanique (ce qui favorise l'épaississement des sols), elle a aussi pour effet inverse de l'altération en diminuant l'exposition des roches (c'est le régime de dénudation chimique à transport limité dont nous avons déjà parlé).

La végétation (et notamment sa densité) présente sur un bassin versant va également influencer la composition chimique de l'eau des rivières par les processus qui ont lieu entre les pluies (puis le ruissellement et l'infiltration), la biomasse et les sols (Berner & Berner, 1987 ; Appelo & Postma,

1993 ; Meybeck *et al.*, 1996a). De nombreux phénomènes comme l'utilisation sélective des produits de l'eau du sol (K par exemple) ou de l'atmosphère (gaz comme SO₂, NH₃...), la dégradation de la matière organique (qui libère notamment des éléments tels que K⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻...), vont jouer de manière indirecte sur les concentrations en matières dissoutes et particulaires observée dans les cours d'eau.

Enfin, dans un milieu aquatique, tel que le delta intérieur du Niger, la composition chimique de l'eau va être influencée par l'inondation et donc la production végétale qui en dépend. Cette production est de deux types : primaire (algues, zooplancton) mais concerne aussi le développement des macrophytes. Les premiers peuvent constituer une part des matériaux en suspension de la rivière (charge organique) et jouer un rôle important sur les cycles biogéochimiques par assimilation ou relargage. L'équilibre des carbonates dans les eaux est un exemple de couplage complexe entre des mécanismes biologiques (photosynthèse et respiration des organismes vivants), chimique et physique (Sigg *et al.*, 1994 ; Stum, 1994). L'assimilation de la silice sous sa forme dissoute par les diatomées pour la fabrication de leur structure interne est un autre exemple d'intervention du milieu vivant sur la chimie des eaux (Meybeck, 1984). Le rôle des macrophytes, sur la composition chimique de l'eau, la sédimentation mais aussi sur le bilan hydrologique devrait être important dans le delta intérieur du Niger, comme dans les autres milieux de type plaine alluviale (Benech *et al.*, 1982 ; Mc Carthy & Ellery, 1994 ; Brunet & Gazelle, 1995 ; Simm, 1995 ; Allison *et al.*, 1998 ; Dunne *et al.*, 1998). L'influence de ces macrophytes va être de deux types (Ryding & Rast, 1994 ; Testard, 1995) :

- Influence physique : sur l'énergie lumineuse, sur le microclimat, sur l'évapotranspiration (bilan hydrologique), sur l'hydrodynamisme et la sédimentation...
- Influence dans les cycles biogéochimiques : en relation avec la photosynthèse (élévation du pH...) ; stockage et transfert d'éléments (rôle de bioaccumulateur transitoire, puisqu'ils piochent dans les sédiments et dans l'eau puis redistribuent les éléments dans la masse d'eau). Les macrophytes activent ou réactivent surtout la circulation des nutriments sédimentaires, et à l'inverse ralentissent celle des éléments dissous dans l'eau.

2. L'OCCUPATION DU MILIEU PAR L'HOMME

A l'heure actuelle, le fleuve Niger, comme la plupart des grands fleuves du globe, a attiré une grande majorité d'utilisateurs dans des domaines aussi variés que l'alimentation en eau (domestique, agricole et industrielle), la pêche, l'énergie ou les communications... La plupart de ces activités, susceptibles de créer des pollutions, sont regroupées habituellement par rapport à leur mode d'entrée dans le milieu naturel. C'est ainsi que l'on distingue les sources ponctuelles qui comprennent les rejets d'effluents domestiques et industriels, tandis que le lessivage des sols cultivés ou urbains constituent les sources non ponctuelles ou diffuses. Ces dernières ont donc des répercussions sur des grandes surfaces et il est très difficile de les contrôler et de les traiter. Les apports atmosphériques (pluies et poussières) peuvent aussi avoir un rôle non négligeable et seront traités séparément dans le chapitre IV. Les problèmes de dégradation du milieu par le surpâturage, l'agriculture (dégradations des sols), la déforestation, la pratique des feux de brousse.. qui sont des facteurs de modifications et d'accélération des processus naturels (Maire & Pomel, 1994) ont été évoqués dans la première partie de ce chapitre.

La difficulté d'un recensement des activités humaines sur le bassin versant du fleuve Niger tient à l'étendue du bassin versant qui se partage entre plusieurs pays ; essentiellement la Guinée (98 000 km²) et le Mali (plus de 200 000 km²), et au peu de données traitant de l'environnement dans les pays africains. Cependant, il existe quelques données bibliographiques (Dejoux, 1988 ; Coulibaly & Derlon, 1995 ; Danté, 1995 ; IWACO, 1996) qui nous ont été très utiles, ainsi que d'autres sources non officielles (entretiens, rapports informels, sites Internet FAO⁵, ADDS⁶,...).

De part la nature de ces sources, cette partie doit être considérée comme un premier inventaire des problèmes de pollution rencontrés sur le bassin versant et non comme une liste exhaustive des pollutions possibles par les activités humaines. Leurs effets sur l'hydrosystème du Niger seront parfois évoqués dans les chapitres suivants.

2.1. Généralités

Le fleuve Niger prend sa source en Guinée puis traverse de part en part le Mali. Ces deux pays, qui regroupent 90% de la superficie du bassin à la sortie du delta intérieur du Niger, se caractérisent par un développement économique faible dépendant des activités agricoles et une croissance démographique importante. Il est communément admis que les types de pollution des eaux sont très liés au stade de développement des pays (Meybeck, 1992). Les principaux problèmes liés à la qualité de l'eau dans les pays en développement portent sur les pollutions pathogènes et organiques et sur les teneurs élevées en nitrates des eaux souterraines en raison de l'absence de collecte et de traitement des eaux usées domestiques (Dejoux, 1988 ; Meybeck, 1992 ; Nash, 1993 ; Mudry & Travi, 1994 ; Colligon, 1994).;

La population totale de Guinée et du Mali était estimée en 1995 à respectivement 6 700 000 et 10 800 000 habitants, avec des taux de croissance autour de 2,7 % pour la Guinée et de 3% pour le Mali. La population active rurale pour les deux pays représente autour de 83-85% de la population active. En Guinée, bien que les conditions éco-climatiques soient très favorables (25 % de la superficie est cultivable), seul 6,5 % de la superficie totale est cultivée chaque année ; l'agriculture ne représente que 21 % du PIB en 1992-93. C'est encore plus le cas dans la région de la Haute Guinée où une partie infime des terres est mise en valeur (IWACO, 1996). Les principales cultures vivrières sont le riz, le fonio, le maïs, l'arachide et le manioc, tandis que les cultures pérennes sont les bananes, l'ananas, les agrumes, le palmier à huile et le café. L'essentiel du PIB provient des produits miniers, et des produits agricoles d'exportation. Le Mali, qui est situé dans une zone climatique plus défavorable est, quant à lui, un des pays en voie de développement parmi les plus pauvres. Le secteur industriel représente 14% de ce PNB alors que la production agricole en fait 51% (en 1988-90). Les superficies cultivables occupent 14 % de la surface du pays, mais à peine 1/3 de ces superficies sont effectivement cultivées actuellement. Le potentiel en terres irrigables est élevé, mais la mise en oeuvre de l'irrigation, entreprise depuis plusieurs décennies, est coûteuse et difficile (FAO/AQUASTAT⁷, Internet). Elle reste

⁵ <http://apps.fao.org/debut.htm>

⁶ <http://edcsnw4.cr.usgs.gov/adds/>

⁷ <http://www.fao.org/ag/aGL/AGLW/aquastat/aquastaF.htm>

cependant une solution potentielle pour pallier aux inconvénients d'un climat capricieux qui rend vulnérable la culture des céréales. Les principales cultures vivrières sont le mil, le sorgho, le maïs et le riz, tandis que le coton et l'arachide constituent les cultures d'exportation. Le Mali exporte aussi du bétail, des peaux, du poisson séché (un peu d'or et de caoutchouc). L'agriculture qui peut représenter un facteur important de la dégradation du milieu est peu mécanisée et marginalement utilisatrice d'engrais.

Au Mali, la majeure partie de la population est concentrée sur le bassin du Niger (70% du bassin versant et environ 1600 km de cours du Niger). Au contraire, en Guinée, la région du bassin versant du Niger (la Haute-Guinée) comprend la plus faible partie de la population totale de la Guinée (20 %) et sa densité est de 12 à 22 habitants au kilomètre carré. Les agglomérations situées le long du fleuve Niger et de ses affluents sont de faible importance en Guinée (Kankan, 90 000 hb ; Kouroussa, 10 800 hb ; Siguiré, 46 900 hb en 1995). La faible densité moyenne (8 habitants /km²) du Mali cache en fait des disparités énormes avec des concentrations très fortes dans les centres urbains et dans les zones de culture, dont le delta du Niger est la plus importante. Bamako, la capitale compte plus d'un million d'habitants, soit 1/9 de la population totale.

La croissance démographique, l'augmentation des besoins individuels en eau potable et l'exode rural vers les grands centres urbains sur les bords du Niger (principalement vers Bamako), le développement des périmètres irrigués et des activités industrielles, sont autant de facteurs susceptibles d'augmenter la pression anthropique qui s'exerce sur le fleuve Niger. Comme les pays concernés doivent faire face à de nombreux problèmes d'alimentation en eau (principal souci de ces régions...), les moyens financiers et technologiques pour développer des mesures parallèles de protection de l'environnement sont trop souvent limités. Dans ce contexte, la préservation de la qualité du milieu et notamment de la qualité du fleuve Niger pour une meilleure utilisation de l'eau est une préoccupation croissante au Mali et en Guinée. Il faut rappeler que pour le Mali, une bonne partie de ses activités économiques est liée aux bassins du Niger ; l'enjeu est donc important. Cette prise de conscience des problèmes environnementaux s'est traduite par l'élaboration de nombreux projets. Le gouvernement malien a lancé en 1994 avec la coopération néerlandaise, réalisé en commun avec la Guinée, un vaste programme sur le « suivi hydro-écologique du Niger » (Iwaco, 1996). Celui-ci vise à faire un inventaire des sources de pollutions potentielles dans le bassin versant du Niger. Une autre étude sur les conséquences des activités agricoles sur la qualité de l'eau a été menée par la CMDT (Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles) au sud du Mali (Coulibaly & Derlon, 1995 ; Bonnefoy, 1998). Egalement, plusieurs journées de réflexion sur la protection du fleuve Niger ont été organisées en 1996 (Ambassade des USA; Association malienne d'Hydrologie). Récemment, une étude sur la caractérisation des rejets domestiques et industriels produits par la ville de Bamako a permis d'entamer une réflexion sur les procédés de traitements à prévoir (Palangie, 1998).

2.2. Les sources ponctuelles de pollutions

Il s'agit de rejet direct des déchets dans l'environnement, à un endroit précis. Ces sources comprennent les réseaux d'assainissement, les effluents industriels, les centres urbains et l'artisanat.

2.2.1. Les eaux usées domestiques et les ordures

Le problème des eaux usées est d'une importance capitale en Guinée et au Mali comme dans les autres pays de l'Afrique de l'Ouest où les systèmes d'assainissement sont quasi inexistant. En Guinée, seule la ville de Kankan possède un réseau d'assainissement, mais très ancien. Dans le meilleurs des cas, l'assainissement s'effectue au moyen de latrines ou de fosses septiques reliées à des puits perdus. Mais, les eaux usées sont le plus souvent évacuées à même la rue. La situation au Mali est encore plus dramatique étant donnée la forte concentration de population des grandes agglomérations situées près du fleuve. Bamako et les autres capitales régionales (Koulikoro, Ségou, Mopti...) possèdent pour la plupart un réseau d'adduction d'eau potable, un réseau de caniveaux à ciel ouvert pour l'évacuation des eaux usées et pluviales mais pas de système de traitement des eaux usées. Les eaux usées sont rejetées directement dans le fleuve. En fait, une grande partie de la population des grands centres urbains n'a pas accès à ces réseaux et utilise des latrines, puisards ou fosses septiques..., parfois aucune installation n'est prévue (Traoré, 1996). En milieu rural, moins de 20% de la population disposent de latrines. Dans les villes, villages ou quartiers, sans réseaux, les eaux usées restent stagnantes, s'infiltrant dans le sol, ou rejoignent directement le fleuve par lessivage lors de la saison des pluies.

Le cas de la ville de Bamako avec une augmentation de sa population de 5,2% chaque année, et une forte expansion spatiale (Bamako et ses proches faubourgs comptent aujourd'hui plus d'un million d'habitants et s'étalent sur un espace utile de 19 000 hectares) est un bon exemple des problèmes que l'on peut rencontrer en matière d'assainissement dans les villes africaines. Les rejets domestiques, évalués à partir de la consommation en eau de la population, sont estimés entre 29 600 et 41 600 m³/j (TECSULT, 1994). Pour "traiter" ces eaux, seulement 4% de la population sont reliés à un système d'égout (cœur administratif de la ville). Les concessions sont parfois équipées de fosses septiques (8,3 %) ; ou de fosses fixes (5,3%) ; mais la plupart des habitations de Bamako ont seulement des latrines traditionnelles (86%) pour l'évacuation des excréments et des eaux vannes (TECSULT, 1994). Les eaux ménagères (eaux de cuisines, lavages...) sont alors évacuées à même la rue ou dans des canaux d'évacuation des eaux pluviales. Ainsi, le réseau d'évacuation des eaux pluviales fait généralement office de véritable égout à ciel ouvert et se trouve la plupart du temps comblé d'ordures ménagères ou de terre. Par temps de pluie, l'importance du débit des eaux de ruissellement établit un régime turbulent dans les caniveaux d'évacuation des eaux pluviales, qui brassent alors les charges polluantes et apportent quantités de matières organiques au fleuve Niger (Palangie, 1998). En saison sèche, l'égout à ciel ouvert peut au contraire jouer un rôle d'épuration par rapport aux substances organiques.

Les ordures ménagères constituent également un véritable problème. Par exemple, la population de Bamako produit actuellement en moyenne 1 200 m³ d'ordures ménagères par jour alors que la voirie

ne peut en évacuer que 855 m³/j (Direction Nationale de la Planification, division de l'hygiène et de l'assainissement). Les ordures séjournent plusieurs jours avant d'être ramassées, parfois de véritables décharges se créent, notamment au bord du fleuve. Lors de pluies, il y a alors lessivage des ordures et rejet des lixiviats vers le fleuve pouvant contenir de fortes teneurs en ammoniacque résultant de la fermentation, des pesticides et métaux lourds que l'on trouve dans certains plastiques...

2.2.2. Les eaux usées industrielles

Le nombre d'industries reste faible par rapport aux pays développés, mais aucune mesure n'est prise en ce qui concerne les effluents industriels et/ou les déchets solides engendrés faute de loi et normes sur les rejets industriels. La plupart des unités industrielles sont situées au bord du fleuve, source inépuisable en eau, dans la zone malienne du bassin qui s'étend de Bamako à Koulikoro. En dehors de cette zone, les quelques installations industrielles importantes sont des industries textiles et alimentaires implantées à Ségou. Toutes rejettent sans traitement ou presque leurs effluents dans le fleuve Niger. Les eaux usées peuvent aussi s'infiltrer dans les nappes phréatiques à partir des bassins de stockage-décantation et des systèmes d'évacuation des eaux usées et polluer les nappes.

Les unités industrielles recensées sur le bassin du Niger en Guinée comprennent notamment des abattoirs, des mines et des carrières, ainsi que des usines de jus de fruits (Danté, 1994 ; IWACO, 1996, Internet⁸). Au total on compte environ 20 grands complexes agro-alimentaires au Mali, dont les plus importants, du point de vue de rejets en matières oxydables, sont les abattoirs, les huileries, les usines fabriquant des jus de fruits et les raffineries. Quelques usines chimiques produisent ou préparent des peintures, détergents, engrais et composés organiques simples. Il existe également des exploitations minières (Or) vers la Guinée. Les industries textiles et les tanneries rejettent de nombreux produits colorants contenant notamment des métaux lourds. Le Tableau 7 nous donne un inventaire des industries polluantes autour de Bamako, ainsi que la quantité et les caractéristiques des effluents produits. On peut voir que la région de Bamako concentre au moins la moitié de l'activité industrielle du Mali. La production d'eaux usées industrielles y est estimée à 3000 m³/j (TECSULT, 1994). Des analyses pratiquées sur des puits de la zone industrielle de la ville ont révélé des niveaux de pollution très élevés en zinc, nickel, chrome et arsenic (IWACO, 1996).

2.2.3. Les eaux usées d'origine artisanale

A coté des activités industrielles, il existe au Mali et à Bamako en particulier, un secteur artisanal très actif. On trouve un grand nombre de petites teintureries (150 recensées dans le district de Bamako) générant des eaux usées importantes (0,3m³/j et par teinturerie) contenant des matières toxiques (TECSULT, 1994). Mais aussi des savonneries... Ces différentes activités se situent généralement au bord même du Niger où l'eau est disponible et gratuite . Les différents lavages sont alors parfois faits directement dans l'eau du fleuve

⁸ <http://www.undp.org/undp/fomli/ind.htm>

Industries	localisation	Activité	Caractéristiques des effluents	Production
Union laitière de Bamako	Z.I Bamako	production de produits laitiers	-DBO5 et DCO élevées -phosphore, nitrates -chlorures -graisses -Ph très acide	EU =60 m3/j DS =60 m3/mois
TAMALI	Bamako	tannerie industrielle	-DBO5 et DCO élevées -sulfures -nitrogènes -chlorures de sodium -chrome	cap. max. : 800 peaux/j cap. act : 200 peaux/j EU =200m3/j DS inconnue
Abattoir frigorifique	Z.I Bamako	abattage chèvres, vaches et moutons	-DCO élevée -graisses -azote -MES/solides totaux -arsenic	EU =270m3/j
Usine Malienne de Produits pharmaceutiques (UMPP)	Bamako	fabrication de médicaments		EU =270m3/j
Industrie textile du Mali (ITEMA)	Bamako	fabrication textile	-soude caustique -naphtol -alcools -acides	EU =1440m3/j
Usine Mamadou Sada Diallo (USMD)	Bamako	production de vinaigre, matière plastique, eau de Javel	-alcool éthylique -soude caustique sel -colorants	EU =10m3/j
Générale malienne de peinture (GMP)	Bamako	fabrication de peinture, colle et vernis		EU =1,75m3/j
Société Nationale des tabacs et allumettes du Mali (SONATAM)	Bamako	fabrication allumettes et cigarettes		EU =5m3/j
Huilerie cotonnière du Mali (HUICOM)	Koulikoro	production d'huile		mousses
Dépôt de munitions de l'armée	Djikoroni		composants des explosifs	
Usine Céramique	Djikoroni	production de céramique		MES
Ancienne briquerie	Djikoroni	fabrication de pavés		MES

EU = Eaux usées
DS = Déchets solides

Tableau 7. Industries susceptibles de créer des pollutions sur Bamako (IWACO, 1996)

2.2.4. Les rejets directs dans le fleuve

On peut également citer parmi les sources ponctuelles de pollution les rejets directs de nature accidentelle ou volontaire dans le fleuve. C'est, par exemple, le cas de l'exploitation des minéraux (or en particulier) présent essentiellement en Guinée à la frontière du Mali (Siguiri, Kouremalé et Fifa) et au Mali (Kalana). Elle se fait le plus souvent de façon artisanale et parfois illégale. Le mercure est certainement employé dans le processus de purification. Un autre phénomène a été rapporté par Dante (1994) au niveau de la pêche : certains pêcheurs semblent utiliser des produits toxiques solubles, servant à faciliter la capture des poissons. On peut également citer la pollution accidentelle survenue en 1993, où des quantités très importantes de lindane et de diazinon ont été déversées dans le fleuve et ont rendu l'eau du robinet impropre à la consommation pendant deux jours. Des pollutions accidentelles peuvent également subvenir en raison d'un mauvais stockage de produits phytosanitaires dans la zone cotonnière du Sud Mali.

Mais il y a aussi le cas des savons, produits vaisselle, lessives et autres détergents qui sont utilisés directement dans le fleuve pour les usages domestiques de la population.

2.3. Les sources diffuses de pollutions

Les sources diffuses sont essentiellement d'origine agricole, liées à l'utilisation d'engrais et de pesticides en agriculture et à l'augmentation du cheptel.

Depuis quelques années l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation au Mali (en Hautes Guinée, les aménagements hydro-agricoles ne concernent que quelques hectares). De nombreux périmètres existent le long du fleuve Niger et de ses affluents ou sur leurs bassins dont les plus importants, tant en surface que pour l'économie malienne, sont le périmètre irrigué de l'Office du Niger dans la région de Ké-Macina sur le bassin du Niger (47 000 ha exploités) et la zone cotonnière du sud Mali sur le bassin du Bani (96 000 km²). L'utilisation des engrais chimiques est massive dans ces cultures intensives mais reste encore très marginale pour les autres cultures en raison du coût très élevé de ces produits. L'Office du Niger a, par exemple, consommé lors de la campagne 1994, 5 939 tonnes d'Urée et 4 055 tonnes de phosphates d'ammonium sur les 47 000 ha irrigués, mais aussi du sulfate de Zinc pour traiter des problèmes de carence (Barral & Dicko, 1996). Quant à la zone cotonnière de la CMDT⁹, l'intensification des systèmes de production s'est traduite par une consommation importante de fertilisants (60 200 tonnes d'engrais en 1992), et de produits phytosanitaires (2 472 000 litres d'insecticides en 1992) (Coulibaly & Derlon, 1995). D'après la F.A.O., la consommation d'engrais total sur plusieurs années a montré une augmentation nette jusqu'en 1991, mais est restée stable depuis.

⁹ La Compagnie Malienne de Développement des Textiles encadre entièrement la production et la commercialisation du coton dans la partie sud du Mali.

Une étude de la CMDT a été menée sur la zone sud du Mali visant à déterminer l'impact des intrants d'origine agricole sur la qualité de l'eau du Banifing, affluent du Bani (Coulibaly & Derlon, 1995 ; Bonnefoy, 1998). Outre une cartographie des secteurs à risques, les principaux résultats de ces études ont révélé que les fortes pollutions par les engrais (teneurs largement supérieures aux normes de potabilité) sont limitées aux sites où se conjuguent les activités d'abreuvement du bétail, l'écoulement des eaux sales et la pratique des lessives. La pollution par les phosphates est générale et constante dans tous les points d'eau étudiés : puits, fleuve, forages. Les teneurs observées ont été attribuées non pas à l'utilisation d'engrais mais aux déjections animales sur les lieux d'abreuvement et aux latrines des habitations qui sont en relation par infiltration avec la nappe phréatique. Toutefois, il faut retenir que la pollution par les fertilisants existe dans l'ensemble de la zone sud Mali. La question est de savoir si cette pollution est persistante ou si elle prend effet uniquement en période d'épandage des intrants.

Cette étude permet de mettre l'accent sur le problème de la concentration des élevages en un endroit donné au bord du fleuve. On a donc une production importante de matières azotées à prendre en compte en ces lieux de concentration.

Après cette revue rapide des différentes pollutions sur le bassin, il semble, en première approximation, que les pollutions chimiques notables ne se produisent généralement qu'en ville (en particulier à Bamako)) et en milieu rural à l'aval des zones agricoles intensives et des périmètres irrigués. Elles sont donc assez localisées dans l'espace et dans le temps. De plus, les sources ponctuelles, comme les eaux usées de la ville de Bamako devraient, étant donnés les débits du fleuve, être rapidement diluées et transportées vers l'aval. Ainsi, des problèmes majeurs risquent de se rencontrer en basses-eaux, et également au début de la saison des pluies avec la montée de la crue.

Nous allons voir que les résultats d'analyse réalisés sur les éléments majeurs et les traces dans la phase totale et dissoute confirment ces observations. Le fleuve Niger est comme la plupart des eaux continentales africaines (Biney et al, 1994) très peu touché par la contamination chimique. Ces résultats étaient attendus étant donnée la faible industrialisation sur le bassin versant et l'usage minoritaire des engrais et pesticides dans l'agriculture.

3. CONCLUSIONS

Le milieu naturel de la partie du bassin du Niger étudiée est caractérisé par deux entités géomorphologiques bien distinctes : les bassins versants du Niger et de, son principal affluent le Bani, qui forment un bassin hydrographique classique (versant et réseau hydrographique), et le delta intérieur du Niger qui constitue une vaste plaine d'inondation où viennent s'épandre les apports de ces deux tributaires. La Figure 16 tente de schématiser les processus majeurs que nous avons abordés dans ce chapitre et qui peuvent affecter la qualité de l'eau de ce système fluvial (système versant + système cours d'eau) en relation avec le cycle hydrologique du bassin versant.



Figure 16. Schématisation des processus majeurs pouvant affecter la qualité de l'eau du système fluvial étudié (système versant + système cours d'eau) en lien avec le cycle hydrologique du bassin versant.

- ① Retombées humides et sèches
- ② Destruction physique
- ③ Dissolution des minéraux
- ④ Altération des minéraux
- ⑤ Précipitation des minéraux
- ⑥ Assimilation biologique
- ⑦ Décomposition biologique
- ⑧ Ajout d'engrais
- ⑨ Alluvionnement
- ⑩ Rejets anthropiques



Chapitre II. Dispositif expérimental, Acquisition des données, Matériel et méthodes

Les réseaux de contrôle de la qualité des eaux occupent une place importante dans la surveillance de l'environnement. L'établissement de bilans précis des diverses matières transportées par les cours d'eau est devenu une priorité dans de nombreux domaines. Traditionnellement, les recherches étaient focalisées sur la détermination de taux d'érosion mécanique et chimique, des flux de matériaux parvenant aux océans et de leur participation aux cycles géochimiques (e.g. Milliman & Meade, 1983 ; Meybeck, 1987...). L'apparition des problèmes d'eutrophisation et de pollution des milieux aquatiques, a ensuite créé la demande pour une évaluation précise de la quantité transportée par les rivières de nutriments, de sédiments et des polluants associés comme les métaux lourds, (e.g. Balland, 1983 ; Horowitz *et al.*, 1992 ; Walling *et al.*, 1992 ; Tonderski *et al.*, 1995). L'intérêt accru depuis ces dernières années pour ces différents thèmes a permis d'engager une réflexion importante sur la validité des programmes de surveillance de la qualité des eaux (e.g. Olive et Reggier, 1992 ; Meybeck *et al.*, 1996a,b,c). Il s'avère ainsi important de déterminer dans quelle mesure les programmes d'échantillonnage utilisés sont adaptés à ce que l'on cherche à étudier et si les procédures de calcul sont appropriées.

Ce chapitre a d'une part pour objectif de présenter le réseau d'observation des flux de matières dissoutes et particulaires transportés par le Niger au Mali mis en place depuis 1991. C'est à partir de ces données que l'essentiel du travail de thèse a été mené. La mise en place de ce réseau ainsi que les premiers résultats sur les flux transportés (de 1991 à 1993) ont fait l'objet d'une première thèse (Gourcy, 1994). La poursuite des observations sur 4 années supplémentaires (de 1994 à 1998) nous a permis, notamment de vérifier la fiabilité des protocoles d'échantillonnage utilisés. Une réflexion supplémentaire a été parallèlement menée sur les méthodes de calcul des flux.

D'autre part, ce chapitre nous permet de décrire la méthodologie et les techniques mises en place pour réaliser des observations plus fines (éléments traces et majeurs dans les eaux du Niger et dans les pluies).

Afin de vérifier la fiabilité des données récoltées, surtout dans le contexte africain, les thèmes suivants seront abordés tout au long de ce chapitre : choix de la station, mesures de débits, fréquences d'échantillonnages, techniques d'échantillonnage, traitement et conservation des échantillons, contrôle de la qualité analytique des mesures, modes de calculs.

1. LE RESEAU D'OBSERVATION, LES MESURES QUANTITATIVES ET QUALITATIVES DES EAUX DU NIGER AU MALI LES BANQUES DE DONNEES

Depuis 1962 et pendant une vingtaine d'années, différents programmes ORSTOM ont développé en Afrique intertropicale des mesures de transport solide en suspension en complément des mesures hydrologiques classiques. Dans certains cas, les mesures de la charge dissoute étaient également réalisées. Des méthodologies diverses ont été mises en œuvre, pour répondre à des besoins et des préoccupations différents : ingénierie liée aux projets hydrauliques ou recherche fondamentale sur l'hydrogéodynamique de bassins hydrologiques. Les travaux de Nouvelot (1969), Nouvelot (1972), Carré (1972), Olivry (1978), Gac (1980), donnent un bon aperçu du savoir faire de l'ORSTOM dans ce domaine et à cette époque. A partir de 1983, l'ORSTOM a étendu le champ de ses recherches sur les grands bassins fluviaux en systématisant les mesures de qualité des eaux dans le cadre du programme EQUERRE (Etude de la Qualité des Eaux, Erosion et Régime des Ecoulements). En 1986, celui-ci s'enrichit de la participation de laboratoires de géochimie de l'INSU (Institut des Sciences de l'Univers, CNRS et Université) pour former un programme INSU/ORSTOM : le programme PIRAT (Programme Inter-disciplinaire de Recherche péri-Atlantique). Celui-ci vise principalement à évaluer de manière qualitative et quantitative les apports continentaux aux océans en relation avec la sédimentation océanique. Il a permis la mise en place d'observatoires permanents de l'environnement des bassins intertropicaux et en particulier du bassin du fleuve Congo-Zaïre dont sont issus de nombreux travaux (e.g. Olivry *et al.*, 1988 ; Negrel, 1992 ; Moukolo *et al.*, 1993 ; Laraque *et al.*, 1995 ; Gaillardet, 1995...).

Le programme EQUANIS (Environnement et Qualité des apports du Niger au Sahel) mené de 1990 à 1997 par l'ORSTOM et le CNRST (Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, Mali) s'est inscrit à partir de 1994 dans le programme PEGI¹. Il a notamment permis la mise en place du réseau de surveillance de la qualité des eaux du fleuve Niger et de son delta intérieur au Mali. Celui-ci repose sur l'existence d'un réseaux d'observation hydrologique ancien, comprenant l'une des stations les plus anciennes d'Afrique (le Niger à Koulikoro). Les observations sur les flux de matières dissoutes et particulaires transportés par le Niger se poursuivent à l'heure actuelle, et constituent une base de données importante (sur 8 années d'observations pour la plupart des stations).

¹ Le programme PEGI (Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale) remplace PIRAT en 1990. Ce programme dont le centre d'intérêt principal était l'étude des grands bassins fluviaux tropicaux, s'est focalisé sur le fleuve Congo-Zaïre (Cameroun, Congo, République Centrafricaine), sur le fleuve Niger (Mali) et sur le fleuve Amazone (Brésil et Bolivie).

1.1. Quelques définitions

Ce paragraphe vise à définir les expressions relatives aux transports solides et dissous, qui seront utilisées par la suite tout au long de ce mémoire.

1.1.1. Le transport solide

Le **transport solide** est par définition la quantité de sédiments (ou, flux solide, charge solide², débit solide³) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps Δt ($\Delta t=1$ jour, 1 mois, 1 année). Il est composé de la charge en suspension et du transport de fond (glissement ou roulement sur le fond et saltation). Le transport des sédiments par les cours d'eau est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules). Ce qui permet de distinguer :

- **la charge en suspension** (*suspended load* des anglo-saxons), constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de silts. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être aisément mesurée : par rapport à la capacité de mesures, on distingue la charge échantillonnée de la charge non échantillonnée (Figure 18). Dans la très grande partie des cas, la charge en suspensions représente quantitativement un pourcentage très important du transport global.
- **la charge de fond** (*bed load*), formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant. Ces particules roulent sur le fond ou se déplacent par saltation. Le transport par saltation correspond à un déplacement par bonds successifs.

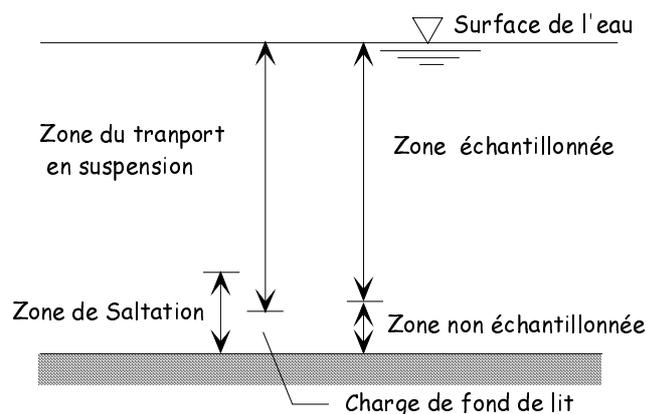


Figure 18. Classification des différentes "couches" de transport solide (d'après Wen Shen, & Julien, 1992).

² Le terme *charge solide* est utilisé pour une période déterminée (e.g. charge annuelle).

³ Chez les hydrologues, on parle de débit solide, qui correspond aux poids total des matériaux transportés par les cours d'eau, d'une manière ou d'une autre passant à travers une section par unité de temps. On l'exprime généralement en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. On distingue ensuite le débit solide en suspension et le débit de charriage associés aux deux modes de transport des matériaux.

En pratique, on mesure une concentration en **Matières En Suspension** (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension recueillis à travers une membrane poreuse (la taille moyenne des pores est en général de $0,2\mu\text{m}$). Elle s'exprime en milligrammes par litre d'eau brute.

La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste à procéder comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration de différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales. L'ORSTOM a une longue expérience de terrain dans ce domaine qui a débuté avec les travaux de Billon (1968) et Nouvelot (1969, 1972), Olivry, (1978), Molinier (1979), et s'est poursuivie avec les travaux sur le Congo. En considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L , chaque verticale V peut être définie par son abscisse l (distance à l'une des 2 rives), et sa profondeur totale P . Si en un point d'une verticale V , situé à la profondeur p , sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration c de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface dS de la section S s'écrit : $q_s = c \times v \times ds$. Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S c \times v \times ds = \iint_S c \times v \times dl dp$$

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport : $C_m = Q_s / Q_L$, Q_L étant le débit liquide total sur la section S ($Q_L = \iint_S v \times ds$)

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiments transporté par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. La question qui demeure est de savoir comment peut-on estimer le transport solide avec un coût non prohibitif, sachant que le bilan exact des matériaux en suspension transportés demeure fondamentalement inaccessible. Nous reviendrons sur ces questions par la suite.

1.1.2. Le transport dissous

Le transport dissous est en principe la quantité de matière dissoute (ou charge dissoute) transportée dans les eaux courantes. La **matière dissoute** est généralement définie comme la matière contenues dans l'eau après filtration à travers un filtre (couramment de porosité $0,2 \mu\text{m}$). Cette classification arbitraire entre matière en suspension et matière dissoute n'est évidemment qu'une définition opérationnelle des substances dans les cours d'eau, puisqu'elle ne prend pas en compte le domaine des colloïdes (qui appartient aux limites inférieure ou supérieure des deux autres domaines).

La charge dissoute est classiquement séparée en une **charge dissoute inorganique** et une charge dissoute organique. La principale grandeur que nous utiliserons dans ce mémoire pour notamment calculer les flux en éléments dissous est le **TDS** ("Total Dissolved Solid" des anglo-saxons), défini comme étant la somme des concentrations de certains éléments dissous dans l'eau (espèces chargées et neutres incluses exprimées en mg.l^{-1}). Les espèces prises en compte sont les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), les anions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-}) et la silice dissoute (SiO_2). Nous utiliserons aussi dans ce chapitre la **concentration ionique** des eaux définie comme la somme des espèces ioniques majeures rencontrées dans les eaux courantes (cations et anions

cités ci-dessus). Cette valeur peut être reliée à la **conductivité électrique** : celle-ci est la quantité d'éléments dissous ionisés permettant le passage du courant électrique entre deux électrodes.

L'établissement des flux d'éléments majeurs repose sur le même principe que celui exposé pour les MES et nécessite donc la connaissance des concentrations des éléments considérés et des débits. Il pose en général peu de problèmes. En effet, la gamme et la variabilité des concentrations avec les débits étant moindres, l'échantillonnage peut être moins fréquent (Meybeck *et al.*, 1996a,b,c). Les problèmes majeurs rencontrés sont associés à la conservation des échantillons et à la fiabilité des analyses.

1.2. Les stations du réseau (données hydrométriques)

Le Niger est équipé de nombreuses stations de surveillance des hauteurs d'eau, et a fait l'objet d'études hydrologiques approfondies par l'ORSTOM : pour la période "historique" (début des observations variable suivant les stations jusqu'à 1980), Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; pour la période récente (1980 à 1997) (Marieu *et al.*, 1997). Les contraintes liées à la gestion des ressources en eau (Office du Niger) et à la navigation fluviale expliquent cette rationalisation d'un réseau hydrométrique qui n'a cessé de s'améliorer depuis 40 ans. Ce réseau participe actuellement au projet HYDRONIGER de l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN) regroupant les états riverains du fleuve.

Les stations d'échantillonnage utilisées pour la présente étude (Tableau 8) ont été choisies de façon à couvrir l'ensemble du bassin du fleuve Niger (Figure 19) et de manière à ce qu'elles soient à proximité d'une échelle limnimétrique étalonnée et relevées quotidiennement par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali (DNHE).

Stations	Biefs
Banankoro (Niger) Koulikoro (Niger) Sélingué (Sankarani)	Niger amont
Ké-Macina (Niger) Douna (Bani) Sofara (Bani)	Entrées delta intérieur du Niger
Kara (Diaka) Tilembeya (Niger)	Séparation Diaka-Niger
Nantaka (Niger) Sensé (Niger)	Confluence Niger-Bani
Akka (Issa Ber) Awoye (Barra Issa) Korientze (Koli-Koli)	Sorties du Lac Débo
Diré (Niger) Korioume (Niger)	Sortie du delta intérieur du Niger

Tableau 8. Positionnement des sites d'observations représentatifs des principaux biefs observés.

L'établissement des flux de matières transportées par les cours d'eau implique nécessairement la connaissance en continu des débits avec précision, particulièrement dans les périodes de crue et de hautes eaux. La précision sur les débits les plus fréquents, c'est à dire en étiage, n'a que très peu d'importance sur celle des flux de matières.

Comme le lit des cours d'eau naturels est en continuel changement et que ses caractéristiques sont susceptibles de changer sensiblement, les relations hauteur-débit établies à un instant donné peuvent devenir rapidement incorrectes. Ceci impose l'exécution continuelle de jaugeages, à défaut de travaux de stabilisation (Jaccon, 1986).

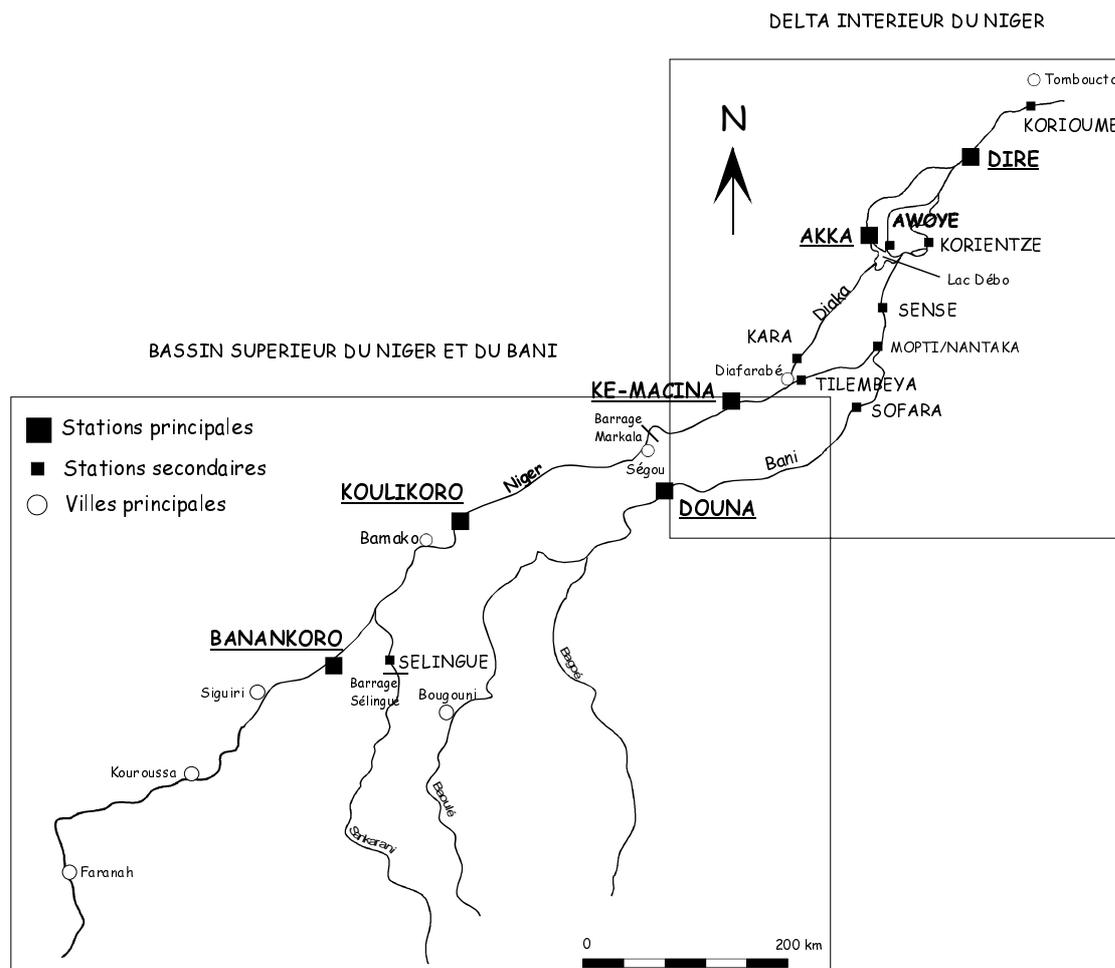


Figure 19. Stations principales et secondaires du réseau de surveillance de la qualité des eaux du fleuve Niger et de son delta intérieur au Mali

1.2.1. Les stations situées sur le Niger amont

Une des stations choisies pour représenter le bassin supérieur du Niger est la **station de Banankoro**. Elle est installée depuis 1967, et se situe à la limite de la frontière Guinéenne ; son bassin de **71000 km²** se situe presque entièrement en Guinée. Le régime hydrologique de Banankoro est

considéré comme naturel. Les échelles limnimétriques se situent en rive gauche, au droit d'un élargissement du fleuve et en amont immédiat d'une île longue de 3,5 km séparant celui-ci en deux bras, dont un seul (celui de rive gauche) est actif en basses eaux. Le lit majeur du Niger à cet endroit fait environ 1 km de large, alors que sa largeur n'est que de 700 m à quelques km en amont. Le lit est par ailleurs encombré de nombreux bancs de sable, visibles en basses eaux, entrecoupés de chenaux formant un réseau de drainage irrégulier. Des débordements peuvent se produire vers la cote 5 m en rive droite et à partir de 7 m en rive gauche. Il semble que les débordements de rive gauche puissent être très importants (Marieu *et al.*, 1997), ce qui n'est pas signalé dans la monographie du Niger (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Ceci peut être important pour l'évolution des concentrations lors de la crue, mais implique aussi que la section de jaugeage utilisée à Banankoro présente des caractéristiques contraires aux critères de pseudo-uniformité habituellement retenus pour le choix d'un site de jaugeage : grande largeur, faible profondeur, vitesses et directions de courant très variables (surtout entre 2 et 4 m de hauteur à l'échelle), débordements en hautes eaux. Dans ces conditions, il est certain que le mode opératoire peut influencer de façon notable le résultat des mesures et en affecter la précision. Des mesures récentes ont permis à Marieu *et al.* (1997) de proposer une nouvelle courbe de tarage pour la station de Banankoro, utilisable pour la période où le régime du Niger est soumis à l'influence du barrage de Sélingué (1982) pourtant situé sur le Sankarani. En effet, les lâchers importants au niveau du barrage induisent une montée du niveau d'eau à la confluence du Sankarani et du Niger pouvant dépasser un mètre. Une élévation importante du niveau de l'eau du Niger à l'aval de Banankoro peut provoquer, malgré la distance (50 km), une diminution de la pente de la ligne d'eau à cette station et par conséquent une réduction du débit (à hauteur d'eau équivalente) par rapport à un régime naturel.

La **station de Koulikoro (120 000 km²)** a été choisie en raison d'une part de sa chronique de hauteurs d'eau ininterrompue depuis 1907, et d'autre part, parce qu'elle se situe après la confluence des eaux du Niger et du Sankarani. Ce dernier est soumis à l'influence du Barrage de Sélingué, cité ci-dessus, en service depuis 1982. Les échelles de Koulikoro se situent dans le port de la ville en rive gauche. Le fleuve est assez large à Koulikoro : 1200 m de lit mineur aux hautes eaux, encombré en son milieu d'un gros banc de sable (sommet à 2,5 m échelle) laissant aux basses eaux deux chenaux, dont le plus profond est en rive gauche le long des quais. Aucun affluent notable du Niger ne se jette à proximité et en aval de la station. La mise en service de la centrale de Sélingué et les mesures effectuées depuis 1982 à Koulikoro, ont conduit à établir un nouveau barème d'étalonnage qui ne diffère du précédent que pour les basses-eaux (Marieu *et al.*, 1997).

Quelques prélèvements à l'aval du barrage de Sélingué sont réalisés depuis 1996 sur le Sankarani, en plus des débits sortants fournis par les données "usine" du barrage de l'Energie Du Mali (EDM, Hydroconsult, 1996).

1.2.2. Les stations représentatives des entrées dans le delta

L'entrée du delta est matérialisée par les stations de **Ké-Macina sur le Niger (141 000 km²)** et **de Douna sur le Bani (102 000 km²)**. Douna a été finalement préférée à Sofara pour représenter les apports du Bani au delta, car des pertes hydriques importantes se produisent après Douna et des

liaisons sont établies entre Niger et Bani au niveau de ce qu'on a appelé la “ mésopotamie ” malienne (région de Djenné).

A Ké-Macina, l'échelle limnimétrique a été installée en 1952 ; elle est régulièrement observée depuis cette date. Elle est située en rive gauche, à environ 70 km à l'aval d'un barrage à hausses mobiles, le barrage de Markala, conçu en 1940 à des fins d'irrigation (Office du Niger). Marieu *et al.* (1997) observent un détarage affectant les basses et moyennes eaux après 1985 (contrairement à Koulikoro ou un détarage en basses-eaux apparaît dès 1982).

Les premières observations limnimétriques du Bani à Douna remontent à 1922. Celles-ci deviennent régulières à partir de 1949 et réellement fiables à partir de 1954. Un pont a été construit, franchissant le Bani juste à l'amont des échelles vers 1969. Sa construction n'a pas nécessité le remaniement de l'échelle. Le lit de la rivière est rectiligne sur 6 km en amont et 2 km en aval de la station entre deux coudes de grand rayon. D'après la carte au 1/200 000, il n'y aurait pas de débordement possibles en rive droite, mais il existe une zone d'inondation en rive gauche (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Aucun affluent notable ne se jette à proximité et en aval de la station. La pente de la ligne d'eau est très faible de l'ordre de 4 cm au km.

Le bon état du limnimètre, qui semble n'avoir subi aucun dommage important depuis 15 ans, laisse augurer d'une bonne qualité des relevés limnimétriques, qui sont effectués avec régularité et sérieux (Marieu *et al.*, 1997). Un total de 62 jaugeages a été effectué depuis 1977 à Douna, bien répartis dans le temps et également en hauteur d'eau observée. Cette station est considérée comme bi-univoque contrairement aux stations cités ci-dessus. Les mesures les plus récentes sont systématiquement en-dessous de la courbe de tarage établie en 1980 et figurant dans la monographie du Niger (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Ce détarage, dont l'origine reste imprécise, a justifié l'établissement d'un nouveau barème d'étalonnage (Marieu *et al.*, 1997).

1.2.3. Les stations du delta intérieur du Niger

La station de **Diré**, est choisie pour représenter la sortie du delta. Celle-ci est opérationnelle depuis 1924. De 1949 à 1980, les observations du niveau d'eau ont été faites au niveau d'une échelle installée dans un bassin d'alimentation d'une ancienne station de pompage (en rive gauche). En 1980, un limnigraphe a été installé dans le canal d'amenée de la nouvelle station de pompage de l'énergie solaire (à 300 m à l'aval de l'ancienne).

Ensuite pour permettre de découper le fonctionnement hydrologique du delta entre les régions aval et amont du lac Débo, des stations intermédiaires ont été prises en compte, dont certaines ont été suivies sur une période relativement plus courte :

- Le premier défluent du Niger est le Diaka, à l'aval de Ké-Macina. Deux stations représentent cette défluence : Kara sur le Diaka permet de suivre les eaux partant vers les plaines du Kotia ; et Tilembeya, qui permet de suivre les eaux demeurant dans le bras majeur du Niger.

- La confluence entre le Bani et le Niger a tout d'abord été représentée par la station de Nantaka-Mopti, puis depuis 1996 par la station de Sensé plus en aval où les eaux sont bien mélangées. Comme il n'y a pas d'échelle dans ce village, les débits utilisés sont ceux de Nantaka. La station de Nantaka est située sur le Niger (en rive gauche et en aval de la confluence Niger-Bani), double celle de Mopti, située à 5 km en amont sur le Bani (en rive droite et à 1800 m de la confluence du Niger et du Bani). Les variations de hauteur d'eau sur les deux stations sont parfaitement synchrones et de même ampleur ce qui prouve, d'après Marieu *et al.* (1997) que l'échelle de Mopti, bien que située sur le Bani, mesure en réalité les fluctuations d'eau du Niger. Ces deux stations constituent bien une seule et même station de mesure des débits du Niger immédiatement après sa confluence avec le Bani, nommée Nantaka-Mopti. L'échelle de Mopti existe depuis 1943 tandis que celle de Nantaka date de 1953. Le service Hydrologique malien a établi un nouvel étalonnage en 1992, validé grâce aux jaugeages réalisés entre 1981 et 1990 à Nantaka.
- Enfin, les trois stations situées sur les trois bras du Niger qui sortent du lac Débo sont, **Akka**, Awoye et Korientze. La station d'observations limnimétriques d'Akka sur l'Issa Ber a été installée pour la première fois en 1955. Le site d'Akka, exutoire principal du Lac Débo, a suscité un intérêt particulier à partir de 1975, où des mesures réalisées par l'ORSTOM ont été entreprises. En 1994, cette station a été remise en service par l'ORSTOM dans le cadre du programme EQUANIS. L'analyse des mesures postérieures à 1985 et plus particulièrement celles réalisées depuis 1994, ont incité Marieu *et al.* (1997) à proposer une nouvelle courbe de tarage, qui est ensuite appliquée à l'ensemble de la chronique d'observations pour le calcul des débits.

Parmi ces stations, seules Mopti-Nantaka, Akka, Diré et Korioumé sont encore en activité en 1999 et ont fait l'objet d'une actualisation des débits (Marius *et al.*, 1997).

Tous les débits utilisés pour les calculs de flux sont issus de ces stations après actualisation des données hydrométriques (actualisation des courbes de tarage).

1.2.4. Distance partielle entre chaque station

Les distances partielles entre chacune de ces stations (Tableau 9) ont été déterminées à l'aide de la couverture photo aérienne au 1/50 000 de la région à partir du point O situé dans le delta maritime du Niger au Nigeria par l'Autorité du Bassin du Niger.

Stations	Distance partielle en km
Banankoro-Koulikoro	172
Koulikoro-Ké-Macina	337
Ké-Macina-Tilembeya	47
Tilembeya-Nantaka	118
Douna-Sofara	247
Sofara-Nantaka	77
Nantaka-Akka	141
Nantaka-Awoye	125
Nantaka-Korientze	135
Akka-Diré	186

Tableau 9. Distance partielle entre stations (km).

1.3. Les mesures de la qualité des eaux

Le programme de surveillance de la qualité physico-chimique des eaux du Niger au Mali comprend les mesures des paramètres (précédemment définis) suivants :

- **MES** ou **Matières En Suspension** (concentrations), ainsi que granulométrie, minéralogie, carbone organique particulaire (mais pas de manière systématique),
- **Substances dissoutes** (ions majeurs, silice dissoute, carbone organique dissous (non systématique) et paramètres associés (conductivité, température, pH).

1.3.1. Historique des mesures

Sur la base de l'expérience acquise sur le bassin du Congo-Zaïre, un suivi régulier des charges en suspension et dissoutes est entamé en juillet 1990 à Banankoro sur le Niger supérieur, à Douna sur le Bani et sur quelques stations du delta. Des mesures de débits solides (**jaugeages complets** par exploration du champ de concentration au sein de la section d'écoulement) ont permis pendant cette période d'analyser la variabilité spatiale des concentrations en MES dans la section de mesure et de les comparer aux autres mesures témoins (prélèvement de surface unique ou autres...). Des prélèvements journaliers en surface et au milieu du fleuve (de 0,9 litre), de juillet à début décembre ont aussi permis de suivre l'évolution temporelle des concentrations en MES.

A partir de 1991, certaines stations sont choisies pour être surveillées **hebdomadairement** et ponctuellement lors des missions de terrains (pendant lesquelles sont réalisés des jaugeages du débit solide). Un **observateur** a été recruté dans chaque village avec pour mission de relever les hauteurs d'eau aux échelles et de prélever un échantillon de 0,9 litre chaque semaine au milieu du fleuve. Seules les stations de Banankoro, Koulikoro et Douna seront surveillées de façon journalière pendant 2 ans de juillet (1990) à décembre (1992). L'échantillon hebdomadaire est pour ces dernières une moyenne de deux prélèvements faits en rive droite et en rive gauche.

Les flacons sont récupérés environ tous les 2-3 mois lors des missions ponctuelles. C'est lors de ces dernières que les jaugeages sont réalisés (avec prélèvement de MES sur une verticale sur deux et sur 3 profondeurs) ainsi que manipulations comme la mesure du COD et des isotopes. Des mesures in-Situ tels que le pH, la conductivité à 20°C et la température, ont souvent été réalisées.

Ce n'est qu'à partir de 1993, suite aux travaux de Gourcy (1994), que l'ensemble des stations a son protocole définitif : le nombre d'échantillons hebdomadaires est passé de 1 prélèvement au milieu à 1, 2 ou 3 selon la largeur de la section du fleuve (elle même fonction de la saison) et l'importance des stations. Les prélèvements se font alors en rive droite, en rive gauche et au milieu pour les stations de Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina, Douna, Akka, Diré ; et au 1/3 de la rive droite et de la rive gauche pour Awoye, Korientze, Nantaka et Sofara. Les concentrations sont alors obtenues en réalisant la moyenne sur les 2 ou 3 mesures. Depuis 1995, les stations de Sofara et de Korientze ne sont plus suivies. Un an plus tard c'est la station d'Awoye qui est abandonnée. Les autres stations sont

toujours suivies à l'heure actuelle et des jaugeages y sont réalisés environ tous les 2 ou 3 mois. Une nouvelle station à Sensé, a été installée en 1996 à l'aval de Mopti pour pouvoir prendre en compte le mélange des eaux du Bani et du Niger.

L'ensemble de ces prélèvements a permis de mesurer les MES, les éléments majeurs... et ainsi de réaliser une banque de données importante, dont il faut vérifier la fiabilité et la représentativité.

	Rivière	Altitudes (cote du zéro) (m)	Surface BV (km ²)	Mise en service	Jaug	Quantité de données Dissous	Quantité de données MES
Banankoro	Niger	329.06	71 000	juillet 1990	70	135	620
Sélingué ⁽¹⁾	Sankarani	325.49	34 200	ponctuelle		20	37
Koulikoro	Niger	290.08	120 000	juin 1991	57	95	590
Ké-Macina	Niger	268.82	141 000	juillet 1990	31	133	362
Douna	Bani	270.71	102 000	juillet 1990	43	130	763
Sensé/Nantaka ⁽²⁾	Niger	260.63	282 000	juillet 1990		15	
Akka	Issa ber	258.36		juillet 1990	15	113	327
Diré	Niger	256.85	340 000	juillet 1990	17	91	319

(1) Les caractéristiques fournies sont relatives au barrage de Sélingué.

(2) Les caractéristiques fournies sont celles de Mopti.

Tableau 10. Caractéristiques des principales stations du Réseau de surveillance périodique des MES et des matières dissoutes (1990-1998). (Nombre de jaugeages de débit solides (Jaug) et nombre d'échantillons analysés (Dissous : analyses chimiques ; MES : Matières en Suspension)).

1.3.2. Mesure des matières en suspension

Les échantillons hebdomadaires (effectués manuellement par des observateurs) ou ponctuels (effectué de manière manuelle ou semi-automatique avec l'utilisation des pompes pour les mesures des débits solides lors des jaugeages) sont apportés au laboratoire de l'ORSTOM à Bamako au retour des missions de terrain. Après mesure des conductivités et des pH au laboratoire, les MES sont recueillies par filtration sur des membranes en acétate de cellulose de 0,2 µm de porosité⁴. L'échantillon est toujours bien mélangé avant la filtration. Les membranes sont passées à l'étuve à une température de 45°C environ pendant 24 heures. Elles sont ensuite placées 20 minutes dans un dessiccateur puis elles sont pesées. La concentration en matières en suspension est obtenue par le rapport entre la différence du poids initial et final du filtre (après passage à l'étuve (24h) et au dessiccateur (20mn)) et le volume d'eau filtrée en litre.

1.3.3. Analyse des éléments majeurs

Les analyses chimiques sont réalisées sur **un ou deux filtrats par mois** suivant la période du cycle hydrologique. L'évolution des éléments chimiques étant régulière, cette fréquence d'analyse est très suffisante.

⁴ De juillet 1990 à avril 1991 le diamètre des pores était de 0,45 µm. Cette année, par ailleurs incomplète, n'a pas été prise en compte dans la suite de cette étude.

Pour les analyses chimiques des éléments majeurs, un volume de 100 ml d'eau filtrée (filtre 0,20 µm) est conservé au laboratoire du centre ORSTOM de Bamako dans des flacons en polyéthylène propres, avant d'être envoyé au centre ORSTOM de Bondy (France) où ils seront analysés (laboratoire des formations superficielles). Avant et pendant leur envoi, les flacons sont conservés à l'abri de la lumière.

Entre 1990 et janvier 1997, l'analyse du SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^- est faite par chromatographie ionique sur un appareil Dionex 2010i équipé d'une colonne AS4A. La limite de détection est de 0,5 mg.l⁻¹. L'analyse des cations majeurs est réalisée sur un appareil de type Philips PU9000 ; Ca^{2+} et Mg^{2+} sont analysés par absorption atomique et Na^+ , K^+ par émission de flamme. La limite de détection est de 0,001 mg.l⁻¹. La silice est mesurée par spectrométrie d'émission atomique à plasma induit par haute fréquence (ICP-AES) à la longueur d'onde de 288,158 nm. L'appareil utilisé est le Liberty 200 (Varian) dont les conditions de fonctionnement sont les suivantes : gaz plasma (Argon) 12 l.mn⁻¹, gaz auxiliaire (Argon) 2,25 l.mn⁻¹. L'erreur d'analyse a été estimée à 5%. L'alcalinité est mesurée par titration d'un acide fort (HCl). Depuis janvier 1997, le laboratoire de Bondy s'est équipé d'un nouvel appareil Dionex DX 120, qui permet de réaliser l'ensemble des analyses de cations et d'anions par chromatographie ionique, ce qui a amélioré la justesse des analyses. Les limites de quantification sont pour Ca : 0,1 mg.l⁻¹ ; Mg : 0,05 mg.l⁻¹ ; K 0,025 mg.l⁻¹ ; Na 0,05 mg.l⁻¹ ; NH_4^+ : 0,05 mg.l⁻¹ ; anions 0,05 mg.l⁻¹.

Les valeurs de pH et de conductivité à 20°C sont également déterminées par ce laboratoire. Pour normaliser la conductivité à 25°C, nous avons multiplié l'ensemble des valeurs par un coefficient correcteur de 1,116 (Rodier, 1996).

1.4. Critique des données

1.4.1. Les éléments majeurs

Les concentrations en éléments dissous mesurées dans des sections suffisamment en aval des confluences ne présentent pas, a priori, de différences significatives suivant les différentes verticales et profondeurs. Un échantillon ponctuel, pris au milieu de la rivière peut être considéré comme représentatif de la moyenne sur la section (Meybeck *et al.*, 1996 a,b). Le contrôle des résultats de l'analyse de l'eau par la méthode de la balance ionique a été réalisé sur l'ensemble des échantillons.

1.4.1.1. Les effets de stockage, conservation des échantillons

Le problème de conservation des échantillons se pose pour les échantillons hebdomadaires qui serviront à l'analyse des éléments majeurs dans l'eau et pour les échantillons ponctuels même s'ils sont plus rapidement ramenés à Bamako. En effet, les paramètres pouvant conditionner l'évolution de la composition chimique des échantillons sont multiples et se situent à plusieurs niveaux au cours du transport ("voyage") de l'échantillon entre le prélèvement et le laboratoire d'analyse :

- périodicité longue des missions de terrain (tous les deux ou trois mois) et/ou accès difficile aux stations (Diré est à 5 jours de route en basses eaux et à 2 semaines en hautes eaux) qui implique un temps de stockage des échantillons long de plusieurs semaines voire plusieurs mois chez l'observateur,
- aucun moyen de conserver les échantillons au froid sur les sites de prélèvement ce qui implique un stockage dans des abris soumis aux fluctuations de températures extérieures et aux rongeurs⁵,
- quantité de filtration à faire au laboratoire importante qui dépasse la capacité de filtration des rampes de filtration du laboratoire... (v. remarque ci-dessous)
- délai d'attente avant l'envoi en France pour l'analyse (Mali),
- délai et reproductibilité des analyses au LFS de Bondy (France). En 1995, le changement d'appareillage au laboratoire de Bondy s'est traduit par le fait que des échantillons prélevés en 1995 n'ont pu être analysés qu'en 1997.

Remarque : La capacité de filtration de la cellule physico-chimique de l'ORSTOM à Bamako est de 80 échantillons par semaine pour les prélèvements de septembre à avril, peu chargés. Pour les prélèvements chargés de mai à août, la quantité d'échantillons filtrés peut descendre jusqu'à 30 à 50 par semaine. Depuis 1994, plus de 10 000 échantillons ont été filtrés, avec un délai entre le prélèvement et l'analyse pouvant atteindre 6 mois pour les stations les plus éloignées (pour un échantillon prélevé à Akka en février, il n'arrivera à Bamako qu'en mai et pourra être filtré en juin ou juillet).

(a) Effets des délais de filtration sur la composition chimique des échantillons.

Une première comparaison entre deux prélèvements faits à Diré lors de la campagne de mars 1992 (le premier échantillon a été filtré dans les 15 jours après le retour de la mission et le double a été filtré **un an plus tard**) a montré que les écart-types calculés pour les éléments dissous étaient grands ; seuls les bicarbonates et le potassium avaient peu évolué (Gourcy, 1994). Les chlorures, le sulfate et la silice avaient fortement varié, avec des coefficients de variation de 35%. Une deuxième analyse plus fine en utilisant trois périodes de délais entre le prélèvement et la filtration (le jour même, 10 jours après et 60 jours après) a montré que l'altération de la qualité chimique des eaux n'est pas très importante si le stockage avant la filtration est inférieur à deux mois, excepté pour les chlorures qui apparaissent très instables quel que soit le délai de filtration. Au delà de cette période, les éléments qui évoluent le plus sont les cations sodium, potassium.

En 1996 et 1997, des comparaisons entre prélèvements effectués le même jour mais ramenés et filtrés à quelques mois d'intervalle à Bamako, ont pourtant montré des différences de concentrations inférieures à 10% pour les chlorures. Ce qui reste acceptable.

(b) Effets des délais d'analyse sur la composition chimique des échantillons.

Deux échantillons d'eau prélevés à Douna à une semaine d'intervalle, filtrés le même jour et analysés à **deux mois d'intervalles** ont permis d'étudier l'influence du délai d'analyse sur les

⁵ De nombreuses bouteilles sont rongées, et vidées de leur contenu par les rongeurs. On a même retrouvé un rat noyé dans une bouteille!

concentrations en éléments dissous (Gourcy, 1994). Les coefficients de variations sont faibles pour la quasi totalité des éléments exceptés pour les chlorures. En l'espace de deux mois, les teneurs en chlorures ont augmenté ou diminué selon l'échantillon ce qui permet de dire que l'écart des concentrations n'est pas dû à une évolution des chlorures de l'eau filtrée avant l'analyse.

1.4.1.2. Critique des résultats analytiques - contrôle des résultats de l'analyse de l'eau

Il n'existe pas de recette absolue pour la vérification des résultats analytiques. La méthode la plus satisfaisante est celle de l'établissement de la balance ionique qui doit être théoriquement nulle ; elle peut être recoupée par la mesure de la conductivité.

(a) Méthode de la balance ionique

La méthode de la balance ionique est basée sur le contrôle des quatre anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) et des quatre cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+). En théorie, et pour un pH voisin de 7, la somme des anions exprimée en concentration de milliéquivalents doit correspondre exactement à la somme des cations exprimée de la même manière. En pratique, il existe presque toujours un écart entre ces deux chiffres. Différentes causes peuvent être impliquées : erreur sur l'alcalinité (pour les eaux non ou mal tamponnées), limite de détection de certains ions (sulfates), présences d'anions organiques, omission d'anions dans les eaux diluées (Meybeck, 1984). La précision de la balance ionique (Er) se calcule selon la formule suivante :

$$Er(\%) = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 200$$

$Er(\%)$: erreur relative sur le bilan ionique en pourcentage
 $\Sigma \text{cations}$: somme des cations en $\text{m} \cdot \text{eq} \cdot \text{l}^{-1}$
 Σanions : somme des anions en $\text{m} \cdot \text{eq} \cdot \text{l}^{-1}$

Le taux couramment admis est de 5%. **L'erreur admise pour des eaux de faibles concentrations comme celle du Niger peut être prise inférieure à 10%** (Orange, 1992 ; Gourcy, 1994).

Le Tableau 11 présente la distribution de Er sur l'ensemble des analyses, classées par station. Sur l'ensemble des stations, pour 732 analyses chimiques d'eau du fleuve, 133 dépassent la marge d'erreur acceptable de 10%. Près de 77% des analyses ont un excédent en anions.

Station	Nombre échantillons	$ Er < 5\%$	$5\% < Er < 10\%$	$10\% < Er $	Er-	Er+	Er \approx 0
Banankoro (Niger)	135	77	51	7	96	33	6
Koulikoro (Niger)	95	48	20	27	85	9	1
Sélingué (SankaraniI)	20	10	10	0	20	0	0
Ké-Macina (Niger)	133	55	48	30	109	22	2
Diouna (BaniI)	130	59	20	51	112	18	0
Sensé (Niger)	15	9	6	0	15	0	0
Akka (Issa Ber)	113	78	31	4	69	44	0
Diré (Niger)	91	52	25	14	57	33	0
TOTAL	732	388	211	133	563	159	9
		53%	29%	18%	77%	22%	2%

Tableau 11. Analyse des résultats analytiques obtenus pour les échantillons du réseau d'observation des éléments majeurs dissous.

Parmi les analyses, il y a une série qui comprend plusieurs années et/ou stations, où l'erreur est inférieure à -30%. Celle-ci correspond à des valeurs de l'alcalinité visiblement trop importantes. Pour ces analyses, nous avons gardé telles quelles les valeurs des autres ions et de la silice, et calculé la quantité de HCO_3^- à partir de concentrations en cations (en meq.l^{-1}) de façon à obtenir une balance ionique équilibrée. En revanche, toutes les autres analyses associées à des erreurs strictement supérieures à 10% ont été éliminées.

(b) *Relation minéralisation - conductivité*

Nous avons déjà évoqué que pour une famille d'eau donnée, la conductivité électrique (en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 25°C) est un bon indicateur de la minéralisation de l'eau et peut être reliée par une fonction linéaire à la charge ionique (exprimée en mg.l^{-1}). Une très bonne relation a été établie pour les eaux du Niger à partir de l'ensemble des années (de 1991 à 1997) et des stations (Figure 20). Les couples de points ne vérifiant pas cette tendance sont considérés comme suspects.

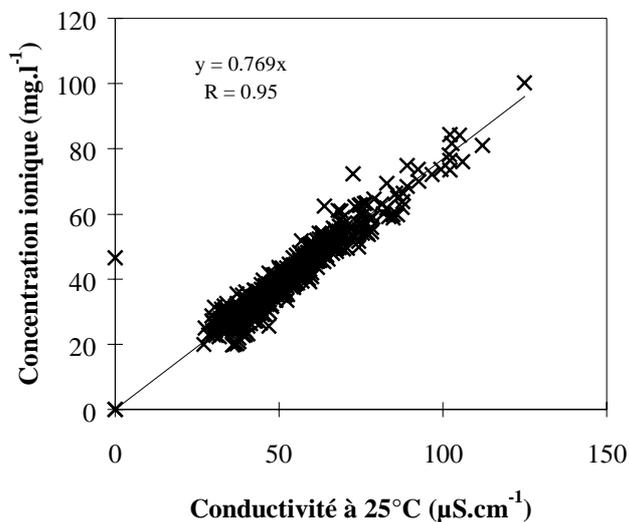


Figure 20. Relation entre la conductivité électrique et la charge ionique des eaux du Niger (N= 559 échantillons).

Finalement, il semble que la fiabilité des valeurs pour les éléments majeurs repose essentiellement sur les **délais d'analyse**. Une collaboration avec un laboratoire d'analyse malien permettrait sans doute de diminuer le temps de stockage des échantillons. Il n'en reste pas moins que les conditions de "terrain" sont difficiles...

1.4.2. Les matières en suspension

La nécessité de mettre en place un échantillonnage aux stations du réseau d'observation des flux de matière au Mali est à l'origine d'une réflexion sur la variabilité temporelle et spatiale des teneurs en matière dissoute et particulaire du fleuve Niger dans une section du fleuve. En effet, si la mesure (filtration, séchage, pesée) d'un volume d'eau prélevé ne pose pas trop de problèmes, l'établissement des bilans de matière solide transportée pose deux contraintes essentielles qui font de la surveillance des MES une étude lourde et coûteuse :

- **la représentativité de la section mouillée** (verticale et horizontale). On admet, trop fréquemment que la concentration est uniforme au sein d'une section d'écoulement à un instant donné (Hubert, 1988). De nombreuses études, dont celles réalisées par l'ORSTOM en Afrique, ont en effet montré que les concentrations en matières en suspension se distribuent dans la section de jaugeage de façon non uniforme et avaient notamment généralement tendance à augmenter avec la profondeur (Colombani, 1967 ; Billon, 1968 ; Nouvelot, 1972 ; Molinier, 1979 ; Moukolo *et al.*, 1990). Cette tendance est faible pour les éléments de la classe granulométrique des argiles ($\varnothing < 4 \mu\text{m}$) et des sablons ($4 < \varnothing < 63 \mu\text{m}$) contrairement aux sables très fins à grossiers qui présentent une augmentation marquée près du fond où ils sont généralement transportés par saltation. Des variations latérales et verticales très importantes peuvent être également observées en aval des grandes confluences (e.g. confluence des eaux noires du Rio Guaporé-Itenez et des eaux blanches du Rio Mamoré ; Guyot, 1993) et dans les parties fluviales de faibles pentes.
- **la variabilité des concentrations dans le temps**, et la faible capacité du programme d'échantillonnage à caractériser celle-ci... C'est l'un des plus importants problèmes associés à l'acquisition de données fiables sur les charges transportées par les rivières. On fait trop souvent l'hypothèse que l'échantillonnage rare (typiquement associé aux programmes de contrôle de la qualité des eaux) est suffisant pour réaliser de bonnes estimations des flux de MES (Walling *et al.*, 1992 ; Meybeck *et al.*, 1996 a,b,c).

Ces deux thèmes seront développés dans les deux paragraphes suivants.

Remarque : Le mode de prélèvement et les manipulations de laboratoire sont des sources d'erreurs assez bien connues (Nouvelot, 1972 ; Nouvelot, 1996). Le volume d'eau échantillonné de 0,9 litre semble trop faible, essentiellement en période de décrue où les concentrations rencontrées sont en générale inférieures à 20 mg.l^{-1} . Il est certain que la filtration de plusieurs litres, voire décalitres comme sur le Djoué au Congo (Laraque *et al.*, 1994) ou du Sénégal à Bakel (Orange, 1992) permettrait de minimiser les erreurs de manipulation au laboratoire et sur le terrain, mais cela serait trop coûteux en temps étant donné le nombre de stations du réseau !

1.4.2.1. Variabilité des concentrations en MES dans la section

Les mesures de débits solides étant longues et coûteuses, il a été nécessaire de réduire le nombre de points à 3 échantillons de surfaces pour les prélèvements hebdomadaires du réseau d'observation de flux de matière (§ 1.3.1). L'étude des différents jaugeages réalisés de 1990 à 1996 (233 jaugeages) sur les différentes stations du réseau de Banankoro à Diré (Tableau 12), permettent d'évaluer l'erreur commise en simplifiant les mesures et d'appréhender la variabilité verticale et horizontale de la section de mesure.

La moyenne arithmétique des n valeurs de mesures sur les p verticales est très peu différente de la valeur de MES dans la section de jaugeage (Nouvelot, 1972 ; Gourcy, 1994). Cette valeur facilement accessible peut être alors comparée à la moyenne de 3 échantillons de surfaces (pris au milieu, en rive droite et en rive gauche).

(a) Variabilité dans la section

Sur l'ensemble des jaugeages et pour toutes les stations, la variabilité d'un point à un autre peut être très grande. Les coefficients de variations (rapport entre écart type et moyenne sur les différents prélèvements du jaugeage, exprimé en %) varient de 5 % à plus de 170 %. Seules les stations de Douna et de Diré présentent des coefficients de variation faibles (Tableau 12).

	Nombre de jaugeage	Médiane %	Min. % - Max. %	Quartile 25% - Quartile 75%
Banankoro	70	25	5 - 100	17 - 36
Koulikoro	57	25	8 - 170	18 - 42
Ké-Macina	30	33	8 - 173	22 - 37
Douna	43	15	4 - 90	10 - 26
Akka	13	33	14 - 50	29 - 40
Diré	16	17	7 - 100	14 - 35

Tableau 12. Distributions des Coefficients de variation des concentrations en MES dans la section de jaugeage pour les différentes stations du réseau d'observation de 1990 à 1997.

La tendance générale observée montre une décroissance des coefficients de variation avec l'augmentation de la concentration moyenne en MES dans la section (Figure 21). Les coefficients de variation importants lors des faibles concentrations peuvent être notamment dus à :

- de très faibles concentrations pour lesquelles l'imprécision de la mesure est grande (étant donné le volume d'eau filtrée trop faible) ;
- une agitation insuffisante des échantillons avant la filtration, induisant un tri granulométrique des matières présentes ;
- la faible tranche d'eau (maximum de 1 m) lors des jaugeages effectués en étiage, qui peut expliquer des écarts importants entre les deux rives ou sur une même verticale (passage à guet, chercheur d'or artisanal, lessive...).

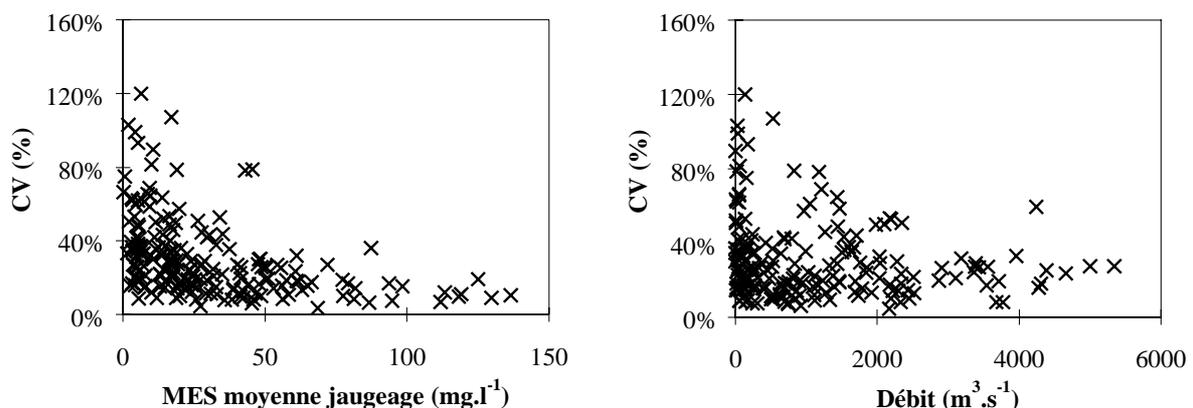


Figure 21. Evolution des coefficients de variation par rapport aux débits et aux concentrations moyennes obtenues lors des jaugeages (sur 209 jaugeages de 1990 à 1996) sur les stations principales (Banankoro, Koulikoro, Douna, Akka, Diré).

Au contraire, les faibles coefficients de variation rencontrés lors des fortes concentrations sont associés à des débits également importants pour les stations amont : en période de hautes eaux et donc de crue, l'amplitude et la valeur des coefficients de variation sont plus faibles (Figure 21). Ceci est en partie dû à un meilleur mélange des eaux lors de la crue. Mais même pour les débits élevés les coefficients de variation avoisinent 20 à 30 % excepté pour la station de Douna où ils tombent à 10 %.

Profil vertical

Cette variabilité s'explique en partie par une augmentation des concentrations vers le fond : les variations sur une même verticale s'expliquent pour 60 % des valeurs ponctuelles par des concentrations de fond supérieures aux concentrations de surface. La variabilité verticale s'explique aussi (10 % des cas) par des valeurs anormalement élevées en surface près d'une ou des rives. Il reste toutefois des variations de concentrations sur une même verticale, inexplicables. Il n'y a donc pas d'augmentation systématique vers le fond. Les vitesses ponctuelles relevées au fond ne sont pas élevées ($0,4 \text{ m.s}^{-1}$), ce qui explique l'absence de remous de fond et la faiblesse du transport par charriage (Nouvelot, 1969). De plus, la granulométrie des matériaux transportés, essentiellement des particules inférieure à $50\mu\text{m}$ (fraction silto-argileuse), ne permet pas a priori une distribution marquée des concentrations sur un profil vertical. **Le transport de fond peut ainsi être considéré comme faible.**

Profil transversal et mesure des MES moyennes

Les variations latérales semblent presque toujours supérieures ou au moins égales aux variations verticales même si ce n'est pas systématique. L'effet de bord est parfois important : près des rives les concentrations ont tendance à être plus fortes. Le phénomène est plus important en surface qu'en profondeur où les concentrations sont plus uniformes. Il est par ailleurs très marqué en période de montée des eaux ce qui s'explique sans doute par les phénomènes d'érosion des berges (permis par des vitesses plus importantes) et les reprises des laissées de crues.

Choix des verticales

Etant donnée la variabilité des concentrations dans la section, et vu l'absence d'une évolution systématique des concentrations dans le profil des verticales, il semble effectivement intéressant, pour évaluer la concentration moyenne au sein de la section d'écoulement, de multiplier les verticales plutôt que le nombre de points par verticales.

A partir des nombreux jaugeages présentés ci-dessus, nous avons testé la représentativité d'un échantillon prélevé au milieu et en surface, ou sur 3 points de surface (suivant les stations), par rapport à la moyenne de MES de la section (exemple Figure 22). Quelle que soit la station, des relations satisfaisantes entre la moyenne des concentrations réalisée avec les 3 échantillons prélevés en surface et la concentration moyenne issue du jaugeage ont été obtenues. Ceci permet de confirmer que le nombre de mesures de MES sur la section mouillée pour les prélèvements de routine est correct. Aucun facteur correctif n'a donc par la suite été utilisé, car l'erreur reste faible par rapport à l'erreur de mesure.

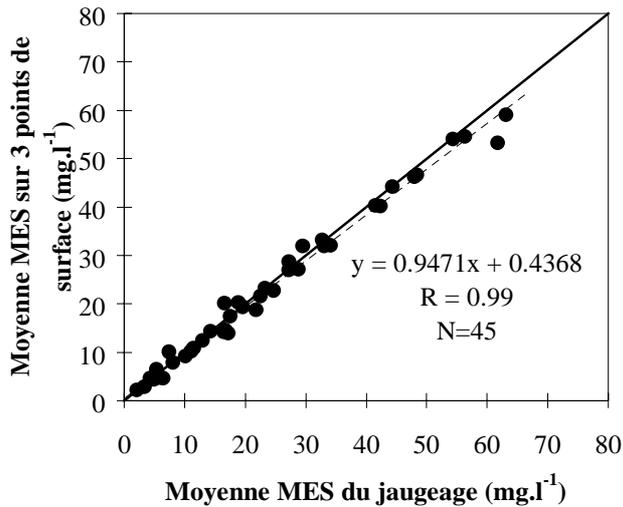


Figure 22. Relation entre la moyenne des échantillons de surfaces et la moyenne du jaugeage.

Si les prélèvements de l'observateur sont réellement faits sur les 3 verticales (rive droite, milieu et rive gauche) à environ 30-40 cm de profondeur et si l'on détermine la concentration moyenne dans la section d'écoulement en effectuant une moyenne arithmétique simple des trois valeurs précédentes, alors le prélèvement hebdomadaire moyen est assez bien représentatif de la section mouillée. De plus, ces 3 points permettent de contrôler s'il y a une erreur de mesure, ou si le prélèvement a été pris trop au bord. Les valeurs trop fortes ou même trop faibles sont alors éliminées.

1.4.2.2. Représentativité temporelle des concentrations

Des mesures journalières de MES (au milieu de la section du cours d'eau) ont été réalisées en 1991 sur les stations de Banankoro et Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani en période de hautes-eaux. Les plus faibles concentrations rencontrées en période d'étiage ne sont donc pas prises en compte. Ces mesures permettent de suivre la variabilité journalière des concentrations et de vérifier le choix d'une fréquence hebdomadaire pour les mesures de routine.

Pour les 3 stations, les variations au cours de la crue sont importantes : par exemple le coefficient de variation est de 70% à la station de Banankoro. A cette même station, les concentrations se distribuent en cloche de manière dissymétrique (Figure 23) : 60% des concentrations sont inférieures à 20 mg.l⁻¹ et 95 % sont inférieures à 50 mg.l⁻¹. Les concentrations supérieures à 50 mg.l⁻¹. ne se produisent que très rarement (5% du temps, soit 14 jours sur 302) et uniquement pendant le mois de juillet et août, au début de la montée de la crue. Le même type de distribution s'observe sur les deux autres stations.

En terme de flux, plus de 80 à 90% du flux total est transporté pendant les 3 mois d'août à octobre (soit la moitié des mois de hautes eaux). Ceci est très différent de certaines rivières pour lesquelles 90% de la charge totale est transportée pendant environ 5% du temps (Walling *et al.*, 1992). Ces résultats sont liés à la nature du régime hydrologique du Niger caractérisé par une crue annuelle

qui à Banankoro commence en juin pour finir en décembre et janvier (Olivry *et al.*, 1995a). Nous étudierons plus amplement les caractéristiques des flux de MES dans les chapitres IV et VIII.

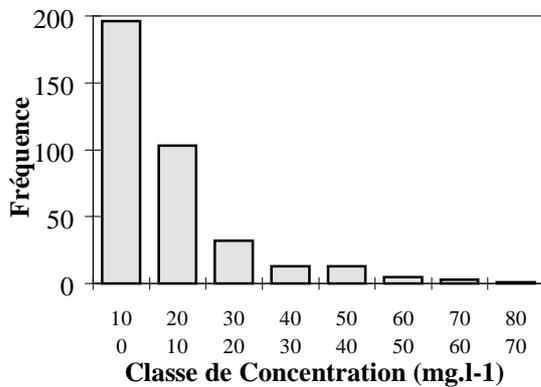


Figure 23. Distribution des concentrations journalières en hautes eaux à Banankoro (1990 et 1991)

Les variations de MES d'une semaine à l'autre peuvent être importantes et ne correspondent pas forcément à une augmentation de débit. Le jour où sera effectué le prélèvement va donc jouer sur les quantités de flux calculées par la suite : suivant les cas, on va, soit éliminer un fait extrême, soit mettre en relief un événement mineur. La Figure 24 compare à titre d'exemple, pour la station de Banankoro et sur l'année 1991, la série d'échantillonnage journalière et une série hebdomadaire prise au hasard.

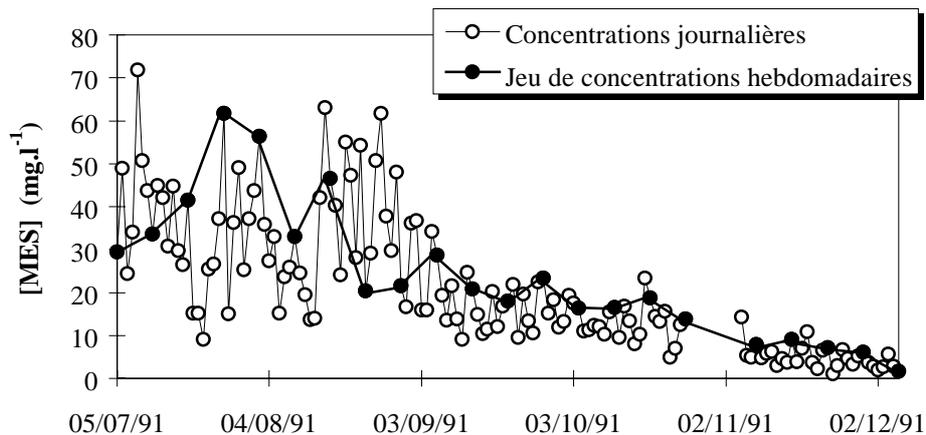


Figure 24. Comparaison entre l'échantillonnage des concentration en MES journalière et un jeu de concentrations hebdomadaires (une concentration prise tous les 7 jours). pour la station de Banankoro, sur l'année 1991.

Etant donnée la taille du bassin versant (de 71 000 km² à Banankoro, à 340 000 km² à Diré) et le régime hydrologique (crue annuelle unique), l'échantillonnage actuel semble être adéquat (en faisant l'hypothèse que cette mesure est représentative de la concentration moyenne en MES dans la section), et donne une information avec un niveau de détail et de précision suffisant et avec un coût non prohibitif. Les jaugeages lors de la montée de la crue sont dès lors très importants, car ils permettent d'avoir une valeur plus proche de la réalité et doivent absolument être poursuivis.

1.5. Méthode de calcul des flux

Plusieurs techniques de calculs sont traditionnellement utilisées pour calculer les flux annuels transportés dans les cours d'eau (Dickinson, 1981 ; Walling & Webb, 1981 ; Balland, 1983 ; Meybeck *et al.*, 1996 a,b). Elles sont toutes basées sur des séries de mesures à la fois du débit et des concentrations relatives à des cycles annuels complets et sur l'équation simple :

$$F = \sum_{i=1} F_i = \sum_{i=1} C_i Q_i \Delta t$$

où F_i et F sont respectivement le flux solide transitant dans le cours d'eau pendant la $i^{\text{ème}}$ unité de temps de durée Δt (Δt = jour, semaine, mois...) et où C_i et Q_i sont respectivement la concentration moyenne et le débit moyen observés pendant la $i^{\text{ème}}$ unité de temps.

Pour être précis ce calcul nécessite, a priori, sur la période de temps considérée de disposer du plus grand nombre possible de couples d'observations simultanées (C;Q). Or, si les débits sont généralement disponibles au pas de temps journalier, ce n'est généralement plus le cas des mesures des concentrations (MES, éléments dissous), qui sont moins fréquentes (hebdomadaires, mensuelles, ou ponctuelles correspondant à des épisodes de crue). Il est donc nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses pour calculer le flux transporté dans le cours d'eau d'un élément considéré (par exemple, hypothèse d'une concentration constante entre deux prélèvements). Les différentes méthodes utilisées dans la littérature ont été recensées par Walling & Webb (1981) puis plus récemment par Meybeck *et al.* (1996 a,b). Brièvement, on peut séparer les méthodes basées sur les relations entre concentrations et débits, "rating curve" des anglo-saxons, (qui permettent d'extrapoler les concentrations dans l'équation simple ci-dessus à partir des débits⁶), des méthodes basées sur une interpolation des valeurs de flux ou de concentrations entre deux mesures.

De nombreuses études (Dickinson, 1981 ; Walling & Webb, 1981 ; Hubert *et al.*, 1988 ; De Vries & Klavers, 1994 ; Meybeck *et al.*, 1996b ; Veyssy, 1998) ont étudié l'influence de diverses méthodes de calcul et de plusieurs fréquences d'échantillonnage sur l'exactitude et la précision des estimations des charges annuelles de MES ou des éléments dissous. Il en ressort qu'il n'y a pas de méthode universelle et que la procédure de calcul de flux d'un élément considéré, doit être choisie en fonction de différents critères, dont la fréquence de l'échantillonnage et les relations entre débits et concentrations pour cet élément.

Dans notre étude, le débit du fleuve est suivi en continu de manière journalière, les séries de concentrations en MES sont plus ou moins hebdomadaires (il existe des lacunes) et les séries de concentrations pour les éléments dissous sont bimensuelles. Des prélèvements ponctuels effectués lors des jaugeages ou des missions de terrains enrichissent cette base de données et le pas de temps entre deux mesures est donc irrégulier. Comme aucune relation simple n'a été établie entre le débit du fleuve et les concentrations en MES, mais aussi en éléments dissous (chapitre IV et VI), la méthode utilisant

⁶ Il est classique d'ajuster aux relations concentrations/débits des équations de la forme $C=aQ^b$ que l'on représente en échelle log-log où elle devient linéaire : $\log C= A + b \log Q$. Ce type de régressions par la méthode des moindres carrés présente l'inconvénient de sous estimer systématiquement les flux réels (Ferguson, 1986).

les relations concentration en MES et Débit ne peut être appliquée. Afin d'établir des bilans mensuels et annuels de flux de MES et d'éléments majeurs, plusieurs méthodes de calculs par interpolation ont alors été testées :

- **Utilisation d'une concentration moyenne sur l'intervalle d'étude.** Cette concentration moyenne est obtenue à partir des concentrations mesurées pondérées par les débits mesurés. Le flux exporté pendant l'intervalle de temps Δt est obtenu en multipliant la concentration moyenne par le débit moyen sur ce même intervalle. Cette méthode n'a été appliquée que pour les flux dissous. Elle ne permet pas d'interpolation pour les mois où il y a très peu de mesures et n'a donc pas été choisie.
- **Reconstitution des concentrations journalières manquantes à partir des concentrations journalières et des débits connus.** L'ensemble des concentrations reconstituées est ensuite utilisé pour la détermination des flux journaliers. Les concentrations moyennes mensuelles ou annuelles sont ensuite obtenues par le quotient du flux moyen par le volume moyen sur l'intervalle d'étude. Cette méthode est intéressante, car elle prend en compte la variabilité des débits journaliers qui est beaucoup plus importante que celle des concentrations. Deux façons de reconstituer les concentrations journalières ont été testées :
 - ◇ la première considère que les concentrations sont constantes entre deux mesures et égales à $(C_i + C_{i+1})/2$. Cette méthode présente l'inconvénient pour le calcul des flux mensuels d'amplifier les effets de bordures à la fin du mois et de créer un biais lorsqu'on recalcule les concentrations moyennes mensuelles à partir de ces flux et des débits moyens mensuels.
 - ◇ la seconde consiste à effectuer une interpolation linéaire des concentrations entre deux mesures connues. elle peut conduire à des surestimations pour les MES lorsqu'elles présentent des corrélations positives avec le débit (Meybeck *et al.*, 1996b). Elle reste assez conseillée pour les MES lorsque la méthode par "rating curve" n'est pas applicable (Tonderski *et al.*, 1995, Meybeck *et al.*, 1996b).

Ces 3 méthodes donnent des résultats similaires : pour les flux annuels la différence est inférieure à 5%. En revanche, il peut y avoir des écarts importants pour les flux mensuels pour les mois où il y a très peu de mesures. Le choix de la procédure s'est porté sur la dernière méthode pour le calcul des flux de MES et d'éléments dissous, car elle limite les effets de bordure rencontrés en général au début de la crue lorsqu'une brusque augmentation de débit se produit juste avant la fin du mois.

2. ACQUISITION DE DONNEES ANALYTIQUES COMPLEMENTAIRES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE

De 1996 à 1997, dans le souci de répondre aux préoccupations locales et d'établir un premier diagnostic de la pollution chimique des eaux du fleuve Niger au Mali, des séries de prélèvements ponctuels pour l'analyse des nutriments et des éléments traces dans l'eau ont été réalisées aux stations principales du fleuve amont et dans la cuvette lacustre (Banankoro, Koulikoro, Sélingué, Ké-Macina, Douna, Sensé, Akka, et Diré).

Ces prélèvements ont été poursuivis sur presque deux cycles hydrologiques (1996-1997 et 1997-1998) dans le but d'étudier la chimie du Niger. La contribution atmosphérique pour ces fleuves peu chargés pouvant être importante, les pluies ont également été échantillonnées à l'est de Bamako afin de déterminer les apports atmosphériques en éléments majeurs et en traces (uniquement sur l'année 1997).

Ce suivi sur l'ensemble du bassin versant du Niger y compris dans le delta intérieur au Mali constitue une première dans cette sous-région d'Afrique.

2.1. Collection des échantillons - Protocole d'échantillonnage et de filtration.

On a vu que la source principale de non-représentativité d'un échantillon réside moins dans les erreurs analytiques que dans l'évolution de la concentration après le prélèvement, ceci va être d'autant plus vrai pour les éléments et les nutriments. Si les contaminations peuvent être minimisées, le maintien de l'intégrité de l'échantillon dépend du choix du récipient et de son mode de conservation entre le prélèvement et l'analyse. L'unanimité n'est pas faite sur la technique à adopter pour une conservation parfaite des échantillons, mais il existe trois techniques classiques plus ou moins adaptés suivant les paramètres mesurés : l'ajout de réactifs bactéricides (Chloroforme, sels mercuriques, thymol), l'acidification ($\text{pH} < 2$) et la filtration. Cependant toute addition de réactifs chimiques aux échantillons risque d'entraîner des contaminations plus importantes que les évolutions qu'ils sont censés inhiber, et de créer des interférences suivant les méthodes de dosages. Il est communément admis que la méthode unique, la plus simple et la plus efficace pour la conservation est la congélation de l'eau vers -20°C à -30°C , aussitôt après le prélèvement.

Cette procédure draconienne est difficilement conciliable avec les impératifs logistiques de certaines études sur des fleuves tropicaux africains, comme le Niger amont et son delta intérieur au Mali, où la conservation des échantillons est un problème majeur. Les stations sont la plupart du temps loin de la capitale du pays où l'on trouve les infrastructures nécessaires, elles sont de plus éloignées les

unes des autres et/ou difficilement accessibles, impliquant des temps de stockage assez long (paragraphe précédent). Les moyens de réfrigération sont limités ou inexistants, problème aggravé par des températures extérieures élevées, et il est souvent nécessaire d'envoyer les échantillons dans des laboratoires d'analyse en France... Ajouté à cela, on y trouve des eaux très peu chargées. Il s'agissait donc de définir une procédure adéquate pour les prélèvements ponctuels, simple et efficace avec le minimum de moyens, sachant que la congélation des échantillons n'est pas possible.

2.1.1. Prélèvements dans les eaux de surface

Les prélèvements ainsi que des mesures In-Situ ont été réalisés au milieu du fleuve et à environ 40 cm de profondeur à partir d'une pinasse en bois (pirogue). Pour les traces, les deux prélèvements (total et dissous) se font dans des bouteilles en polypropylène de 250 ml préalablement lavées à l'acide ultra pur (5%) et rincées à l'eau milliQ et enfin rincées 3 fois avec l'échantillon lors du prélèvement. Pour le carbone organique, il se fait dans des bouteilles en plastique de 0,9 litre lavées à l'eau acidifiée. Enfin, une bouteille d'un litre permettra de doser les MES et les éléments majeurs (dissous uniquement).

Pour limiter l'évolution de l'échantillon du prélèvement à l'analyse pour les dosages dans la phase dissoute, la filtration des échantillons est réalisée sur la rive, immédiatement après le prélèvement (une comparaison entre des échantillons filtrés sur place et filtrés 6 mois après au laboratoire ont montré une nette évolution des concentrations). Deux types de filtration sous pression sont menées en parallèle : la filtration de 250 ml d'eau du fleuve permettra d'obtenir les concentrations en éléments traces dans la phase dissoute et la filtration de 200 à 600 ml d'eau, pour le carbone organique. La procédure d'échantillonnage des eaux du fleuve Niger et du Bani est présentée schématiquement dans la Figure 25 .

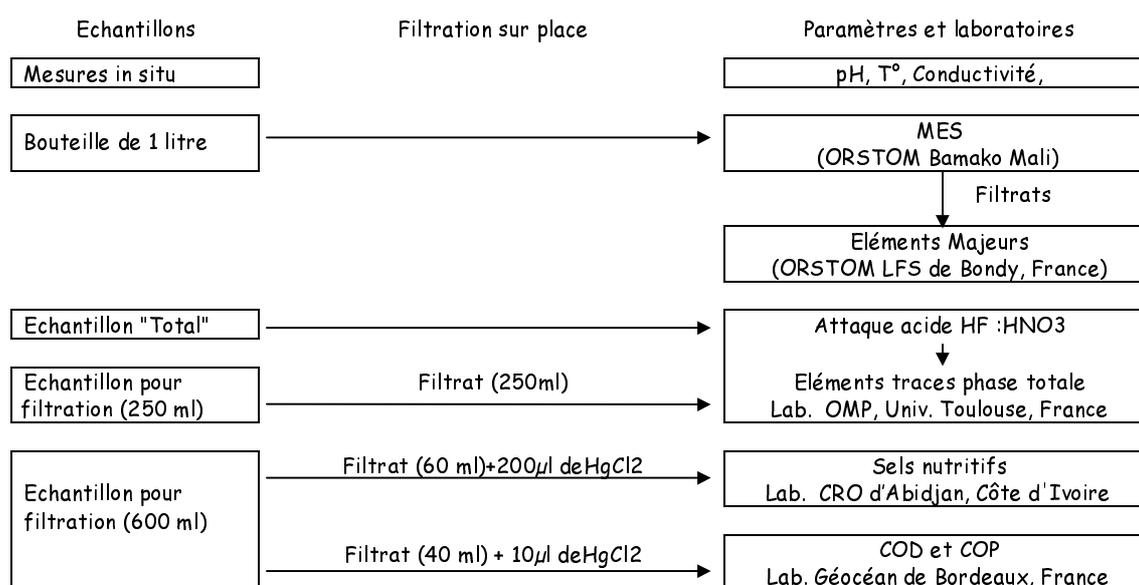


Figure 25. Procédure des échantillonnages ponctuels des eaux du fleuve Niger au Mali, du prélèvement au laboratoire d'analyse.

La fréquence d'échantillonnage est fonction des grandes étapes du régime hydrologique du Niger : montée de la crue, étales de la crue, décrue et basses-eaux. Elle est plus ou moins élevée suivant l'éloignement des stations de prélèvements de Bamako : tous les mois ou tous les 2 mois pour les stations les plus proches (de 80 à 300 km), et tous les 4 mois environ pour les plus éloignées (de 600 à 1200 km). Les dates de prélèvement à chaque station sont calculées à partir des vitesses moyennes afin de suivre la même masse d'eau tout le long du fleuve.

2.1.1.1. Echantillonnage pour l'analyse des éléments traces

L'analyse des éléments traces dans les eaux des rivières nécessite quelques précautions supplémentaires liées aux très faibles concentrations des éléments dans les eaux et aux contaminations extérieures. Ceci est d'autant plus vrai que la filtration s'effectue dans des conditions limites : pas de production d'eau milliQ sur place, pas de hotte à flux laminaire de terrain, temps de la filtration important (deux à quatre heures suivant la période de l'année), et conditions météorologiques parfois "inconfortables"⁷. Une première précaution pour éviter la pollution des échantillons est d'utiliser un matériel préalablement lavé (bouteilles, filtres, système de filtration...) au laboratoire et donc très propre. Ensuite, il s'agit de manipuler dans les meilleures conditions possibles (loin de sources éventuelles de pollution comme les feux de bois, les pots d'échappement...). La détermination de "blancs" qui constitue une mesure de contrôle du matériel et du protocole d'échantillonnage nous a permis de mettre au point et d'améliorer le protocole de filtration au cours de l'étude en tenant compte de toutes les contraintes logistiques (propreté du matériel, temps de stockage...).

(a) Procédure de filtration

La procédure de filtration pour les lavages sur le terrain a subi trois transformations qui ont permis d'améliorer la qualité des blancs (se reporter à l'annexe 1). Seule le protocole final est présenté ici.

Tout le matériel pour le prélèvement et la filtration des échantillons qui a servi à l'analyse des éléments traces a été lavé au laboratoire de Toulouse à l'acide puis rincée au moins 3 fois avec de l'eau milliQ. Il est conservé et protégé de la poussière dans des sacs en polyéthylène.

La procédure de filtration finale se déroule en 3 étapes à l'aide d'un système de filtration sous pression et à travers une membrane en nitrate de cellulose de 0,2 µm de taille de pore. Un blanc de filtration est d'abord réalisé avant chaque nouvelle filtration avec de l'eau milliQ. La filtration s'effectue sous une boîte à gant en Plexiglas, lavée entre chaque mission et rangée dans des pochettes en tissu à l'intérieur d'une boîte en bois (Photo).

⁷ En saison des pluies notamment, les vents de sable qui précèdent les tornades nous ont parfois surpris en pleine filtration...



Photo 1. La filtration de l'échantillon pour les éléments traces est réalisée à l'intérieur de la boîte en Plexiglas. Deux ouvertures, protégés avec des sacs en plastique propres (renouvelés à chaque filtration), permettent de glisser les mains dans la boîte et de manipuler. Un trou, sur la gauche, permet de glisser le tuyau de la pompe à main. La filtration est réalisée à l'ombre, au bord du fleuve Niger (en fond).

Le protocole exact est décrit dans le cadre suivant :

Procédure de filtration sur la rive pour les traces

La procédure de filtration se déroule en 3 étapes qui nécessitent 3 bouteilles de 250 ml: 2 bouteilles avec de l'eau milliQ pour le blanc et le rinçage (flacon n°1 et 2) et une bouteille de l'eau du fleuve (flacon n°3). Elle s'effectue dans une boîte à gants en Plexiglas démontable (photo). Une fois sur la rive, dans un endroit "propre" se préparer à filtrer l'échantillon :

1. Rinçage du système de filtration :

Le haut de l'appareil de filtration est nettoyé avec environ 150 ml d'eau milliQ en séparant bien le haut du bas. Puis on met un filtre et on rince le bas de l'appareil de filtration avec les 100 ml restant. Rincer encore une fois avec 100 ml d'eau milliQ de la bouteille n°2.

2. Blanc de filtration :

Passer 150 ml d'eau milliQ restant de la bouteille n°2 Récupérer l'eau filtrée dans cette même bouteille.

3. Filtration de l'échantillon :

Rincer avec 50 ml d'eau du fleuve (de la bouteille n°3) pour chasser les dernières gouttes d'eau milliQ pouvant rester dans le système. Puis, passer 200 ml restant d'échantillon du flacon n°3 que l'on récupère dans le flacon propre n°1.

(b) Fiabilité des échantillons filtrés

L'eau milliQ n'existant pas sur le Mali, elle a été amenée dans les bouteilles de 250 ml qui sont réutilisées une fois vidées pour stocker l'échantillon filtré. L'eau milliQ apportée sur le terrain puis ramenée au laboratoire en France un an plus tard, n'a pas montré d'évolution remarquable des quantités en éléments dissous.

En revanche, comme nous l'avons déjà évoqué, le protocole de filtration sur le terrain a beaucoup évolué depuis la première série de mesures. La principale contrainte étant de s'adapter au manque d'eau milliQ pour les lavages. Plusieurs contrôles de la qualité de la filtration ont été possibles, d'une part avec les blancs de filtration réalisés dans les mêmes conditions de terrain que la filtration de l'échantillon (sur la rive du fleuve) et, d'autre part, avec la comparaison entre les résultats totaux (échantillon total à priori non contaminé car n'ayant subi aucune manipulation) et les résultats dissous (échantillon filtré).

La comparaison des blancs de filtration de terrain et avec, soit les blancs milliQ, soit un blanc de filtration d'un échantillon d'eau milliQ réalisé en salle blanche, ont permis de distinguer les éléments susceptibles d'être apportés par la filtration elle-même et/ou par "l'environnement de la filtration" (Annexe 1).

Mais les concentrations restent assez faibles pour des blancs de terrains exceptés pour le Zn et parfois le Pb pour lesquelles on peut aussi parler de "pollution" anthropique. Sur les 34 blancs de filtration, 9 blancs présentent une concentration en Zn supérieure à 1 (soit au mois 7 fois la limite de détection de 0,136 ppb) dont un échantillon avec des valeurs extrêmement élevées (Banankoro le 17-04-97). Pour le Pb, seuls 3 blancs sur 34 présentent des concentrations en Pb élevées, mais deux de ces blancs ont des concentrations en Pb presque 2000 fois plus grand que la limite de détection (Banankoro le 17-04-97, Sélingué le 22-04-97).

La comparaison des concentrations totales (C_T) et des concentrations dissoutes (C_D) retranchées du blanc de filtration sur 20 échantillons, a montré pour presque tous les échantillons une anomalie en Sc, Zn (et parfois Pb), pose souvent des problèmes de contamination (soit $C_D > C_T$, soit la valeur trouvée dans le blanc est supérieure à la valeur dans l'échantillon filtré). Le détail des remarques à ce propos se trouve en annexe 1.

En conclusion, la réalisation du blanc de filtration avant la filtration permet de s'assurer d'un rinçage abondant du matériel de filtration et du filtre avant la filtration de l'échantillon du fleuve, même si en contrepartie, les blancs ne sont pas toujours excellents...

2.1.1.2. Echantillonnage pour l'analyse du Carbone organique et des nutriments

Pour mesurer le carbone organique, nous avons adopté la convention méthodologique classique qui considère comme particulaire (COP) la fraction organique récupérée sur filtre de porosité 0,7 μm et comme dissous (COD) celle passant à travers les pores.

La filtration pour le carbone organique, également réalisée sur la rive, se fait avec un appareil de filtration en verre. Les filtres sont en fibres de verre de type Whatman GF/F (0,7 μm). Les filtres sont stockés immédiatement dans une boîte de Pétri ; puis une fois ramené au laboratoire, séchés à l'étuve à 50°C pendant au moins 24 heures. Le filtrat est récupéré dans deux flacons de 20 ml (prébrûlés à 450 °C pendant 12 heures), que l'on empoisonne avec 10 μl d' HgCl_2 (à 1 g.l^{-1}). Ils sont stockés à l'obscurité et à 4°C. Les filtres en fibre de verre GF/F et les bouteilles en verre de 20 ml pour la

filtration des échantillons de carbone organique ont été prébrûlés au four à 450°C pendant 12 heures, ainsi que le haut du système de filtration afin d'éliminer toute trace de matière organique du matériel.

Une quantité d'eau filtrée de 60 ml est également récupérée pour l'analyse des nutriments dans des bouteilles de 20 ml en verre préalablement lavées au laboratoire avec de l'eau acidifiée (1%) et rincées à l'eau distillée, puis séchées à l'étuve. Les bouteilles et les bouchons sont lavés de la même manière. L'ensemble de ce matériel est conservé dans du papier aluminium.

2.1.1.3. Quantité d'échantillons récoltés

Au total pour les deux années 1996 et 1997, et pour l'ensemble des 8 stations, sur **11** campagnes de prélèvements, 150 échantillons pour le COD et 76 filtres pour le COP, ont été réalisés ; ainsi que, 152 échantillons pour les traces dont 33 blancs de filtration, 57 échantillons totaux, 57 échantillons filtrés et 5 blancs d'eau milliQ, partie sur le terrain.

2.1.2. Prélèvements des eaux de pluies

Un préleveur à sac automatique (ESA) a été installé depuis le début de la saison des pluies 97-98 dans le cadre du réseau IDAF⁸ (Figure 26).

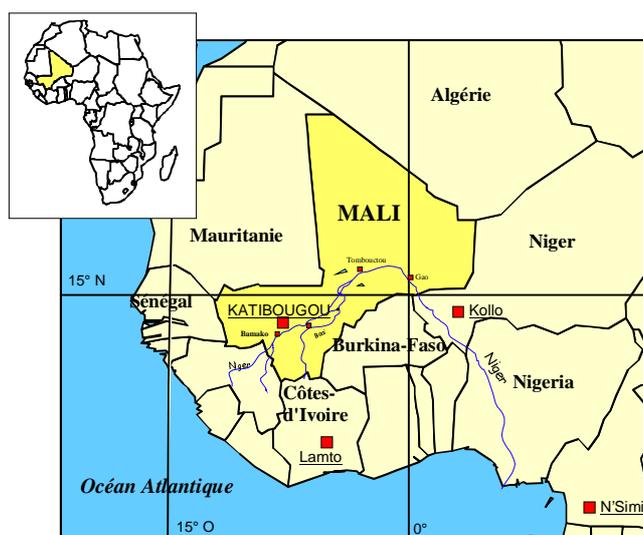
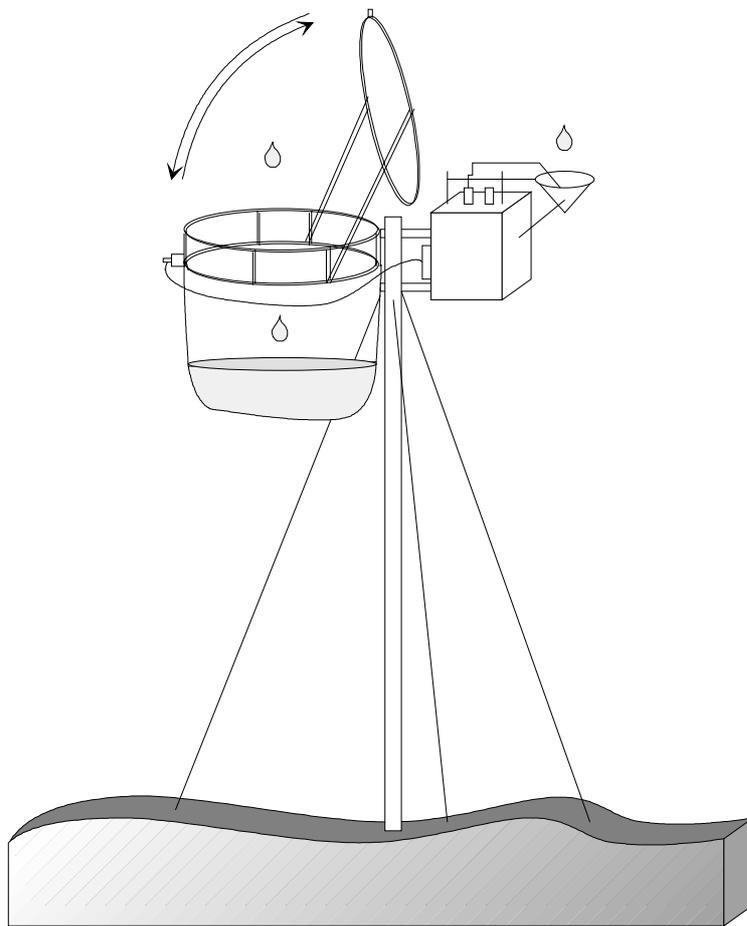


Figure 26. Localisation de la station de Katibougou au Mali et autre stations du réseau IDAF dans la même zone géographique.

Les eaux de pluies ont été recueillies à la station de Katibougou (quartier nord-est de Koulikoro) du réseau IDAF de juin à octobre 1997. Cette station est représentative de l'écosystème savane aride.

⁸ Le programme IDAF (IGAC/DEBITS/AFRIQUE) a permis la mise en place d'un réseau de collecte de pluie (pour l'analyse des espèces majeurs) sur tout le continent africain et pour objectif principal de mesurer les dépôts atmosphériques à l'échelle de ce continent.

Elle se situe à 60 km au nord-est de Bamako en zone agricole sahélo-soudanienne, et se situe près d'une ville où l'on recense quelques industries : huilerie (fabrication de savons) et moulin (production de farine). Les procédures analytiques, les méthodes de collecte et de préservation des échantillons de pluies sont décrits dans Galy *et al.* (1998). Les échantillons d'eau de pluie sont récupérés à l'aide d'un collecteur à sac à ouverture schématisés dans la Figure 27. Dès qu'il pleut, un système électrique permet l'ouverture automatique du collecteur, et l'eau de pluie tombe dans des sacs en polyéthylène utilisés pour leur propreté. L'eau de pluie est ensuite transvasée à la fin de chaque événement pluvieux, soit dans des tubes de 50 ml pour l'analyse des majeurs (ceux-ci sont conservés avec du thymol et mis au réfrigérateur avant leur envoi au laboratoire d'analyse), soit dans des bouteilles de 250 ml préalablement lavées à l'acide chlorhydrique ultrapur et rincées à l'eau milliQ pour l'analyse des éléments traces. Ces derniers sont simplement conservés au réfrigérateur.



Protocole d'échantillonnage

1. Le couvercle est fermé en position d'attente.
2. Avec la pluie, le système de détection électrique permet l'ouverture automatique du couvercle.
3. A la fin de l'événement pluvieux, l'observateur récupère le sac en plastique et coupe avec un ciseau une des deux extrémités inférieures du sac.
4. Après avoir jeté un peu d'eau de pluie (pour éviter une éventuelle contamination) l'eau de pluie est récupérée soit dans un tube de 50 ml avec du Thymol soit dans une bouteille en polypropylène de 250 ml.
5. Les échantillons sont conservés au réfrigérateur.

Figure 27. Schéma de fonctionnement du préleveur à sac automatique (ESA).

Au total, 19 échantillons pour l'analyse de traces ont été collectés d'août à septembre 1997, ce qui représente environ 55 % des pluies totales (390,3 mm sur 714 mm). Les pluies du début de saison (juin et juillet) n'ont pas pu être échantillonnées.

Pour les majeurs l'ensemble de la saison pluvieuse (de juin à octobre) a été échantillonné, ce qui représente 46 échantillons.

L'eau de pluie n'entre en contact qu'avec les sacs de congélation et les deux types de flacons. Les blancs de manipulation, réalisés en remplaçant l'eau de pluie par de l'eau milliQ dans chaque réceptacle (sacs et bouteilles) sont tous inférieurs aux limites de détection. Seul le Zn présente dans les blancs de sacs une concentration moyenne supérieure à la limite de détection ($0,35 \mu\text{g.l}^{-1}$).

2.2. Analyses et préparation des échantillons

Les analyses effectuées sur les eaux de surfaces et les précipitations ont porté sur les mesures de concentrations en éléments majeurs, les éléments traces, ainsi que les MES, le COD, COP (uniquement pour les rivières).

2.2.1. Analyse des éléments majeurs

Les éléments majeurs dans la phase dissoute sont recherchés dans les échantillons ponctuels des eaux du Niger et de ses affluents, ainsi que dans les précipitations à Katibougou. Deux laboratoires d'analyse sont associés à ces deux types d'échantillons : pour les eaux de surface, il s'agit du laboratoire des formations superficielles de l'ORSTOM à Bondy (cf. § 1.3.3.) ; pour les pluies, les analyses de majeurs par chromatographie ionique sont réalisées au laboratoire d'analyse IDAF du laboratoire d'Aérodologie de Toulouse.

2.2.2. Analyse des éléments en traces

L'analyse des éléments traces dans la phase totale et dans la phase dissoute pour les eaux de surfaces et pour les pluies (uniquement phase totale) est réalisée à l'Observatoire Midi Pyrénées (GRGS/UMR5566/CNES-CNRS-Université) de Toulouse par la méthode ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer).

Le choix d'analyser les éléments en traces dans la phase totale (dissous + particulaire) a été conditionné par les très faibles taux de MES rencontrés dans le fleuve Niger pour les échantillons d'eau de surface, et par l'impossibilité de congeler les échantillons pour les pluies. Les concentrations dans la phase particulaire (C_p) (en ppb) sont alors obtenues à partir des concentrations dans la phase totale (C_T) et dans la phase dissoute (C_D), selon l'équation :

$$C_p = C_T - C_D$$

Les concentrations dans la phase particulaire (en ppm - en $\mu\text{g.g}^{-1}$) sont obtenue à partir de la concentration en MES (en mg.l^{-1}), selon l'équation :

$$C_p = \frac{C_T - C_D}{[MES]}$$

2.2.2.1. Préparation spécifique des échantillons pour l'analyse de la phase Totale (rivières et précipitations)

Cette analyse a demandé une préparation de l'échantillon selon un protocole qui se rapproche de Freyrier (1997) pour les eaux de pluies. Il consiste en l'attaque acide HF:HNO₃ d'une quantité d'eau de l'échantillon total (10 ml). Cette attaque acide permet de dissoudre les particules en suspensions dans les eaux. Des blancs "d'attaque" sont réalisés à chaque manipulation, en remplaçant l'échantillon par de l'eau milliQ.

2.2.2.2. Méthode d'analyse - standard interne

Les échantillons ainsi préparés sont ensuite passés à l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer). Les concentrations totales et dissoutes en éléments traces sont obtenues en utilisant la méthode du standard interne (Indium). L'appareil utilisé est un Elan 5000 de Perkin-Elmer. Tous les échantillons analysés (standards de référence utilisés pour la calibration, blancs, échantillons d'eau) sont des solutions d'HNO₃ 2%. Les limites de détections sont présentées dans le Tableau 14. Les résultats sont exprimés en ppb ou en µg.l⁻¹. La fiabilité des résultats de l'analyse et les éléments pouvant être raisonnablement dosés sont déterminés à partir de deux paramètres de contrôles. Le premier consiste en l'utilisation de deux standards internes pour la calibration, l'autre nécessite l'analyse d'un échantillon standard de rivière (SLRS3) dont les concentrations sont certifiées pour quelques éléments traces (Mg, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Ba, Pb, U, Al, Fe).

L'analyse de l'ensemble des échantillons a fait l'objet de 7 séries d'analyses (Tableau 13).

Echantillon Niger	Echantillon filtré		Echantillon "Total"	
	Préparation des échantillons	Analyses des échantillons	Préparation des échantillons	Analyses des échantillons
Juin&Juillet 96	?	3 oct 96	22 & 23 avr 98	24 avr 98
Août 96	?	15 nov 96	22 & 23 avr 98	24 avr 98
Nov&Dec 96	4 & 5 févr 97	19 févr 97	4 & 5 févr 97	19 févr 97
Fev&Mai 96	25 & 26 juin 97	1 juil 97	25 & 26 juin 97	1 juil 97
Aout 97	20 nov 97	21 nov 97	21 nov 97	16 nov 97
Nov&Dec97	22 avr 98	24 avr 98	22 & 23 avr 98	24 avr 98
Pluie 97	-	-	21 nov 97	16 nov 97

Tableau 13. Séries d'analyses effectuées pour traiter l'ensemble des échantillons.

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de l'ICP-MS, les résultats obtenus pour 25 échantillons de SLRS-3 pour l'ensemble des séries sont reportés dans le Tableau 14.

Pour les éléments certifiés, la plupart des concentrations mesurées sont proches des concentrations proposées (écart maximum de 13%) pour Mg, Al, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Mo, Ba, Pb, U. Pour Pb, bien que la différence ne soit que de 11%, le coefficient de variation de 104% atteste d'une

anomalie dans une des séries d'analyse. En fait une évolution de concentrations est observée sur la série de "Nov&Dec 96" à partir d'un certain point. Les échantillons passés après celui-ci, étaient des doublons.

	Limite de détection	Blanc d'attaque H F:HNO ₃	Moyenne SLRS3 (n=25)	CV%	Différence %	Valeurs certifiées de SRLS3
Mg	0.114	0.120	1461 +/- 271	19%	9%	1600 +/- 200
Al	0.052	na	33 +/- 2.06	6%	6%	31 +/- 3
V	0.013	<DL	0.34 +/- 0.04	13%	12%	0.3 +/- 0.02
Cr	0.025	<DL	0.738 +/- 0.915	124%	59%	0.3 +/- 0.04
Mn	0.01	0.015	3.967 +/- 0.270	7%	2%	3.9 +/- 0.3
Fe			107.05 +/- 7.39	7%	7%	100 +/- 2
Co	0.004	0.012	0.036 +/- 0.005	12%	26%	0.027 +/- 0.003
Ni	0.39	<DL	0.931 +/- 0.071	8%	11%	0.83 +/- 0.08
Cu	0.01	0.052	1.552 +/- 0.208	13%	13%	1.35 +/- 0.07
Zn	0.139	0.215	1.69 +/- 0.46	27%	38%	1.04 +/- 0.09
Rb	0.003	0.007	1.724 +/- 0.112	6%		1.64 +/- 0.06
Sr	0.007	<DL	32.108 +/- 1.984	6%		-28.1-
Y	0.001	0.001				
Zr	0.01	<DL				
Mo			0.209 +/- 0.020	9%	9%	0.19 +/- 0.01
Cd	0.004	0.058	0.016 +/- 0.013	85%	17%	0.013 +/- 0.002
Sb	0.003	<DL	0.16 +/- 0.01	7%		
Cs	0.001	0.005	0.009 +/- 0.003	29%		
Ba	0.017	0.491	13.80 +/- 0.906	7%	3%	13.4 +/- 0.6
La	0.001	0.002	0.24 +/- 0.015	6%		
Ce	0.001	<DL	0.28 +/- 0.015	6%		
Pr	0.001	<DL	0.059 +/- 0.004	7%		
Nd	0.011	<DL	0.22 +/- 0.015	7%		
Sm	0.011	<DL	0.046 +/- 0.007	15%		
Eu	0.003	<DL	0.007 +/- 0.003	40%		
Gd	0.005	<DL	0.036 +/- 0.006	16%		
Tb	0.001	<DL	0.004 +/- 0.002	39%		
Dy	0.004	<DL	0.022 +/- 0.004	17%		
Ho	0.001	<DL	0.004 +/- 0.001	34%		
Er	0.006	<DL	0.012 +/- 0.002	17%		
Tm	0.001	<DL	-	-		
Yb	0.003	<DL	0.010 +/- 0.004	36%		
Lu	0.001	<DL	-	-		
Pb	0.013	<DL	0.077 +/- 0.080	104%	11%	0.068 +/- 0.007
Th	0.002	0.002	0.013 +/- 0.005	39%		
U	0.002	<DL	0.046 +/- 0.005	12%	1%	(0.045)

Tableau 14. Blanc d'attaque, moyenne des concentrations et valeurs certifiées de SLRS-3 (Résultats en ppb sur l'ensemble des séries d'analyses).

Pour les éléments Cr, Co, Zn, Cd, les écarts entre la moyenne SLRS-3 et les valeurs certifiées sont importants (respectivement de 59%, 26%, 38% et 17%). Freydier (1997) avait déjà remarqué une différence pour Co. Pour Cr, seule la dernière série d'analyse montre en fait des problèmes de reproductibilité. **Les concentrations en Cr de cette série ne seront donc pas prise en compte.** Pour le Zn, les concentrations varient peu (le coefficient de variation tombe à 10% sans 3 valeurs) mais sont

systématiquement supérieures à la valeur certifiée. Pour Cd, la reproductibilité est très médiocre puisque sur l'ensemble des analyses de SLRS-3 le coefficient de variation est de 85%.

Dans l'ensemble les analyses montrent des différences inférieure à 5% ou plus rarement 10% pour la calibration. Deux blancs de laboratoire ou de pilulier, sont réalisés par séries (l'échantillon est remplacé par de l'eau milliQ pour toutes les manipulations en "salle blanche" et lors de l'analyse). Ils montrent des concentrations en général inférieures aux limites de détection. La moyenne des Blancs d'attaque HF:HNO₃, est également présentées dans le Tableau14.

Au vu des considérations sur les blancs de filtration et sur cette dernière présentation, il semble que les valeurs de concentration en Zn sont à prendre avec beaucoup de précautions, étant donné le nombre important de problèmes pour cet élément. Pb, Cr, Cd sont aussi, bien que dans une moindre mesure, à prendre avec précautions... Ces éléments seront marqués d'une astérisque dans la suite de l'exposé.

2.2.3. Analyse du carbone organique

Le carbone organique, dissous et particulaire, est mesuré au laboratoire de Géologie et Océanographie (URA-CNRS) à Bordeaux, par combustion à haute température dans un four après décarbonatation.

Le dosage du COP est fait sur LECO CS 125 après combustion à 1100 °C et décarbonatation à HCL 2N à 60 °C pendant 24 h. La mesure de CO₂ se fait sur une cellule infrarouge. La limite de détection est de 0,05 mg.l⁻¹, et la précision de l'ordre de 5%. La mesure est exprimée en % de matière sèche.

Le dosage du COD est fait à l'aide d'un appareil Kontron Océanic International selon la méthode humide par voie chimique. Chaque analyse est faite en triplicata. La limite de détection est de 0,4 mg.l⁻¹, et la précision de l'ordre de 3% à 8%. La mesure est exprimée en mg.l⁻¹. Cette méthode est acceptable par rapport à d'autres théoriquement plus performantes (comme par exemple TOC 5000), car on se situe dans un milieu à teneurs en COD souvent élevées. De plus, l'ajout de chlorure mercurique dans les proportions décrites ci-dessus perturbe l'analyseur au niveau de la cellule infrarouge.

3. CONCLUSION

La surveillance des flux de MES et d'éléments majeurs sur les stations du réseau de surveillance du transport de matière du fleuve Niger au Mali a donc les caractéristiques suivantes :

- des débits suivis de façon journalière,

- un échantillonnage de 0,9 litre en 3 points de surface, en rive droite, milieu et rive gauche, avec une fréquence hebdomadaire,
- des jaugeages sur 5 verticales et 3 profondeurs réalisés en période de crue et en général tous les 2-3 mois,
- des échantillons filtrés sur des filtres en acétate de cellulose de 0,2 μm de porosité au laboratoire de l'ORSTOM à Bamako. Le filtrat est conservé toutes les deux filtrations (15 jours) pour être envoyé pour l'analyse des majeurs au LFS de l'ORSTOM-Bondy.
- une procédure de calcul des flux identique pour les MES et les éléments dissous par interpolation linéaire des concentrations.

Une amélioration des délais d'analyse pour les éléments majeurs serait sans doute une amélioration sensible et une surveillance continue avec un turbidimètre aux stations importantes semble être une solution à considérer à l'avenir pour le suivi des MES, même si certains problèmes techniques n'ont pas permis une mise en œuvre opérationnelle des appareillages acquis dans le cadre du projet.

Le suivi des éléments traces et du carbone organique a pris la forme de mesures ponctuelles au milieu du fleuve à partir d'une pinasse en bois. La méthode de conservation des échantillons consiste en une filtration de l'échantillon directement après le prélèvement puis à un ajout de réactifs (uniquement pour le COD et les nutriments). Les méthodes analytiques sont spécifiques aux différentes variables étudiées et effectuées dans des laboratoires de recherche français. Les protocoles d'échantillonnage et de conservation des échantillons mis en place pour l'analyse des éléments traces dans les eaux du Niger ont donné des résultats satisfaisants avec un minimum de matériel et de précautions.

PARTIE II : LES APPORTS DU BASSIN AMONT

Le delta intérieur du Niger reçoit principalement ses apports en eau, de matières dissoutes et particulaires de son bassin amont. Un premier objectif de notre étude est de quantifier ces apports à partir des mesures physiques et chimiques réalisées sur le terrain. L'étude des différents éléments transportés par le fleuve (sous forme dissoute et particulaire) est réalisée ensuite sur différentes stations du bassin du Niger amont et à différentes échelles de temps. Cette étude permet d'atteindre un deuxième objectif qui est de comprendre à la fois les origines des éléments transportés et les causes de leurs variations spatiales et temporelles dans la masse d'eau. Ce thème nous permet d'aborder la problématique de la pollution chimique du fleuve par les activités anthropiques présentes sur son bassin versant. Enfin, la composition chimique et minéralogique du fleuve reflétant en partie les phénomènes d'érosion chimique et mécanique qui se produisent sur son bassin versant, cette partie permet aussi d'estimer les taux de dénudation continentale et d'appréhender la dynamique actuelle du paysage du bassin amont du fleuve Niger.

Chapitre III. Eléments du régime hydrologique du Niger supérieur et du Bani

Le fleuve Niger a fait l'objet de nombreuses études hydroclimatologiques tant sur l'évaluation de la ressource en eau, que sur des projets d'aménagements potentiels hydroélectriques ou agricoles, ou encore sur la propagation des crues. Avec les déficits pluviométriques de ces 25 dernières années, de nombreuses études ont également porté sur la variabilité des écoulements et de son incidence sur la ressource en eau.

Dans sa traversée du Mali, le fleuve Niger, est conventionnellement subdivisé en trois parties :

- le Bassin amont (ou supérieur) du fleuve Niger¹,
- le delta intérieur allant de Markala (sur le Niger) et de Douna (sur le Bani) à Koryoumé, où le fleuve forme une vaste zone d'inondation composée de nombreux chenaux, petits lacs, mares..,
- le Niger moyen allant de Koryoumé à la frontière nigérienne.

Seul le bassin amont est abordé dans ce chapitre, l'hydrologie du delta sera présentée plus tard dans la partie qui lui est consacrée. Dans un premier temps, le réseau hydrographique, ainsi que les ouvrages hydrauliques existant sur le bassin versant du Niger amont seront présentés. Puis l'étude des éléments du régime des écoulements, principale variable explicative pour le transport de matière, permettra de replacer les années d'étude dans leur contexte hydrologique.

1. RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT AMONT

Le Bassin amont du fleuve Niger est composé du Haut-Niger où quatre branches mères - Niger, Tinkisso, Niandan et Milo - se retrouvent en Guinée avant la frontière malienne (drainant environ 71 000 km²), et du Sankarani (35 500 km²), auxquels il convient de rajouter le Bani, affluent principal du Niger, dont la superficie du bassin versant à Douna est de 102 000 km². Il est possible de se reporter à la carte présentant les bassins versants au chapitre I (p.9).

¹ Nous emploierons tout au long de ce document le terme de "bassin amont du Niger" pour désigner l'ensemble des deux bassins du Niger et du Bani jusqu'à leur entrée dans le delta intérieur du Niger respectivement à Ké-Macina et Douna.

1.1. Le Haut-Niger

Le Niger et ses principaux affluents en rive droite forment un large éventail, qui draine, selon l'expression consacrée "comme les doigts de la main", le vaste plateau orienté vers le nord-est qui descend progressivement depuis les reliefs frontaliers de la dorsale guinéenne vers le delta intérieur du Niger. Le Niger prend sa source à 800 m d'altitude. Sur les 40 premiers kilomètres, sa pente est très forte ($7,5 \text{ m.km}^{-1}$). Jusqu'à Faranha (3200 km^2) la pente se maintient au dessus de $0,3 \text{ m.km}^{-1}$, malgré de nombreux méandres dans de vastes plaines d'inondation. Après Faranha cette pente se maintient avec l'apport en rive gauche de petits affluents à fortes pentes issus du Fouta Djallon (Balé, Koba, Niandan). Juste après le confluent de la Mafou en rive droite ($3\,750 \text{ km}^2$ au confluent, avec une très forte pente de 2 m.km^{-1} durant les 10 premiers km), le Niger chute d'une dizaine de mètres par une série d'imposants rapides. Le Niger gardera jusqu'à Bamako le même aspect : berge de 5 à 6 mètres de haut, plaine d'inondation d'extension notable, courbes à grand rayon, îles multiples, avec une pente qui reste voisine de 12 cm.km^{-1} . Peu après le confluent du Mafou, il passe à Kouroussa ($16\,560 \text{ km}^2$) et reçoit ensuite successivement ses 3 autres branches mères : le Niandan et le Milo en rive droite, puis le Tinkisso en rive gauche. Le Milo est l'affluent dont la source est la plus élevée (1050 m), mais sa confluence avec le Niger n'est plus qu'à 350 m ; le Niandan prend sa source à proximité de celle de la Mafou à environ 700 m d'altitude : le Tinkisso, seul grand affluent provenant du Fouta Djallon, prend sa source vers 850 m d'altitude.

A partir de Siguiri, la pente tombe à 10 cm.km^{-1} . Le fleuve Niger entre au Mali quelques kilomètres à l'amont de Banankoro, où son bassin presque entièrement guinéen est de $71\,000 \text{ km}^2$. Il prend alors le nom de Djoliba en bamanan. Le Haut-Niger reçoit encore les eaux venant de ses affluents "maliens" dont les principaux sont :

- le Fié ($2\,700 \text{ km}^2$) qui prend sa source en Guinée et qui rejoint le fleuve Niger à 30 km en aval de la frontière Guinée-Mali.
- le Sankarani ($35\,500 \text{ km}^2$) prend naissance en Guinée et reçoit le Ouassoulou à quelques kilomètres en amont du barrage de Sélingué (mis en service en 1982) avant de rejoindre le fleuve Niger à quelques 70 km en amont de la ville de Bamako. Le barrage de Sélingué à but multiples (hydroélectricité, navigation et irrigation) a permis la mise en eau d'une retenue artificielle de plus de 2 milliards de m^3 avec une surface du plan d'eau de 430 km^2 à la cote maximale de remplissage. Il est constitué de deux digues en terres de 2600 m de longueur totale et de 23 m de hauteur, encadrant un ouvrage en béton de 334 m de longueur (Hydroconsult, 1996 ; Diarra & Soumaguel, 1997).

Quelques petits marigots (cours d'eau) se trouvent entre Siguiri et Ségou. Ils sont généralement à sec 6 à 9 mois par an. Un petit aménagement hydroélectrique et agricole (3000 ha irrigué) est également à signaler à 7 km en aval de Bamako sur la rive droite du fleuve (le barrage de Sotuba). Ouvrage au fil de l'eau réalisé en 1966, il n'a pas d'influence sur le régime du fleuve.

En amont de Ké-Macina, le delta intérieur du Niger est dominé par la vallée fossile communément appelée *Delta Mort* et dont la remise en eau a été rendue possible grâce à la

construction du barrage de Markala. Celui-ci est en service depuis 1943 et comprend une digue en terre de 1 813 m et un barrage à hausses mobiles de 816 m de longueur qui s'effacent complétement en moyennes et hautes eaux. Ce barrage a permis l'aménagement et l'exploitation de parcelles irriguées en maîtrise totale de l'eau, pour la riziculture par l'Office du Niger (50 000 ha) et l'Office Riz Ségou (5 000 ha), et pour la culture de canne à sucre par la société Sukula (4 000 ha) ; soit au total environ 60 000 ha. En rive gauche, la prise d'eau du canal adducteur pour les irrigations de l'Office du Niger se partage en canal du Sahel (vers le lit fossile appelé Fala de Molodo) et canal du Macina (vers la rivière de Boky-Were, ancien bras également). Une dérivation en rive droite permet la poursuite de la navigation. Le volume stocké entre les cotes 299,5 et 300,50 m du système de l'Office du Niger a été estimé à environ 90 millions de m³.

A l'aval de Markala, le fleuve aborde au niveau de Ké-Macina le delta intérieur du Niger avec une pente moyenne du lit du fleuve inférieure à 2 cm.km⁻¹. A Ké-Macina, le fleuve a parcouru environ 1200 km depuis sa source, et draine un bassin versant de 141 000 km².

1.2. Le Bani, affluent principal du Niger

Bien que le Bani ne rejoigne le Niger qu'à Mopti, en plein delta intérieur du Niger et que la partie inférieure de son cours fasse entièrement partie du delta, il est considéré comme faisant partie du bassin amont et donc des entrées dans le delta au niveau de Douna (bassin de 102 000 km²).

Le Bani, de direction générale sud-nord, est formé par la réunion du Baoulé et de la Bagoé qui prennent naissance en Côte-d'Ivoire, respectivement vers Odienné à la côte 450 m et au sud de Boundiali à environ 600 m d'altitude.

Le Baoulé descend en pente douce vers le nord. Méandres et plaines d'inondation commencent déjà à l'amont d'Odienné, soit après un parcours de moins de 30 km. Il prend ensuite la direction sud-nord avec une pente de 40 cm.km⁻¹, jusqu'à sa confluence avec un premier affluent en rive droite : la pente n'est alors plus que de 20 cm.km⁻¹ et les méandres s'accroissent. Le Baoulé reçoit ensuite d'autres affluents ayant les mêmes caractéristiques que ce dernier. La plaine d'inondation atteint alors de 800 à 1500 m de largeur et les sinuosités prennent encore plus d'ampleur. Il prend la direction générale Est-Ouest et retrouve le Bagoé à 500 km de sa source.

Le Bagoé descend en plaine encore plus rapidement que le Baoulé ; la pente se maintient alors à 15 cm.km⁻¹ sur 300 km, la direction restant sud-nord. Il présente très vite de larges plaines d'inondation et un cours sinueux. Il reçoit trois affluents importants avant de rejoindre la confluence du Baoulé après un parcours de 700 km.

A 20 km à l'aval de cette confluence, le Bani reçoit sur sa rive gauche un important affluent issu de la région nord-est de Sikasso. Un des tributaires de cette rivière, la Lotio, est le seul cours d'eau notable du Bassin du Bani à présenter une forte pente; il est issu du plateau gréseux et assez accidenté situé au sud de Sikasso.

Après ce dernier confluent, le Bani s'élargit de plus en plus. Les sinuosités du lit disparaissent presque, mais la plaine d'inondation devient de plus en plus large, surtout à l'aval de Douna. La largeur atteint vite une dizaine de kilomètres. Le Bani rentre dans le delta intérieur juste après San après avoir reçu un dernier petit affluent. La pente devient extrêmement faible : moins de 2 cm.km^{-1} . Cependant sur la rive droite la plaine d'inondation est limitée par une série de collines gréseuses d'où sont issus quelques petits cours d'eau. Le cours du Bani dans la plaine d'inondation progresse vers le nord où de nombreux bras secondaires prennent naissance. Il se jette enfin dans le Niger à Mopti après un parcours de 1300 km et un bassin versant de $130\,000 \text{ km}^2$.

A l'issu de cette présentation, quelques remarques importantes peuvent être faites :

- La ressource hydrique du Niger provient presque exclusivement du château d'eau de l'Afrique de l'Ouest que constitue la Guinée.
- Avec des superficies de bassin versant sensiblement identiques, et des réseaux hydrographiques tout deux très denses, le Bani et le Niger se distinguent avant tout par leur pentes respectives : alors que le Niger possède à Koulikoro, 24,4% de sa superficie totale au dessus de 500 m, le Bani n'en possède que 1,7 % et est caractérisé par un modelé topographique beaucoup plus mou.
- Les entrées du fleuve Niger et du Bani dans la vaste plaine d'inondation que constitue le delta intérieur du Niger se situent respectivement au niveau des stations de Ké-Macina et de Douna.
- Deux aménagements importants se situent sur le bassin amont : la barrage de Sélingué et le barrage de Markala, avec une influence non négligeable sur le régime du Niger (infiltrations vers la nappe, évaporation, prélèvements agricoles).

2. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPERIEUR ET DU BANI

Les études portant sur le régime hydrologique du Niger supérieur, du Bani et les conséquences de la variabilité climatique sur ceux-ci sont nombreuses (Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; Lamagat *et al.*, 1993 ; Olivry *et al.*, 1995a ; Bricquet *et al.* , 1996 ; Lamagat *et al.* , 1996 ; Diarra & Soumaguel, 1997 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Mahé *et al.*, 1997 ; Olivry *et al.*, 1998). Il existe aussi quelques études isotopiques (isotopes stables ^{18}O et ^2H) qui ont permis de préciser les relations du fleuve avec la nappe superficielle, les pertes par évaporation, les recharges par les pluies (Fontes *et al.*, 1991 ; Gourcy, 1993 ; Sidoru *et al.*, 1993 ; Gourcy, 1994).

L'étude du régime du Niger supérieur (dans sa partie malienne) sera replacée dans le contexte climatique actuel. Notons que l'actualisation des données de débits réalisée par Marieu *et al.* (1997) peut avoir changé certaines valeurs par rapport aux données bibliographiques antérieures.

2.1. Eléments du régime hydrologique du Niger supérieur et du Bani

L'étude du régime hydrologique du Niger supérieur est essentiellement basée sur l'étude des débits à la station de Koulikoro (bassin de 120 000 km², dont seulement un cinquième au Mali, et à 570 km de la source) qui est considérée comme représentative du haut bassin du Niger. Cette station dispose d'une chronique de données anciennes (remontant à 1907) et de bonne qualité qui a fait l'objet d'études sur les variations hydroclimatiques de l'Afrique de l'Ouest (parmi lesquelles : Mahé & Olivry, 1991 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Bricquet *et al.*, 1996 ; Mahé *et al.*, 1997). Plus au sud, le Bani à la station de Douna (102 000 km²) draine un bassin versant à peine moins important que celui du Niger à Koulikoro, mais moins arrosé et soumis au climat tropical pur. Les chroniques de relevés des hauteurs d'eau ne deviennent réellement exploitables qu'à partir de 1951.

2.1.1. Le régime des crues

Le Niger supérieur et le Bani font l'objet **d'une grande crue annuelle**, caractéristique pour le Niger supérieur du régime tropical de transition alors que le Bani suit un régime tropical pur (Rodier, 1967). L'hydrogramme correspondant résulte de l'évolution progressive, au cours de la saison des pluies, du débit de base sur lequel se greffent des pointes de crues d'une durée variable. Compte tenu de la taille des bassins versants (120 000 km² à Koulikoro pour le Niger et 102 000 km² pour le Bani à Douna), les crues exceptionnelles ne correspondent pas obligatoirement avec les fortes averses dont la répartition spatiale est généralement limitée. Les débits maximums annuels sont en assez bonne relation avec le volume annuel écoulé. Pour les grands fleuves, le maximum annuel peut très bien caractériser le régime des crues et des hautes eaux (représentant l'essentiel de l'écoulement annuel) qui correspond aux mois d'abondance pluviométrique (Olivry *et al.*, 1998).

Période de retour en années	Années Humides			Médiane	Années sèches		
	100	20	10	2	10	20	100
Modules en m³.s⁻¹							
Koulikoro (NIGER)	2366	2089	1940	1419	898	750	472
Douna (BANI)	918	854	827	419	153	84	70
Maximum de crue en m³.s⁻¹							
Koulikoro (NIGER)	9330	8290	7735	5590	3800	3300	2260
Douna (BANI)	4460	3560	3480	2425	806	565	364

Tableau 15. Analyse fréquentielle de quelques paramètres hydrologiques observés sur le bassin du Niger (modules et maximums) (d'après Olivry *et al.*, 1995a)

La conjugaison du caractère épisodique des pluies ("mousson africaine"), des faibles pentes, de la direction sud-nord des cours principaux, des sols peu perméables, de plaines d'inondations qui absorbent les excédents de crues, explique la **médiocrité des puissances de crue du Niger supérieur et du Bani** (Tableau 15), médiocrité caractéristique des cours d'eau d'Afrique sèche (Rodier, 1967).

Ces deux cours d'eau drainant des régions différentes (relief, précipitations...), leurs crues ne sont pas de la même puissance, ni synchrones. Le régime du Haut Niger est fortement dominé par les précipitations des hauts bassins guinéens, alors que les précipitations moins abondantes sur le bassin du Bani expliquent des apports moindres. **Le module du Bani ne représente ainsi que 11 à 41% des modules à Koulikoro** suivant le type d'années considérées (Tableau 15). Toutefois, pour les deux cours d'eau, c'est le régime des précipitations (chapitre I) qui commande la grande variabilité saisonnière des débits et induit des variations importantes de débit entre l'étiage et la crue.

Outre les différences absolues entre le Niger et le Bani, le Tableau 15 montre le regroupement des valeurs actuelles dans une gamme très déficitaire ; ce thème sera développé par la suite

2.1.2. Variabilité saisonnière des débits

Le contrôle majeur de la forme de l'hydrogramme de crue est la dynamique des précipitations en relation avec le réseau hydrographique et la morphologie du bassin. Les différentes caractéristiques du bassin (géologie, sols, végétation) vont aussi déterminer, pour une grande partie, la contribution des eaux souterraines aux débits du cours d'eau pour un bassin donné. La participation des différents écoulements (ruissellement, ruissellement hypodermique, écoulement souterrain superficiel et profond) vont avoir une influence notable sur la nature et la quantité des matériaux transportés par le fleuve.

2.1.2.1. Répartition mensuelle des écoulements

La répartition de l'écoulement au cours de l'année pour les stations du Niger supérieur étudiées (Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina) et sur le Bani (Douna) est précisée dans la Figure 28.

(a) *Le Niger*

Pour le Niger, pendant six mois (janvier à juin), les débits des basses-eaux représentent environ 8% du débit annuel. La remontée des débits s'annonce en mai, mais ne devient vraiment significative qu'au mois de juillet. Le maximum de crue a lieu généralement dans la deuxième quinzaine de septembre, soit un léger décalage par rapport au maximum des pluies en août. Plus de 80 % du volume s'écoule pendant 4 mois, entre août et novembre. La décrue, rapide et assez régulière, est caractérisée par deux phases.

- La première correspond à l'épuisement des eaux de surface (ruissellement),
- la deuxième phase qui se distingue par une diminution rapide des débits dès fin novembre, correspond à la vidange des nappes souterraines qui assurent alors exclusivement l'écoulement de surface : c'est la phase de tarissement.

L'alimentation en décrue et lors des basses eaux est principalement due au cumul des vidanges de petites nappes de versant assez semblables et caractéristiques de la géomorphologie générale de l'Afrique intertropicale (chapitre I) ; leur recharge ne dépend que des apports par infiltration des lames d'eau précipitées (Olivry *et al.*, 1998). Une étude complète réalisée sur 9 bassins représentatifs

reportés sur l'ensemble du Mali (Joignerez & Guiguen, 1992) a montré que certains bassins avaient une part importante de leur écoulement qui provenait d'écoulements de base retardés incluant vidange de mares et restitution de nappes. Le débit de base provenant des nappes intervient la plupart du temps tardivement dans la saison car il faut laisser à la nappe d'interfluve, le temps de se recharger à un niveau suffisant.

Boeglin & Tardy (1997) ont proposé une méthode de découpage de l'hydrogramme fondée sur le suivi de marqueurs chimiques (Na^+ , HCO_3^- , MES). Celle-ci leur a permis de séparer l'écoulement final du Niger à Bamako (entre Banankoro et Koulikoro) pour l'année moyenne 1990-1992 en 4,9% pour le ruissellement de surface, 52,1% pour la nappe profonde, 22,3 % dans la nappe superficielle et 20,8% restante pour le ruissellement hypodermique. Si la méthode montre bien l'importance des écoulements souterrains, elle ne paraît pas, en revanche, de nature à préciser de manière convaincante les autres composantes de l'écoulement.

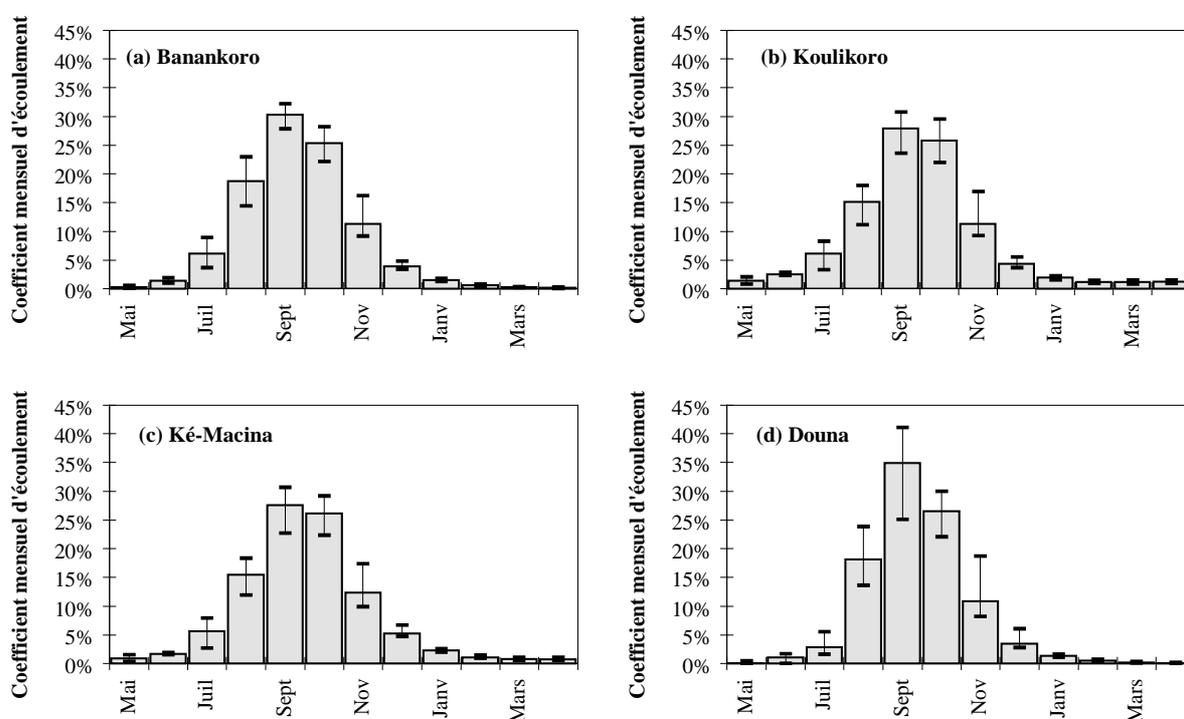


Figure 28.: Répartition de l'écoulement moyen mensuel (et de ses valeurs extrêmes) au cours de l'année pour quelques stations du Niger supérieur et sur le Bani (période commune 1955-1997). Banankoro (a), Koulikoro (b), Ké-Macina (c) et Douna (d).

L'influence du barrage de Sélingué sur l'évolution des débits du Niger à l'aval de la confluence avec le Sankarani est limitée lors des maximums de crue du Niger (déversement), alors que le soutien apporté par Sélingué en étiage est considérable. A titre d'exemple, la Figure 29 présente l'évolution des débits sortants du barrage de Sélingué pour une crue forte (1994-1995).

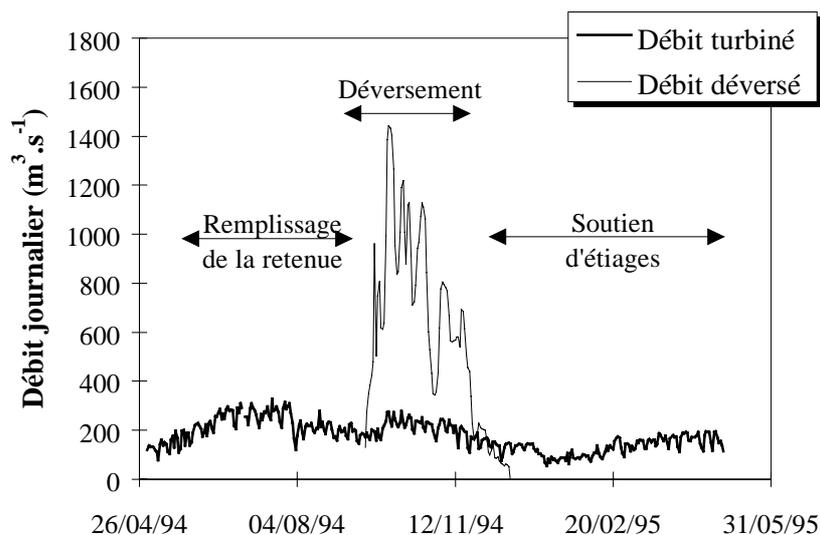


Figure 29. Evolution des débits journaliers sortants du barrage de Sélingué (1994-1995)

(b) *Le Bani*

A Douna sur le Bani (Figure 28d), la variabilité saisonnière des débits montre une plus longue période de faibles écoulements (seulement 7,5 % du volume annuel transite à Douna sur 6 mois). On a observé ces dernières années, un arrêt de l'écoulement lors des étiages de 1983/84 à 1988/89 et plus récemment en 1990/91, 1991/92, 1993/94. Cela est sans doute lié à un niveau très bas des nappes qui ne sont pas suffisamment réalimentées sur ce bassin. Le maximum de crue a lieu en général pendant la deuxième quinzaine de septembre et début octobre, 33% des écoulements annuels transitent en septembre et 80% d'août à octobre.

Il n'y a pas coïncidence des dates de maximum de crue entre le Niger et le Bani. La décrue est plus progressive sur le Bani que sur le Niger.

2.1.2.2. Les mesures isotopiques

Des prélèvements effectués par l'ORSTOM en 1990 et 1991, pour des mesures isotopiques à Banankoro et Douna faites par l'AIEA (Gourcy, 1993) ont permis de suivre l'évolution au cours de l'année des teneurs en isotopes stables ^{18}O et ^2H et de mieux identifier les origines des eaux participant à l'écoulement de surface.

(a) *Le Niger*

Sur le Niger, l'évolution des teneurs en ^{18}O au cours de l'année est en relation avec celle des débits. Au début de la saison des pluies (mai à juillet) il y a une diminution rapide des teneurs en isotopes lourds par lessivage direct : les pluies étant plus faiblement enrichies que les eaux soumises à l'évaporation pendant l'étiage (Figure 30a). Un enrichissement débute en août alors que le lessivage n'est pas terminé et que le débit du fleuve continue à augmenter. Ceci pourrait s'expliquer par un mélange entre les eaux de ruissellement et les eaux de la couche superficielle d'altérite épaisse et perméable. Cette dernière favorise un écoulement latéral de type ruissellement différé qui est évacué

par le réseau de surface (Chapitre I). Cet horizon est enrichi en isotopes sous l'effet de l'évaporation durant la saison sèche. Les premières pluies, par infiltration et effet piston, en permettent l'écoulement vers le Niger.

En amont de Banankoro, à partir de Siguiri en Guinée, il existe quelques plaines d'inondations, déjà signalées dans un paragraphe précédent, dont la grande extension permet un enrichissement par fractionnement isotopique dû à l'évaporation. Ces plaines se vidangent dans le fleuve et peuvent également jouer un rôle dans l'enrichissement observé à Banankoro au début d'août. D'autres études ont montré qu'un enrichissement dû à cet horizon perméable avait lieu, mais tout au début de la saison des pluies (juin). Le retard observé à Banankoro pourrait être dû à la présence d'un front d'infiltration suivi d'un lessivage par les eaux d'infiltration (Gourcy, 1994). Dès la décrue, la part des apports souterrains est de plus en plus grande et l'évaporation domine, ce qui permet un enrichissement progressif en isotopes lourds des eaux du fleuve.

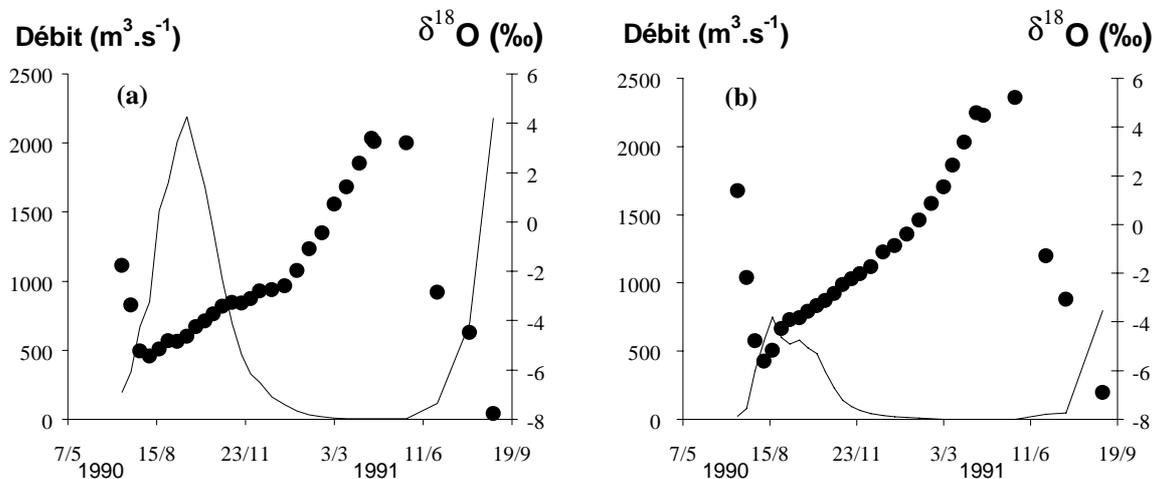


Figure 30. Evolution de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) en fonction du débits ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) à Banankoro (a) et à Douna (b) pour les années 1990 et 1991 (d'après Gourcy, 1993).

La relation $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ montre que deux droites de régression peuvent être établies, l'une pour la période de crue et l'autre pour la période de décrue (Figure 31a). Les pentes de ces deux droites respectivement +6,63 et +4,58 indiquent une évaporation. Les points d'intersection de ces droites avec la droite des eaux météoriques mondiales donnent la composition de l'eau d'origine. Ces valeurs sont : $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -29,7\text{‰}$ pour la décrue et $\delta^{18}\text{O} = -4,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -22,8\text{‰}$ pour la crue. Ces eaux se placent sur la droite de la chronique des eaux de pluies à Bamako : $\delta^2\text{H} = 5,8 * \delta^{18}\text{O} - 0,9$ (construite à partir des données de Bamako de 1962 à 1978 de l'IAEA). Le groupe des points de la décrue a un cachet nettement évaporé.

(b) Le Bani

Sur le Bani, l'évolution au cours de l'année est très classique (Figure 30b) ; elle montre une diminution des teneurs durant la crue, due à l'apport des eaux de pluies. Dès le début de la décrue, l'évaporation agit sur la surface d'eau libre et un enrichissement en isotopes lourds par fractionnement

isotopique a lieu. La saison des basses eaux est plus longue, ce qui explique les valeurs en isotopes stables plus importantes (évaporation plus forte).

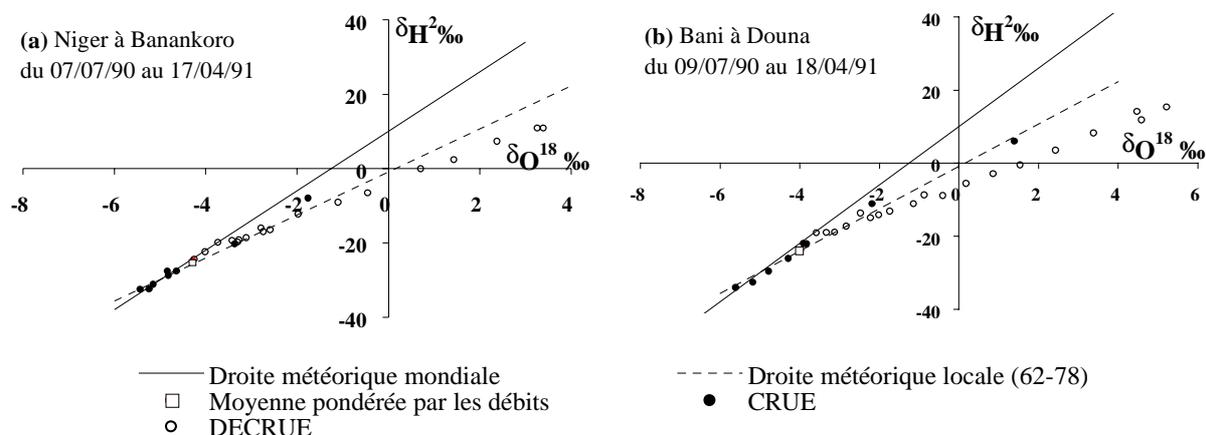


Figure 31. Variations de la composition isotopique moyenne des eaux pour le Niger à Banankoro (a) et pour le Bani à Douna (b) (d'après Gourcy, 1993).

La relation $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ montre, là aussi, que deux droites ont pu être définies pour la crue et la décrue (Figure 31b). Les pentes trouvées sont de +5,86 et +4,01 et correspondent à des eaux évaporées. Les points d'intersection avec la droite des eaux mondiales : $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$; $\delta^2\text{H} = -30\text{‰}$ pour la crue et $\delta^{18}\text{O} = -3,9\text{‰}$; $\delta^2\text{H} = -21,8\text{‰}$ pour la décrue. Ces eaux sont les mêmes qu'à Banankoro.

Les effets de continentalité et de latitude jouent un rôle négligeable car les sources de ces deux fleuves se trouvent dans une région peu étendue comprise entre les latitudes 8° et 13° nord et les longitudes 12° et 6° ouest.

2.1.3. Evolution spatiale des modules

On a déjà évoqué les différences entre le Niger et le Bani. L'étude spatiale des modules, réalisée uniquement sur les deux principaux biefs du Niger amont, Banankoro-Koulikoro et Koulikoro-Ké-Macina, (où l'on retrouve les deux ouvrages hydrauliques importants) nous permet de caractériser les apports ou les pertes se produisant sur les bassins intermédiaires. Ces données nous seront très utiles dans l'interprétation des différents flux de matériaux.

2.1.3.1. Bief Banankoro-Koulikoro

Lorsque le Niger entre au Mali, à la station de Banankoro (bassin versant de $71\,000\text{ km}^2$), le module interannuel pour la période d'observation (1967-97) est de $803\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, soit un débit spécifique (rapport entre moyenne et superficie) de $11,3\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$. A la station de Koulikoro, 200 km en aval, le débit moyen interannuel calculé sur la même période, est de $1170\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, (avec un bassin versant de $120\,000\text{ km}^2$, le module spécifique est de $9,3\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$). Ainsi, **entre Banankoro et Koulikoro, les**

volumes écoulés augmentent. Il existe une relation linéaire entre les modules sur les deux stations (Figure 32a) qui présente un coefficient linéaire de 0,98 (avec une probabilité de 99%).

Le Niger reçoit entre ces deux stations, espacées de 170 km, le Sankarani (35 500 km²), mais aussi un affluent de moindre importance le Faya (qui se jette en rive droite 2 km avant les échelles de Koulikoro, avec un bassin total de 2190 km²), ainsi que de nombreux marigots qui se jettent directement dans le fleuve. Les apports annuels moyens du Sankarani à Sélingué (au niveau du barrage le bassin versant est de 34 200 km²) sont estimés à 275 m³.s⁻¹ pour la période 1967-1995, et à 197 m³.s⁻¹ pour les années 1981 à 1995 largement déficitaires (période de fonctionnement du barrage). Ceci représente de 75 à 80% des apports intermédiaires sur le bief. La différence de modules entre les deux stations précédentes tient ainsi au fait que le Sankarani, représente une part importante des apports du Niger à Koulikoro.

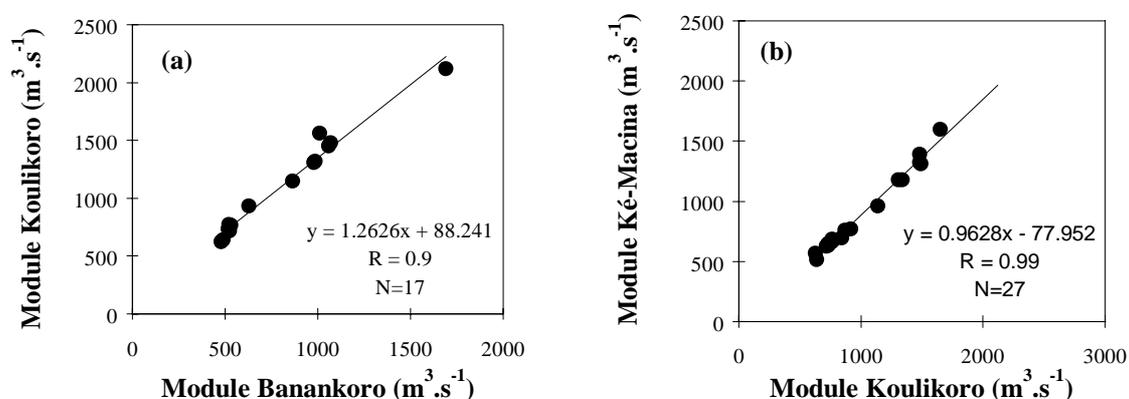


Figure 32. Relation entre les modules de Banankoro et Koulikoro (a) et de Koulikoro et Ké-Macina (b).

Mais les apports du bassin intermédiaire (14 800 km² avec le Sankarani à l'aval du barrage + le bassin entre Banankoro et Koulikoro) sont toutefois conséquents. Les apports de débit sont de 90 à 53 m³ s⁻¹ suivant la période choisie, ce qui correspond à des débits spécifiques de 6,1 et 3,6 l.s⁻¹.km⁻². Ces valeurs peuvent être comparées aux débits spécifiques de 11,5 et 6 l.s⁻¹.km⁻² observés sur deux petits bassins versants de la zone (Droux *et al.*, 1997), et à celui du Faya (Brunet-Moret *et al.*, 1986) correspondant à 8 l.s⁻¹.km⁻².

Ces quelques observations mettent en évidence les apports du bassin intermédiaire qu'il faudra donc prendre en compte dans les étude des flux de matières.

2.1.3.2. Bief Koulikoro - Ké-Macina

La dernière station du Niger avant son entrée dans le delta est celle de Ké-Macina (bassin de 141 000 km²). Le module interannuel est de 1070 m³.s⁻¹ sur la période 1955-1997 pour 1267 m³.s⁻¹ à Koulikoro. Comme pour le bief précédent, la relation linéaire entre les volumes écoulés à Koulikoro et Ké-Macina (Figure 32b) est très bonne ($R=0,99$; $N=27$). Mais cette fois ci, **il y a des pertes en eau entre les deux stations** dont le bief fait 270 km et où se trouve le barrage à hausses de l'Office du Niger. Par rapport à Koulikoro, les modules ont perdu de 210 à 50 m³.s⁻¹ suivant les années.

Une année de débit au niveau du canal adducteur de l'Office du Niger (dit "Point A") montre que le débit annuel enregistré pour l'année 1992/1993 est de $49,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (D'après Barral, 1997). Ce débit représente 7% du volume total écoulé à Koulikoro et 58 % des pertes totales sur cette année hydrologique. Les 42 % de pertes restantes sont donc à attribuer à d'autres pertes entre Koulikoro-Markala, bief qui fait environ 200 km de long. D'après Brunet-Moret (1986), les pertes en eau entre ces deux stations ne sont pas compensées par les apports du bassin intermédiaire de $17\,000 \text{ km}^2$. Elles sont principalement dues :

- Aux débordements du fleuve. Entre Tamani (à 68 km à l'amont de Ségou) et Ségou, les apports du bassin versant intermédiaire sont très faibles. Les pertes commencent à être sensibles : pertes par remplissage des aires inondables du lit majeur puis évaporation (cuvettes isolées du lit mineur à la décrue) et déversement possible en hautes eaux, dans la région de Kala, en face de Ségou, vers le Fala de Molodo.
- Aux effets "secondaires" dus à la présence du barrage de l'Office du Niger : évaporation due à la création de la retenue. En basses eaux, la manoeuvre des hausses du barrage relève le plan d'eau de la retenue, ce qui se fait sentir jusqu'à 25 km en amont de Ségou ; au contraire, en hautes eaux, les hausses sont abaissées (plus ou moins complètement?) et s'effacent complètement sur le radier.

Il existe en revanche, un deuxième tronçon entre Markala et Ké-Macina (d'environ 70 km) pour lequel il semble il y avoir des gains en eau (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Bien que ceux-ci ne soient pas quantifiés, ils proviendraient d'une part des apports entre les deux stations, et d'autre part des restitutions par l'Office du Niger en amont de Ké-Macina.

Finalement, aucune relation linéaire ne s'ajuste bien pour décrire les relations entre les pertes sur le bief et les modules à Koulikoro. Les prélèvements dus à l'Office du Niger sont erratiques (liés à ses besoins en eau) et ne sont pas fonction de l'hydraulicité de l'année. La gestion de l'alimentation en eau de l'Office du Niger consiste notamment à garder toujours la même hauteur d'eau dans le canal principal.

2.2. Bilan de l'eau sur les BV amonts et variations interannuelles

2.2.1. Bilan hydrique

Sur une période déterminée, le bilan de l'eau dans un bassin hydrographique est de type :

$$P = E + Q + \Delta S$$

dans lequel P représente les précipitations, E l'évapotranspiration, Q le débit des cours d'eau et ΔS la variation de stock. Dans cette équation la variation de stock est considérée comme nulle pour un grand bassin versant à l'échelle interannuelle. Le terme E du bilan ci-dessus est alors considéré comme l'évapotranspiration réelle et correspond à la pluie moins l'écoulement.

A la station de Koulikoro, le débit moyen interannuel calculé sur la période 1951-90, est de $1375 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, (module spécifique de $11,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Avec une hauteur de précipitation interannuelle estimée à 1452 mm et une lame d'eau écoulée² de 361 mm, le coefficient d'écoulement³ moyen pour l'ensemble du bassin amont du Niger à Koulikoro atteint 24,9% (D'après Mahé *et al.*, 1997 ; et actualisé). Ce coefficient d'écoulement élevé s'explique par la géologie du bassin composé de roches granitiques du socle avec peu de végétation (Brunet-Moret *et al.*, 1986). La reprise par évaporation serait de 1091 mm.

En rive droite du Niger, le Bani, dont les limites Sud se situent en Côte d'Ivoire, est nettement moins arrosé que le Haut Niger guinéen : la lame précipitée moyenne sur la même période de 1951-1990, est estimée à 1113 mm (Bamba *et al.*, 1996a et b). Ceci explique que le module moyen du Bani à Douana soit à peine de $465 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sur la même période d'observations (1951-1990), le débit spécifique à Douana de $4,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ représente une valeur presque trois fois plus faible que celui du Niger à Koulikoro ($11,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$). Avec une lame écoulée moyenne estimée à 144 mm, le coefficient d'écoulement est de 12,9% (Bamba *et al.*, 1996a et b, et actualisé). L'évapotranspiration est donc estimée à 969 mm.

2.2.2. Evolution interannuelle et contexte hydroclimatique des dernières décennies

Les chroniques des modules du Niger supérieur à Koulikoro et du Bani à Douana sont présentées dans la Figure 33. La chronique de Diré à la sortie du delta intérieur du Niger est également figurée à titre de comparaison.

L'évolution de ces modules montre que le Niger connaît depuis les années 1970 une modification de son régime hydrologique en relation avec le déficit pluviométrique observé dans toute l'Afrique de l'Ouest (Mahé & Olivry, 1991 ; Mahé & Olivry, 1995; L'Hôte & Mahé, 1996, entre autres). En effet, cette période est caractérisée par une baisse continue de la pluviométrie sur le bassin versant entraînant aussi un changement dans le même sens de l'écoulement (Olivry *et al.*, 1993 ; Olivry *et al.*, 1995a), mais avec un déficit plus marqué pour les écoulements que pour les précipitations (Bricquet *et al.*, 1995 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Bamba *et al.*, 1996a et b). Le Tableau 16 montre bien le décalage récent entre l'évolution de l'hydraulicité⁴ du fleuve et celle de l'indice pluviométrique⁵ à Koulikoro sur le Niger, et à Douana sur le Bani pour les quatre dernières décennies (d'après, Bricquet *et al.*, 1996, Bamba *et al.*, 1996a et b et Mahé *et al.*, 1997).

² La lame d'eau écoulée correspond à la hauteur qu'atteindrait le volume écoulé à l'exutoire d'un bassin versant s'il était également réparti sur la surface du bassin.

³ Le coefficient d'écoulement correspond au rapport : lame écoulée/hauteur de précipitation.

⁴ L'hydraulicité (Ie) d'une année dans une série chronologique est définie par l'expression : $Ie = (Q - Q_m) / Q_m$; avec Q, le débit annuel et Q_m , la moyenne interannuelle des modules de la série.

⁵ L'indice pluviométrique (Ip) est défini de même comme $Ip = (P - P_m) / P_m$.

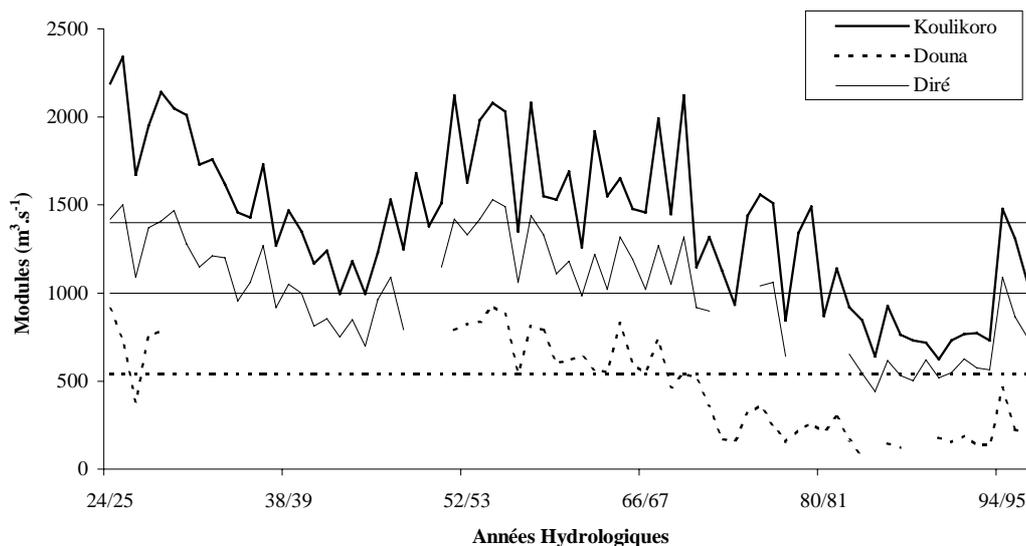


Figure 33. Evolution des modules du Niger supérieur à Koulikoro, du Bani à Douna, du Niger à Diré et moyennes interannuelles (1924-97).

Entre la première et la dernière décennie, la différence de pluviométrie est de 20% pour le Niger et de 24 % pour le Bani, la différence d'écoulement de 55% pour le Niger et de 79% pour le Bani. Les régimes des écoulements ont été marqués par les changements climatiques avant et après 1970, plus sur le bassin versant du Bani que sur le bassin versant du Niger. En effet, l'arrêt des écoulements pendant l'étiage et sur plusieurs années sur le Bani a déjà été évoqué dans les paragraphes précédents.

(a) Koulikoro (120 000 km²)

Périodes	Q, m3/s	P, mm	Le, mm	Ke, %	Ie, %	Ip, %	DE, mm
1951 - 1960	1800	1611	473	29,4	128,6	107,8	1138
1961 - 1970	1600	1529	420	27,5	114,3	102,3	1109
1971 - 1980	1260	1403	331,0	23,6	90,0	93,9	1072
1981 - 1989	795	1268	209,0	16,5	56,8	84,9	1059

(b) Douna (101 600 km²)

Périodes	Q, m3/s	P, mm	Le, mm	Ke, %	Ie, %	Ip, %	DE, mm
1951 - 1960	772	1251	239	19,1	166,0	112,4	1012
1961 - 1970	649	1187	201	16,9	139,6	106,6	986
1971 - 1980	247	1053	76,4	7,3	53,1	94,6	977
1981 - 1989	163	945	50,4	5,3	35,1	84,9	895

Tableau 16. Baisse continue de la pluviométrie et des écoulements depuis les quatre dernières décennies à Koulikoro sur le Niger (a) et à Douna sur le Bani (b) (Q : Débit ; P : Pluie ; Le : Lame écoulée ; Ke : Coefficient d'écoulement ; Ie : Indice d'écoulement ; Ip : Indice pluviométrique ; DE : Déficit d'écoulement)

Dès 1993, Olivry *et al.* font l'hypothèse que le changement durable de la relation pluie-débit est dû à une réduction de l'écoulement de base et que le retour à des débits plus soutenus suppose la reconstitution des aquifères, possible avec un cumul de variations climatiques dans le même sens.

L'étude des variations des coefficients de tarissement⁶ sur quelques stations du Niger amont et du Bani semble corroborer cette hypothèse (Bricquet *et al.*, 1995 ; Bamba *et al.*, 1996a et b ; Bricquet *et al.*, 1997; Mahé *et al.*, 1997). En effet, les coefficients de tarissement augmentent pour nombre de stations du simple au double depuis 1971, ce qui indique une vidange des nappes plus rapide, et donc un niveau plus faible de celles-ci.

Pour le Niger à Koulikoro (Figure 34), les données montrent un coefficient de tarissement qui a augmenté brutalement vers 1980 jusqu'à une valeur de $0,040 \text{ j}^{-1}$ au début des années 90. Dans le cas du Bani, l'évolution du tarissement est tout aussi significative. De 1950 à 1975, le coefficient moyen est de $0,023 \text{ j}^{-1}$, il passe à $0,03 \text{ j}^{-1}$ à la fin des années 70 et à $0,04 \text{ j}^{-1}$ à la fin des années 80. Après les sécheresses sévères des années 1970, 1980 et 1990, l'appauvrissement des nappes phréatiques n'a pu être compensé en dépit d'une faible amélioration de la pluviométrie des années 1988, 1989 et 1994. L'année 1994, qui fait partie de la période d'étude des flux de matière, a vu la crue du Niger à Koulikoro atteindre une cote inégalée depuis de nombreuses années, bien qu'à peine supérieure à la médiane calculée sur 86 ans. Les pluies sur le bassin ont pourtant été très abondantes (1670 mm), soit 15 % de plus que la moyenne 1951-1989.

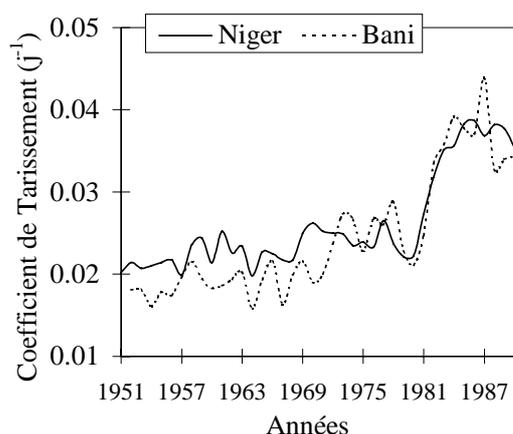


Figure 34. Evolution du coefficient de tarissement
(d'après Bricquet *et al.*, 1997)

Olivry *et al.* (1998) ont comparé cette année 1994 à une année équivalente (Tableau 17), qui se situerait dans une période humide (elle est constituée à partir de 5 années dont le total annuel des précipitations est voisin de celui de 1994). Pour une même pluie, le coefficient d'écoulement pour l'année 1994 est inférieur de 30% à l'année équivalente, et le coefficient de tarissement est supérieur de 60%. Ceci confirme bien les hypothèses d'un appauvrissement des écoulements essentiellement dû à celui des aquifères alimentant l'écoulement de base.

⁶ Le tarissement d'un cours d'eau correspond à la vidange des réserves souterraines du bassin en dehors de toute précipitation et d'apport ruisselé. La décroissance des débits pour le bassin du Niger supérieur (Roche, 1963), prend une forme exponentielle d'expression : $Qt = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$, connue sous le nom de loi de Maillet, où Q_0 est le débit initial du début du tarissement, α , le coefficient de tarissement, t le temps en jours entre la date t_0 d'observation de Q_0 et celle du débit Qt à l'instant t .

	Année 1994-1995 Période Sèche	Année équivalente Période Humide
Pluviométrie (mm)	1670	1660
Lame Eoulée (mm)	376	537
Coef. d'écoulement (%)	22,5	32,3
Max. de crue ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	5800	6500
Tarissement α (j^{-1})	0,036	0,022

Tableau 17. Comparaison de la saison 199-1995 avec la moyenne des années de pluviométrie équivalente (d'après Olivry *et al.*, 1998).

Un schéma théorique de composition des écoulements pour deux hydrogrammes annuels de crue correspondant aux périodes humide et sèche (Figure 35), résultant de conditions pluviométriques identiques en hauteurs de précipitations et en répartition peut être envisagé (Olivry *et al.*, 1995a). L'hypothèse de départ est que le ruissellement est le même, le volume d'origine phréatique (écoulement de base) est alors déduit de la courbe de tarissement principal, beaucoup plus rapide en décennie sèche, et apparaît comme nettement plus faible. Les hydrogrammes de crues (composés des deux écoulements) sont réduits en volume et en durée et les maximums de crue sont moins importants dans la situation actuelle que dans une période plus humide.

Pour Mahé *et al.* (1997), la faible diminution du déficit d'écoulement fait penser que c'est la part infiltrée qui diminue, réduisant de ce fait petit à petit le niveau des nappes, et provoquant des étiages plus sévères au fur et à mesure que la sécheresse se poursuit.

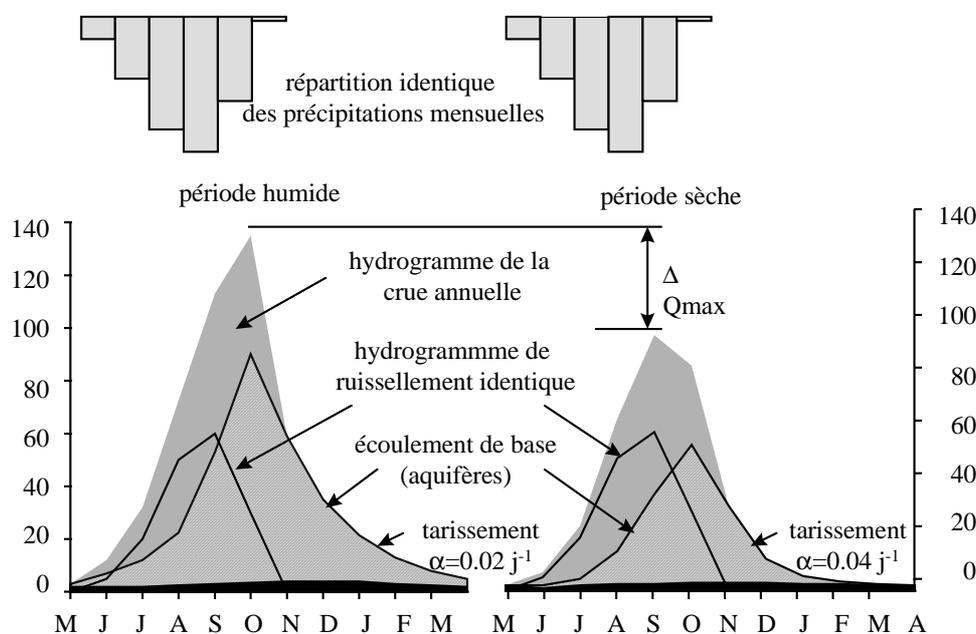


Figure 35. Schéma théorique de décomposition de l'hydrogramme de crue en décennie humides ou sèche (d'après Olivry *et al.*, 1995a ; Olivry *et al.* 1998)

En effet, les écoulements de surface, très rapides (se produisant surtout sur les petits bassins de tête), ne seraient que très peu concernés par les modifications climatiques (Pouyaud, 1987), et la reprise évaporatoire des eaux de la zone non saturée se ferait au détriment de l'infiltration. L'amointrissement de l'écoulement de base serait donc lié à une réduction des nappes de versant des bassins, leur alimentation n'étant plus assurée dans des conditions aussi favorables qu'auparavant. Ce phénomène est d'autant plus important sur le bassin du Bani que les aquifères sont caractérisés par une faible capacité de stockage.

En résumé, la différence des réponses entre le Niger et le Bani pour l'année 1994, de pluviosité exceptionnelle (la différence entre pluie et écoulement est plus élevée pour le Niger à Koulikoro que pour le Bani à Douna) est peut être liée :

- à une différence de propriété des aquifères (Mahé *et al.*, 1998). Dans le cas du Bani (aquifères fissurés) les échanges plus rapides entre nappe et surface exacerberaient les mouvements vers le haut (recharge accélérée) et vers le bas (étiages rapidement faibles) tandis que sur le Niger la recharge serait plus lente.
- à la sécheresse des années 1970 et 80 plus sévère dans la zone du bassin versant du Bani ce qui a entraîné une vidange plus importante des nappes. En effet, l'étude des termes du bilan hydrologique (1951-1989) sur les sous bassins versants amonts du Niger et sur le Bani (Bamba *et al.*, 1996a et b) a permis de localiser des zones de très fort déficit (nord de la Guinée, Mali) et une zone de déficit plus modéré en Guinée forestière, sous le vent des monts de Guinée (bassins de Niandan et du Milo).

Dans les deux cas, une succession de plusieurs années de pluies supérieures à la normale du siècle serait nécessaire pour retrouver les caractéristiques hydrologiques d'avant 1970.

3. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES ANNEES ETUDIEES

De 1991 à 1998, des prélèvements hebdomadaires de matière en suspension (MES) et de matières dissoutes sont effectués en plusieurs points de l'axe fluvial du fleuve Niger au Mali (chapitre II). Pour estimer le transport solide et dissous il est nécessaire de caractériser les flux hydriques auxquels ils sont attachés, mais aussi de situer les années étudiées dans leurs contexte hydroclimatique.

3.1. Contexte hydroclimatique des années 1991 à 1998

La période maximum d'étude s'étale sur 8 cycles hydrologiques de juillet 1991 à mai 1998. Replacée dans le contexte hydrologique moyen de ces 25 dernière années, cette période paraît comme contrastée (Figure 36 et Figure 37). La comparaison des débits sur le bassin versant du Niger et du Bani et de la moyenne interannuelle de 1970 à 1998 est présentée page suivante.

On considère l'**hydraulicité de l'année** $I_e = (Q - Q_m) / Q_m$ avec Q , débit annuel de l'année considérée ; Q_m , débit annuel moyen de la période 1970-1998.

Sur le Niger

- **Années de faible hydraulicité ("sèches") :**
1991-1992, 1992-1993, 1993-1994
($-0,29 < I_e < -0,27$),
- **Années moyennes :**
1996-1997 et 1997-1998 ($I_e = +0,12$ et 0) ;
- **Années de bonne hydraulicité ("humides") :**
1994-1995, 1995-1996 ($I_e = +0,46$ et $+0,33$).

Sur le Bani

- **Années de faible hydraulicité :**
1992-1993, 1993-1994
($-0,37 < I_e < -0,11$)
- **Années moyennes :**
1991-1992, 1995-1996, 1996-1997 et
1997-1998 ($-0,05 < I_e < +0,05$) ;
- **Année de bonne hydraulicité :**
1994-1995, ($Q_i = +1,14$).

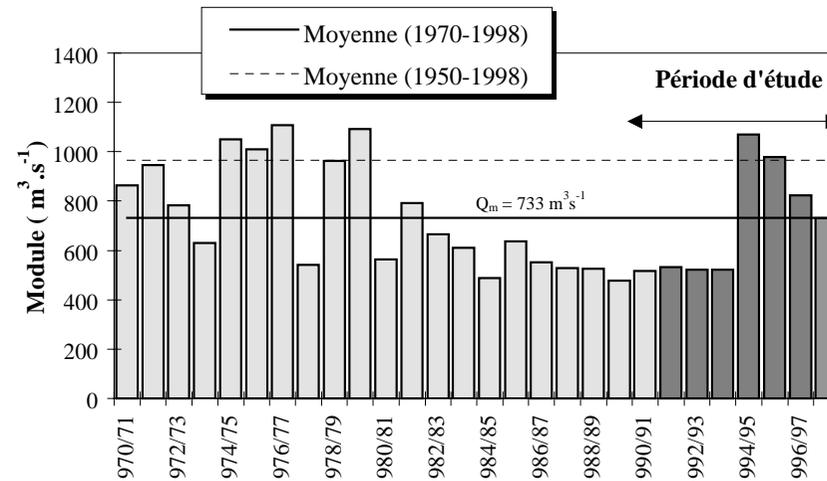


Figure 36. Ecoulement annuel des six années d'observation des flux particulières à la station de Banankoro (Niger supérieur) comparé à celui mesuré depuis 1970.

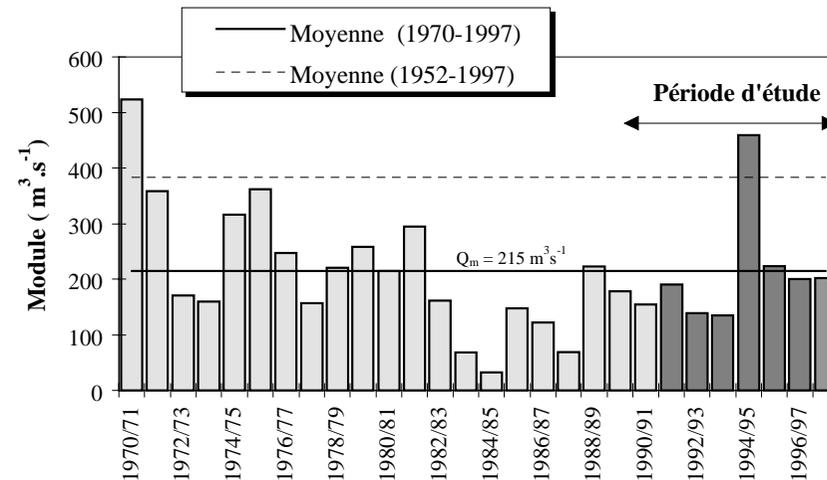


Figure 37. Ecoulement annuel des six années d'observation des flux particulières à la station de Douna (Bani) comparé à celui mesuré depuis 1970.

3.2. Caractéristiques hydrologiques sur la période 1991-98

Les principales caractéristiques de la période 1991-1998 sont données dans le Tableau 18 pour les différentes stations du bassin amont du Niger étudiées.

	Cours d'eau	Superficie	Module Moyen	Débit Spécifique	Minimum mensuel	Maximum mensuel	Lame écoulée
		(km ²)	(m ³ .s-1)	(l.s-1.km ²)	(m ³ .s-1)	(m ³ .s-1)	(mm)
Banankoro	Niger	70 800	739	10,4	2,5	3840	330
Sélingué*	Sankarani	34 200	235	6,9	64	1116	217
Koulikoro	Niger	120 000	1019	8,5	108	5080	268
Ké-Macina	Niger	141 000	906	6,4	48,1	4530	185
Douna	Bani	101 600	221	2,2	0	1540	69

* Les données de Sélingué viennent d'HYDROCONSULT (Débit Sélingué = débit usiné +déversonné).

Tableau 18. Caractéristiques des stations étudiées pour la période 1991-1998

Elles confirment pour la période d'étude les caractéristiques observées précédemment sur l'ensemble de la chronique de débits :

- faiblesse des apports annuels du Bani (à Douna) au delta intérieur du Niger par rapport aux apports du Niger à Ké-Macina : **en moyenne (1991-1998), ceux-ci ne constituent qu'environ 20 % des apports totaux.**
- gain en eau entre Banankoro et Koulikoro,
- pertes en eau sur le bief entre Koulikoro et Ké-Macina, qui se ressentent à Ké-Macina aussi bien sur les modules, que sur les débits mensuels minimum et maximum.
- rôle important que joue le barrage de Sélingué dans le soutien d'étiage dont bénéficie le Niger à partir de Koulikoro qui se ressent sur les minimums mensuels observés aux deux stations à l'aval de la confluence du Niger et du Sankarani (Koulikoro et Ké-Macina).

3.3. Caractéristique de chaque hydrogramme annuel

Le Tableau 19 présente pour la période 1991-98, les caractéristiques principales des hydrogrammes de crues aux stations de Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina et Douna : module, débit de pointe (journalier), minimum journalier, pourcentage du volume mensuel écoulé sur les 3 mois d'étale (Août, Septembre et Octobre). Les débits mensuels pour chaque année et chaque station pour la période d'étude se trouvent en annexe 2.

Ce tableau montre dans un premier temps que sur l'ensemble des stations et sur les 8 cycles hydrologiques, les très bonnes relations qui existent entre les débits annuels mais aussi les maximums

de débit journaliers entre les 3 stations du Niger (Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina) sont vérifiées (§ 2.1.1.). Sur le premier bief (Banankoro-Koulikoro), plus l'année est humide est plus les gains du bassin intermédiaire (notamment Sankarani) sont importants et par conséquent les débits à Koulikoro le seront aussi. Sur le bief Koulikoro-Ké-Macina, où des pertes en eau sont observées (§ 2.1.2.2), cela signifie que plus l'année sera humide et plus les pertes seront importantes. Nous verrons par la suite les conséquences de ces variations sur les bilans des apports solides.

Le tracé des hydrogrammes pour une station donnée (exemple à Banankoro et Douna en Figure 38 et Figure 39) montre aussi des particularités importantes entre années liées à la variabilité spatio-temporelle des pluies. Même si la crue couvre à peu près la même période, les débits maximums journaliers sont différents et atteints plus ou moins tardivement ; la longueur de l'étale de crue est ainsi différente d'une année à l'autre. L'intensité et la forme de l'hydrogramme conditionnent **la répartition des volumes écoulés** dans le temps : si l'étale de la crue est longue, les volumes sont mieux répartis sur l'année et inversement. Par exemple à Banankoro l'année 1994-1995 se caractérise, par une crue de très forte intensité qui s'est de plus prolongée dans le temps : les mois d'août, septembre, et octobre représentent alors une plus faible part dans l'écoulement total (69 %) par rapport aux autres années où ces mois représentent environ 75% des écoulements. Pour l'année 1995-1996, bien qu'ayant un maximum plus important qu'en 1994-1995, le volume écoulé annuel est plus faible, car la crue est de durée plus courte.

A Douna, l'année 1994-1995, avec un débit annuel et un débit maximum représentant le double des autres années, s'est prolongée sur octobre et novembre (Figure 39) ; les 3 mois d'août à octobre ne représentant alors que 70% de volumes écoulés contre plus de 80% pour les autres années. Ces différentes remarques montrent qu'il n'existe pas sur les stations étudiées et pour la période considérée de relation parfaite entre le module annuel et le débit maximum journalier de la crue.

	Débit Annuel (m ³ s ⁻¹)	Débit min. (m ³ s ⁻¹)	Date min. (jour)	Débit max. (m ³ s ⁻¹)	Date max. (jour)	V _{3 mois} (%)
Banankoro						
1991-1992	532	2,1	06-mai	2180	28-août	76
1992-1993	521	1,1	14-avr	2230	12-sept	75
1993-1994	521	5,5	30-avr	2000	10-sept	74
1994-1995	1070	5	13-avr	4110	24-sept	69
1995-1996	978	29,5	04-mai	4350	28-sept	78
1996-1997	823	17,8	11-avr	3640	03-oct	77
1997-1998	730	9,4	13-avr	2970	16-sept	73
1998-1999	-	8,2	28-avr	3640	28-sept	
Koulikoro						
1991-1992	767	83,9	11-avr	3120	13-sept	68
1992-1993	775	92,1	21-mai	3400	17-sept	68
1993-1994	732	99,7	31-mars	2750	25-sept	65
1994-1995	1480	97,7	08-avr	5800	03-oct	64
1995-1996	1310	147	10-mai	5880	01-oct	74
1996-1997	1050	129	15-avr	5030	04-oct	73
1997-1998	1020	73,5	20-mars	4600	29-sept	70
1998-1999	-	91,4	20-mars	5090	04-oct	
Ké-Macina						
1991-1992	686	14,5	24-mai	2900	16-sept	69
1992-1993	681	35	22-mai	3180	19-sept	69
1993-1994	647	42	01-mai	2640	28-sept	67
1994-1995	1320	34,7	31-mai	5000	18-oct	64
1995-1996	1180	54,8	28-mai	5170	05-oct	74
1996-1997	914	53,3	28-mars	4270	07-oct	73
1997-1998	911	17,5	27-avr	4010	17-sept	69
1998-1999	-	-	-	4340	03-oct	
Douna						
1991-1992	190	0	30-mai	944	08-sept	82
1992-1993	139	0,3	29-mai	823	24-sept	82
1993-1994	135	0	02-juin	761	19-sept	81
1994-1995	459	0	07-mai	1800	28-sept	70
1995-1996	224	4,6	21-mai	920	02-oct	78
1996-1997	200	0,8	04-mai	881	25-sept	82
1997-1998	202	0,5	15-avr	1180	10-sept	82
1998-1999	-	-	-	1720	02-oct	

Tableau 19. Quelques caractéristiques des hydrogrammes de crue aux stations de Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina et Douna pour la période 1991-98: débit annuel, débit de pointe (journalier), minimum journalier, V_{3mois}=pourcentage du volume mensuel écoulé sur les 3 mois d'été (Août, Septembre et Octobre). Quelques données sur l'année 1998-1999 sont également données.

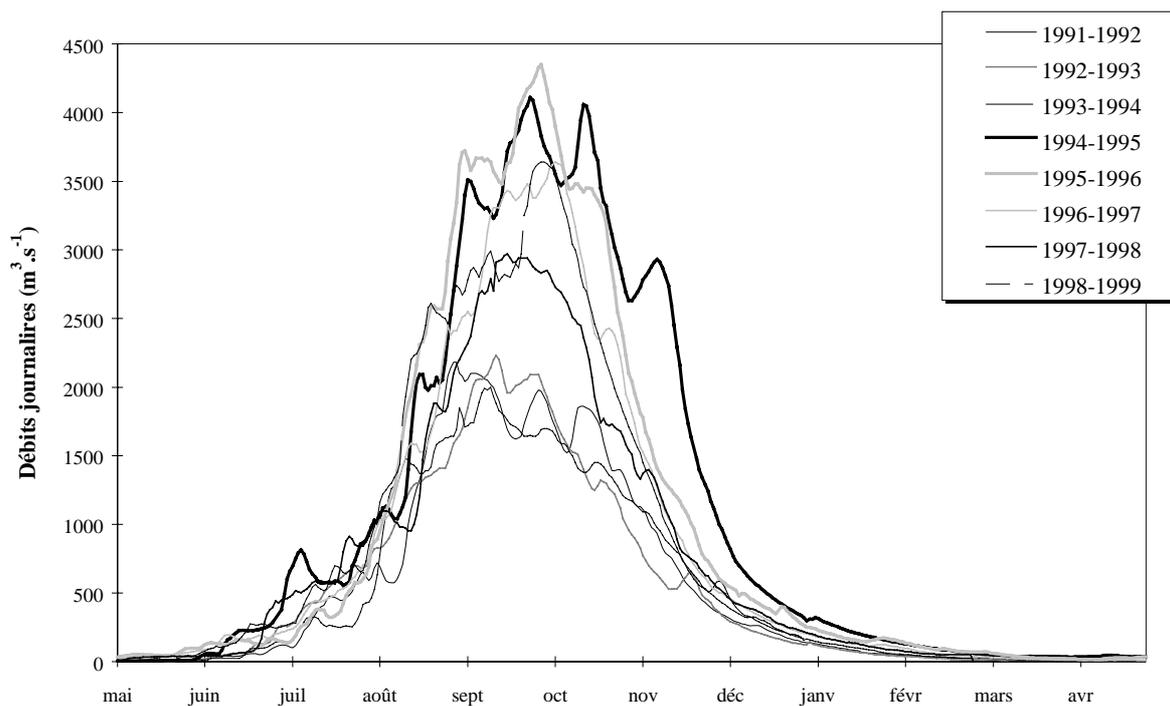


Figure 38. Exemple d'hydrogrammes annuels du fleuve Niger à Banankoro de 1990 à 1998.

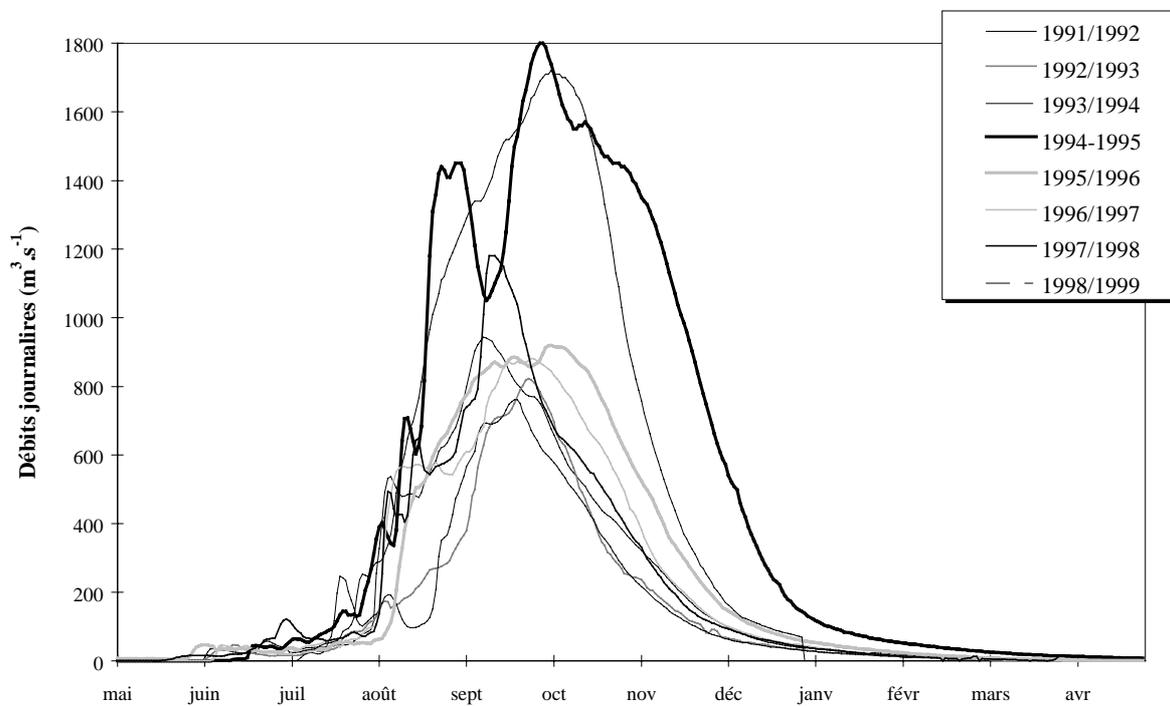


Figure 39. Exemple d'hydrogrammes annuels de la rivière Bani à Douna de 1990 à 1998.

L'évolution des volumes écoulés en fonction du temps permet également de visualiser les différences entre années de bonne hydraulicité et années d'hydraulicité médiocre : après une période où les volumes augmentent de la même manière, la différence entre les deux types d'années se creuse vers la fin du mois d'août au coeur de la saison des pluies, et dès la fin septembre les volumes pour les années humides ont atteint le double par rapport aux années sèches (Figure 40).

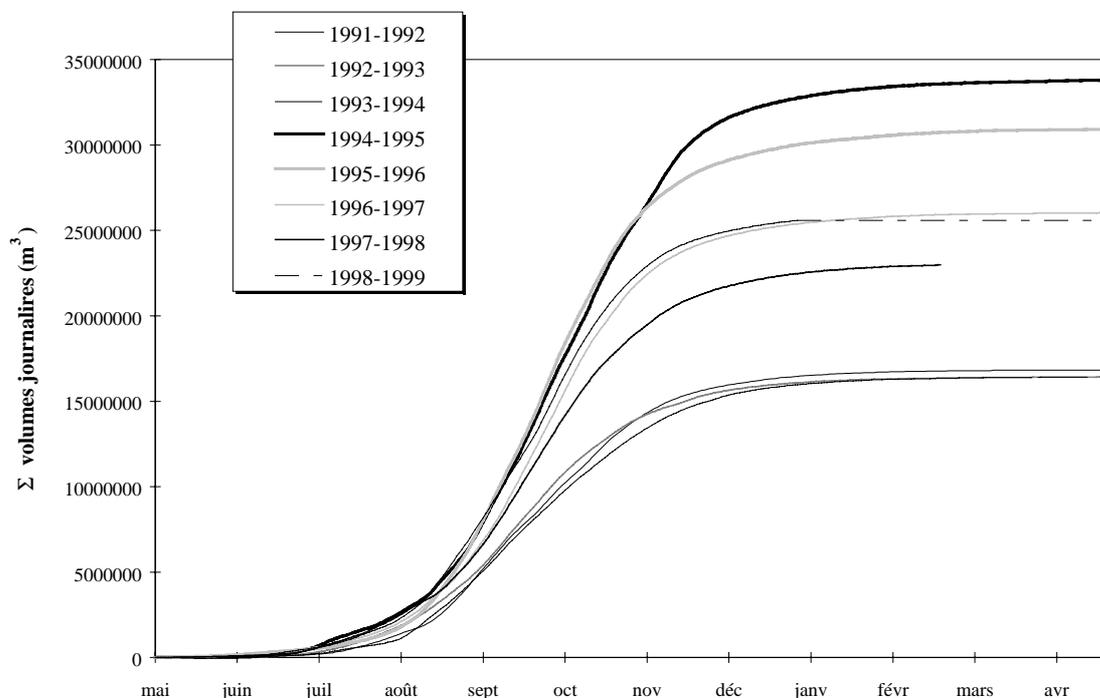


Figure 40. Evolution des volumes écoulés cumulés à Banankoro de 1990 à 1997.

L'intensité maximum de la crue conditionne aussi la cote maximum atteinte par le fleuve et **l'activation ou non des plaines d'inondation du lit majeur**. Le temps d'inondation va ensuite dépendre de la durée de l'étalement de la crue. Par exemple, à Banankoro, des débordements peuvent avoir lieu en rive gauche à partir de 5 mètres et en rive droite à partir de 7 mètres. De ce fait les plaines d'inondation n'ont pas été activées pour les années sèches alors que pour les trois années récentes, les durées d'inondation en rive droite sont respectivement de 82, 74 et 63 jours (Tableau 20).

Année hydrologique	Maximum de débit ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Nombre de jour $H > 5$ m	Nombre de jour $H > 7$ m	
1990 - 1991	2210	le 16/09/1990	2	0
1991 - 1992	2180	le 28/08/1991	0	0
1992 - 1993	2230	le 12/09/1992	1	0
1993 - 1994	2000	le 10/09/1993	0	0
1994 - 1995	4110	le 24/09/1994	82	5
1995 - 1996	4350	le 28/09/1995	74	11
1996 - 1997	3640	le 03/10/1996	63	0

Tableau 20. Minimum, Maximum et Nombre de jours où le débit dépasse la hauteur de 5 et 7 mètres.

4. CONCLUSIONS

L'ensemble de ce chapitre permet de retenir quelques points importants pour la suite de l'étude :

- Pour toutes les stations; le régime des écoulements correspond à une crue annuelle unique : le Niger supérieur (à Koulikoro) suit un régime tropical de transition avec un module interannuel de $1265 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1955-1997) alors que le Bani (à Douna) suit un régime tropical pur avec un module de $370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- La variabilité saisonnière des pluies commande celle des débits (on estime que l'année hydrologique débute le 1 mai). L'augmentation des débits correspond alors au ruissellement des eaux de pluies sur le bassin versant. La période des hautes eaux se prolonge pendant plusieurs mois (environ de juillet à décembre). En étiage, l'écoulement de base est assuré uniquement par la vidange des réserves souterraines, excepté pour les stations du Niger à l'aval de la confluence du Sankarani et du Niger pour lesquelles le débit d'étiage dépend pour l'essentiel des apports du barrage de Sélingué.
- L'étude isotopique a mis en évidence l'importance des écoulements lents dans l'écoulement total de surface et vraisemblablement l'importance du rôle des plaines d'inondation plus à l'amont (vidange de ces plaines).
- Les sept années d'observations regroupent des années hydroclimatiques contrastées représentatives des fluctuations hydrologiques de ces 20 dernières années.

Chapitre IV. Régime du transport solide en suspension sur le bassin amont du fleuve Niger

Nous avons vu dans les chapitres I et II que les notions d'érosion mécanique sur un bassin versant (ou prédictions des pertes en sols) et de transport spécifique dans les fleuves (flux annuel de MES rapporté à la superficie du bassin versant) regroupent deux processus différents. Elles permettent de distinguer d'une part les processus de détachement et de transport de matériaux du sol avant leur entrée dans le système "rivière" et d'autre part leur transport dans la rivière elle-même (Walling, 1983 ; Vijay & Singh, 1989 ; Wen Shen & Julien, 1992). Pour le premier point, on peut parler des agents de l'érosion qui sont principalement les pluies, les ruissellements qui en découlent et le vent, ainsi que des facteurs qui vont conditionner les quantités de particules arrachées : caractéristiques des pluies, des sols, de la végétation, de la topographie et enfin les activités humaines. Les taux de particules transportées vont à leur tour être régis par de nombreux facteurs dont la vitesse de l'eau, les caractéristiques du lit, la granulométrie des particules... Le matériel particulaire ainsi transporté par le cours d'eau ne reflétera qu'en partie les phénomènes d'érosion sur les versants puisqu'une partie des sédiments arrachés au bassin pourra se déposer (éventuellement temporairement) entre les sources d'érosion et l'exutoire du bassin de drainage. D'autre part, l'érosion des berges pourra contribuer à la charge en suspension mesurée dans le cours d'eau tandis que la présence de lacs, réservoirs entraînent une sédimentation des particules. L'hypothèse d'un équilibre constant entre l'érosion des berges concaves et la sédimentation sur les rives convexes est difficile à admettre sur une longue durée (Bravard & Petit, 1997). Pour ces différentes raisons, il est donc généralement admis que le transport spécifique de matières particulaires calculé dans les fleuves ne peut être assimilé à un taux de dénudation mécanique des versants.

L'étude des Matières En Suspension (MES) transportées sur les différentes stations du bassin du Niger amont (qui regroupe les bassins du Niger et du Bani) a pour but premier de quantifier le transport solide en suspension attaché aux flux hydriques étudiés au chapitre III et ainsi d'estimer les apports de MES au delta intérieur du Niger. Ceci nous amènera à discuter de la variabilité interannuelle et spatiale de ces différents flux et ainsi des sources possibles de ces sédiments (érosion des versants et/ou érosion des berges). Un deuxième objectif est de présenter deux modèles simplifiés issus des observations des variations des concentrations de MES dans le temps qui permettent de relier la concentration en MES à l'hydrologie (débit) observée à la station étudiée.

1. CONCENTRATIONS EN MES DANS LES EAUX DU BASSIN AMONT

L'évolution des concentrations en MES au cours de la crue a été suivie de 1991 à 1998 dans le cadre du programme EQUANIS de l'ORSTOM (chapitre II).

1.1. Résultats dans les eaux du bassin amont

1.1.1. Statistiques générales sur les données en MES

Le Tableau 21 présente quelques variables statistiques relatives aux distributions des concentrations en MES (médiane, minimum, maximum, centiles...) pour l'ensemble des stations du bassin amont (Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina, Sélingué, Douna) et pour les 7 années d'observations (années hydrologiques). L'ensemble des données instantanées est regroupé dans la banque de données de l'ORSTOM au Mali (ORSTOM, 1997), les concentrations moyennes mensuelles et annuelles sont calculées en annexe 5.

Une première remarque intéressante concerne la variabilité des caractéristiques des distributions des concentrations. Cette variabilité est à la fois spatiale (entre stations pour une même année) et temporelle (pour une même station) : par exemple, sur le Niger amont les maximums atteints à Ké-Macina sont plus importants que ceux observés sur les deux autres stations situées plus à l'amont. Ceux atteints sur le Bani à Douna le sont encore plus.

La variabilité temporelle est à la fois entre années et intra-annuelle. Entre années, la concentration maximum atteinte ou la concentration médiane peuvent varier du simple au double. Au cours d'une année hydrologique, les concentrations sont beaucoup plus variables. L'écart entre minimum et maximum est important pour toutes les stations et quelle que soit l'année (coefficients de variations élevés), le rapport entre ces deux concentrations extrêmes étant fréquemment supérieur à 100. Cette variabilité annuelle est liée principalement à la variabilité annuelle des débits dont nous discuterons tout au long de ce paragraphe.

1.1.2. Evolution des concentrations au cours du cycle hydrologique

1.1.2.1. Variabilité des concentrations à l'échelle hebdomadaire

La Figure 41 présente les variations des concentrations mesurées en MES (généralement hebdomadaires) et des débits journaliers au cours du temps pour l'ensemble des stations du bassin du Niger amont et du cycle 1991/1992 à 1997/1998. Quelle que soit la station, l'évolution des concentrations hebdomadaires au cours du cycle hydrologique est bien moins régulière que celle des

débites. Elle décrit une série de pics de concentrations dont **les plus fortes valeurs précèdent toujours le maximum de débit.**

	N	Médiane	CV	min.	- max.	Quartile 25%	- Quartile 75%	date min.	date max.
Banankoro									
1991/92	179	14,9	84%	0,1	- 72	6,0	- 25,7	7/4/92	9/7/91
1992/93	61	13,6	78%	1,8	- 51	7,2	- 19,4	5/4/93	18/8/92
1993/94	50	17,5	69%	1,3	- 64	10,8	- 32,7	3/5/93	26/7/93
1994/95	72	15,6	74%	4,4	- 66	11,0	- 29,7	3/4/95	7/7/94
1995/96	50	11,2	99%	3,0	- 82	7,1	- 33,6	2/4/96	13/7/95
1996/97	54	12,2	82%	4,0	- 81,3	7,5	- 22,9	17/5/96	12/8/96
1997/98	54	9,4	94%	1,9	- 69,9	5,1	- 18,7	9/2/98	14/7/97
Koulikoro									
1991/92	158	19,1	82%	0,7	- 79,9	8,1	- 31,9	30/1/92	1/8/91
1992/93	114	12,7	75%	1,1	- 54,5	6,5	- 19,8	11/2/93	29/8/92
1993/94	69	12,0	74%	2,5	- 52,4	8,0	- 24,4	3/5/93	2/8/93
1994/95	53	8,1	98%	1,8	- 69,9	4,9	- 22,9	9/5/94	11/7/94
1995/96	45	10,6	89%	2,8	- 57,8	7,2	- 22,4	15/1/96	4/8/95
1996/97	53	17,1	74%	3,9	- 88,1	10,5	- 29,1	3/3/97	29/7/96
1997/98	54	9,4	94%	1,9	- 69,9	5,1	- 18,7	9/2/98	14/7/97
Ké-Macina									
1991/92	41	10,7	129%	0,5	- 150,4	5,3	- 47,9	17/3/92	22/8/91
1992/93	47	26,4	65%	6,57	- 105	15,4	- 39,5	2/2/93	8/8/92
1993/94	47	31,6	65%	8,4	- 99,9	16,5	- 55,8	6/2/94	23/8/93
1994/95	44	26,3	76%	6,27	- 113	15,6	- 60,9	19/1/95	1/8/94
1995/96	54	25,1	73%	5,46	- 95,2	15,1	- 44,1	19/1/96	29/7/95
1996/97	50	21,7	77%	8,3	- 120	14	- 51,6	29/4/97	6/8/96
1997/98	51	21,7	125%	5,67	- 213	13,7	- 43,3	23/3/98	14/4/97
Douna									
1991/92	184	25,6	103%	0,1	- 251	9,0	- 57,3	6/5/92	5/8/91
1992/93	75	13,3	109%	0,7	- 125	5,6	- 46,6	7/5/93	30/7/92
1993/94	83	25,5	110%	3,1	- 245	13,5	- 46,1	24/5/93	19/7/93
1994/95	58	25,6	92%	5,0	- 171	16,9	- 58,7	2/5/94	14/8/94
1995/96	51	20,8	99%	7,3	- 165	14,8	- 44,3	4/3/96	17/8/95
1996/97	50	19,1	101%	8,8	- 183	11,3	- 84,2	13/1/97	5/8/96
1997/98	51	13,7	1,28	5,5	- 221	9,3	- 59,1	23/03/98	09/08/97

Tableau 21. Quelques variables statistiques de distribution des valeurs ponctuelles de MES sur les stations du bassin amont du Niger. (nombre d'échantillons analysés (N) ; concentration médiane ; coefficient de variation (CV) ; concentrations minimum et maximum ; quartiles ; date d'observation du maximum et du minimum de concentration)

La variabilité des concentrations d'une semaine à une autre, qui induit ces pics, semble être en partie **liée aux épisodes élémentaires de crue et de décrue** successifs qui composent l'hydrogramme final. Certains pics de concentration sont en effet observés lorsque les variations de débits sont importantes. A Douna, en 1993/1994 (Figure 41d), on observe au tout début de la crue un maximum de 250 mg l^{-1} beaucoup plus important que pour les autres années. Or l'augmentation des débits fut très importante dès le début de la crue cette année là (en sept jours le débit passe d'une valeur inférieure à $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, alors que pour les autres années les débits de début de crue ne dépassent jamais $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Par ailleurs, ces épisodes de crue ou de décrue successifs (correspondant à des variations de débits relativement importantes), et vraisemblablement aussi certains pics de concentrations, sont a priori liés à des contributions différées dans le temps des différents sous bassins versants du système, sur lesquels les pluies ne se produisent généralement pas au même moment. Or ce sont principalement les caractéristiques conditionnant l'érodabilité des bassins et les caractéristiques de ces pluies qui règlent l'acquisition de la charge en suspension dans l'écoulement, de part l'érosion des versants qu'elles induisent, qu'elle soit directe et liée essentiellement à l'intensité des précipitations, ou indirecte et liée aux ruissellements produits (chapitre I).

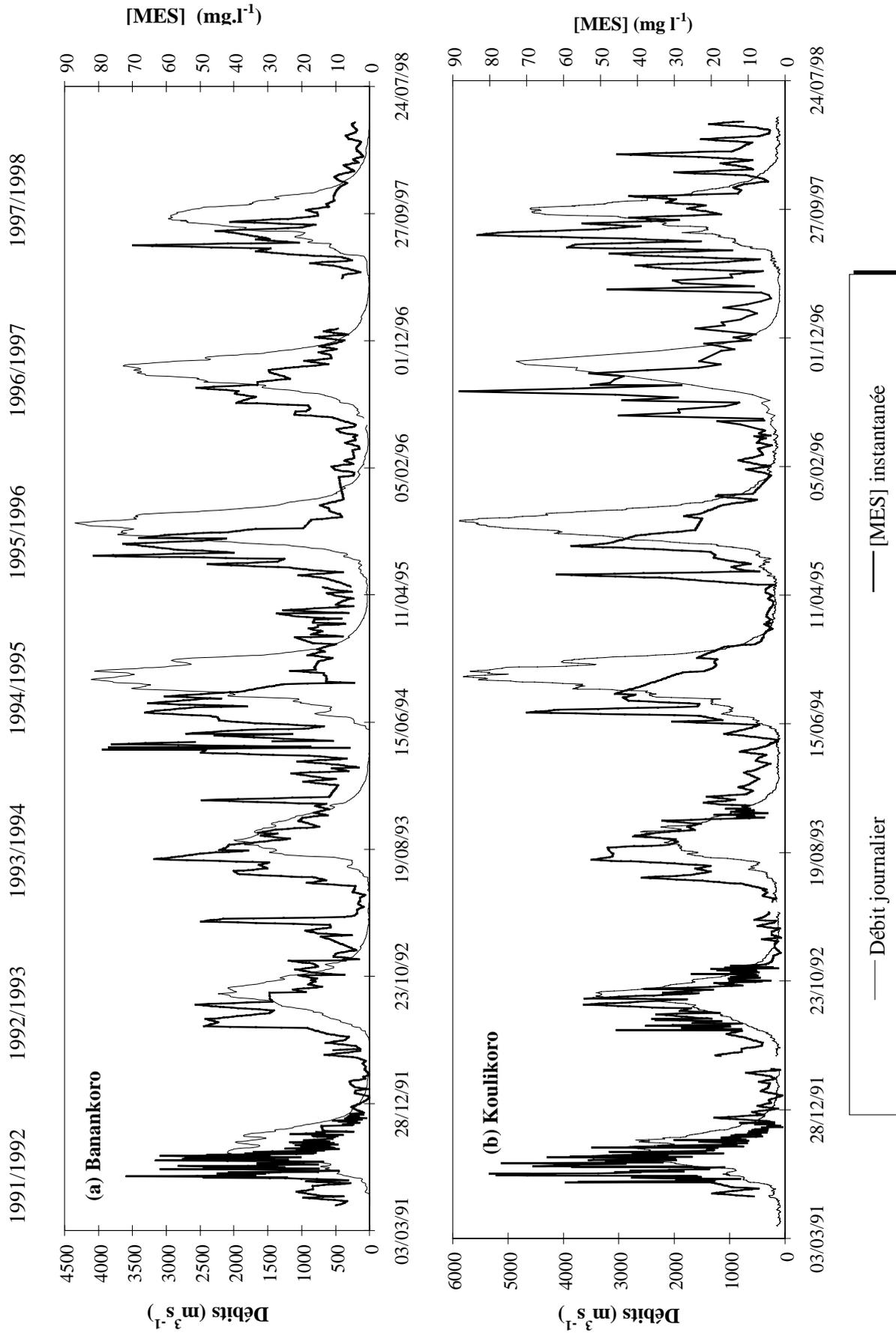
Différentes autres explications relatives à des **phénomènes locaux** peuvent aussi être envisagées pour expliquer ces pics. Une pluie dans les environs de la station peut par exemple conduire les divers mayos (petit cours d'eau) à se charger rapidement et à se déverser dans le fleuve. Les vents violents qui précèdent généralement les averses (Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; Orange *et al.*, 1993) et les vents sahariens (Coudé-Gaussen & Rognon, 1983) transportent beaucoup de poussières qui peuvent être piégées par l'eau du fleuve. Ils peuvent aussi contribuer à l'érosion des berges et à la remise en suspension des matériaux déposés au fond du lit du fait des remous qu'ils produisent. L'échantillonnage hebdomadaire peut être effectué après de telles modifications des concentrations.

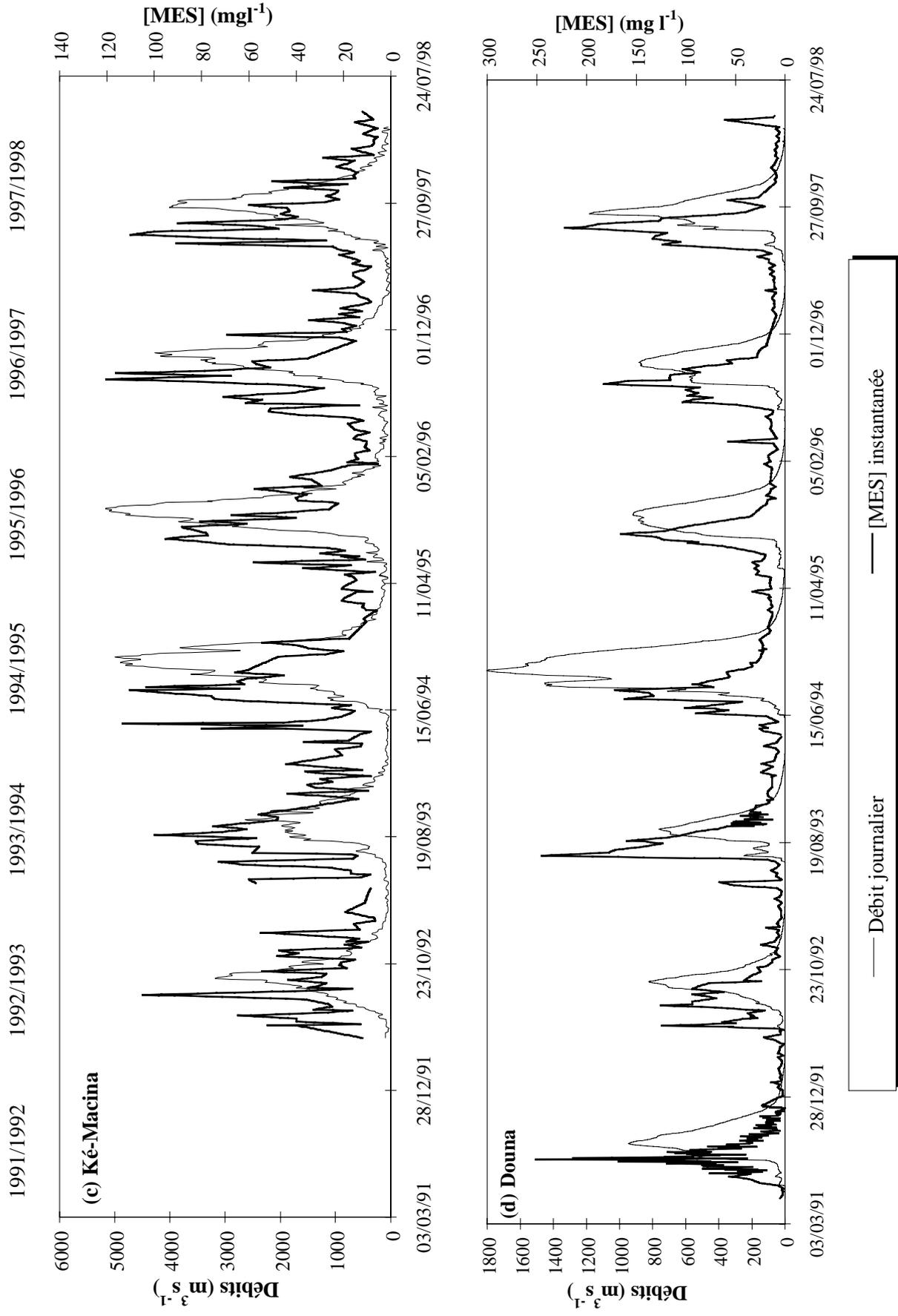
Malgré ces variations de concentration rapides dont les causes ne peuvent être identifiées clairement..., on peut mettre en évidence **une évolution globale plus systématique des concentrations en MES au cours du cycle hydrologique**. De mai à juillet, en début de saison des pluies, les concentrations en MES hebdomadaires sont très variables dans le temps mais ont tendance à croître de même que les débits. Les concentrations maximum s'observent en montée de crue, en juillet ou en août suivant les années. Elles dépassent rarement 100 mg.l^{-1} pour le Niger et 250 mg.l^{-1} pour le Bani. A partir de ce point elles ont tendance à diminuer, de façon plus régulière et plus brutale sur le Bani que sur le Niger, alors que les débits continuent à augmenter. La décroissance des concentrations se poursuit en décrue. Les concentrations les plus faibles sont systématiquement rencontrées en saison de basses eaux. Ces minimums sont très faibles : $0,1$ à $4,4 \text{ mg.l}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro et $0,1$ à $8,8 \text{ mg.l}^{-1}$ sur le Bani à Douna.

Remarque : de très fortes concentrations peuvent se rencontrer en basses eaux. Elles sont dues comme on l'a vu (chapitre méthode) à la faible tranche d'eau et au dépôt du fond de lit facilement mobilisable. Les faibles volumes d'eau enregistrent alors rapidement les remises en suspension dues au vent, aux passages de troupeaux, hommes...

Enfin, il est très difficile d'expliquer les variations de concentrations d'une semaine sur l'autre faute d'informations spatialisées sur les caractéristiques des bassins impliqués (érodabilité des versants, du réseau hydrographique) et sur les mécanismes générateurs de ces MES (en particulier intensité et localisation des pluies). Dans notre cas, la seule variable que l'on puisse utiliser pour interpréter ces variations est une variable globale : le débit à l'exutoire du bassin versant. Celui-ci intègre de nombreux phénomènes et processus singuliers à l'intérieur du bassin versant dont les effets sont en partie lissés. Les différentes relations et modèles que nous proposerons par la suite pour essayer de retrouver l'évolution des concentrations observée à une station donnée à partir des débits ne pourront donc que fournir des résultats imparfaits.

Figure 41. Pages suivantes. Evolution des concentrations instantanées en MES et des débits journaliers au cours du temps sur les 4 stations du bassin du Niger amont (de mai 1991 à avril 1998) .





1.1.2.2. Relation entre les MES et les débits (Q)

Bien que les variations hebdomadaires soient importantes, on retrouve une relation générale entre les concentrations en MES et les débits (noté par la suite relation MES/Débits) globalement identique pour chaque année : il n'y a pas de relation simple univoque entre les concentrations en MES et les débits, ces relations forment des boucles ou cycle d'hystérésis horlogique¹. Dans ce cas, le maximum de concentration se produit avant le maximum de la crue, et à débit égal, la montée des eaux est toujours plus turbide que la décrue. La Figure 42 illustre pour chacune des stations les relations globales entre le débit et la charge en MES établies pour les données mensuelles.

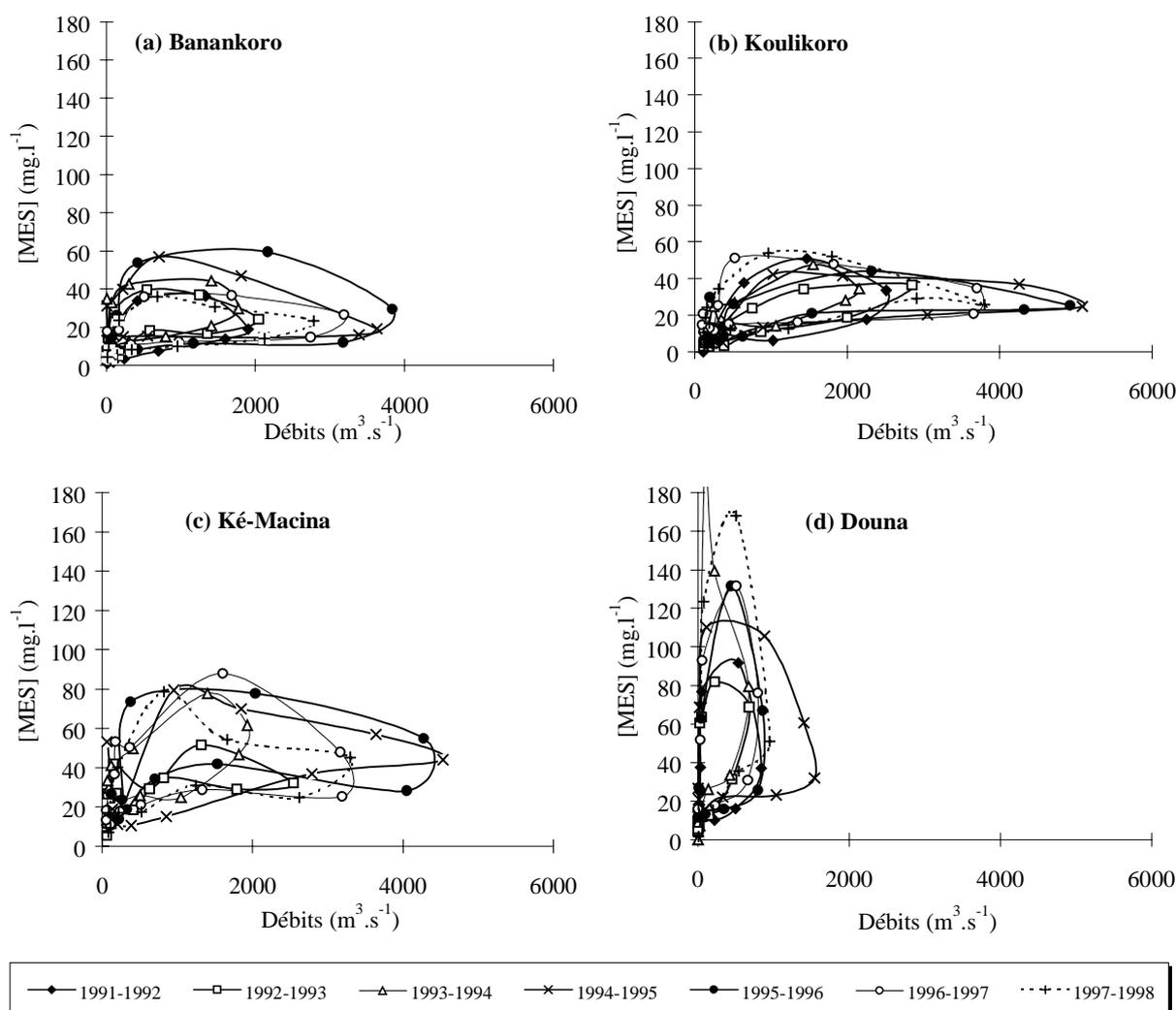


Figure 42. Relations MES/Débits entre les débits mensuels et les concentrations mensuelles (flux mensuel/débit mensuel) pour chaque année et pour les 4 stations du Niger amont : Banankoro (a), Koulikoro (b), Ké-Macina (c) et Douna (d) pour la période d'observation des flux particuliers (1991 à 1997).

¹ Dans le sens des aiguilles d'une montre.

Ce type de cycle a déjà été observé à l'échelle d'une crue de quelques heures sur des petits bassins (ruraux ou urbains) (Brunet et Gazelle, 1995 ; Droux *et al.*, 1997) ou à l'échelle annuelle pour les fleuves tropicaux unimodaux d'Afrique : Cameroun, Oubangui, Niger (Olivry *et al.*, 1988,1995b), Chari, Sénégal (Gac,1980, 1986, ; Orange 1992). Ce comportement est classiquement attribué à la succession de 3 phases au cours desquelles la dynamique des MES est différente (e.g. Gac, 1986 ; Meybeck, 1984 ; Kattan et al, 1987 ; Olivry *et al.*, 1989 ; Orange, 1992) :

1. **Une phase d'érosion initiale** qui caractérise la période au début de la crue où la concentration en MES croît très rapidement en fonction du débit. Cette phase correspond à différents phénomènes qui ont lieu à la fois sur le bassin versant et à la fois dans le réseau hydrographique. Sous l'effet des précipitations (effet de *splash*) et du ruissellement superficiel (détachement ou raboutage de la surface du sol du fait des forces de cisaillement produites par le ruissellement), **les sols, qui ne sont pas encore protégés par la végétation, se dégradent** : les particules produites sont susceptibles d'être évacuées et véhiculées par l'eau pour rejoindre le cours principal. **Les reprises de laisses de crues et des dépôts antérieurs temporaires**, ainsi que l'érosion des berges peuvent être une autre source de MES pour le fleuve. Les MES ainsi arrachées au bassin et/ou remises en suspension sont transportées par le fleuve, et le pic de MES arrive donc très rapidement, précédant l'arrivée du maximum de crue.
2. **Une phase d'érosion atténuée et de transport** qui dure le reste de la saison des pluies où la concentration en MES diminue tandis que les débits continuent d'augmenter de manière importante. Ce phénomène est à mettre en relation avec le processus classique d'épuisement du stock érodable sur le bassin versant (diminution de la fourniture sédimentaire) et sans doute aussi avec la mise en place de la végétation qui s'est développée entre temps et qui joue donc de plus en plus un rôle de protection des sols. **L'érosion est ralentie, la charge solide est diluée par une forte augmentation de débit** et par une contribution sans doute de plus en plus importante de l'écoulement souterrain (très pauvre en MES) par rapport à l'écoulement total.

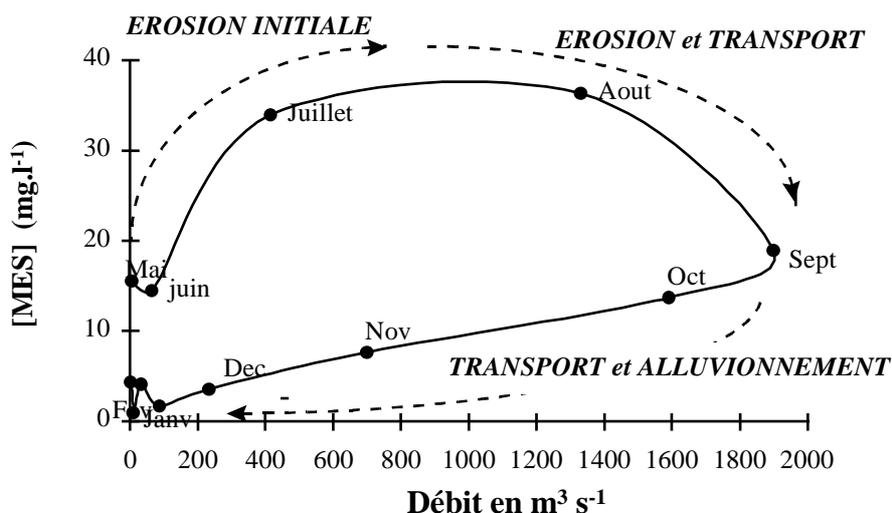


Figure 43. Exemple de relation MES/Débits au pas de temps mensuel à la station de Banankoro pour l'année 1991-1992.

3. Enfin, lorsqu'il ne pleut plus et que la décrue est bien amorcée, **une phase dite de "transport et alluvionnement"** pendant laquelle la charge solide diminue en même temps que le débit. L'unique source de MES est alors **l'érosion des berges et du fond de lit**. Le débit et par suite la vitesse, diminuent avec la décrue et la rivière perd de sa compétence d'érosion et de transport, les particules peuvent être finalement déposées dans les lits majeurs ou les plaines inondées. Les concentrations en MES sont faibles, c'est la période où les eaux sont limpides.

La relation fréquemment utilisée $C = aQ^b$ (avec $b > 1$) liant la concentration en MES du cours d'eau avec son débit (e.g. Walling & Weeb, 1981 ; Ferguson, 1986 ; Meybeck *et al.*, 1996a,b,c) n'est donc pas adaptée pour décrire les relations MES/débits non univoques de type hystérésis rencontrées sur les stations du bassin du Niger amont. Cette relation simple n'est d'ailleurs bien définie que pour des bassins à forte sensibilité à l'érosion (montagne et/ou roches meubles), et ne comportant ni lac, ni réservoir (Meybeck *et al.*, 1996b).

Nous essayons dans les paragraphes suivants d'établir des relations MES/Débits essentiellement pour les deux stations de Banankoro sur le Niger et de Douna sur le Bani, pour lesquelles le régime hydrologique peut être considéré comme naturel. En effet, les relations entre les débits et les concentrations mensuelles sont relativement plus complexes sur les autres stations du Niger à l'aval de Banankoro où le régime des écoulements est influencé par des barrages ou des aménagements hydrauliques (Koulikoro et le barrage de Sélingué ; Ké-Macina et le barrage de Markala et les prélèvements de l'Office du Niger).

1.1.3. Variabilité interannuelle des concentrations en MES

La période d'étude regroupe des années contrastées d'un point de vue hydrologique (chapitre III). A la station de Banankoro, on peut ainsi distinguer 3 groupes d'années à l'hydrologie contrastée : 3 années "**sèches**" (1991-1992, 1992-1993 et 1993-1994), 2 années "**moyennes**" (1996-1997 et 1997-1998) et 2 "**humides**" (1994-1995 et 1995-1996). A Douna, il existe une seule année humide pendant cette même période (Chapitre III). C'est pourquoi nous regarderons principalement la variabilité interannuelle des concentrations de MES à la station de Banankoro.

1.1.3.1. Comparaison des années humides et sèches à la station de Banankoro

Une première étude sur les deux types d'années "sèches" et "humides" (Figure 44) a fait apparaître, en première approximation, des distinctions importantes entre les années suivant leur hydraulité et pour chaque phase (Picouet *et al.*, 1998) : de façon générale les cycles d'hystérésis relatifs aux années sèches observées sont contenus dans les cycles relatifs aux années plus humides. Ceci se traduit notamment par le fait qu'à débit égal, les concentrations moyennes mensuelles en MES atteignent des valeurs moins élevées pendant la montée de crue lors des années sèches que lors des années humides et inversement pendant la décrue. Pour un débit en crue d'environ $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, les concentrations sont entre 35 et 45 mg.l^{-1} pour les années sèches et entre 45 et 55 mg.l^{-1} pour les années humides.

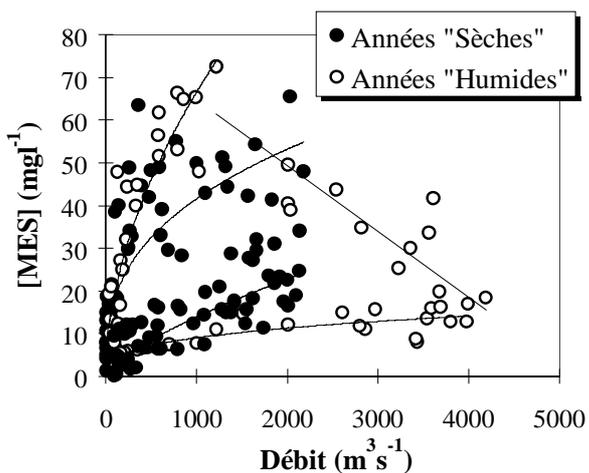


Figure 44. Relation MES/Débits au pas de temps hebdomadaire sur la station de Banankoro et pour différents types d'années.

Il est donc envisageable d'expliquer cette dispersion des points au regard de l'hydraulicité des deux types d'années. Deux phénomènes pourraient expliquer que l'on trouve **lors de la montée de crue** des concentrations plus élevées en années "humides" qu'en années "sèches" :

- La première hypothèse est que la quantité d'eau écoulee avant la mise en place de végétation (frein à l'érosion mécanique) est plus importante pour les années humides que pour les années sèches : la mobilisation de la fourniture sédimentaire sur les versants se produirait en années humides essentiellement lorsque l'effet de protection des sols par la végétation est encore nul et conduirait à des concentrations plus importantes à débit égal qu'en année sèche.
- Un autre phénomène, sans doute important, est lié à la rapidité de la montée des eaux (elle-même liée aux caractéristiques des averses, intensité maximum, forme, hauteur précipitée) et à ses conséquences sur l'érosion des versants et des berges : on peut penser que plus la montée des eaux sera rapide et brutale, plus l'érosion qui en résultera sera importante.

Une autre différence entre les deux types d'années est frappante : en année humide, la relation MES/Débits **en fin de montée de crue** montre une décroissance importante des concentrations jusqu'au maximum de crue, ce que ne montrent pas les années sèches. On peut avancer les explications suivantes :

- au coeur de la saison des pluies, lorsque l'érosion est ralentie par la végétation bien en place, et que la fourniture sédimentaire est réduite, la diminution des concentrations s'explique avant tout par une dilution très importante des écoulements qui augmentent très fortement pendant cette période. La dilution est donc plus importante pour les années de meilleure hydraulicité : les concentrations rencontrées lors du maximum de crue sont alors plus faibles pour les années humides que pour les années sèches.
- une autre explication possible s'appuie sur l'efficacité des crues en terme d'érosion des berges : différents auteurs suggèrent que les crues les plus efficaces sont celles de plein bord et non pas celles qui inondent (Gilvear & Bravard, 1993 ; Bravard & Petit, 1997). De fait, l'érosion des berges croît généralement avec le débit sauf lorsque la hauteur d'eau dépasse une certaine cote pour atteindre le lit majeur ce qui permet une dissipation de l'énergie et rend la crue moins efficace, moins érosive ...

1.1.3.2. Peut-on lier hydraulité de l'année et concentration en MES ?

Au vu de ces résultats, les concentrations mensuelles moyennes semblent dépendre tant pour la phase de montée de crue que pour la décrue de l'hydraulité de l'année (concentrations en début de crue plus fortes pour les années humides que pour les années sèches ...). Or il apparaît quelques contradictions avec les hypothèses émises ci-dessus et cette relation concentration/hydraulité ne semble être que contextuelle :

- A la station de Banankoro, les débuts de crues (en terme de débits) sont tous identiques, que la crue soit ensuite de faible, moyenne, ou forte hydraulité : un même débit n'est pas observé plus tôt lors d'une année humide que lors d'une année sèche. Pour un débit donné à Banankoro, la couverture végétale sur le bassin et par suite la difficulté à mobiliser le stock de MES disponible sur les versants n'est pas plus importante en années sèches qu'en années humides. Pour les premiers mois, l'hydraulité de l'année, du fait d'une simple arrivée plus ou moins tardive des écoulements, ne peut donc pas être incriminée pour expliquer les différences de concentrations observées entre années pour un même débit.
- Les années "moyennes" (1996-1997 et 1997-1998) ne montrent pas de comportement intermédiaire entre les deux types d'années précédents : les boucles d'hystérésis MES/Débits ne sont pas comprises entre les boucles des années humides et celles des années sèches.
- Ces différences entre années humides et années sèches ne se retrouvent plus vraiment sur les autres stations et notamment sur la station de Douna sur le Bani pour laquelle le régime est également considéré comme naturel. Pour celle-ci, les concentrations maximums atteintes sont plus faibles pour l'année humide que pour 3 années de moyennes voire faible hydraulité.

Il n'y donc pas de lien évident entre les concentrations mensuelles moyennes au cours de la crue et l'hydraulité de l'année. Les variations de débit ne suffisent pas à expliquer les variations de concentrations. Il y a évidemment d'autres phénomènes qui entrent en jeu et qui ne sont pas forcément pris en compte par la simple mesure du débit:

- Distribution spatiale des caractéristiques géologiques, pédologiques des versants,... qui vont définir l'érodabilité des sols,
- Etat du bassin versant au début du cycle hydrologique qui définit un stock érodable initial, ce stock pouvant peut-être être relié à l'hydrologie de l'année précédente (longueur de la saison sèche),
- Distribution spatiale et intensité des pluies de l'année considérée,
- Etendue des surfaces touchées et lessivées par les pluies (proportion du bassin touchée),
- Phénomènes réglant le transport solide (arrachage ou dépôt dans le lit lié à vitesse du courant + sédimentation si débordement dans marges ...).

1.2. Recherche de modélisation des relations MES/Débits

L'objet de ce paragraphe est de proposer une modélisation de la relation entre les concentrations en MES et les débits écoulés observés à une station donnée de façon à pouvoir quantifier à partir d'un hydrogramme de crue donné les exportations de matières du bassin versant étudié. Les chroniques de débits sont en effet généralement plus longues que celles concernant les concentrations. La réalisation d'un modèle de production de MES permettrait donc la reconstitution des flux de matières exportés par le bassin sur une durée plus longue que celle pour laquelle on dispose de données.

Remarque : du fait des observations effectuées dans le paragraphe précédent, les modèles proposés par la suite sont établis sans faire de distinction entre années de bonne ou de faible hydraullicité.

1.2.1. Modélisations de l'érosion et du transport solide existantes.

Ces modèles relèvent classiquement de trois types dits déterministes, empiriques ou conceptuels (Viajy & Singh, 1989 ; Wen Shen & Julien, 1992) :

- (1) Les modèles déterministes ou à bases physiques visent à décrire par les équations de la mécanique et de l'hydraulique l'ensemble des phénomènes qui conduisent à la production et au transport des sédiments (cas du modèle SHESED ; Wicks et al. 1996). En fait, la connaissance de certains mécanismes et de certaines étapes du processus à modéliser est souvent trop sommaire pour pouvoir établir de telles équations. C'est en particulier le cas des mécanismes liés à la mobilisation des particules sur les versants, ces mécanismes étant par ailleurs généralement décrits à une échelle microscopique (arrachement sous l'effet de la pluie) inadaptée à la modélisation du phénomène à l'échelle d'un versant ou pire à celle d'un bassin versant. La majorité des modèles déterministes se contentent donc souvent de ne traiter que la partie transport sédimentaire dans les rivières mettant en jeu des phénomènes mieux maîtrisés. Enfin, ils nécessitent un nombre considérable de données souvent non disponibles ou difficilement géables.
- (2) Les modèles empiriques s'appuient sur des lois issues d'observations, i.e., la production de sédiments est décrite par des corrélations faisant intervenir les facteurs dominants responsables des phénomènes observés.
 - La plupart de ces modèles ne permettent que le calcul d'une information globale relative à un événement hydrologique donné, à savoir le flux total de MES transporté au cours de l'événement. Les variations des concentrations au cours de l'épisode ne sont pas abordées. C'est le cas des nombreux modèles répertoriés par Bobrovitska & Zubkova (1995) ou par Singh (1989) et en particulier du très connu USLE (Universal Soil Loss Equation). Les variables hydrologiques utilisées pour déterminer le flux de MES peuvent être le volume ruisselé pendant l'épisode, le débit de pointe, le débit moyen, l'intensité maximale ou moyenne de la pluie,... Les autres paramètres intervenants dans les ajustements proposés sont parfois

nombreux et concernent la nature et l'érodabilité des sols, la topographie du bassin, la couverture végétale des sols, le mode d'utilisation des terres, les éventuelles pratiques de conservation des sols, la présence éventuelle de barrages ...

- Les modèles empiriques qui permettent de déterminer les concentrations ou les flux instantanés en fonction des débits instantanés sont peu nombreux. Les relations C/Q proposées dans la littérature sont toutes des relations univoques non valables pour représenter les cycles d'hystérésis observés sur certains bassins comme celui du Niger. La plupart d'entre elles sont du type $C = a Q^b$ (Walling, 1977 ; Chikita, 1996 ; Hasnain, 1996).

(3) Les modèles de type conceptuel sont en principe fondés sur une schématisation des phénomènes. Ce sont généralement les modèles dits à réservoirs.

- On peut distinguer ceux du type du Sédimentographe Unitaire Instantané (Instantaneous Unit SedimentoGraph ; Williams, 1978 ; Sharma et al. 1992 ; Kazimierz, 1995) : l'IUSG est défini comme la distribution temporelle du flux de MES généré par une impulsion instantanée de pluie produisant une unité de flux de MES. Il est donc utilisé, sur le même principe que l'Hydrogramme Unitaire Instantané (IUH) pour déterminer, par convolution avec le hétérogramme de la pluie effective tombant sur le bassin étudié, le graphe du flux instantané de MES (F(t)) observée à l'exutoire du bassin. Ce type de modèle ne donne pas d'information sur la façon dont est acquise la charge en suspension.
- D'autres modèles permettent de tenir compte des principaux mécanismes naturels produisant l'érosion. C'est le cas du modèle de Negev (1967) qui utilise deux réservoirs : le premier, le réservoir sol, est le siège des deux mécanismes d'érosion, le rabotage effectué par le ruissellement superficiel et l'arrachement des particules de MES sous l'effet de la pluie ; les particules arrachées par la pluie alimentent le second réservoir qui contient des sédiments facilement mobilisables. Le ruissellement superficiel peut ainsi participer de façon indépendante à la mobilisation des particules contenues dans les réservoirs sol et sédiment précédents (Pinheiro et Caussade, 1989). Tous les sédiments issus des versants alimentent finalement un troisième réservoir, le réservoir de sédiments du réseau hydrographique : le transport des sédiments (et ses mécanismes corollaires tels que la décantation et les reprises) est alors contrôlé par la capacité de transport de l'écoulement fluvial. Différents autres mécanismes sont parfois aussi modélisés comme la recharge en temps sec du réservoir de sédiments facilement mobilisable ; ce mécanisme est pris en compte dans les modèles conceptuels relatifs au transport sédimentaire en milieu urbain, où les sédiments mobilisés en temps de pluie proviennent essentiellement de l'accumulation de poussières à la surface des sols (Bujon, 1988 ; Coleman, 1993 ; Bertrand-Krajewski, 1993 ; Mark et al. 1993).

Finalement, les seuls modèles qui permettent de suivre l'évolution de la charge en sédiments au cours du temps sont soit à base physique, soit conceptuels. Or, la totalité des modèles existants nécessitent comme variable d'entrée la pluie et en particulier l'intensité des précipitations qui doit être souvent exprimée en mm/h (Bujon, 1988 ; Mark et al. 1993 ; Negev 1967, Wicherek 1994). Dans le cas de grands bassins dont les crues à l'échelle annuelle sont produites par une multitudes de pluies localisées dans le temps et dans l'espace, cette information semble de fait inadaptée pour constituer

l'entrée du modèle sauf si on construit un modèle spatialisé, fonctionnant à une échelle de temps inférieure à la journée qui serait nécessairement plus complexe.

Dans le cas du fleuve Niger amont et du Bani, la méconnaissance de la distribution spatio-temporelle des pluies de même que la méconnaissance des caractéristiques relatives à l'érodabilité des différents sous bassins nous a conduit à essayer de construire un modèle basé sur la seule utilisation du débit journalier, variable relativement bien connue en une station donnée. On a donc essayé d'établir des relations permettant d'estimer la concentration de MES (C) à partir du débit (Q) en sachant pertinemment qu'elles seront imparfaites du fait de multiples variables importantes et inconnues réglant l'érosion du bassin. Deux modèles ont été réalisés :

- un **modèle empirique** qui identifie des relations entre C, Q et le volume écoulé depuis le début de la crue à partir d'ajustements entre ces différentes variables ;
- un **modèle conceptuel** qui permet de représenter schématiquement deux phénomènes supposés être représentatifs de la production des MES dans le transport liquide, l'érosion des versants du bassin et l'érosion des berges du cours d'eau.

Un ensemble de 8 années hydrologiques a été utilisé pour caler chacun des modèles. Ces années sont les années hydrologiques complètes pour lesquelles on dispose d'observations ponctuelles sur les débits écoulés (observations journalières) et sur les concentrations en MES (observations généralement hebdomadaires) (années de 1991/92 à 1998/99). La procédure de calage de chaque modèle comporte les deux étapes suivantes :

- une étape de calibration qui consiste à déterminer, en fonction d'un critère de qualité donné, les paramètres optimum du modèle conceptuel et ceux du modèle empirique. Cette étape de calibration a été effectuée sur l'échantillon constitué des 6 premières années de mesures (de 91/92 à 96/97).
- une étape de validation effectuée à l'aide des données concernant les années (97/98 et 98/99) lorsqu'elles sont disponibles. Le nombre d'année utilisées pour cette étape de validation est limité du fait du nombre total restreint d'années disponibles.

Les données utilisées pour la calibration et la validation des modèles sont les valeurs hebdomadaires moyennes des débits et des concentrations. Les débits hebdomadaires moyens ont été calculés simplement à l'aide des débits journaliers. Les concentrations hebdomadaires moyennes correspondent à la moyenne sur 7 jours des concentrations journalières pondérées par les débits journaliers. Les concentrations journalières non connues ont été obtenues par interpolation linéaire entre les concentrations journalières connues relatives aux deux jours les plus proches encadrant la date concernée. Ainsi, les données utilisées sont homogènes pour toutes les années. Les concentrations hebdomadaires moyennes utilisées permettent de retrouver à partir des débits hebdomadaires moyens les valeurs des flux annuels de MES transportés aux stations étudiées et calculés par ailleurs suivant la méthode exposé au chapitre (II). Elles sont lissées par rapport au concentrations hebdomadaires mesurées ce qui permet, dans une certaine mesure, de s'affranchir d'une variabilité importante des concentrations (pics locaux) due à des phénomènes locaux non identifiables (§ 1.1.2.1).

1.2.2. La modélisation empirique statistique

1.2.2.1. Principe

(a) *Remarques préliminaires :*

Les mécanismes d'acquisition des MES diffèrent au cours d'une année hydrologique comme nous l'avons vu précédemment :

- **au début de la saison des pluies**, les MES proviennent à la fois des apports liés au ruissellement sur les versants et dans le réseau hydrographique (qui constituent ce qu'on peut appeler un stock facilement mobilisable) et aussi des apports dans le fleuve lui-même. Ce **stock facilement mobilisable** en début d'année hydrologique, distribué sur le bassin (versants + réseau hydrographique), va diminuer avec l'avancement de la crue : il est en partie emporté par le ruissellement superficiel et il est par ailleurs réduit au fur et à mesure que la végétation se met en place. On peut donc supposer que **pour un même débit écoulé, la quantité de matière érodée sera plus faible si ce débit est observé après 3 mois de lessivage des versants que si ce débit est observé en tout début de crue**. Par conséquent, les concentrations observées dans la rivière représenteront, au fil du temps, une part de plus en plus faible des concentrations observées pour les mêmes débits en début de crue. Le volume écoulé ($V_e(Q(t))$) depuis le début de la crue, variable liée au débit, et aussi a priori à la diminution du stock facilement mobilisable sur le bassin, semble ainsi constituer une variable importante conditionnant l'acquisition de la charge en MES.
- **pendant la décrue**, le stock mobilisable a **disparu** ou **n'est plus accessible** (arrêt des pluies + arrêt du ruissellement superficiel + présence végétation), et l'essentiel de la charge en MES du fleuve provient alors du transport de la charge acquise plus en amont, de la mobilisation des dépôts dans le lit de la rivière et de l'érosion des berges du fleuve (toujours disponibles). Nous utiliserons par la suite l'expression d'« **érosion continue** » pour décrire l'ensemble des mécanismes qui contribuent à la charge en suspension observées dans le fleuve **indépendamment de la saison**.

Par ailleurs, il peut sembler hasardeux de considérer que la totalité du débit instantané observé à une station donnée peut expliquer la charge en sédiments transportée par le fleuve. En effet le débit transité résulte de la contribution plus ou moins différée de divers types d'écoulements (Chapitre III) qui n'interviennent pas forcément dans les mécanismes de l'érosion précités : ce sont l'écoulement superficiel et hypodermique, les écoulements souterrains de nappes plus ou moins profondes. On peut cependant remarquer que :

- **en début de crue**, l'essentiel du débit transité résulte du ruissellement superficiel, seule composante du débit qui peut contribuer à l'érosion et au lessivage des versants. Pour cette phase la recherche d'une relation entre le débit total observé à la station et le transport solide se justifie.
- **en phase de décrue**, lorsque le débit ne provient plus que d'écoulements retardés (écoulement hypodermique et souterrain), la période d'érosion des versants est pour ainsi dire terminée. La charge en sédiments s'explique seulement par les mécanismes relatifs à l'érosion continue du bassin amont. L'eau transportée dans le fleuve peut donc, quelle que soit son origine, participer à

ces différents mécanismes et le débit total transité constitue donc toujours une variable explicative pertinente de la charge instantanée en sédiments.

(b) *Méthodologie et ajustement utilisés.*

Pour chacune des stations étudiées par la suite, la méthodologie utilisée pour déterminer le modèle empirique entre C et Q s'appuie sur les différentes remarques précédentes.

- **au début de la montée de crue (deux premiers mois seulement)**, on suppose que l'on peut ajuster une première relation de type

$$C_{env}(Q) = a_1 Q^{b_1} \quad \text{Eq. 1}$$

qui constitue une **courbe enveloppe** des concentrations supérieure aux points expérimentaux correspondant à l'ensemble des 6 premières années d'observation. L'équation de cette courbe enveloppe représenterait, s'il n'y avait pas d'influence saisonnière (diminution du stock facilement mobilisable au fil du temps), l'érosion moyenne possible sur le bassin versant (érosion des versants et des berges) du fait du seul ruissellement. L'ajustement a été réalisé à partir des données hebdomadaires correspondantes aux seuls deux premiers mois des 6 années utilisées.

- **pendant tout le reste de la montée de crue**, on suppose que l'on peut relier la diminution relative des concentrations au volume écoulé depuis le début de crue. On établit donc un ajustement entre d'une part, le volume écoulé depuis le début de la crue $V_e(Q)$ et, d'autre part, l'écart observé entre la concentration qui serait obtenue s'il n'y avait pas d'influence saisonnière ($C_{env}(Q)$, obtenue avec l'équation de la courbe enveloppe présentée ci-dessus) et la concentration réellement observée dans la rivière ($C_{obs}(Q)$). L'ajustement entre $(C_{env}(Q) - C_{obs}(Q)) = (a_1 Q^{b_1} - C_{obs}(Q))$ et $V_e(Q)$ a aussi, après analyse des données, été choisi de la forme :

$$\Delta C = (C_{env}(Q) - C_{obs}(Q)) = a_2 V_e(Q)^{b_2} \quad \text{Eq. 2}$$

Il a été réalisé sur l'ensemble des couples (Q, C_{obs}) correspondant à la montée de crue de chacune des 6 années ($Q < Q_{pointe}$).

- **pour la décrue, seule l'érosion continue** est supposée expliquer les concentrations observées. On suppose que l'on peut ajuster aux points expérimentaux une relation linéaire croissante du type $C = a_3 + b_3 \cdot Q$ exprimant le fait que l'érosion continue est d'autant plus intense que les débits sont importants. Cette relation passe par le point correspondant au maximum de crue de coordonnées $(Q_{max}; C_{calc}(Q_{max}))$ et par le point de coordonnées $(Q_{min}=0; C_0)$, où C_0 correspond à la concentration limite observée en basses eaux.

En résumé, la concentration sera calculée de la façon suivante :

(1) en période de montée de crue ($t \leq T_p$ temps de montée de la crue) :

$$C_{cal}(t) = C_{calc}(Q(t)) = a_1 Q^{b1} - a_2 V e^{b2} = a_1 Q(t)^{b1} - a_2 \left(\int_0^t Q(t) \cdot dt \right)^{b2} \quad \text{Eq. 3}$$

(2) en période de décrue ($t > T_p$)

$$C_{cal}(t) = a_3 + b_3 \cdot Q(t) = C_0 + Q(t) \cdot \frac{(C_{cal}(Q_{max}) - C_0)}{Q_{max}} \quad \text{Eq. 4}$$

Le changement de relation est réalisé lorsqu'on atteint le maximum de débit Q_{max} . La Figure 45 représente de manière schématique le principe de modélisation de la phase de crue.

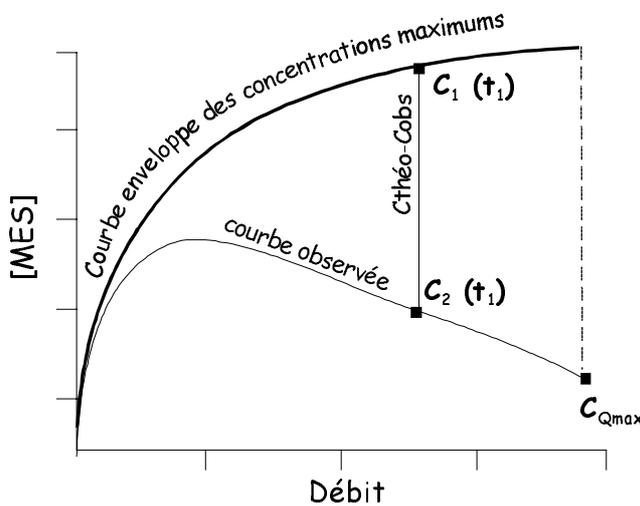


Figure 45. Principe de modélisation de la phase de crue du modèle empirique.

Remarque 1 : la concentration calculée pour la phase de montée de crue à l'aide de l'équation Eq. 3 est successivement une fonction croissante puis décroissante du temps écoulé depuis le début de la crue. La plus ou moins grande rapidité de la décroissance sera fonction de la forme de l'hydrogramme de crue (et donc des fonctions $Q(t)$ et $V_e(t)$). Il est ainsi possible que la concentration calculée en période de montée de crue devienne très faible voire négative avant que le débit de pointe ne soit atteint ; si tel est le cas la concentration calculée (à l'aide de l'Eq. 3 puis pour la décrue à l'aide de l'Eq. 4) est forcée à la valeur d'une *concentration minimum* correspondant à la concentration limite observée en période de basses eaux.

Remarque 2 : les deux ajustements choisis pour décrire d'une part l'équation de la courbe enveloppe (Eq. 1) et d'autre part la relation entre volume écoulé depuis le début de la crue et la différence entre la concentration enveloppe et la concentration observée (Eq. 2) sont de type logarithmique. D'autres ajustements sont possibles : on a obtenu par exemple des résultats de qualité parfois équivalente voire meilleure en utilisant une relation linéaire simple pour la courbe enveloppe et une relation polynomiale du 2nd ou 3^{ème} ordre pour la seconde relation. Seuls les deux ajustements logarithmiques ont cependant permis d'obtenir des résultats intéressants pour les 4 stations étudiées. Par ailleurs la relation logarithmique entre C et Q est plus usuelle.

(c) Détermination des paramètres :

Pour chaque crue (soit pour chaque année hydrologique), la qualité de la reconstitution obtenue à l'aide du modèle des concentrations $C_{obs}(Q)$ est évaluée à l'aide du critère de Nash (expression Annexe 3). Celui ci a été calculé pour chaque crue entre :

- l'ensemble des concentrations observées ($C_{obs}(Q(t))$) (concentrations hebdomadaires moyennes),
- et les concentrations calculées $C_{cal}[Q(t), V_e(Q(t))]$.

Pour mesurer la qualité des résultats obtenue pour un échantillon constitué de N crues, un critère de Nash moyen (moyenne des critères de Nash relatifs à chaque crue) a été utilisé.

Les paramètres a_1 , b_1 , a_2 et b_2 des ajustements logarithmiques réalisés entre C , Q et V_e (Eq. 3) pour la crue sont identiques pour les 6 années utilisées pour la calibration du modèle : ils ont été déterminés de sorte que le critère de Nash moyen calculé sur l'échantillon constitué de ces 6 années soit minimum. Le paramètre b_3 (décrue) dépend de l'année : il est obtenu directement à partir du débit de pointe de l'année et de la concentration calculée pour ce débit à l'aide de l'Eq. 3. La concentration limite C_0 (coefficient a_3) a été évaluée pour chacune des stations à partir des concentrations hebdomadaires moyennes observées en périodes de basses eaux. Elle avoisine pour les différentes stations 5mg/l.

1.2.2.2. Résultats

Cette méthode a été appliquée aux années de 1991 à 1997 pour les stations de Banankoro de Ké-Macina et de Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani.

A titre d'exemple, la Figure 46 présente la courbe enveloppe obtenue pour la station de Douna relative au premier ajustement (Eq. 1).

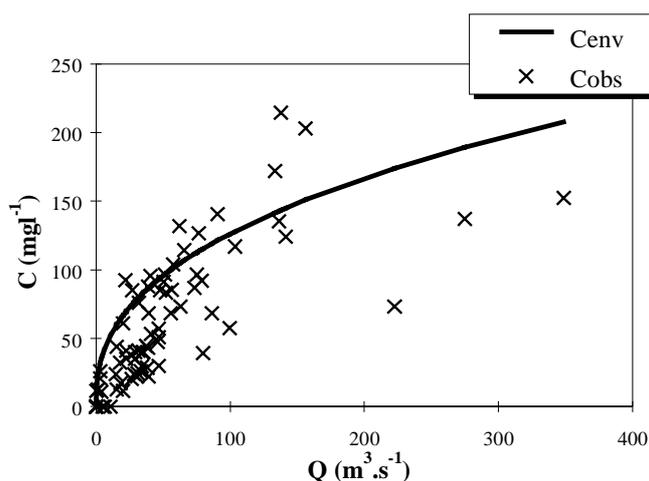


Figure 46. Courbe « enveloppe » $C_{env}(Q)$ déterminée à partir des valeurs hebdomadaires (C_{obs} , Q_{obs}) observées pour les 6 années hydrologiques 1991/92 à 1996/97 sur les deux premiers mois de l'année.

Le deuxième ajustement relatif à Eq. 2 est présenté, toujours pour la station de Douna, dans la Figure 47. Les valeurs des paramètres des ajustements obtenus pour les 4 stations étudiées sont dans le Tableau 22. Les valeurs du critère de Nash moyen obtenues pour les 6 années utilisées pour le calage du modèle entre les concentrations hebdomadaires moyennes calculées et observées ainsi que les

valeurs des critères de Nash obtenues pour les années servant à la validation du modèle sont dans le Tableau 23

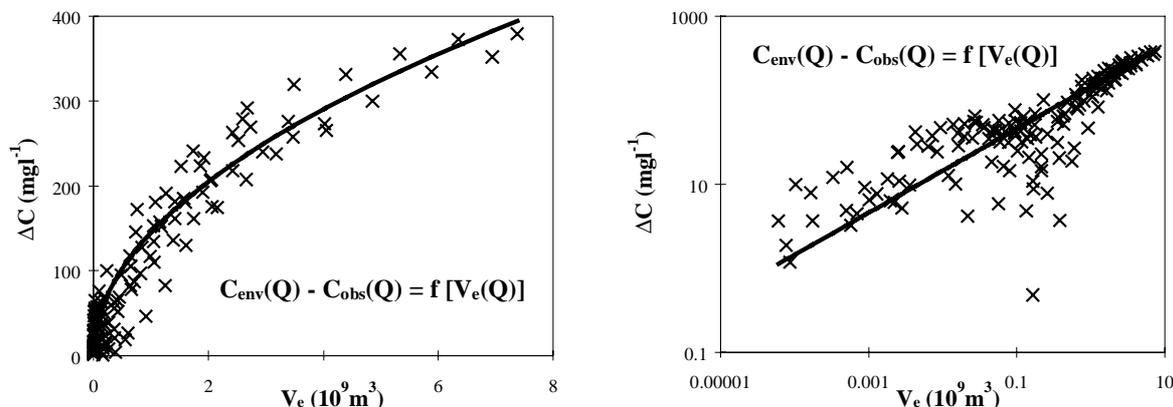


Figure 47. Ajustement logarithmique entre le volume écoulé depuis le début de la crue $V_e(Q)$ et l'écart $\Delta C = C_{env}(Q) - C_{obs}(Q)$.

Station	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3
Banankoro	5	0,4	27	0,55	5
Koulikoro	4	0,4	12	0,7	5
Ké-Macina	8	0,4	40	0,5	5
Douna	20	0,4	145	0,5	5

Tableau 22 : Valeurs des paramètres des différents ajustements du modèle empirique.

(les paramètres a_1 , b_1 , a_2 et b_2 correspondent à des ajustements dans lesquels les concentrations, les débits et les volumes ruisselés sont respectivement exprimés en $mg.l^{-1}$, en $m^3.s^{-1}$ et en $10^9 m^3$)

Station	Nash moyen 6ans de 91/92 à 96/97	Nash année 90/91	Nash année 97/98	Nash année 98/99
Banankoro	0,54		0,72	0,85
Koulikoro	0,52		0,44	
Ké-Macina	0,34		0,48	
Douna	0,64	0,56	0,49	

Tableau 23. Qualité des résultats obtenus avec le modèle empirique $C(Q)$ pour les 4 stations situées sur le bassin du Niger Amont et du Bani. Critère de Nash moyen obtenu pour l'échantillon constitué des 6 années ayant servi au calage du modèle. Critère de Nash obtenu pour chacune des autres années utilisées pour la validation du modèle.

1.2.2.3. Discussion

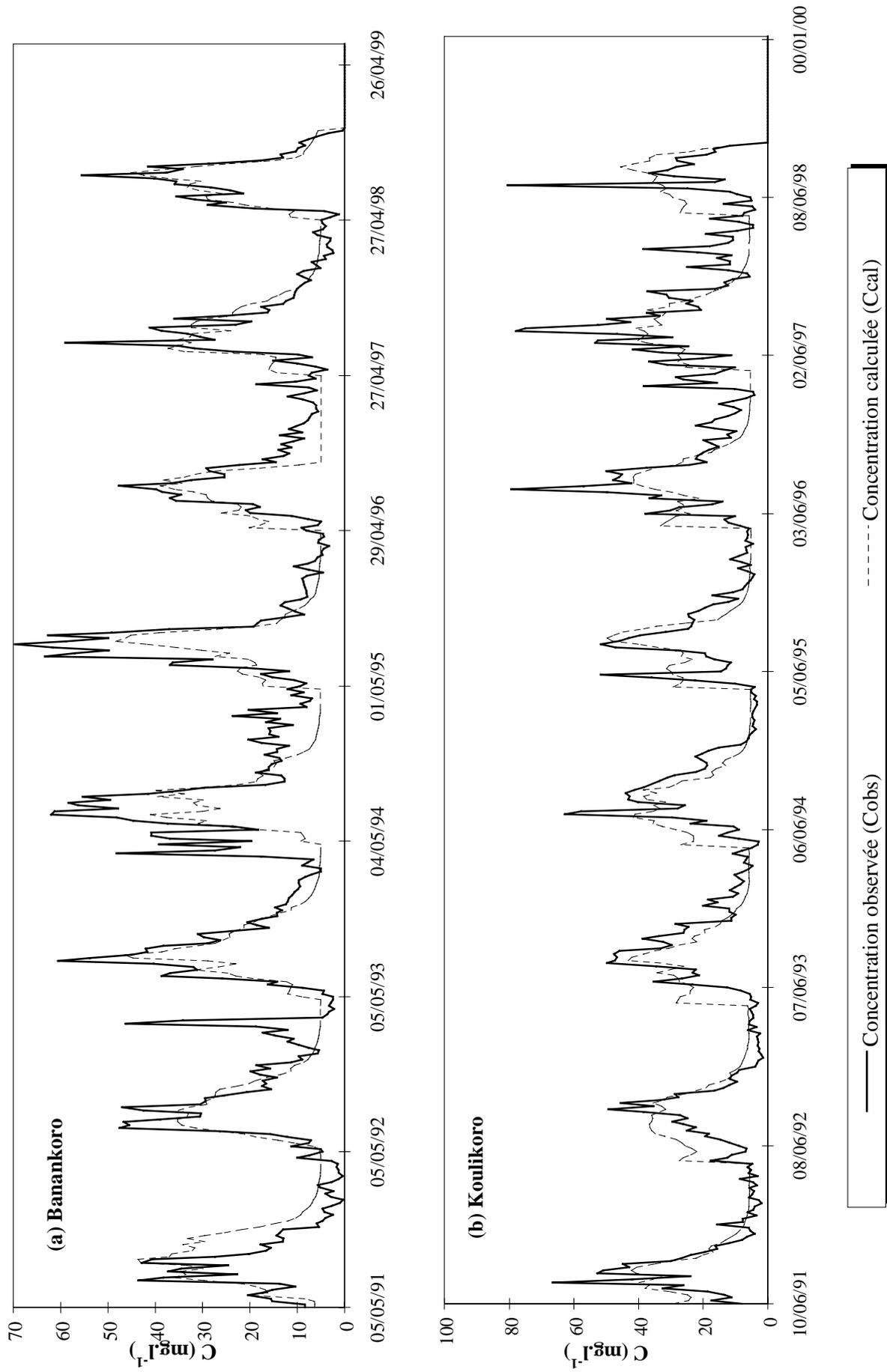
Pour l'ensemble des années et des stations, le modèle empirique permet de représenter l'évolution générale des concentrations au cours d'une année hydrologique. En particulier le maximum de concentration systématiquement observé au milieu de la montée de crue de même que la forte décroissance des concentrations qui suit, sont relativement bien reproduits. Par ailleurs, le modèle reproduit aussi certains pics du début de crue même si l'intensité n'est pas toujours bonne (Banankoro 1996/97 et Douna toutes années). Le choix des deux grandeurs utilisées pour établir ce modèle, le débit observé hebdomadaire ainsi que le volume écoulé depuis le début de la crue semble donc être relativement pertinent.

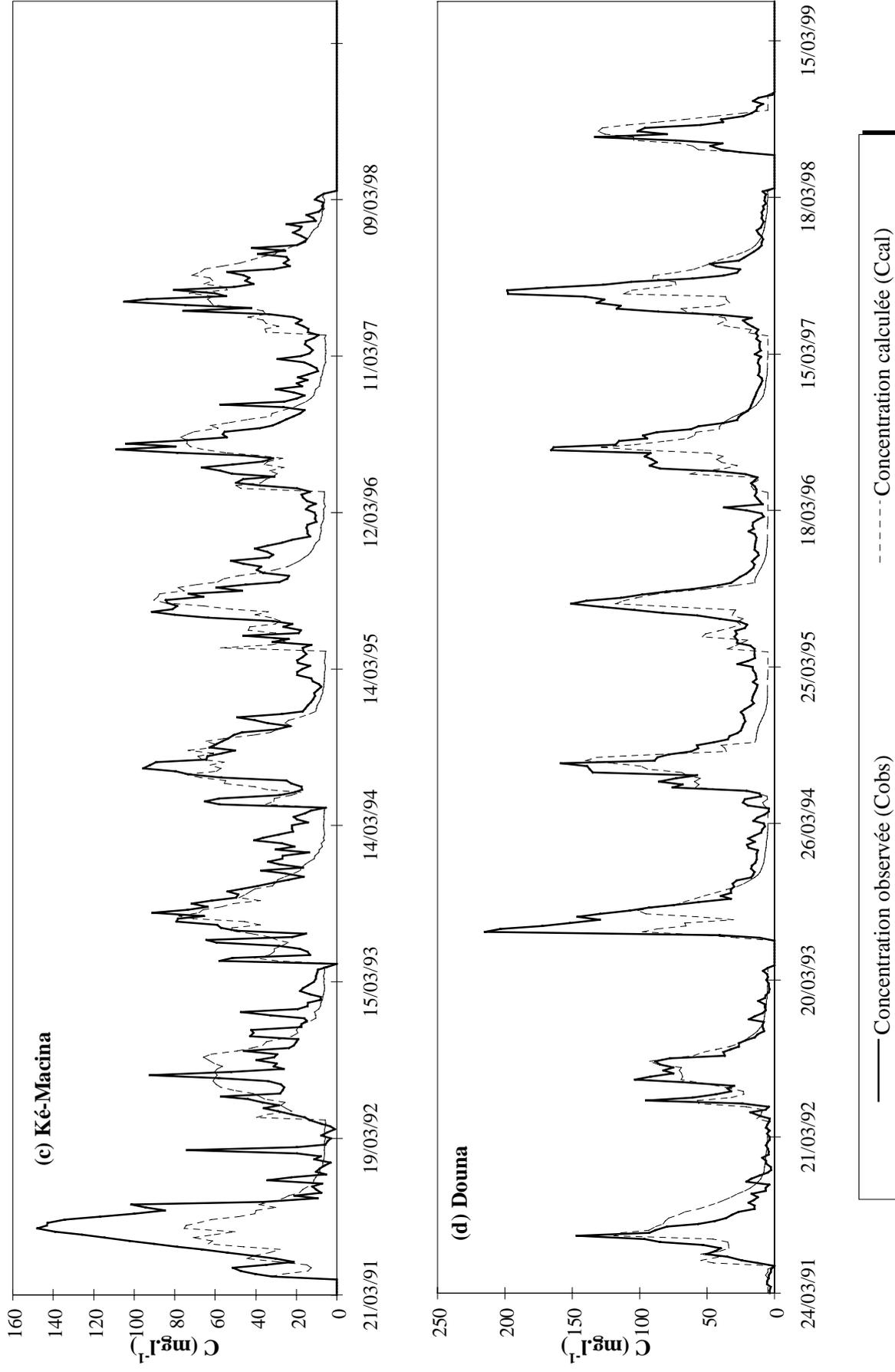
Cependant l'adéquation entre courbe de concentration observée et calculée est loin d'être parfaite. Tout d'abord la qualité moyenne des résultats est très variable suivant les stations observées. Si la qualité est relativement acceptable à la station de Douna (Nash moyen $>0,6$), elle l'est moins à Banankoro et à Koulikoro et devient plutôt mauvaise à Ké-Macina.

La qualité des résultats dépend aussi des années. En particulier, on remarquera, pour une station donnée, que la variabilité de l'intensité du pic de concentration annuel maximum n'est pas bien reproduite par le modèle (Figure 48a et c). Par ailleurs, la qualité des résultats semble d'autant moins bonne que la variabilité des concentrations d'une semaine à l'autre est forte, et, en particulier, que le nombre de pics locaux de concentrations est important : le modèle empirique ne permet pas, par exemple, de reconstituer certains pics observés en tout début de crue de même que les pics d'intensité importante situés en décrue (Figure 48a ; année 1994/95). Ceci explique en partie le fait que le modèle donne des résultats nettement meilleurs à Douna qu'à la station de Ké-Macina.

Enfin, la qualité des résultats dépend en partie de la qualité de la reconstitution des concentrations observées lors de la décrue. Si l'on observe effectivement une relation décroissante assimilable en première approximation à une relation linéaire entre les concentrations et les débits observés (Figure 42), la relation linéaire proposée ici (Eq. 4), qui s'appuie sur la concentration calculée pour le maximum de crue, peut conduire à une reconstitution très médiocre de la décrue. Si la concentration $C_{cal}(Q_{max})$ est très surestimée par rapport à la concentration $C_{obs}(Q_{max})$, l'ensemble des concentrations calculées pour la décrue est très surestimé (Banankoro, année 91/92) et inversement si cette concentration $C_{cal}(Q_{max})$ est très sousestimée (Banankoro, année 96/97).

Figure 48. Pages suivantes - Comparaison de l'évolution au cours du temps des concentrations observées et calculées avec le modèle empirique sur les 4 stations étudiées.





1.2.3. Le modèle conceptuel

La modélisation conceptuelle proposée ici a toujours pour objectif de reproduire à partir du seul débit hebdomadaire moyen observé l'évolution de la concentration au cours du cycle hydrologique. Elle s'appuie sur les mêmes remarques que celles ayant servi à l'élaboration du modèle empirique (§ 1.2.2.1.). Le modèle traite des quantités de MES hebdomadaires exportés par le bassin versant, ces flux étant utilisés ensuite pour calculer les concentrations hebdomadaires moyennes correspondantes.

1.2.3.1. Principe

Le flux journalier (ou débit solide en tonnes/jour) transporté par le débit à l'exutoire $Q(t)$ est considéré comme la somme d'un flux journalier $F_{mob}(t)$ provenant d'un stock "temporaire" disponible en début d'année (mobilisable temporairement et limité) et d'un flux journalier provenant d'un stock toujours disponible toute l'année lié à l'érosion dite continue $F_{ec}(t)$.

Cette distinction se base sur le fait que le transport en suspensions dans un cours d'eau dépend non seulement de la compétence du cours d'eau (sa capacité de transport amont-aval, sa capacité d'érosion des berges et du fond de lit) mais aussi de la fourniture assurée par le bassin versant, sollicité pendant les épisodes pluvieux.

On considère donc deux stocks (ou réservoirs) de particules pouvant contribuer à la charge en suspension du fleuve à l'instant t :

- **Un stock "temporaire" et limité.** On suppose qu'il existe sur le bassin un stock "temporaire" initial mobilisable $M_{mob}(t=0)$. Temporaire, car ce stock va être entraîné au cours de la saison pluvieuse jusqu'à son épuisement plus ou moins total. Cette épuisement du stock ne correspond pas seulement à une diminution des particules disponibles, mais aussi à l'effet conjugué au cours de l'avancement de la saison des pluies de la protection des sols puis de l'arrêt de la pluie, principal agent de l'érosion sur les versants. Ce **stock mobilisable temporairement** disponible au début de l'année hydrologique est supposé ne pas pouvoir se reconstituer pendant la période pluvieuse: On suppose donc qu'il diminue au fur et à mesure qu'il est érodé en produisant le flux journalier $F_{mob}(t)$:

$$\frac{dM_{mob}(t)}{dt} = -F_{mob}(t) \quad \text{Eq. 5}$$

avec dt en jours ; $M_{mob}(t)$ en tonnes, $F_{mob}(t)$ en tonnes/jour.

Le flux journalier de particules en suspension $F_{mob}(t)$ provenant de l'érosion de ce stock est supposé être, à un instant donné, proportionnel à **deux variables** : au **stock restant** $M_{mob}(t)$ et à une fonction puissance du **débit observé à l'exutoire** du bassin à cet instant :

$$F_{mob}(t) = k_{mob} \cdot M_{mob}(t) \cdot Q(t)^{B_{mob}} \quad \text{Eq. 6}$$

avec $Q(t)$ en m^3/s , $M_{mob}(t)$ en tonnes, $F_{mob}(t)$ en tonnes/jour.

- **Un stock "permanent et "illimité".** L'érosion de ce stock n'est limité que par la compétence du cours d'eau (cf. ci-dessus). Il correspond aux phénomènes relatifs au réseau hydrographique actif, i.e., à l'érosion dite continue définie auparavant.

Le flux journalier provenant de l'érosion continue ($F_{ec}(t)$) est supposé être aussi une fonction de Q^b :

$$F_{ec}(t) = k_{ec} \cdot Q(t)^{B_{ec}} \tag{Eq. 7}$$

avec $Q(t)$ en m^3/s , et $F_{ec}(t)$ en tonnes/jour.

A partir de ces deux flux ($F_{mob}(t)$ et $F_{ec}(t)$), la concentration hebdomadaire en MES à l'instant t est finalement donnée par :

$$C_{calc}(t) = \frac{1}{A} \left[\left(\frac{F_{mob}(t)}{Q(t)} \right) + \left(\frac{F_{ec}(t)}{Q(t)} \right) \right] \text{ soit } C_{calc}(t) = C_{mob} + C_{ec} \tag{Eq. 8}$$

avec $F_{ec}(t)$ et $F_{mob}(t)$ en tonnes/jour, $Q(t)$ en m^3/s , $C_{calc}(t)$ en mg/l et où $A=24 \cdot 3600 / 10^6$, en $s/jour \cdot tonne/mg \cdot litre/m^3$, est une constante permettant le changement d'unités entre ces différentes variables.

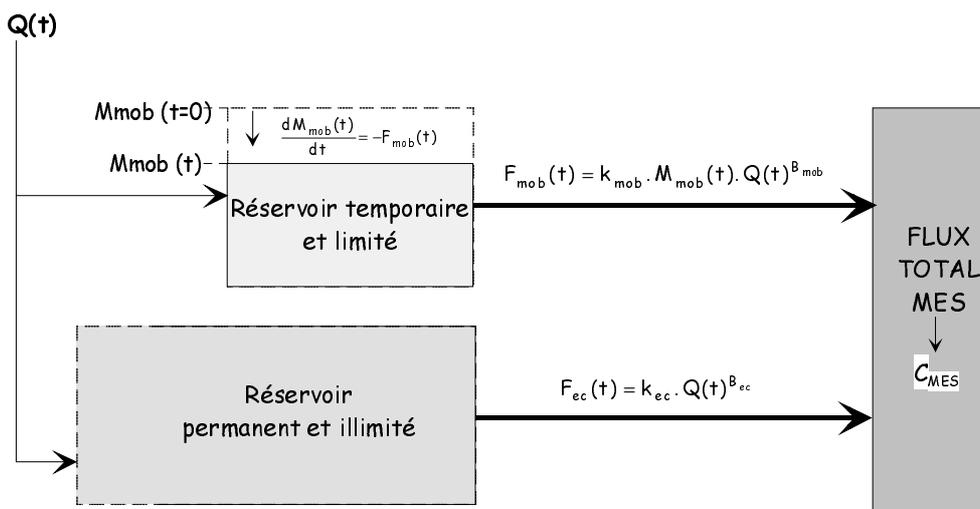


Figure 49. Principe de modélisation de la charge en suspension du modèle conceptuel.

Le modèle contient donc 5 paramètres k_{mob} , $M_{mob}(t=0)$, B_{mob} , k_{ec} , B_{ec} . Certains de ces paramètres peuvent être déterminés relativement simplement en remarquant que pour les crues de fortes hydraulité, on peut supposer que le stock mobilisable temporaire initial est rapidement épuisé :

- Tout d'abord, lors de la décrue (il ne pleut plus), seule la contribution due à l'érosion continue entre alors en compte. On peut alors exprimer la concentration hebdomadaire simplement de la façon suivante :

$$C_{calc}(t) = C_{ec}(t) = \frac{k_{ec}}{K} \cdot Q(t)^{B_{ec}-1} \quad \text{Eq. 9}$$

Les paramètres k_{ec} et B_{ec} peuvent donc être déterminés par un ajustement logarithmique simple entre les concentrations et les débits moyens hebdomadaires observés pendant la période de décrue (Figure 50).

- Ensuite, l'érosion du stock $M_{mob}(0)$ explique le surplus de concentration observé dans l'écoulement en début de crue par rapport à la concentration en MES provenant uniquement de l'érosion continue. Le stock $M_{mob}(0)$ peut ainsi, pour chaque crue et lorsqu'il est totalement mobilisé lors du début de la crue, être évalué en calculant l'intégrale suivante (Figure 51) :

$$M_{mob}(0) = K \cdot \int_{année} (C_{obs}(t) - C_{ec}(t)) \cdot Q(t) \cdot dt \quad \text{Eq. 10}$$

Pour une station donnée, un stock mobilisable initial unique a été utilisé pour l'ensemble des années simulées. Le stock $M_{mob}(0)$ utilisé est le stock mobilisable initial moyen déterminé pour les 6 années servant au calage du modèle (moyenne des stocks mobilisables calculés de la façon exposée ci-dessus pour les 6 années concernées).

Les deux paramètres k_{mob} et B_{mob} ne peuvent pas être prédéterminés d'une façon similaire à celle exposée ci-dessus. Ils ont tous deux été déterminés par optimisation du critère de Nash moyen calculé sur les 6 crues utilisées pour le calage du modèle entre $C_{obs}(t)$ et $C_{calc}(t)$.

1.2.3.2. Les résultats

Cette méthode a été appliquée aux années de 1991 à 1997 pour les stations de Banankoro de Ké-Macina et de Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani.

La Figure 50 présente pour la station de Douna le graphe permettant de déterminer les paramètres k_{ec} et B_{ec} relatifs au flux de MES provenant de l'érosion dite continue. La Figure 51 présente pour cette même station la fraction des flux annuels exportés par le bassin servant à déterminer pour l'année considérée (1991/92) le stock mobilisable $M_{mob}(0)$. La Figure 52 montre la reconstitution des concentrations obtenues pour cette année et en particulier la part des concentrations calculées due à l'érosion du stock mobilisable et celle due à l'érosion continue.

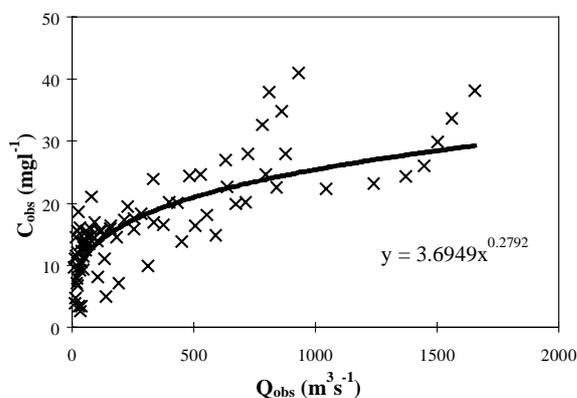


Figure 50. Détermination des paramètres k_{ec} et B_{ec} relatifs au flux de MES provenant de l'érosion continue : relation entre la concentration et le débit hebdomadaire en période de basses eaux pour les années de forte hydraulité (Station de Douna).

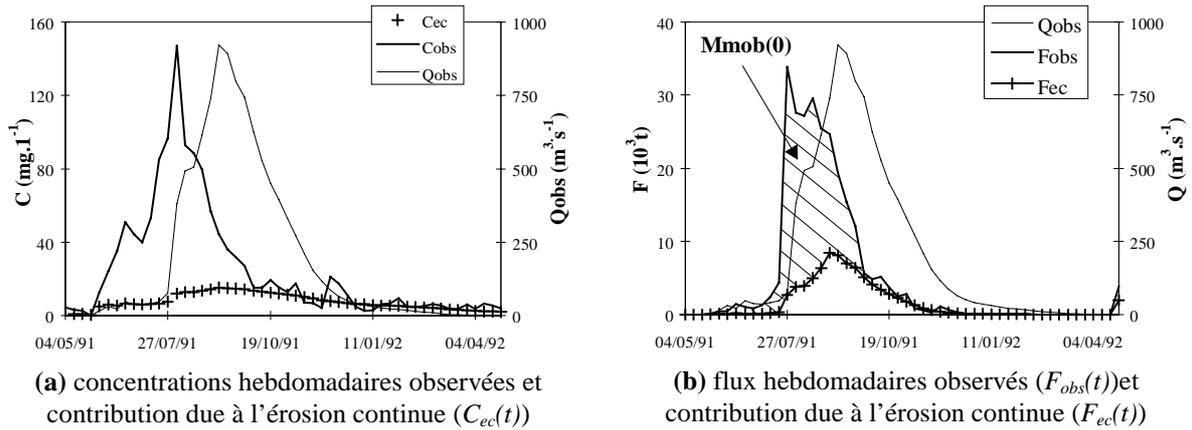


Figure 51. Détermination du stock mobilisable initial pour l'année 1991/92 à Douna en calculant l'intégrale de l'équation (Eq. 10), i.e. l'aire de la surface comprise entre la courbe des flux hebdomadaires observés et la courbe des flux hebdomadaires provenant de l'érosion continue.

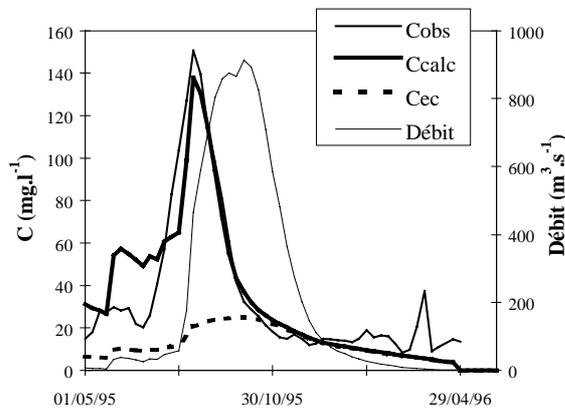


Figure 52. Exemple de reconstitution à l'aide du modèle conceptuel de l'évolution des concentrations observées au cours d'un cycle hydrologique. (Année 1995/96 - Station de Douna)

Les valeurs des paramètres obtenus pour les 4 stations étudiées sont dans le Tableau 24. D'autres jeux de paramètres permettent de retrouver des résultats d'une qualité équivalente. Nous avons donc choisi d'utiliser des exposants B_{mob} et B_{ec} identiques pour les 4 stations. Ceci permettra de comparer les valeurs des autres paramètres entre les différentes stations. Les valeurs du critère de Nash moyen obtenues pour les 6 années utilisées pour le calage du modèle entre les concentrations hebdomadaires moyennes calculées et observées ainsi que les valeurs des critères de Nash obtenues pour les années servant à la validation du modèle sont dans le Tableau 25.

Station	k_{ec}	B_{ec}	k_{mob}	B_{mob}	$M_{mob}(0)$ en (t)
Banankoro	1,70	1,28	$0,85 \cdot 10^{-6}$	1,4	264 000
Koulikoro	1,50	1,28	$0,36 \cdot 10^{-6}$	1,4	443 000
Ké-Macina	3,62	1,28	$0,51 \cdot 10^{-6}$	1,4	511 000
Douna	3,69	1,28	$4,1 \cdot 10^{-6}$	1,4	232 000

Tableau 24 : Valeurs des paramètres des différents ajustements du modèle empirique. (les valeurs de ces différents paramètres correspondent à un modèle dans lequel les unités du débit hebdomadaire moyen, des concentrations et des flux hebdomadaires sont respectivement exprimés en m³/s, en mg/l et en tonnes).

Station	Nash moyen 6ans de 91/92 à 96/97	Nash année 97/98	Nash année 98/99
Banankoro	0,60	0,70	0,80
Koulikoro	0,63	0,46	
Ké-Macina	0,51	0,65	
Douna	0,8	0,77	

Tableau 25. Qualité des résultats obtenus avec le modèle conceptuel C(Q) pour les 4 stations situées sur le bassin du Niger Amont et du Bani. Critère de Nash moyen obtenu pour l'échantillon constitué des 6 années ayant servi au calage du modèle. Critère de Nash obtenu pour chacune des autres années utilisée pour la validation du modèle.

1.2.3.3. Commentaires

(a) Qualité des résultats

Le modèle conceptuel permet d'obtenir des résultats meilleurs à nettement meilleurs que le modèle empirique présenté ci-dessus pour 26 des 30 années étudiées (une année par station présente des résultats moins bons). Le critère de Nash moyen gagne de 0,08 point pour les stations de Koulikoro et Banankoro à 0,17 point pour les stations de Ké-Macina et de Douna. La qualité de résultats est toujours nettement meilleure à Douna qu'aux autres stations tandis que celle relative à Ké-Macina reste toujours relativement médiocre. Le régime non naturel des écoulements à Markala est probablement à mettre en cause (chapitre III).

(b) Interprétation de la valeurs des différents paramètres

Les valeurs des coefficients sont par ailleurs instructives. Il semble intéressant d'exposer auparavant la façon dont ces différents paramètres influencent la courbe de concentration calculée.

Le rôle des paramètres relatifs à l'érosion continue est simple (Eq. 7). Le paramètre k_{ec} est la concentration obtenue du fait de l'érosion continue lorsque le débit écoulé est de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'exposant B_{ec} règle la plus ou moins bonne proportionnalité qui existe entre la courbe $C_{ec}(t)$ correspondant à l'érosion continue et la courbe des débits écoulés $Q(t)$ (si $B_{ec} = 1$, l'érosion continue contribue à une concentration constante indépendante du débit de valeur k_{ec} ; si $B_{ec} = 2$, la courbe $C_{ec}(t)$ est proportionnelle à la courbe $Q(t)$)

Le rôle des autres paramètres, relatifs à l'érosion du stock mobilisable $C_{mob}(t) = F_{mob}(t)/Q(t)$ est plus complexe car ils agissent de différentes façons sur la dynamique du système. A un instant donné et pour un débit $Q(t)$ donné, le flux provenant du stock mobilisable $F_{mob}(t)$ sera d'autant plus grand que $M_{mob}(t)$, k_{mob} et B_{mob} seront grands. Ainsi :

- la concentration $C_{mob}(t)$ sera d'autant plus grande que $M_{mob}(t)$, k_{mob} et B_{mob} seront grands

- l'érosion relative du stock mobilisable ($dM_{mob}(t)/M_{mob}(t)$) sera d'autant plus forte et par suite l'érosion du stock mobilisable d'autant plus rapide que k_{mob} et B_{mob} seront grands (pour un hydrogramme de crue $Q(t)$ donné).

Le paramètre k_{mob} contrôle la **rapidité de l'érosion du stock temporaire mobilisable**. Plus k_{mob} sera grand, plus le stock sera érodé rapidement. Il en résulte que pour un bassin donné, toute chose égale par ailleurs, plus k_{mob} sera important et plus le flux issu du stock temporairement mobilisable sera grand (et donc les concentrations), et plus ce stock "s'épuisera" vite, ce qui implique que le maximum de concentration sera observé plus tôt au cours de la crue. Ce paramètre définit donc la rapidité des mécanismes liés au lessivage des versants.

L'influence du débit et des variations de débit sur les variations de concentrations sont d'autant plus importantes que le paramètre B_{mob} est grand. L'expression de la dérivée par rapport au temps de la concentration $C_{mob}(t)$ nous montre que (Eq. 11) :

$$\frac{dC_{mob}(t)}{dt} = k_{mob}^2 \cdot M_{mob}(t) \cdot Q(t)^{2B_{mob}-2} \cdot \left[\frac{(B_{mob} - 1)}{k_{mob}} \cdot \frac{1}{Q(t)^{B_{mob}}} \cdot \frac{dQ(t)}{dt} - 1 \right] \quad \text{Eq. 11}$$

- si $B_{mob} \leq 1$ alors la concentration $C_{mob}(t)$ est une fonction strictement décroissante du temps écoulé depuis le début de la crue et la concentration $C_{mob}(t)$ maximum est observée au commencement de la saison des pluies.
- si $B_{mob} > 1$ alors la concentration $C_{mob}(t)$ est une fonction qui peut être alternativement croissante ou décroissante. On remarquera que selon notre modèle, le signe de la dérivée de la concentration $C_{mob}(t)$ ne dépend que du débit et des paramètres B_{mob} et k_{mob} . On remarquera aussi que l'on peut observer une augmentation de concentration importante dès lors que l'augmentation de débit est importante. Ceci concorde avec les remarques que nous avons faites au paragraphe 1.1.2.1 : de nombreux pics de débits observés en début de crue coïncident avec des augmentations importantes du débit.

L'exposant B_{mob} pourrait être utilisé pour essayer de reproduire un certain nombre de pics de concentration observés pendant la montée de crue avant le maximum de concentration annuel.

Le fait que les exposants B_{mob} et B_{ec} aient été choisis identiques pour les 4 stations étudiées nous permet d'interpréter plus facilement les différences observées entre les autres paramètres (Tableau 24) :

- Le stock initial mobilisable moyen ($M_{mob}(t=0)$) est presque le même aux stations de Douna et de Banankoro pour un bassin plus important sur le Bani (valeur spécifique de 2,3 t.km⁻²). On observe une augmentation significative du stock mobilisable avec la superficie du bassin versant sur le Niger amont (et des valeurs spécifiques presque identiques de 3,6 à 3,7 t.km⁻²).
- Le paramètre k_{mob} relatif à la rapidité d'érosion de ce stock est très instructif. Sur le Niger il est inférieur à 1 et compris entre 0,36 à Koulikoro et 0,85 à Banankoro. Il est en revanche de 4,1 à Douna, ce qui témoigne d'une diminution très importante du stock temporaire mobilisable et ainsi de concentration plus importante qui arrivent plus tôt. Ces différences sont sans doute à relier au

caractéristiques des bassins étudiés. Nous reviendrons par la suite sur ces différences entre les bassins du Bani et du Niger.

Il est nécessaire malgré tout d'interpréter ces différences avec prudence car **d'autres jeux de paramètres sont envisageables** pour chacune de ces stations.

(c) Conclusions et perspectives

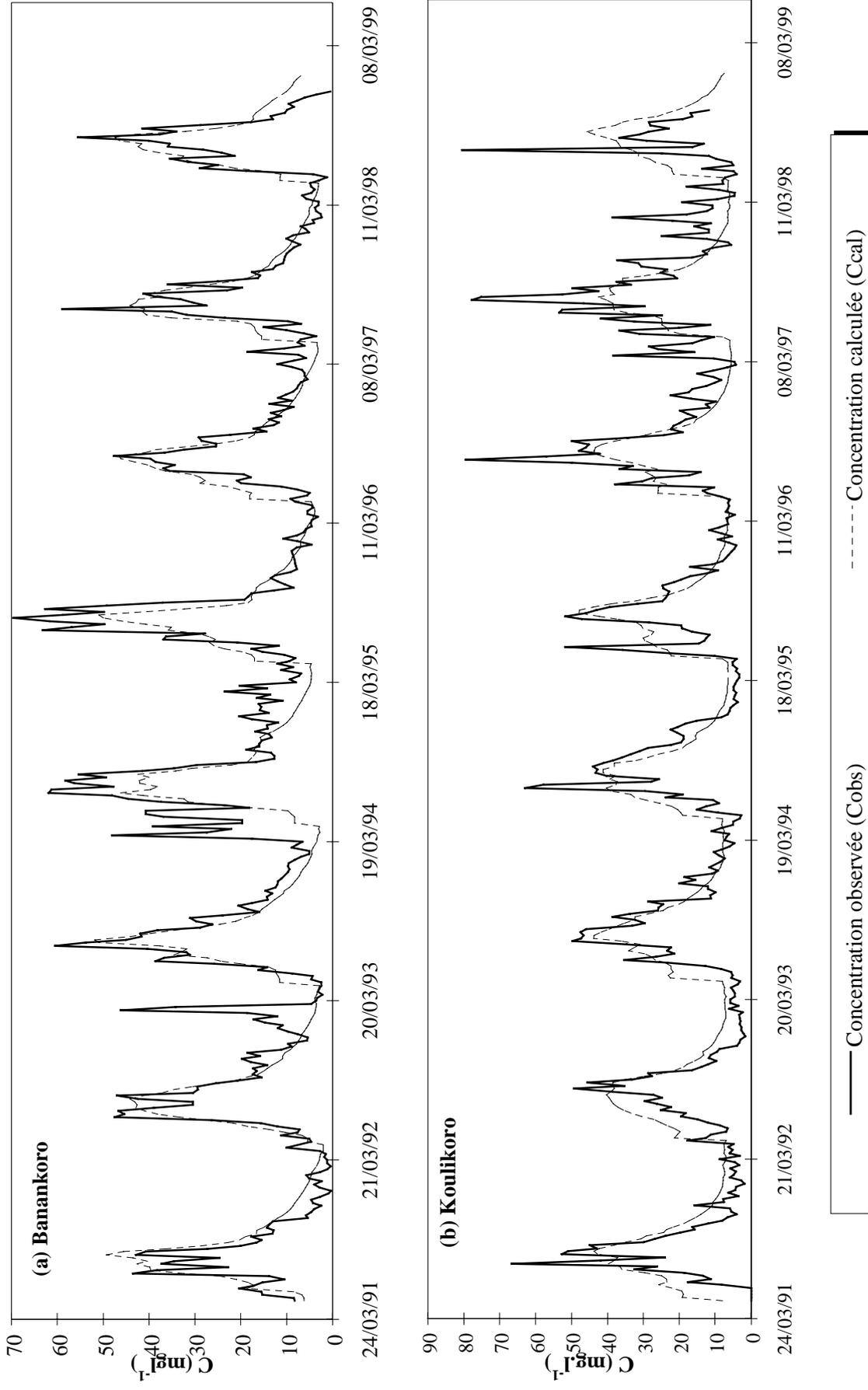
Un modèle conceptuel de ce type est plus intéressant qu'un modèle empirique tel que celui présenté plus haut car il est envisageable, en étudiant un nombre suffisant de bassins, d'expliquer la valeur de certains de ces paramètres à partir de certaines caractéristiques physiques du milieu. Par exemple, le stock mobilisable $M_{mob}(t=0)$ est vraisemblablement à relier à l'érodabilité du bassin versant ainsi qu'à sa superficie. Nous avons vu par ailleurs qu'il diffèrait suivant les années (du simple au double) ce qui nous a conduit à déterminer un stock mobilisable moyen pour l'ensemble des années de calage utilisées. Ce paramètre dépend donc aussi d'autres variables. Cela peut être : la superficie totale du bassin touchée par les pluies pendant la saison pluvieuse considérée, l'intensité de ces pluies, la durée de la saison sèche précédente qui a conduit à une accumulation de poussières sur les versants d'autant plus importante que cette durée est longue, l'hydrologie des années passées. En effet on peut penser qu'à la fin d'une année sèche tout le stock mobilisable n'a pas été érodé. Le stock mobilisable disponible l'année suivante sera ainsi plus important. Au contraire, si l'année étudiée suit une année humide, le stock mobilisable au début de l'année sera plus faible.

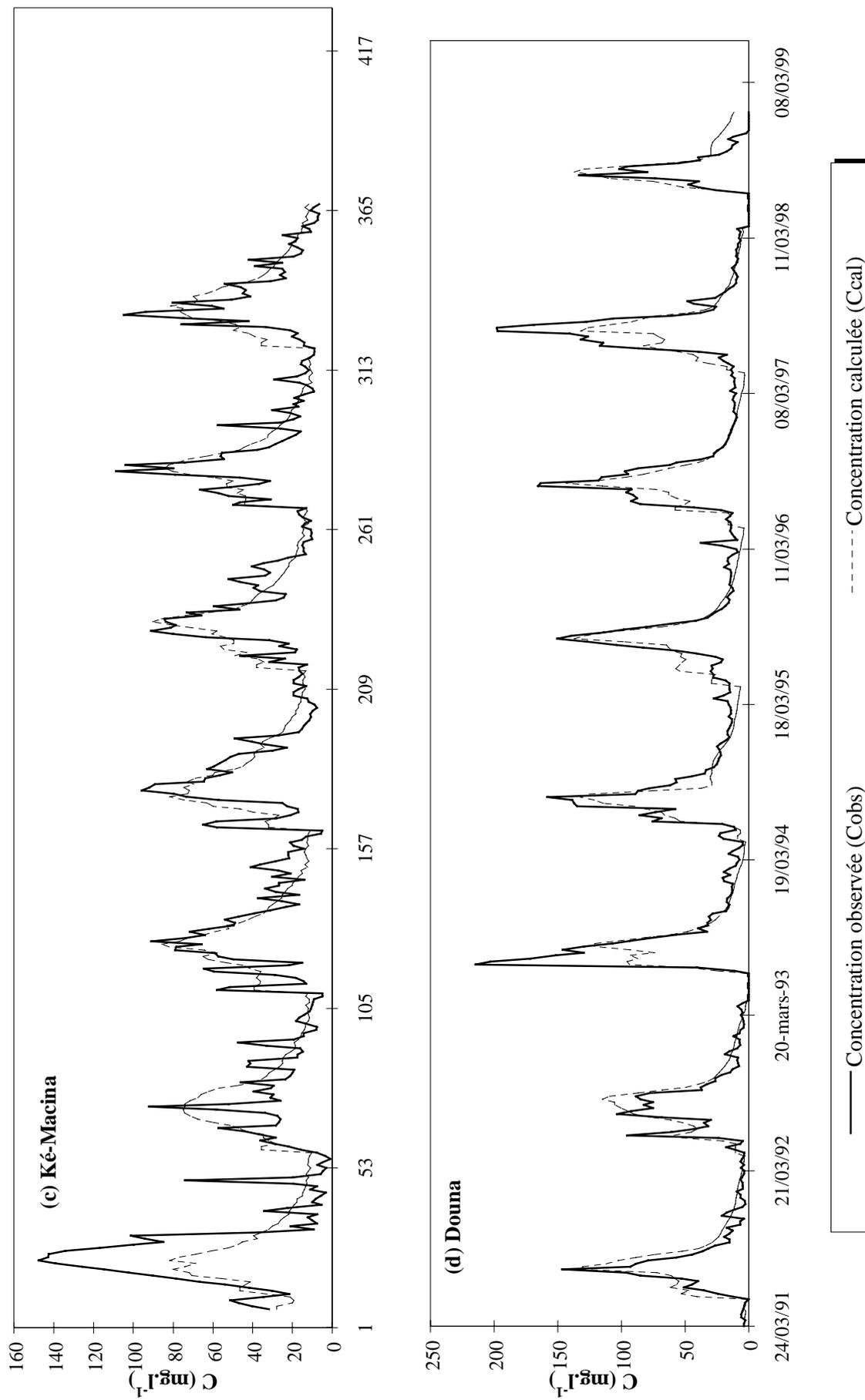
Le paramètre k_{mob} qui contrôle la rapidité de l'érosion du stock mobilisable, définit la rapidité des mécanismes liés au lessivage des versants et est probablement à relier à la durée de la saison pluvieuse mais aussi à la pente des versants, à la densité de végétation donc à l'érodabilité du bassin...

Finalement, nous avons mis en place un modèle simple qui permet de représenter l'évolution des concentrations de MES dans le temps et qui permet même de représenter certains pics de concentrations observés lors des variations brutales de débit en début de crue. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les deux réservoirs de matières utilisés ne reflètent pas forcément uniquement les processus que nous y avons attaché. Il est certain que d'autres processus et paramètres entrent en jeu. Bien évidemment ce concept de réservoir n'est qu'une schématisation de la réalité. Entre le stock mobilisable des versants supposé fini à l'échelle de la saison et le réservoir de sédiments toujours disponible dans le réseau hydrographique (berge et lit), il y a toutes les contributions des drains primaires qui participent aux deux réservoirs.

Enfin, il faut admettre que ce modèle conceptuel a intégré, sans l'identifier, l'effet de dilution de la charge solide, dilution liée à la part de plus en plus grande prise par les écoulements lents (sans charge particulaire initiale) dans l'hydrogramme de crue.

Figure 53. Pages suivantes - Comparaison de l'évolution au cours du temps des concentrations observées et calculées avec le modèle conceptuel, sur les 4 stations étudiées.





2. VARIABILITE INTERANNUELLE DES FLUX

La connaissance des concentrations journalières mesurées ou calculées et des débits journaliers a permis de calculer les flux annuels transportés sur les différentes stations et pour les années d'observations (de 1991/92 à 1997/98).

2.1. Flux de matières particulaires mesurés de 1991/92 à 1997/98

Les flux de matières en suspension exportées en année hydrologique (de 1991/92 à 1997/98), obtenus par une méthode d'interpolation des concentrations (chapitre II), les concentrations moyennes annuelles (rapport annuel entre flux de MES et flux hydrique), et les taux de transport spécifique (Ts) sont présentées dans le Tableau 26.

	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98
Banankoro							
Flux (10^3 t. an ⁻¹)	338	411	467	800	862	596	479
Débit (m ³ .s ⁻¹)	531	521	521	1070	977	825	729
[MES] (mg.l ⁻¹)	20,1	25,1	28,4	23,7	27,9	22,9	20,8
Ts (t.km ⁻² .an ⁻¹)	4,8	5,8	6,6	11,3	12,1	8,4	6,7
Koulikoro							
Flux (10^3 t. an ⁻¹)	607	593	665	1 296	1 014	960	986
Débit (m ³ .s ⁻¹)	767	775	732	1480	1310	1050	1019
[MES] (mg.l ⁻¹)	25,1	24,3	28,8	27,8	24,5	29,0	30,7
Ts (t.km ⁻² .an ⁻¹)	5,1	4,9	5,5	10,8	8,4	8,0	8,2
Ké-Macina							
Flux (10^3 t. an ⁻¹)	-	715	1 028	1 974	1 701	1 223	1 139
Débit (m ³ .s ⁻¹)	-	681	647	1320	1180	929	911
[MES] (mg.l ⁻¹)	-	33,3	50,4	47,4	45,7	41,8	39,6
Ts (t.km ⁻² .an ⁻¹)	-	5,1	7,3	14,0	12,1	8,7	8,1
Douna							
Flux (10^3 t. an ⁻¹)	257	229	315	729	389	422	448
Débit (m ³ .s ⁻¹)	190	139	135	459	224	200	202
[MES] (mg.l ⁻¹)	42,8	52,3	74,1	50,3	55,1	66,9	70,3
Ts (t.km ⁻² .an ⁻¹)	2,5	2,3	3,1	7,2	3,8	4,2	4,4

Tableau 26. Flux annuels de matières en suspension sur le Niger amont (Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina) et le Bani (Douna). (Ts : Transport spécifique)

Les flux de MES exportés présentent des variations importantes suivant l'hydraulicité de l'année contrairement aux concentrations (Tableau 26). La Figure 54 montre que l'on peut en première approximation déterminer pour chacune des stations du bassin du Niger amont une relation linéaire entre débit spécifique et transport spécifique (flux annuel ramené à la surface du bassin). Il s'agit en fait d'une auto-corrélation : étant données les faibles variations de concentration en MES (de 1 à 10) par rapport aux variations de débits (de 1 à 500) au cours d'un cycle hydrologique, le facteur déterminant dans l'importance du flux annuel de matières particulaire transportée va être le débit annuel. Différents modèles utilisent ce type de régression (§1.2.1.)

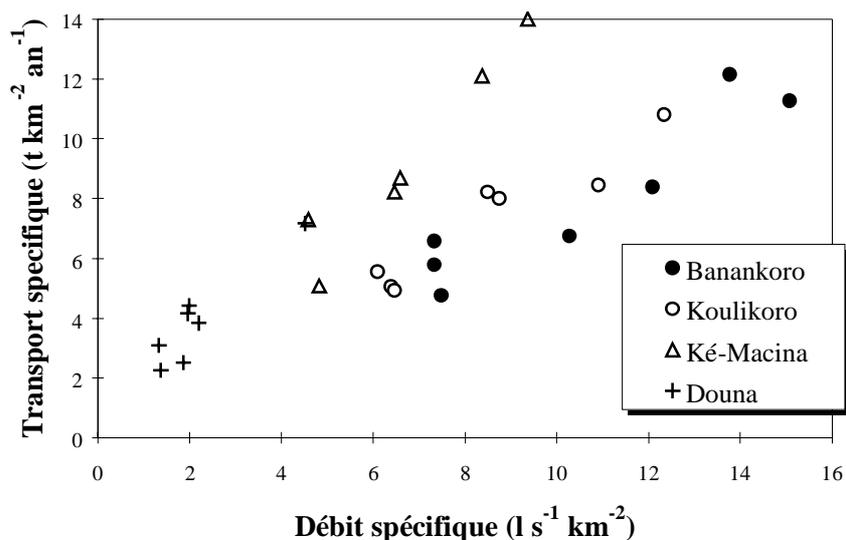


Figure 54. Relation entre débit et transport spécifique sur les 4 stations du bassin du Niger amont pour l'ensemble des années d'observation (de 1991 à 1998).

Cependant, la relation linéaire ci-dessus n'est pas parfaite ce qui s'explique par le fait que les maximums de concentrations soient observés avant le maximum de crue. De ce fait les maximums d'exportations de matières précèdent la période des très hautes eaux et les relations entre les flux de MES et les volumes mensuels prennent aussi la forme de cycle d'hystérésis orthogrades (Figure 55b). L'étude de la répartition saisonnière des flux de MES montre que quelle que soit la station plus de 70% des flux annuels sont exportés en l'espace de 3 mois (août, septembre, octobre). Sur cette période, l'augmentation importante des débits est compensée par la diminution également importante des concentrations. Les flux mensuels moyens (Figure 55a) des mois d'août et septembre sont ainsi équivalents. **En revanche, le transport annuel va très peu dépendre des fortes concentrations atteintes lors de la phase d'érosion initiale (courant juillet) : cette période ne pesant en moyenne que pour 12% dans le flux annuel.** Le transport particulaire annuel est donc avant tout expliqué par la quantité de volume écoulé.

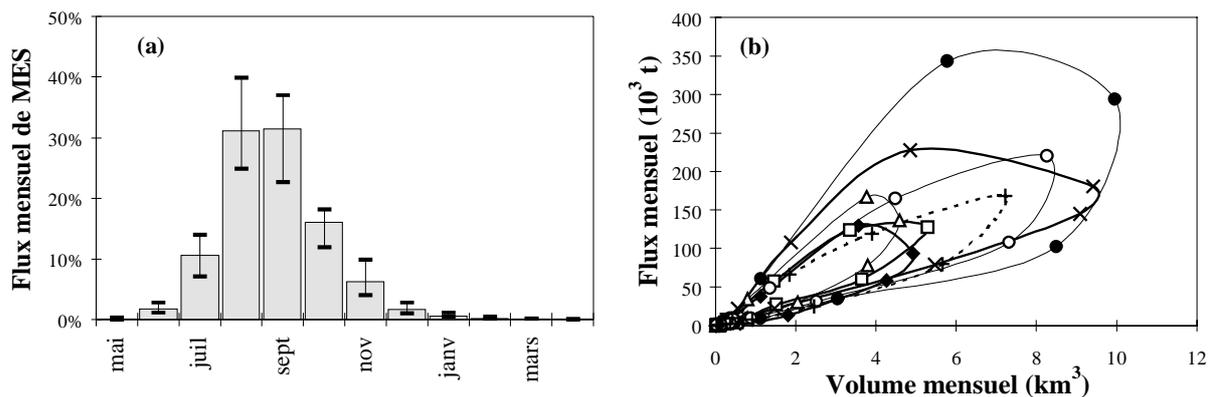


Figure 55 : Flux mensuel à la station de Banankoro ; évolution des flux mensuels interannuels (moyenne 1991-1998) en fonction du temps (a) ; relation Flux MES - Volume mensuel pour l'ensemble des années d'observation (b).

2.2. Flux de matières particulaires calculés de 1991/92 à 1997/98

De même qu'il est intéressant de pouvoir reconstituer à partir d'un hydrogramme de crue l'évolution des concentrations au fil d'un cycle hydrologique, il est intéressant de pouvoir reconstituer les flux exportés. Plusieurs solutions sont envisageables si l'on cherche à reconstituer les flux annuels : on peut utiliser un ajustement statistique simple entre les débits annuels et les flux annuels ou recalculer les flux instantanés à partir des débits instantanés en utilisant un modèle du style de ceux présentés dans le paragraphe ci-dessus. Par la suite, si l'on cherche à retrouver la distribution temporelle de ces flux au cours de l'année, l'ajustement statistique simple devient insuffisant.

Nous étudions (et comparons) dans ce paragraphe la capacité des deux modèles empirique et conceptuel présentés plus haut (paramètres inchangés) à reconstituer l'évolution temporelle des flux hebdomadaires exportés à chacune des 4 stations étudiées. Nous présenterons les résultats pour toutes les crues pour lesquelles nous disposons d'observations relatives aux concentrations et aux débits. Le critère de qualité est toujours le critère de Nash calculé entre les flux hebdomadaires observés et les flux hebdomadaires calculés, ceux-ci étant obtenus à partir des concentrations observées et calculées d'une part et des débits hebdomadaires observés d'autre part.

Nous étudions aussi pour chacune des crues, l'écart entre le flux annuel observé et le flux annuel calculé. Nous comparons alors les résultats issus de 3 « modèles » : les deux premiers sont le modèle empirique et le modèle conceptuel. Le 3^{ème} est l'ajustement simple effectué entre débit annuel et flux annuel sur les 6 années ayant servi au calage des deux modèles précédents.

Les résultats avec les 3 modèles sont présentés pour chaque station dans les Tableau 27 à Tableau 30

année	Ajustement Statistique	Modèle Empirique		Modèle Conceptuel	
	Ecart flux (%)	Ecart flux (%)	Nash Flux	Ecart flux (%)	Nash Flux
91/92	23	52	0,55	38	0,79
92/93	-1	-1	0,92	10	0,92
93/94	-13	-11	0,96	-3	0,97
94/95	5	-10	0,88	-4	0,93
95/96	-11	-21	0,92	-16	0,86
96/97	8	-21	0,81	7	0,93
97/98	20	10	0,86	20	0,85
98/99		-11	0,92	17	0,87
Sur N années					
Ecart flux max,	23	52		38	
Ecart flux min,	-13	-21		-16	
Ecart moyen sur 8 ans	3	-5		-2	
Nash moyen sur 8 ans			0,84		0,89

Tableau 27, Ecarts entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Banankoro.

année	Ajustement Statistique	Modèle Empirique		Modèle Conceptuel	
	Ecart flux (%)	Ecart flux (%)	Nash Flux	Ecart flux (%)	Nash Flux
91/92	6	-6	0,94	8	0,91
92/93	10	8	0,93	13	0,95
93/94	-8	-19	0,89	-6	0,96
94/95	-4	-21	0,87	-15	0,93
95/96	9	-1	0,82	0	0,94
96/97	-8	-9	0,93	-10	0,92
97/98	-13	-13	0,77	-15	0,77
98/99					
Sur N années					
Ecart flux max.	10	40		13	
Ecart flux min.	-13	-21		-15	
Ecart moyen sur 8 ans	-2	-10		-4	
Nash moyen sur 8 ans			0,88		0,91

Tableau 28. Ecarts entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Koulikoro.

année	Ajustement Statistique	Modèle Empirique		Modèle Conceptuel	
	Ecart flux (%)	Ecart flux (%)	Nash Flux	Ecart flux (%)	Nash Flux
91/92	-44	-49	0,60	-42	0,65
92/93	45	42	0,17	48	0,23
93/94	-4	-16	0,93	-3	0,96
94/95	2	-9	0,91	-5	0,94
95/96	6	20	0,65	2	0,93
96/97	18	21	0,68	14	0,83
97/98	21	28	0,50	19	0,80
98/99					
Sur N années					
Ecart flux max,	45	42		48	
Ecart flux min,	-44	-49		-42	
Ecart moyen sur 8 ans	1	0		5	
Nash moyen sur 8 ans			0,63		0,76

Tableau 29. Ecarts entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Ké-Macina.

année	Ajustement Statistique	Modèle Empirique		Modèle Conceptuel	
	Ecart flux (%)	Ecart flux (%)	Nash Flux	Ecart flux (%)	Nash Flux
91/92	24	54	0,47	38	0,75
92/93	2	6	0,94	32	0,83
93/94	-28	-16	0,87	-6	0,91
94/95	5	-21	0,71	-16	0,83
95/96	-4	-23	0,95	-1	0,99
96/97	-21	-25	0,89	-14	0,96
97/98	-24	-5	0,61	-18	0,87
98/99					
Sur N années					
Ecart flux max.	24	64		38	
Ecart flux min.	-28	-25		-18	
Ecart moyen sur 8 ans	2	-10		2	
Nash moyen sur 8 ans			0,78	0	0,88

Tableau 30. Ecarts entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Douna (Bani).

Ces différents tableaux montrent la plus ou moins bonne adéquation entre les flux annuels calculés et observés suivant les années et les stations mais aussi suivant le modèle utilisé :

- L'écart entre flux observés et calculés (%) est très variable d'une année à une autre, quelle que soit la station,
- Sur la station de Ké-Macina, les flux annuels sont plutôt mal reproduits quel que soit le modèle utilisé, pour les autres stations, les écarts sont plus faibles,
- L'ajustement statistique simple donne de meilleurs résultats, que les deux autres modèles en terme de flux annuels : les écarts (en %) avec les flux mesurés sont notamment toujours plus faibles. Le modèle conceptuel donne des approximations légèrement meilleures que le modèle empirique : le critère de Nash moyen sur l'ensemble des années gagne de 0,06 à 0,15 point suivant les stations.

Finalement il semble, qu'en termes de flux annuels les modèles présentés dans le paragraphe 1.2. n'apportent pas d'amélioration sensible par rapport à l'ajustement statistique simple entre les volumes écoulés et les flux de MES. En revanche ces modèles reproduisent assez bien l'évolution des concentrations et des flux dans le temps et sont plus satisfaisants du point de vue conceptuel.

3. EVOLUTION SPATIALE DES CONCENTRATIONS EN MES ET DES FLUX ASSOCIES

Les observations à moyen terme, réalisées de 1991 à 1998, permettent de déterminer les valeurs moyennes interannuelles des concentrations en MES, leurs flux associés. Le Tableau 31 présente ces résultats qui nous permettent d'étudier l'évolution spatiale sur le bassin amont du Niger des concentrations en MES et de leurs flux associés.

3.1. Evolution spatiale des concentrations et des flux de MES

Les moyennes annuelles, calculées à partir du rapport entre flux de MES et débits interannuels, mettent en évidence la variabilité spatiale des concentrations entre l'amont et l'aval du cours du Niger supérieur, et entre le Niger et le Bani sur la période étudiée. La concentration moyenne annuelle des eaux du Bani à Douna est de 58,8 mg.l⁻¹, tandis que pour le Niger supérieur elle augmente de 24 à 45 mg.l⁻¹ de la station de Banankoro à la station aval de Ké-Macina alors que les débits ne suivent pas ces variations (Tableau 31). Ces concentrations restent toutefois très faibles par rapport à d'autres fleuves du monde et notamment du Sénégal à la sortie de son bassin supérieur (MES=232 mg.l⁻¹ ; Orange, 1992) qui jouxte celui du Niger ; en revanche elles sont du même ordre de grandeur que celles d'autres fleuves africains comme celles du Congo à Brazzaville (26 mg.l⁻¹), de l'Oubangui à Bangui (31 mg.l⁻¹) et du Chari à N'Djaména (76 mg.l⁻¹).

Moyenne (1991-98)	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuelle
Banankoro													
Débit (m ³ .s ⁻¹)	25,4	133	510	1584	2736	2256	1039	338	136	59	24,9	14,6	739
[MES] (mg.l ⁻¹)	13,0	26,4	42,7	41,6	24,5	15,4	12,7	9,4	8,1	8,4	6,3	11,3	24
Flux (10 ³ .t)	0,7	9,5	59	182	174	90	35	9,3	3,3	1,3	0,5	0,4	565
Koulikoro													
Débit (m ³ .s ⁻¹)	167,6	301	705	1761	3456	3171	1446	526	233	155	136,6	146,7	1019
[MES] (mg.l ⁻¹)	13,1	19,5	37,4	44,6	32,4	23,1	13,5	10,9	8,1	8,5	7,4	8,5	27,2
Flux (10 ³ .t)	6,3	15,3	73	211	284	198	56	15,8	4,8	3,1	2,5	3,0	874
Ké-Macina													
Débit (m ³ .s ⁻¹)	88,8	187	579	1609	3014	2866	1397	558	244	131	89,6	82,4	906
[MES] (mg.l ⁻¹)	31,6	36,8	60,1	69,9	49,7	33,0	33,0	22,1	19,0	15,1	14,5	13,2	43,1
Flux (10 ³ .t)	8,2	17,4	101	311	408	266	129	34,7	12,3	4,4	3,5	2,6	1 297
Douna													
Débit (m ³ .s ⁻¹)	2,6	26	68	474	884	701	333	103	36	16	5,8	2,1	221
[MES] (mg.l ⁻¹)	14,2	45,0	103,0	121,4	62,9	29,4	17,4	14,4	11,1	12,0	9,0	11,8	58,8
Flux (10 ³ .t)	0,2	3,5	20	153	142	56	17	4,8	1,2	0,5	0,2	0,1	398

Tableau 31. Valeurs moyennes interannuelles (1991-1998) des débits, des concentrations et des flux sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont.

Le transport spécifique moyen interannuel varie de 7,3 à 9,2 t.km⁻².an⁻¹ le long du Niger entre Banankoro et Ké-Macina. Il diminue entre Banankoro et Koulikoro ; par contre, il augmente entre Koulikoro et Ké-Macina alors que la taille du bassin versant augmente et que les débits spécifiques diminuent (Figure 56). Il se rapproche alors des taux observés par Orange (1992) sur les stations situées en Guinée. Sur le Bani, cette valeur est à peine de 3,9 t.km⁻².an⁻¹ pour un bassin versant de superficie similaire, bien que ce soit un bassin agricole. Nous reviendrons par la suite sur ces différences.

Finalement les faibles concentrations rencontrées sur le bassin du Niger amont (Niger et Bani) se traduisent par des flux spécifiques inférieurs à 10 t.km⁻².an⁻¹. Ces valeurs sont évidemment très faibles par rapports à d'autres fleuves tropicaux peu anthropisés du globe tels que l'Amazone (221 t km² an⁻¹ ; Meade *et al.*, 1985, cités par Summerfield & Hulton, 1994) mais du même ordre de grandeur que des fleuves africains comme le Congo (8,8 t km² an⁻¹ ; Laraque *et al.*, 1995) ou le Niger à son embouchure (19 t km² an⁻¹ ; Milliman & Meade, 1983). Les taux spécifiques faibles de ces rivières africaines proviennent, d'un point de vue global, des faibles altitudes moyennes de leurs bassins versants (Milliman & Meade, 1983 ; Milliman & Syvitski, 1992 ; Summerfield & Hulton, 1994).

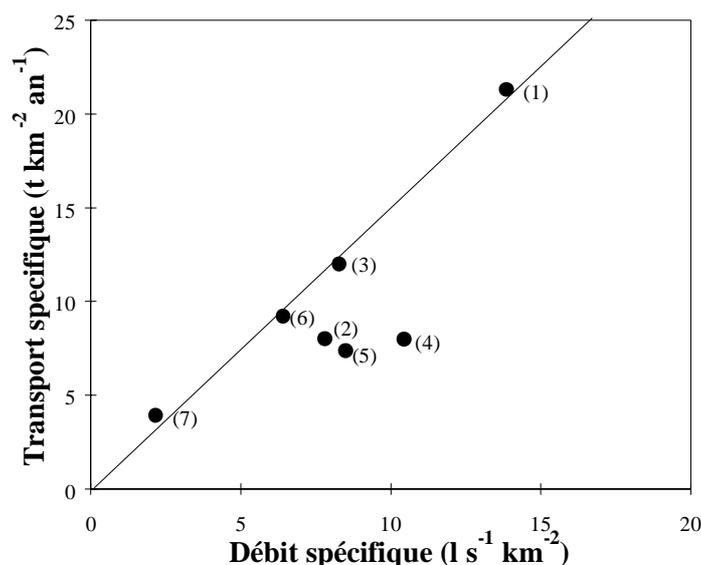


Figure 56. Comparaison des valeurs obtenues pour les stations étudiées sur le bassin du Niger amont avec quelques valeurs sur des stations du Haut-Niger en Guinée (d'après Orange, 1992). (1) Milo à Kankan ; (2) Tinkisso à Dabola ; (3) Niger à Siguiri ; (4) Niger à Banankoro ; (5) Niger à Koulikoro ; (6) Niger à Ké-Macina ; (7) Bani à Douna.

Sur le bassin du Niger amont, la faiblesse des flux spécifiques observés est à mettre en relation avec la **faiblesse des lames d'eau écoulées** et aussi avec la **lithologie** (et les couvertures ferrallitiques) de la zone d'étude. Les taux observés sur le Niger peuvent être comparés à ceux du bassin actif du fleuve Sénégal voisin dont la valeur moyenne est de $16,7 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur 9 années récentes déficitaires (Gac & Orange, 1990b). Cette différence peut en partie s'expliquer par l'importance relative plus grande sur le bassin du Sénégal que sur le bassin du Niger, du plateau Mandingue à couverture ferrugineuse très sensible à l'érosion en ravine (Orange, 1992). Le fleuve Niger au contraire descend du Fouta Djallon sur des sols ferrallitiques indurés puis coule dans une vallée colluviale sableuse, deux environnements peu propices à l'exportation de matières particulaires.

3.2. Evolution des concentrations et des flux de MES transportées sur le cours du Niger

L'étude porte sur les deux biefs maliens du Niger supérieur : Banankoro à Koulikoro et Koulikoro à Ké-Macina. La Figure 56 a mis en évidence les différences entre l'évolution spatiale des valeurs annuelles des flux hydriques et celle de MES entre les deux biefs. La Figure 57 montre bien la particularité du bief Koulikoro - Ké-Macina, pour lequel les flux de MES augmentent (Figure 57b) alors qu'il y a des pertes en eau (Figure 57a). Dans un bief, les différentes sources de sédiments possibles sont les tributaires et l'érosion des berges ou du fond de lit. D'autres processus indirects peuvent toutefois jouer un rôle important sur les flux et les concentrations en MES. Une évaporation

forte peut par exemple concentrer les eaux en MES. Les plaines alluviales peuvent au contraire faciliter la sédimentation et le piégeage de sédiment.

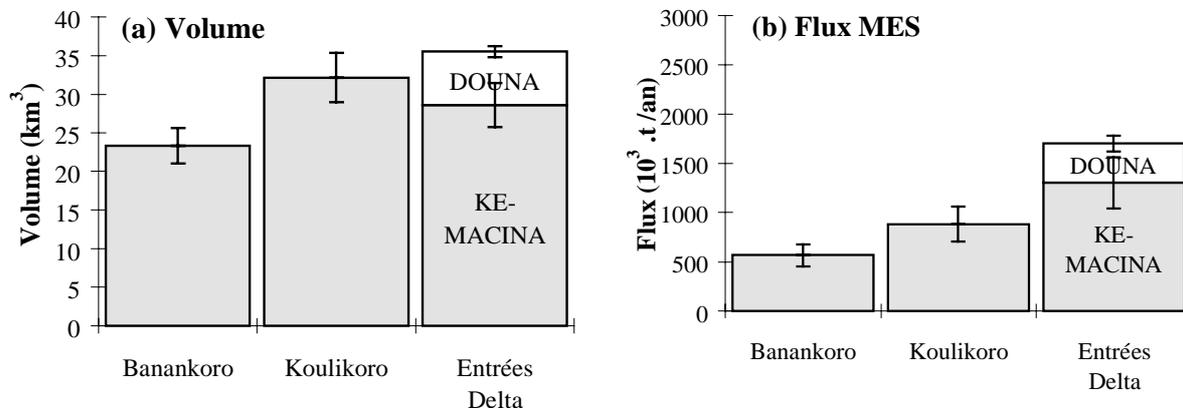


Figure 57. Evolution spatiale des flux moyens annuels (1991-1998) hydriques (a) et solide (b).

3.2.1.1. Bief Banankoro-Koulikoro

Entre Banankoro et Koulikoro, il y a un gain d'eau moyen entre les deux stations de 8,8 km³ (soit environ 27%), qui s'accompagne d'un gain de matières en suspension moyen plus important de 36%, correspondant à 317 000 tonnes (soit, ramené à la surface du bassin intermédiaire, un taux de transport de 6,5 t.km².an⁻¹). Les concentrations augmentent légèrement entre les deux stations (Tableau 31). La Figure 58 qui présente les relations entre concentrations moyennes en MES et débits mensuels moyens interannuels, met en relief les différences à la fois de concentrations et des débits observées sur les deux stations. Au début de la crue, en mai, juin et juillet, alors que les débits sont plus importants à Koulikoro qu'à Banankoro (ceci est vrai sur l'ensemble de l'année), les concentrations sont en revanche plus faibles.

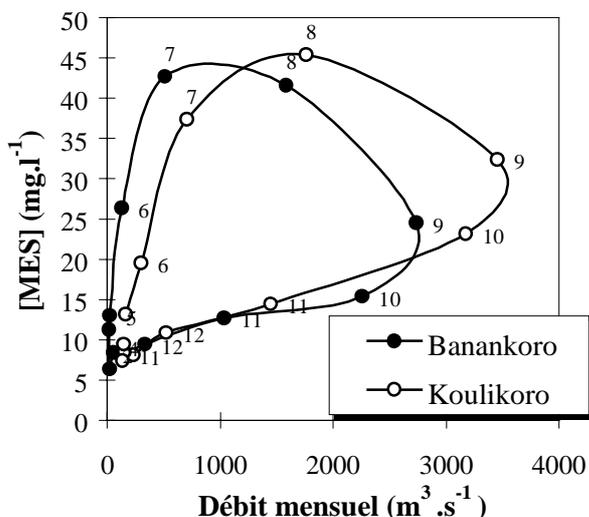


Figure 58. Relation Concentrations en MES - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Banankoro et Koulikoro (moyenne 1991-1998). (les numéros sont les mois correspondants).

Le Niger reçoit entre ces deux stations, un tributaire important, le Sankarani (35 500 km²) où le barrage de Sélingué est en fonctionnement à environ 60 km de la confluence, mais aussi un affluent de moindre importance, le Faya (2190 km²), ainsi que de nombreux marigots qui se jettent directement dans le fleuve (chapitre III).

L'évolution au cours du temps des débits sur le Sankarani à l'aval du barrage de Sélingué (Figure 59), montre que hormis la période de déversement (septembre-octobre), les eaux peu chargées en matières en suspension sortants du barrage diluent les apports chargés provenant du Niger et les concentrations à Koulikoro sont plus faibles (et les gains en flux faibles).

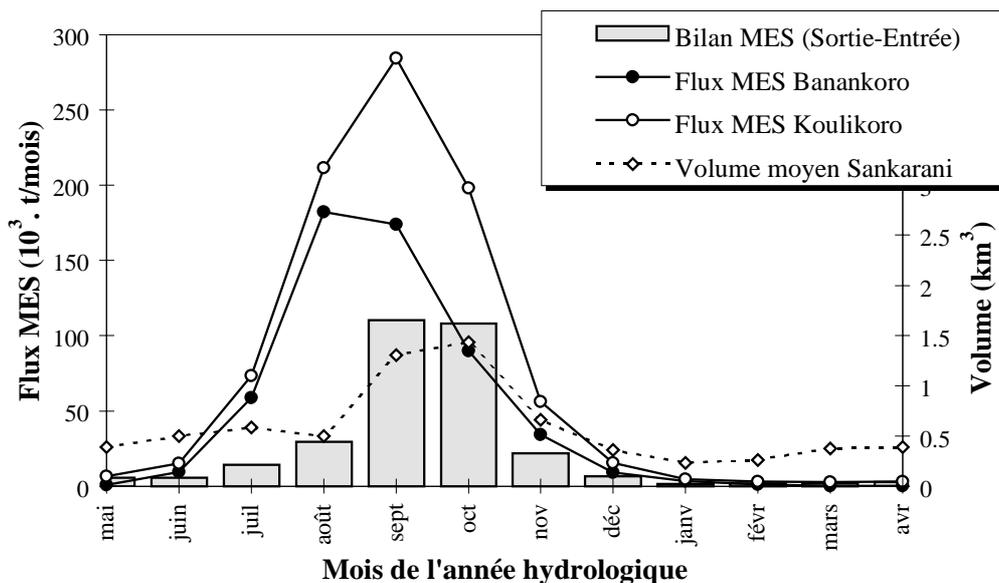


Figure 59. Evolution du bilan des flux en MES sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison avec les débits du Sankarani.

La première source hydrique et donc a priori des sédiments en suspension sur le bief provient des apports du Sankarani. L'influence du Sankarani sur les volumes écoulés à Koulikoro a été étudiée à partir des débits sortant à l'aval du barrage au chapitre III : sur la période d'étude (1991-1998) on peut de la même manière estimer que les apports du Sankarani représentent au moins 70 % des apports hydriques entre les deux stations. Il n'existe en revanche que très peu de données sur les flux de MES provenant du Sankarani, seul quelques données ponctuelles sur les années 1995 et 1996 permettent d'avoir un aperçu des concentrations. Les concentrations sur le Sankarani, à l'aval du barrage de Sélingué ne dépassent pas 30 mg.l⁻¹ (en juillet) et sont la plupart du temps inférieures à 5 mg.l⁻¹. Au vu de ces données, on peut considérer que la concentration annuelle est faible sur le Sankarani et que l'on peut utiliser la concentration moyenne observée sur le Niger à Banankoro comme une limite maximum (20 mg.l⁻¹). On peut alors calculer un flux interannuel probable à partir des volumes annuels moyens écoulés (connus) sur la même période d'étude (moyenne de 222 m³.s⁻¹). Les flux annuels moyens estimés seraient de 140 milliers de tonnes par an, soit environ 50% de la différence de flux entre Banankoro et Koulikoro (alors que les flux hydriques expliquent très bien la différence sur le bief). Ce tonnage correspond à un transport spécifique moyen assez faible de 4,1 t.km⁻².an⁻¹.

Le bassin intermédiaire (de 14 800 km²) apporte ainsi une quantité de MES estimé en moyenne à 177 000 tonnes par an, soit un transport spécifique de 12 t.km⁻².an⁻¹. Ces apports intermédiaires, comme pour les flux hydriques (chapitre III) ne sont pas négligeables. Ces taux peuvent être comparés aux valeurs obtenues par Droux (1999) de 20 t.km⁻².an⁻¹ et 14 t.km⁻².an⁻¹ respectivement sur deux bassins versants représentatifs de la zone (l'un est en zone de grès durs cuirassés caractéristiques du plateau Mandingue, l'autre est en zone de socle). Avec un taux de recouvrement de 20% pour les grès et de 80% pour le socle, la quantité de matières en suspension exportée par le bassin intermédiaire est de 220 milliers de tonnes, soit un peu plus que ce que nous avons calculé. Cette différence peut notamment s'expliquer par le fait que notre période d'étude recouvre 7 années à l'hydrologie contrastée tandis que l'étude de Droux (1999) recouvre les deux années 1994/95 et 1995/96 considérées comme les plus humides de notre série. Cette façon de procéder ne tient pas compte également des problèmes de changement d'échelle.

Une autre source, déjà évoquée dans la modélisation est l'apport de l'érosion des berges et du fond du lit. Ce phénomène participe à la charge en suspension transportée sur le bief où les berges du lit mineur font 5-6 mètres de haut et sont relativement mobiles. A partir d'une étude sur une rivière anglaise, Asbridge *et al.* (1995) trouvent cependant que seule une faible partie des sédiments issus des berges sont en général assez fins pour participer à la charge en suspension du cours d'eau. Ce n'est pas le cas du Niger dont les dépôts de berges sont silto-argileux.

3.2.1.2. Bief Koulikoro - Ké-Macina

Le bief Koulikoro-Ké-Macina, avec son bassin intermédiaire de 21 000 km² est caractérisé par des pertes en eau moyennes entre les deux stations de 3,6 km³ sur la période d'étude (soit 13% de perte). Celles-ci sont en partie dues à la présence du barrage de Markala (prélèvements de l'Office du Niger, plan d'eau soumis à l'évaporation), puis aux débordements du lit majeur dans des plaines et des mares qui sont ensuite isolées à la décrue (chapitre III). Etant donné la forme du lit, on s'attendrait à avoir également des pertes de sédiments. Or, il y a gain de matières en suspension entre les deux stations, plus ou moins important suivant les années : il est en moyenne de 422 000 tonnes (soit un gain de 48% !) et représente, en ramenant à la surface du bassin intermédiaire, un taux de transport de 20 t.km².an⁻¹ (Figure 56 ; Tableau 31). On se retrouve donc avec une augmentation du transport spécifique alors que la taille du bassin augmente. Ce type de relation peu courante sur les grands bassins versants, est sans doute due à l'érosion des berges (source dominante de MES dans la rivière), ou bien à une agriculture sur plaine importante ou encore à un changement de lithologie (chapitre I), mais aussi à une agressivité climatique croissante en latitude (Olivry, 1978).

L'étude des relations entre concentrations en MES et débits moyens à Ké-Macina, montre que la forme en boucle du cycle d'hystérésis est conservée, mais avec des concentrations toujours plus importantes que sur la station amont de Koulikoro (Figure 60). En décrue, on peut observer des concentrations qui ne diminuent pas avec les débits, avec parfois suivant les années, une tendance à augmenter. Les gains de matières sont nuls en mai-juin, puis de janvier à avril ; le maximum de gains a lieu en août/septembre (cœur de la saison des pluies) alors que les pertes en eau sont également importantes, voire maximales, entre les deux stations (Figure 61).

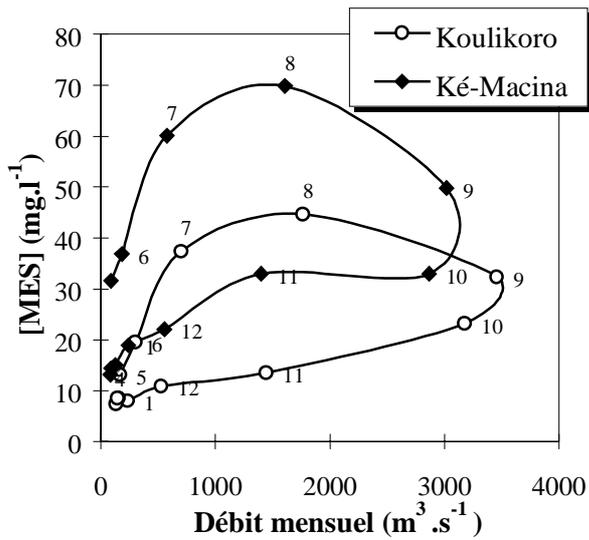


Figure 60. Relation Concentrations en MES - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Koulikoro et Ké-Macina (moyenne 1991-1998).

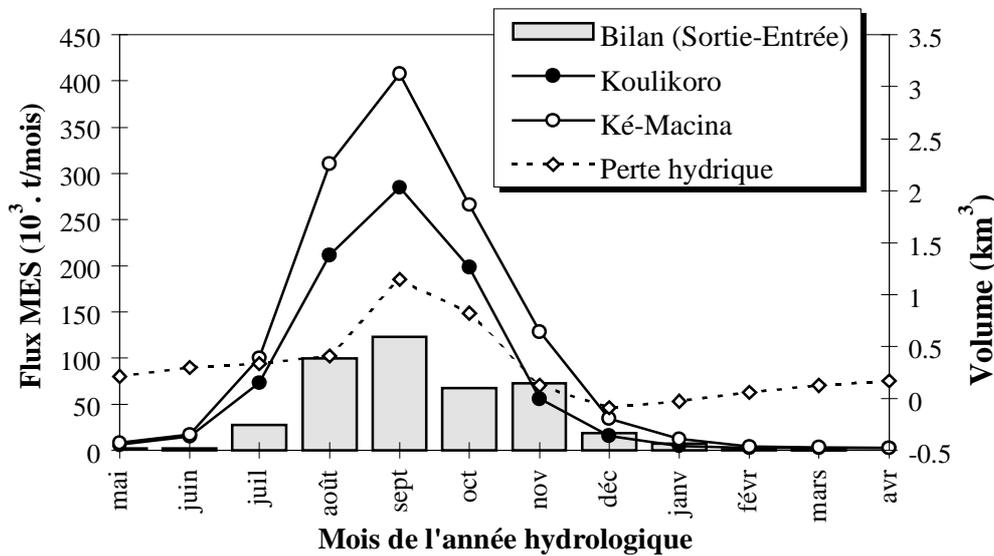


Figure 61. Evolution du bilan des flux en MES sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison avec les débits du Sankarani.

Plusieurs hypothèses, dont certaines, qui ont déjà été évoquées, peuvent être avancées pour expliquer ces gains de matières en suspension qui ont lieu pendant toutes les hautes eaux de juillet à décembre :

- Une des premières hypothèses est une participation de l'érosion des berges comme source de matières transportées par le fleuve au cours du passage de la crue. Bien que la pente soit très faible sur ce bief, de 7 cm au km au début du bief (de Koulikoro à Tamani) puis de 2 cm au km (entre Tamani et Ké-Macina), la forme de l'hydrogramme en dents de scie (les lâchés fréquents du barrage de Markala qui peuvent créer des perturbations à l'aval du barrage) suggère que l'érosion sur les berges et au fond du lit peut quand même être importante. De plus, l'érosion de fond du lit pourrait être importante sur ce bief où les bancs de sables sont courants après le barrage de Markala.

- Les pertes en eaux n'étant pas compensées par les gains en eau du bassin intermédiaire, les forts gains de matières sur le bief Koulikoro - Ké-Macina, suggèrent aussi que ces gains hydriques peuvent lors de la saison pluvieuse (période de ruissellement) être plus concentrés en MES. Cette forte érosion des versants s'expliquerait par la zone bio-climatique plus aride traversée alors par le Niger : sur le bassin intermédiaire les alluvions du quaternaire et les grès ont complètement remplacé les granites plus amont, les sols sont des sols de plaines limono-sableux, ou de sols latéritiques, sableux ou "humides" (PIRT, 1986), la végétation est plus rare (le Niger va vers le nord). Autant de facteurs qui favorisent une érosion importante. Le taux du transport du bassin intermédiaire de $20 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ est comparable à celui observé par Droux (1999) sur un bassin représentatif en zone de grès cuirassé. **L'hypothèse d'apports intermédiaires plus concentrés dus à une érodibilité du bassin plus importante est donc tout à fait envisageable et la plus probable.**
- Une autre source de sédiment pourrait être liée aux gains en eau observés entre Kirango-aval et Ké-Macina (que l'on observe notamment en décembre et janvier). Ceux ci sont attribués d'une part à des apports entre les deux stations et d'autre part aux restitutions par l'Office du Niger en aval de Kirango (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Cette partie du bief peut être considérée comme le début de la vaste zone d'inondation que constitue le delta intérieur du Niger. La pente est très faible, on observe différents bras avec des bancs rocheux (cuirasse latéritiques et grès) ou sableux (bancs de sable et de gravillons latéritiques), des aires d'inondation importantes, des bourrelets de rives, et un lit très large (entre 1200 et 2000 m)... Lors de la décrue une reprise de matériaux par le retour des eaux du lit majeur dans le lit mineur ainsi que le retour des eaux de drainage de l'Office du Niger (peut-être très chargées en MES?) pourrait expliquer une part des gains de MES.
- Un phénomène à ne pas négliger est la concentration des eaux en MES par évaporation et perte de volumes conséquents qui peut sans doute aussi expliquer les fortes concentrations rencontrées à Ké-Macina, et les flux de MES importants qui en ont découlé.

Remarque : Il faut signaler l'exception pour l'année 1992/1993 pour laquelle les pertes en eaux sont du même ordre de grandeur que pour les autres années sèches mais avec des gains de MES très faibles : à peine de 112 milliers de tonnes. Ceci est sans doute lié à la forme de l'hydrogramme et à la répartition des pluies dans l'année (chapitre III).

Dans le bassin amont, le Niger traverse une région avec encore un peu de relief et reçoit essentiellement les eaux provenant de Guinée. Les moyennes interannuelles des concentrations en MES sur la période d'étude, sont respectivement de 24 à 27,2 mg.l^{-1} aux stations de Banankoro et Koulikoro. A cause de l'influence du barrage de Sélingué, les eaux moins turbides du Sankarani ont tendance à diluer les apports amonts, et ceux du bassin intermédiaire.

Le fleuve traverse ensuite une zone où les tributaires sont très peu importants (le bassin intermédiaire n'est que de 21 000 km^2). Du fait de l'irrigation (Office du Niger et barrage de Markala), ainsi que de la morphologie du lit (bancs de sables, zones inondables..), le module à Ké-Macina diminue, tandis que la concentration moyenne en MES augmentent de 27,2 à 43,1 mg.l^{-1} traduisant une forte érosion des bassins versants intermédiaires.

3.3. Différences entre Bani et Niger

Pour des bassins versants de taille presque identique (102 000 km² pour le Bani à la station de Douna ; 120 000 km² et 141 000 km² pour le Niger à la station de Koulikoro et Ké-Macina), le suivi des concentrations au cours du temps et le calcul des concentrations et des taux de transports spécifiques moyens interannuels ont mis en évidence des différences entre le fleuve Niger et son principal tributaire le Bani. Ces deux tributaires forment les entrées du delta intérieur du Niger.

3.3.1. Comparaison des relations MES/Débits

La Figure 62 qui met en relation les concentrations et les débits moyens interannuels, montre de manière frappante que le Bani, avec des débits beaucoup plus faibles que sur le Niger, présente des concentrations beaucoup plus importantes lors de la montée de crue. Tandis que le Niger présente des débits très importants (maximum de 3 500 m³ s⁻¹) et des faibles concentrations de MES (maximum de 70 mg.l⁻¹), le Bani, au contraire, montre des concentrations très importantes (maximum d'environ 120 mg.l⁻¹) pour des faibles débits (maximum de 900 m³ s⁻¹). Une différence aussi importante des concentrations en MES sur les deux cours d'eau pourrait s'expliquer en partie par l'activité agricole plus importante sur le bassin du Bani (notamment avec le périmètre cotonnier de la CMDT) d'où une sensibilité à l'érosion plus grande. Il est possible que des apports des bassins intermédiaires situés sur les grès horizontaux, participent à ces fortes concentrations. Pour les deux cours d'eau, le maximum de débit a lieu au cours du mois de septembre, mais, contrairement au Niger, les concentrations sur le Bani diminuent très fortement d'août à octobre (Figure 62).

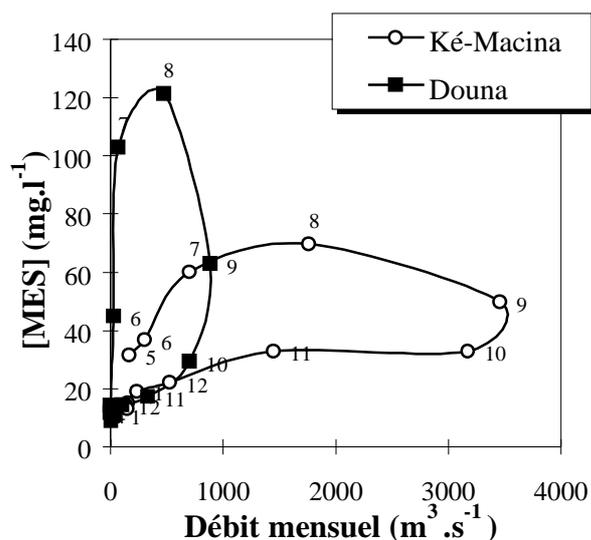


Figure 62. Relation Concentrations - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Ké-Macina et le Bani à Douna (moyenne 1991-1998).

3.3.2. Comparaison des flux exportés

La Figure 63 présente l'évolution comparée des flux en MES à la station de Ké-Macina sur le Niger et de Douna sur le Bani. Sur le Bani, la période de transport de MES est plus courte : les mois d'août, septembre et octobre représentent en moyenne 90 % du transport annuel, tandis que pour la station de Ké-Macina, ces mois représentent moins de 80% du transport annuel.

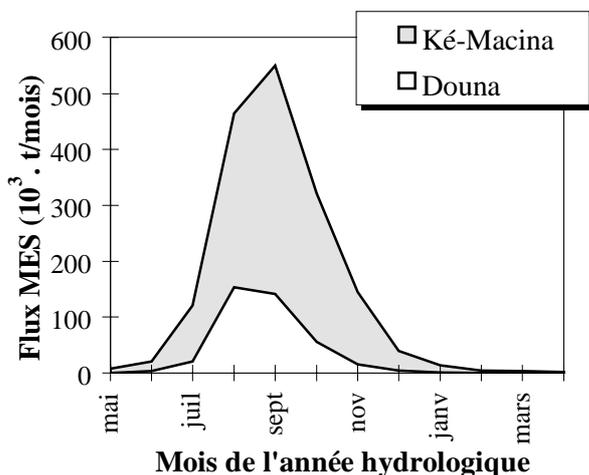


Figure 63. Evolution comparée des flux en MES à la station de Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani.

A l'échelle annuelle, on a vu que le taux de transport est très faible sur le Bani ($3,9 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ à Douna) par rapport au Niger ($9,2 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$ à Ké-Macina). Ce faible taux de MES annuellement exporté est évidemment à relier à la localisation plus au sud du bassin du Bani dont la moyenne partie du bassin versant se trouve en zone climatique soudano-sahélienne. Comme précisé auparavant (chapitre I), cette zone climatique est caractérisée par des précipitations annuelles qui diminuent progressivement de 1200 à 700 mm et qui se répartissent sur 4 mois de juin à Octobre, tandis que la zone soudanienne où se situent les hauts bassins du Niger, est caractérisée par une saison sèche plus courte et des précipitations annuelles beaucoup plus importantes se produisant de mai à octobre. Ainsi, sur le bassin du Bani à Douna, les débits sont plus faibles, les précipitations moins abondantes et la saison des pluies plus courte, ce qui explique la faible lame d'eau écoulée annuellement et les très faibles taux de transports de MES observés.

Les concentrations rencontrées sur le Bani, affluent principal du Niger, dont le bassin versant est presque aussi important que celui de Koulikoro, sont plus importantes. Les concentrations moyennes maximum ne dépassent pas 70 mg.l^{-1} à Ké-Macina sur le Niger tandis que sur le Bani elles peuvent atteindre 120 mg.l^{-1} . Cette différence est sans doute liée aux sols et aux superficies cultivées importantes sur le bassin du Bani, qui en font une région sensible à l'érosion. Bien que les concentrations soient fortes sur le Bani, la faiblesse des écoulements est le principal facteur qui limite le transport de MES sur ce bassin versant.

En conclusion, comme pour l'hydrologie, les entrées dans le delta sont principalement composée des apports de MES du Niger (76%) et dans une moindre mesure des apports de MES du Bani (24%).

Chapitre V. Chimie des précipitations en zone soudano-sahélienne : éléments majeurs et traces

La charge en solution produite à l'exutoire d'un bassin versant ne correspond qu'en partie à l'altération chimique des roches du bassin versant, car d'autres sources de matériaux peuvent contribuer à une part non négligeable des éléments en solution (chapitre I). C'est le cas des apports atmosphériques, surtout dans le cas des rivières faiblement minéralisées. La contribution des apports atmosphériques se fait par précipitation au moment de la condensation, dissolution au moment de la chute des gouttes (déposition humide) et par dépôts de poussières (déposition sèche). Seul les dépôts humides sous forme de précipitation nous intéressent ici. Le nettoyage de l'atmosphère, qui s'effectue selon deux modes connus sous les noms de "rain out"¹ et wash out"²", conduit à des précipitations atmosphériques qui ne sont pas chimiquement pures. Les compositions chimiques des pluies vont être très variables suivant la diversité des sources de gaz et de particules présentes dans l'atmosphère : source terrigène due à l'érosion du bassin versant, apports océaniques régulés par la distance à l'océan, érosion éolienne, émission d'aérosols par la végétation et apports anthropiques (Meybeck, 1983 ; Berner & Berner, 1987 ; Appelo & Postma, 1993 ; Freydiser, 1997).

Ce chapitre vise à identifier la contribution des apports atmosphériques à la chimie du fleuve Niger et aussi d'identifier l'origine des différents éléments ou d'éventuelles traces de pollution anthropogéniques dans les précipitations.

1. RESULTATS DANS LES PLUIES

Une première série de mesures a été réalisée en 1993 sur la station de Bamako (Gourcy, 1994), mais ces données sont a priori incorrectes étant donné le protocole de prélèvement inadéquat ; seul le pH, mesuré immédiatement après la pluie, nous est très utile : les précipitations de Bamako ne sont pas considérées comme des pluies acides, le pH moyen est proche de 6,4 avec une fourchette de variation allant de 4,7 en octobre (fin de la saison des pluies) et 7,3 en mai (début de la saison).

¹ Le "rain out" consiste en la capture des particules par les gouttelettes des nuages au cours de leur croissance. Les constituants solubles se trouvent ainsi incorporés aux gouttes de pluie.

² Le "wash out" ou encore "self cleaning" permet un "nettoyage" de l'air par piégeage des particules pendant les précipitations.

Depuis Août 1996, les éléments majeurs (phase dissoute et totale) et traces (phase totale) sont recherchés dans les précipitations à soixante kilomètres environ de Bamako à la station de Katibougou (Chapitre II).

1.1. Composition chimique de la phase dissoute

Les concentrations moyennes en espèces majeures pondérées par les hauteurs d'eau recueillies lors de la saison des pluies 1997 à Katibougou sont présentées dans le Tableau 32. La moyenne a également été calculée sans trois événements dont les concentrations sont anormalement élevées. Seule une des ces pluies à une hauteur d'eau significative (13,2 mm), les deux autres ont des hauteurs d'eau négligeables, inférieures à 2 mm (et donc un faible poids dans le calcul de concentrations pondérées par les hauteurs d'eau). Les concentrations moyennes sur 46 ou 43 (notées C_{46} et C_{43}) échantillons varient surtout pour Cl^- , Na^+ et K^+ (du simple au double) et dans une moindre mesure pour Mg^{2+} et Ca^{2+} . Les teneurs en NO_3^- et SO_4^{2-} ne sont pas affectées par le nombre d'échantillons pris en compte.

	1997	Hmm	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
C_{46} (µg.l ⁻¹)		714		281	663	318	260	220	103	860
C_{43} (µg.l ⁻¹)		697	16,85	142	632	313	99	98,5	72	709

Tableau 32. Concentrations moyennes en µg.l⁻¹ des eaux de pluies recueillies à Katibougou (Mali) de juin à octobre 1997.

Etant données les faibles concentrations, certaines balances ioniques dépassent 10%. La plupart sont négatives. L'absence de dosage de l'ion ammonium (NH_4^+) peut expliquer en partie ce déficit, mais la limite de détection des appareils de mesures ou la présence dans les eaux d'une espèce non dosée (comme les acides organiques) sont également en cause. Freydier (1997) a clairement mis en évidence la présence de carbonates à la station de Kollo, ainsi que la présence d'acides faibles autres que formiques et acétique, aux stations de Nsimi et Bangui qui pourrait expliquer le déficit de charge négative des balances ioniques. Les ions sont classés dans l'ordre d'abondance :



L'ion calcium est le plus abondant (709 µg.l⁻¹) de tous les ions traduisant l'importance de la source terrigène. L'ion sodium est moins abondant que les chlorures, qui sont relativement importants en début et en fin de saison des pluies.

Les concentrations moyennes pondérées par les hauteurs d'eau obtenues sur deux autres sites dans la même zone géographique (Freydier, 1997) sont présentées dans le Tableau 33. Les concentrations à Katibougou sont plus ou moins proches de celles rencontrées à Lamto et Kollo qui se trouvent respectivement à 780 km sud-est et à environ 1100 km à l'est de Katibougou (voir localisation au chapitre II). Les teneurs en NO_3^- et SO_4^{2-} sont intermédiaires entre Kollo et Lamto. Les valeurs de

K^+ et Na^+ se situent dans le même ordre de grandeur qu'à Lamto, tandis que les concentrations moyennes en Ca^{2+} et Mg^{2+} sont supérieures à celles de Lamto. Le Cl^- présente de faibles concentrations par rapport aux deux stations.

$\mu g.l^{-1}$	Conc.moy. Katibougou (a) (Mali)	Conc.moy. Lamto (b) (C.I.)	Conc.moy. Kollo (c) (Niger)
	n=43	n=50	n=22
H mm	697	645	640
pH		5,2	5,7
Ca^{2+}	709	148	509
Mg^{2+}	72	32	65
K^+	99	89	296
Na^+	98,5	97	230
Cl^-	142	202	380
NO_3^-	632	453	769
SO_4^{2-}	313	287	464

(a) Cette étude - Pluie 1997

(b) Freydier (1997) - Pluie 1995

(c) Freydier (1997) - Pluie 1994

Tableau 33. Concentrations moyennes en éléments (en $\mu g.l^{-1}$) majeurs dans la phase dissoute des pluies recueillies à Katibougou (Mali). Comparaison avec deux autres sites de l'Afrique de l'Ouest.

1.2. Les éléments traces de la phase totale

Pour la plupart des éléments la distribution des concentrations dans la phase totale est plutôt normale avec une dissymétrie étalée vers les plus petites valeurs, excepté pour Ca, Mn, Co, Ge, Sn, Lu.

Le Tableau 34 présente les concentrations moyennes pondérées par les hauteurs d'eau ainsi que certains descripteurs statistiques (médiane, quartiles, minimum, maximum). Les différences entre médiane et moyenne sont faibles sauf pour Ni et Zn. Le coefficient de variation pour Zn^3 atteint 251%. Les facteurs de variation entre le minimum et le maximum ne dépassent pas 100. Ces faibles variations sont à relier avec les lacunes d'échantillonnage au niveau des premières pluies plus concentrées (Orange *et al.*, 1992). Deux échantillons semblent anormaux, l'un présente des concentrations particulièrement très faibles, et l'autre une concentration en Zn très élevée. Les

³ Rappelons (chapitre II) que les concentrations en Zn et Cr, notée Zn^* et Cr^* , sont à considérer avec précautions, car les blancs de laboratoire sont relativement élevés.

moyennes recalculées sans ceux-ci sont toutefois très peu différentes de celles calculées avec tous les échantillons du fait de la faible hauteur d'eau associée à ces deux événements pluvieux. En revanche, un événement pluvieux présentant une concentration en Zn très élevée de $99,7 \mu\text{g.l}^{-1}$, modifie de façon conséquente la concentration moyenne pondérée ($9,0 \mu\text{g.l}^{-1}$ avec l'échantillon et $5,58 \mu\text{g.l}^{-1}$ sans).

	Conc. moy. n=19	Mediane	Min. - Max.	Quartile (25%)	-	Quartile (75%)	Conc.moy. Lamto (a)	Conc. moy. Kollo (b)
Mg	119,3	113,3	6,1 - 320,7	74,8	-	145,9	46,4	184
Al	350,4	295,4	772,3	-	-	-	204	2419
V	1,02	0,99	0,03 - 2,80	0,56	-	1,34	0,288	2,99
Cr*	1,02	0,91	0,10 - 3,23	0,58	-	1,22	0,25	2,74
Mn	8,97	9,92	0,62 - 19,35	6,58	-	13,23	3,6	20,9
Fe	370,3	341,2	11,9 - 1038	192,3	-	478,7	101	981
Co	0,244	0,236	0,026 - 0,491	0,131	-	0,307	0,064	0,47
Ni	1,32	1,01	< DL - 3,16	0,89	-	1,45	-	-
Cu	0,834	0,743	0,198 - 3,678	0,407	-	1,402	-	-
Zn*	8,92	6,07	1,48 - 99,69	3,02	-	8,60	10,5	15,4
Rb	0,864	0,787	0,077 - 2,622	0,484	-	1,157	0,315	2,2
Sr	2,41	2,38	0,16 - 5,96	1,85	-	2,84	1,15	4,73
Cs	0,039	0,034	< DL - 0,113	0,020	-	0,050	0,011	0,091
Y	0,246	0,250	0,008 - 0,602	0,150	-	0,319	-	-
Cd	0,114	0,102	< DL - 1,055	0,006	-	0,233	-	-
Sb	0,029	0,016	0,009 - 0,128	0,014	-	0,021	-	-
Ba	5,59	5,43	0,46 - 15,35	3,18	-	6,54	2,14	10,5
La	0,416	0,395	0,011 - 1,052	0,237	-	0,589	0,123	1,53
Ce	0,888	0,866	0,020 - 2,201	0,520	-	1,250	0,262	3,26
Pr	0,105	0,101	0,005 - 0,264	0,061	-	0,148	-	-
Nd	0,408	0,408	< DL - 1,034	0,255	-	0,558	0,116	1,54
Sm	0,076	0,080	< DL - 0,195	0,043	-	0,110	-	-
Yb	0,023	0,023	< DL - 0,052	0,016	-	0,031	0,006	0,091
Pb	0,412	0,437	0,101 - 0,877	0,371	-	0,531	0,209	1,55
Th	0,094	0,087	< DL - 0,270	0,057	-	0,123	0,035	0,443
U	0,024	0,026	0,008 - 0,056	0,018	-	0,031	0,01	0,101

(a) Freydier (1997) - Pluie 1995

(b) Freydier (1997) - Pluie 1994

**Tableau 34. Concentrations moyennes en éléments traces dans la phase totale des pluies (en $\mu\text{g.l}^{-1}$).
Comparaison avec deux autres sites de l'Afrique de l'Ouest.**

La comparaison des concentrations avec les deux autres stations de l'Afrique de l'Ouest du réseau IDAF (Tableau 34), situées soit à l'est de la station de notre station d'étude à Kollo au Niger (zone de savane sèche), soit au sud à Lamto en Côte d'Ivoire (zone de forêt dense et de savane humide), fait apparaître que les concentrations de la station de Katibougou sont intermédiaires. Si l'on prend en compte le fait que les premières pluies les plus concentrées n'ont pas été échantillonnées on peut penser que la station du Mali se rapproche plus de Kollo que de Lamto. Ceci semble logique étant donnée la situation géographique de notre site d'étude en zone soudanienne où dominent les savanes

arborées à arbustives (Chapitre I). Freydier (1997) a montré que la station de Kollo présente des valeurs 1 à 10 fois plus élevées que pour les autres stations. Ici, le rapport entre Katibougou et Lamto varie de 1 à 4, et le rapport entre Katibougou et Kollo de 1,5 à 7. Pour U, Pb, Zn Katibougou se rapproche plus de Lamto que de Kollo. Pour Cs, Co, V, Cr, Ba, Mg, Fe, Katibougou se rapproche d'avantage de Kollo.

Toutes les concentrations à la station de Katibougou sont inférieures à celles de Kollo et supérieures aux autres stations du réseau IDAF en Afrique de l'Ouest (Lamto) et en Afrique intertropicale (Bangui en République Centrafricaine, et Nsimi au Cameroun) excepté pour le Pb et le Zn où Katibougou se situe parmi les valeurs les plus faibles.

1.3. Facteur d'enrichissement

En calculant le facteur d'enrichissement (FE) pour chaque élément, on peut distinguer leurs différentes origines : naturelle et/ou industrielle (Duce et al., 1975 ; Atteia, 1994 ; Roy, 1996 ; Freydier et al, 1997).

1.3.1. Définition et résultats

Ce type de "représentation" permet de mettre en évidence un excès ou un déficit pour un élément donné par rapport à un réservoir de référence. A partir des abondances de chaque élément dans ce réservoir, qui est, dans cette étude, la croûte continentale moyenne définie par Taylor et Mc Lenman (1985), on peut calculer le FE selon l'équation :

$$FE = \frac{([X]/[REF])_{Ech}}{([X]/[REF])_{CC}}$$

→ $([X]/[REF])_{Ech}$: Rapport des concentrations dans la phase totale de l'élément X et de l'élément de référence (REF) de l'échantillon.

→ $([X]/[REF])_{CC}$: Rapport des concentrations de l'élément X et de l'élément de référence (REF) dans la croûte continentale.

Le fer est pris comme élément de référence de la source purement crustale. Cet élément, comme l'aluminium dans les particules atmosphériques, provient essentiellement de la source crustale (Berner & Berner, 1987 ; Freydier, 1997). Les FE ont été calculés à partir des concentrations totales individuelles (celles-ci devant être supérieures à 5 fois la limite de détection pour éviter de surestimer les FE pour les très faibles concentrations) et de la concentration moyenne pondérée par les hauteurs d'eau (calculée uniquement pour les éléments pour lesquels 80% des valeurs sont supérieures à la limite de détection). L'ensemble de ces résultats ainsi que quelques paramètres statistiques sont présentés dans le Tableau 35.

	FE _{moyen}	CV%	FE _{median}	FE _{min.}	-	FE _{max.}	FE 25%	-	FE 75%	Nbval.	Nbval >10
K	0,8	86%	0,9	0,5	-	4,4	0,6	-	1,1	19	0
Na	0,4	94%	0,4	0,1	-	2,2	0,3	-	0,5	19	0
Ca	0,6	92%	0,7	0,4	-	3,7	0,4	-	0,8	19	0
Ti	0,9	90%	0,8	0,6	-	5,2	0,7	-	1,2	19	0
V	1,6	11%	1,6	1,4	-	2,2	1,5	-	1,7	19	0
Cr*	2,8	139%	2,4	<5DL	-	25,8	2,2	-	2,6	18	1
Mn	1,4	91%	1,7	0,8	-	9,3	1,3	-	1,9	19	0
Fe		0%								19	0
Co	2,3	75%	2,1	1,3	-	8,9	1,7	-	2,9	19	0
Cu	3,2	164%	3,6	0,7	-	61,8	1,5	-	8,4	19	2
Zn*	12	170%	8,3	1,7	-	175,8	5,1	-	21,8	19	8
Ga	1,1	14%	1,1	0,5	-	1,2	1,0	-	1,2	19	0
Rb	0,7	43%	0,7	0,6	-	2,0	0,7	-	0,8	19	0
Sr	0,7	63%	0,7	0,4	-	2,8	0,6	-	0,9	19	0
Y	1,1	58%	1,1	0,9	-	4,2	1,0	-	1,1	19	0
Zr	0,3	50%	0,3	<5DL	-	1,1	0,3	-	0,4	18	0
Sb	13,5	57%	10	<5DL	-	53,6	5,6	-	18,8	18	9
Cs	1,0	12%	0,9	<5DL	-	1,2	0,9	-	1,0	18	0
Cd	105	130%	152,1	<5DL	-	1039	58,1	-	219,3	14	12
Ba	1,0	46%	0,9	0,7	-	2,4	0,9	-	1,1	19	0
La	1,3	19%	1,4	1,0	-	2,2	1,2	-	1,4	19	0
Ce	1,3	26%	1,4	0,9	-	2,7	1,2	-	1,5	19	0
Pr	1,4	32%	1,5	<5DL	-	3,5	1,3	-	1,5	18	0
Nd	1,5	44%	1,5	<5DL	-	4,6	1,4	-	1,6	18	0
Pb	2,0	95%	2,0	1,2	-	14,8	1,6	-	3,6	19	1
Th	0,8	18%	0,8	<5DL	-	1,3	0,7	-	0,9	18	0
U	0,8	55%	0,8	<5DL	-	3,0	0,7	-	1,1	17	0

Tableau 35. Facteur d'enrichissement ((X)/[Fe]) dans les pluies à Katibougou au Mali (N=19 et H = 390.3 mm).

Ces valeurs sont ensuite classées arbitrairement dans un ordre croissant et représentées pour les valeurs moyennes et individuelles (chaque échantillon) respectivement dans la Figure 64 et la Figure 65.

1.3.2. Existe-t'il des enrichissements en éléments?

Comme le fer provient exclusivement de la croûte continentale, un FE proche de 1 traduira donc une origine crustale prépondérante. Deux limites à 10 et à 100 sont classiquement utilisées dans les pluies (Roy, 1996 ; Freydier, 1997) et permettent de séparer les éléments « moyennement enrichis » ($10 < FE < 100$) et « fortement enrichis » (> 100). Ces gammes de valeurs assez larges permettent de prendre en compte la variabilité de la croûte continentale locale par rapport à celle utilisée comme réservoir de référence, mais aussi la variabilité naturelle des apports anthropiques.

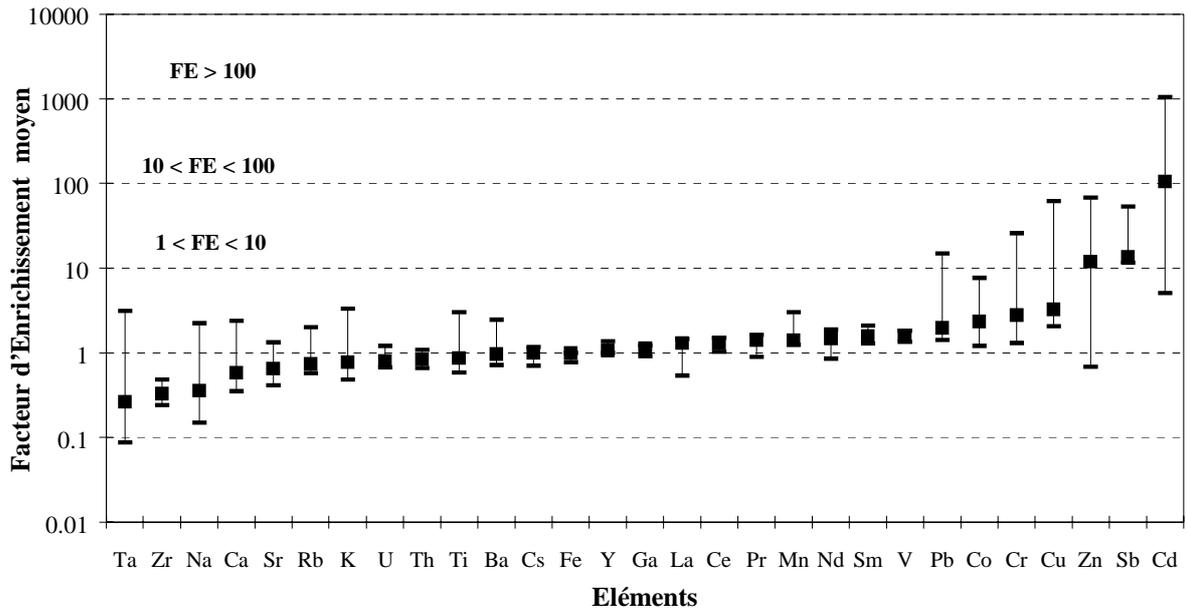


Figure 64. Facteur d'enrichissement moyen ($[X]/[Fe]$) dans les eaux de pluies à la station de Katibougou au Mali, minium et maximum ponctuels.

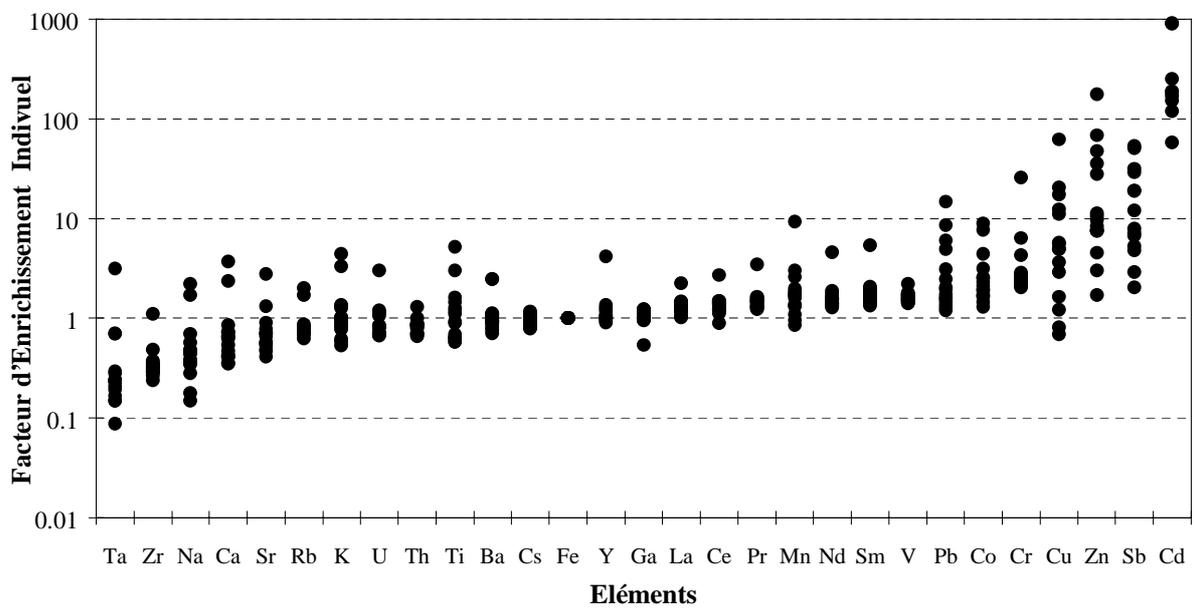


Figure 65. Facteur d'enrichissement individuel ($[X]/[Fe]$) dans les pluies à Katibougou au Mali.

La première remarque sur le facteur d'enrichissement moyen est qu'il y a **peu d'enrichissements significatifs** excepté pour Zn ($FE_{moyen} = 12$), Sb ($FE_{moyen} = 13,5$) et Cd ($FE_{moyen} = 105$). Notons que sans l'échantillon B14, le FE de Zn tombe à 7,95 ; pour Sc et Cd, aucun changement de concentrations n'est obtenu sans cet échantillon. Une seconde observation est que les éléments Ta, Zr et dans une moindre mesure pour Na, Ca, Sr, Rb, K et U montrent des FE moyens inférieurs à 1. Ces anomalies en Ta et Zr ($FE \ll 1$) traduisant un appauvrissement par rapport à la croûte, viennent du fait que même si ces éléments sont d'origine crustale ils se trouvent surtout dans les sables (absents dans les poussières atmosphériques). Pour les autres éléments, cela peut signifier que les particules retrouvées dans les pluies sont des particules déjà altérées et donc appauvries en éléments solubles connus comme solubles (U, Rb, Ba, K, Na, Ca, et Sr, cf. Chapitre V) ou qu'elles ont subi des fractionnements dans les sols d'où elles sont issues.

Une remarque importante est aussi que les éléments enrichis sont les mêmes que dans les pays industrialisés. On retrouve les **éléments métalliques Pb, Co, Cr, Sc, Zn et Cd** qui sont les plus enrichis. Les FE restent toutefois très faibles par rapport à ceux des pays industrialisés et sont parfaitement compatibles avec ceux trouvés par Freyrier (1997) à Kollo et Lamto. En général, les FE à Katibougou sont intermédiaires par rapport aux deux autres stations (Figure 66).

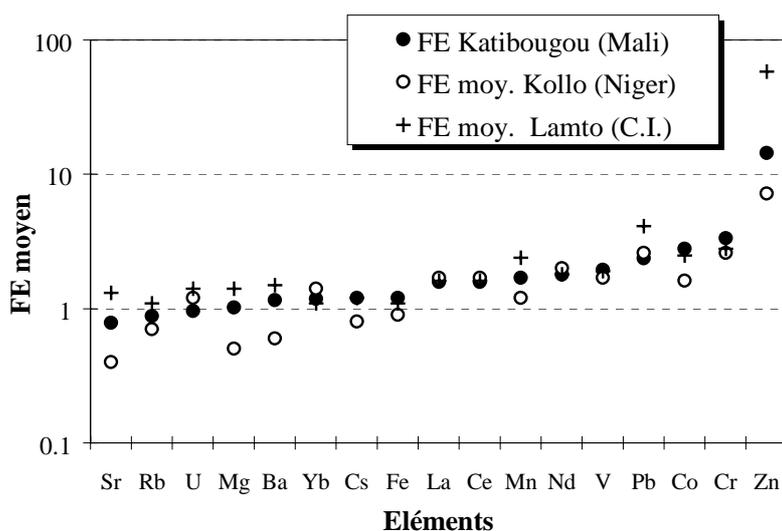


Figure 66. Comparaison des Facteurs d'Enrichissement (FE) moyen dans les pluies à Katibougou ($[X]/[Fe]$) et à Lamto et Kollo ($[X]/[Al]$).

Au niveau des FE individuels (Figure 65), les variations peuvent être très importantes : Na, Ca, Sr, K, U, Ti, Mn, Pb, Co, Cr, Zn, Cd ont des CV supérieurs à 50%. Par rapport aux bornes définies ci-dessus, on peut finalement distinguer plusieurs groupes :

- ① **Le groupe des éléments qui ne sont jamais enrichis** (le FE maximum est toujours < 10): K, Na, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Th, U (Tableau 35). On trouve au sein du premier de ce groupe des éléments insolubles connus comme étant d'origine purement crustale tels que les terres rares, Th, Y ou Sc. On identifie aussi, la présence des éléments alcalins (Rb et Cs) et alcalino-terreux (Mg, U, Sr, Ba). Certains des éléments de ce groupe (Co, Mn)

présentent des FE maximum proches de 10. Leur FE moyen étant toutefois faible (respectivement 1,4 et 2,3), ces valeurs individuelles ne sont pas significatives d'un apport supplémentaire.

② **Le groupe des éléments parfois enrichis** avec Pb, Cr et Sc ($FE_{\max} > 10$) et Zn et Cd ($FE_{\max} > 100$) (Tableau 35 ; Figure 65). Les seuls éléments enrichis sont des métaux mais les FE restent en général variables et faibles. Pb et le Cr ne dépassent la limite arbitraire de 10 qu'une seule fois, en revanche le FE pour Zn est 11 fois sur 19 supérieur à 10 ; le FE de Sb 9 fois sur 18 et Cd, 12 fois sur 14.

1.3.3. Evolution des FE en fonction de la quantité de fer

Dans le calcul du facteur d'enrichissement intervient la concentration en fer dans la phase totale des eaux de pluies. L'étude des relations entre le FE et la quantité de fer totale en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ dans l'échantillon (produit de la moyenne pondérée par les hauteurs d'eau et de la hauteur d'eau totale, équivalant à un ratio de déposition) montre que pour les éléments définis comme non enrichis l'ensemble des points se situe sur une horizontale proche de 1 (Figure 67a). En revanche, les plus forts FE de Zn, Pb, Cd et Sb sont concomitants avec des quantités de fer total très faibles (Figure 67b).

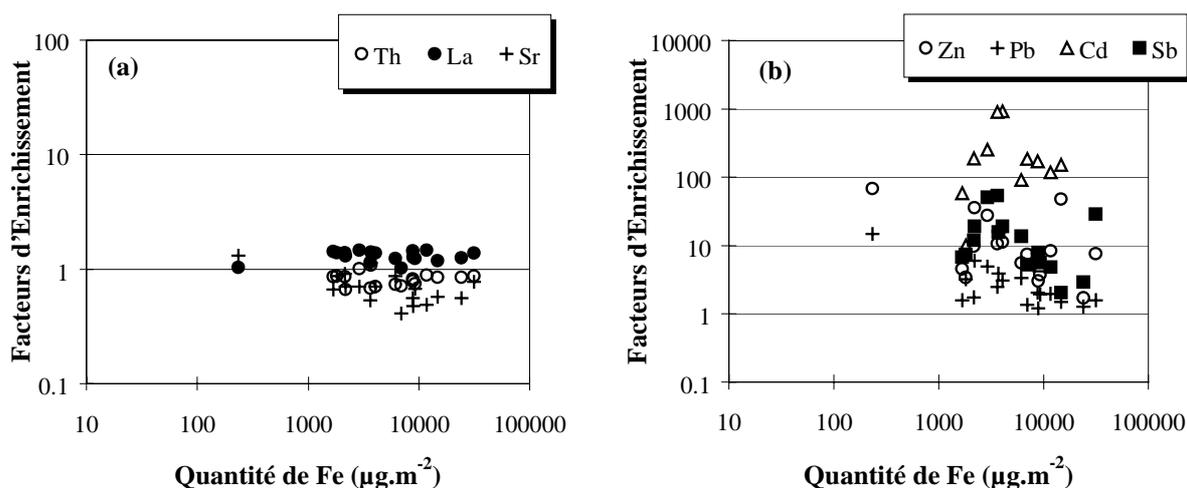


Figure 67. Exemple de relations entre les FE individuels de certains éléments et la quantité de fer total dans l'échantillon.

Pour étudier l'influence de la quantité des particules crustales dans les pluies en relation avec la contamination due à des sources non crustales, Freydier (1997) propose d'utiliser des diagrammes de mélange faisant figurer le FE d'un élément en fonction de l'élément de référence choisi dans le calcul du FE (ici le fer). Le principe d'un tel diagramme est basé sur l'hypothèse d'un mélange entre deux types d'aérosols. Pour un élément x , la quantité totale $(Q_x)_T$ est alors égale à la somme de la quantité totale d'origine crustale $(Q_x)_{CC}$ et de la quantité totale provenant d'autres sources $(Q_x)_{AS}$:

$$(Q_x)_T = (Q_x)_{CC} + (Q_x)_{AS}$$

La quantité totale de l'élément x dans la phase totale peut s'écrire $(Q_x)_T = (C_x)_T \times H$; avec $(C_x)_T$ concentration de x dans la phase totale, et H la hauteur d'eau totale. La quantité déposée liée à l'origine crustale de l'élément x peut aussi être calculée par le produit de la quantité de référence dans l'échantillon $(Q_{Fe})_T$ par le rapport de l'élément considéré sur Fe dans la croûte continentale $((C_x)_{CC} / (C_{Fe})_{CC})$.

Le Facteur d'enrichissement s'écrit alors :

$$FE = 1 + \left[\frac{(Q_x)_{AS}}{A \times (Q_{Fe})_T} \right]$$

avec $A = (C_x / C_{Fe})_{CC}$, constante pour chaque élément.

Cette équation traduit bien le fait que si $(Q_{Fe})_t$ est très grand devant $(Q_x)_{as}$, FE tend vers 1 et si $(Q_x)_{as}$ est très grand devant $(Q_{Fe})_t$, FE tend vers des valeurs supérieures à 1. Les FE importants rencontrés pour des faibles flux de fer (et donc avec très peu de particules d'origine terrigène) sont dus à d'autres sources (biogénique, marine, anthropique...). Les éléments a priori non enrichis et d'origine crustale se situent sur une droite horizontale proche de 1. C'est le cas pour les éléments précédemment cités qui ne sont jamais enrichis.

Pour Pb, une autre source que terrigène peut être envisagée, et on peut alors construire les deux courbes théoriques correspondant à une contribution anthropique possible maximum et minimum à partir des valeurs expérimentales de $(Q_x)_{as}$, respectivement la plus petite et la plus grande. Ces courbes ont été tracées sur la Figure 68 et permettent d'encadrer nos données. Pour Pb, la dispersion des points est assez importante mais la distribution des points n'est pas aléatoire : les FE les plus faibles correspondent aux quantités de fer les plus élevés. Ce sont alors **les particules terrigènes en quantités très importantes qui donnent le cachet chimique des eaux de pluies.**

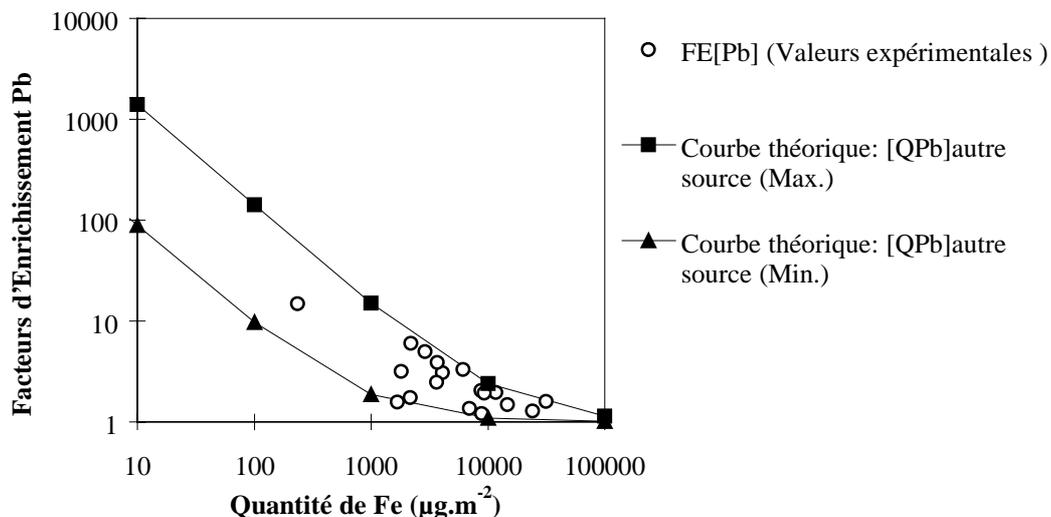


Figure 68. Evolution des facteurs d'enrichissement de Pb en fonction de la quantité de Fe totale présent dans les pluies.

Les mêmes constructions pour Zn et Cd montrent un nuage de points plus dispersés, en revanche pour Sc, il semble bien que les FE suivent une relation décroissante inverse avec la quantité totale de fer dans les pluies (Figure 68).

1.4. Spectre des terres rares

Les terres rares (TRs) ou lanthanides forment un groupe de 14 éléments métalliques (du lanthane au luthétium) et de propriétés physiques et chimiques très voisines (Foucault & Raoult, 1995). Les travaux de Sholkovitz *et al.* (1993) ont montré qu'il existait des fractionnements importants entre la composition en terres rares de la mer, de l'atmosphère et des continents. Les terres rares présentes dans l'atmosphère proviennent des phénomènes d'érosion éolienne à la surface des continents. Comme la composition chimique des particules est en général la même que celle du sol dont elles sont issues, s'il existe des fractionnements pour les TRs, ceux-ci peuvent donner des informations sur les réactions entre les aérosols et les précipitations et les sources de particules de poussières continentales.

La Figure 69 montre les diagrammes de concentration dans la phase totale des terres rares normalisées à la croûte continentale (ou spectre des TRs) pour 11 échantillons à Katibougou pour lesquels les valeurs sont assez élevées pour permettre cette représentation. Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm n'ont pas été déterminés. Cette forme de représentation permet d'observer des comportements différents entre éléments : si tous les éléments étaient dans l'eau dans les mêmes proportions que dans la croûte continentale (ils participent alors aux mêmes réactions), le diagramme des concentrations normalisées à la croûte serait plat ; au contraire s'il existe des fractionnements pour certains éléments, ils seront plus appauvris par rapport à leurs voisins. Cette méthode de représentation a l'inconvénient de se baser sur une croûte continentale moyenne, qui ne correspond pas forcément aux bassins étudiés (Dupré *et al.*, 1996).

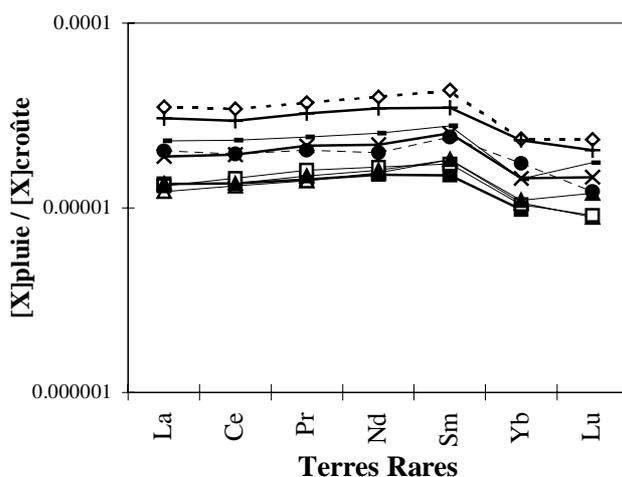


Figure 69. Diagrammes des concentrations des TRs dans la phase totale normalisées à la croûte continentale (11 échantillons).

L'ensemble des 11 spectres, représentés dans la Figure 69, ont des formes assez identiques (translation de la courbe qui dépend de la quantité de poussière dans l'air) avec un appauvrissement en

terres rares légères (La, Ce) par rapport aux terres rares lourdes (Yb, Lu). Le rapport La/Yb se situe entre 15,6 et 22,3 avec une moyenne de 18,6 sur les 11 échantillons. Ce rapport est nettement supérieur à celui de la croûte de 13,6. Par contre il est du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans les pluies à Kollo et Lamto par Freyrier (1997), ou ceux trouvés par Dupré et al (1996) dans le fleuve Congo (entre 15 et 19). Il est également remarquable que la valeur du rapport La/Yb dans les pluies à Katibougou soit proche de celle observée dans la phase totale des eaux du fleuve Niger à la station de Koulikoro (chapitre VI) qui est de l'ordre de 21. Ces valeurs élevées (par rapport à la croûte) dans les particules des pluies et des eaux du Niger, peuvent être interprétées comme étant représentatives des roches de la région. **Les particules minérales présentes dans les pluies ont a priori les mêmes caractéristiques chimiques que les roches de la région.**

1.5. Matrice de corrélation

Les coefficients de corrélation entre les ions et les éléments traces trouvés dans les pluies peuvent s'avérer utiles dans le but d'identifier d'éventuelles sources communes ou des comportements similaires lors de certains processus qui ont lieu dans l'atmosphère. Cette approche est très souvent utilisée dans les études sur les pluies (e.g. Hendry *et al.*, 1984 ; Durand *et al.*, 1992 ; Laberge *et al.*, 1994 ; Freyrier, 1997).

On a vu que la distribution des concentrations était normale, les calculs des coefficients de corrélations peuvent être alors directement calculés à partir des valeurs des concentrations. Cette opération a été réalisée à la fois sur les éléments majeurs dans la phase dissoute (Tableau 36) et pour les éléments traces dans la phase totale (Tableau 37) des pluies.

1.5.1. Les éléments majeurs dans la phase dissoute

La matrice de corrélation entre éléments majeurs dans la phase dissoute (Tableau 36) fait apparaître de très bonnes corrélations ($>0,9$) entre Ca et Mg ($R=0,97$) ; entre Cl et Na ($R=0,92$) ; entre K et Mg ($R=0,92$).

	Cl	NO3	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca
Cl								
NO3	0,74							
SO4	0,75	0,73						
Na	0,92	0,73	0,60					
NH4	0,52	0,79	0,20	0,80				
K	0,89	0,70	0,77	0,78	0,13			
Mg	0,81	0,71	0,83	0,62	-0,07	0,92		
Ca	0,77	0,74	0,85	0,57	-0,12	0,83	0,97	

Tableau 36. Matrice de corrélation entre les éléments majeurs dans la phase dissoute (N=43).

Afin d'obtenir différents groupes d'éléments en fonction de leurs coefficients de corrélation, une analyse en composantes principales a été réalisée sur 43 échantillons d'eau de pluies et 8 variables mesurées (anions et cations). Le pH n'étant pas dosé, ce paramètre de premier ordre dans la chimie des pluies, ne peut donc pas être pris en compte. Cette analyse montre que l'axe 1 explique 80 % de la variance totale. Cet axe est fortement lié aux valeurs de Ca^{2+} et Mg^{2+} (il ne faut pas oublier que cette technique statistique donne un poids disproportionné aux événements extrêmes). Le cercle des corrélations (où sont représentés les facteurs 1 et 2) permet de distinguer 2 groupes bien distincts: le premier est constitué de Ca^{2+} , Mg^{2+} (représentatifs de la source d'aérosols terrigènes) auquel est associé SO_4^{2-} . Un deuxième groupe comprend les ions NO_3^- et K^+ . Na^+ et Cl^- ne peuvent être classés dans aucun de ces deux groupes, ni en former un troisième.

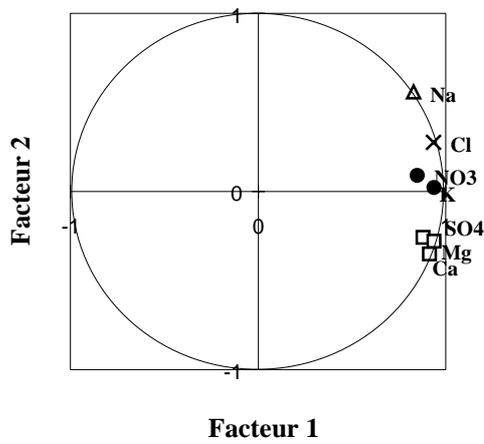


Figure 70. Représentation des axes de l'ACP (43 échantillons et 8 variables).

1.5.2. Les éléments majeurs et traces dans la phase totale

Pour les éléments majeurs et traces dans la phase totale, la matrice de corrélation entre éléments (Tableau 37, Figure 71) montre que :

- Il existe de très faibles coefficients entre la hauteur d'eau et les concentrations en éléments dans la phase totale, ce qui élimine a priori l'hypothèse de l'influence importante du lessivage des aérosols sur les concentrations. En effet, en général les concentrations diminuent avec l'augmentation des volumes précipités (Orange & Gac, 1990a ; Durand *et al.*, 1992). Mais il est certains que les lacunes d'échantillonnage au début de la saison constituent un biais important pour cette observation.
- Les éléments qui possèdent les coefficients les plus faibles sont : Cr, Cu, Zn, Cd et Sb.
- Les éléments Ca, Ti, Mn, Co, Zn, Ge, Ta, Pb, Na, K ont des coefficients compris entre 0,5 et 0,9.
- Les éléments Mg, Sc, V, Fe, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Yb, Hf, Th, U ont des coefficients de corrélations très élevés ($\approx 0,9$)

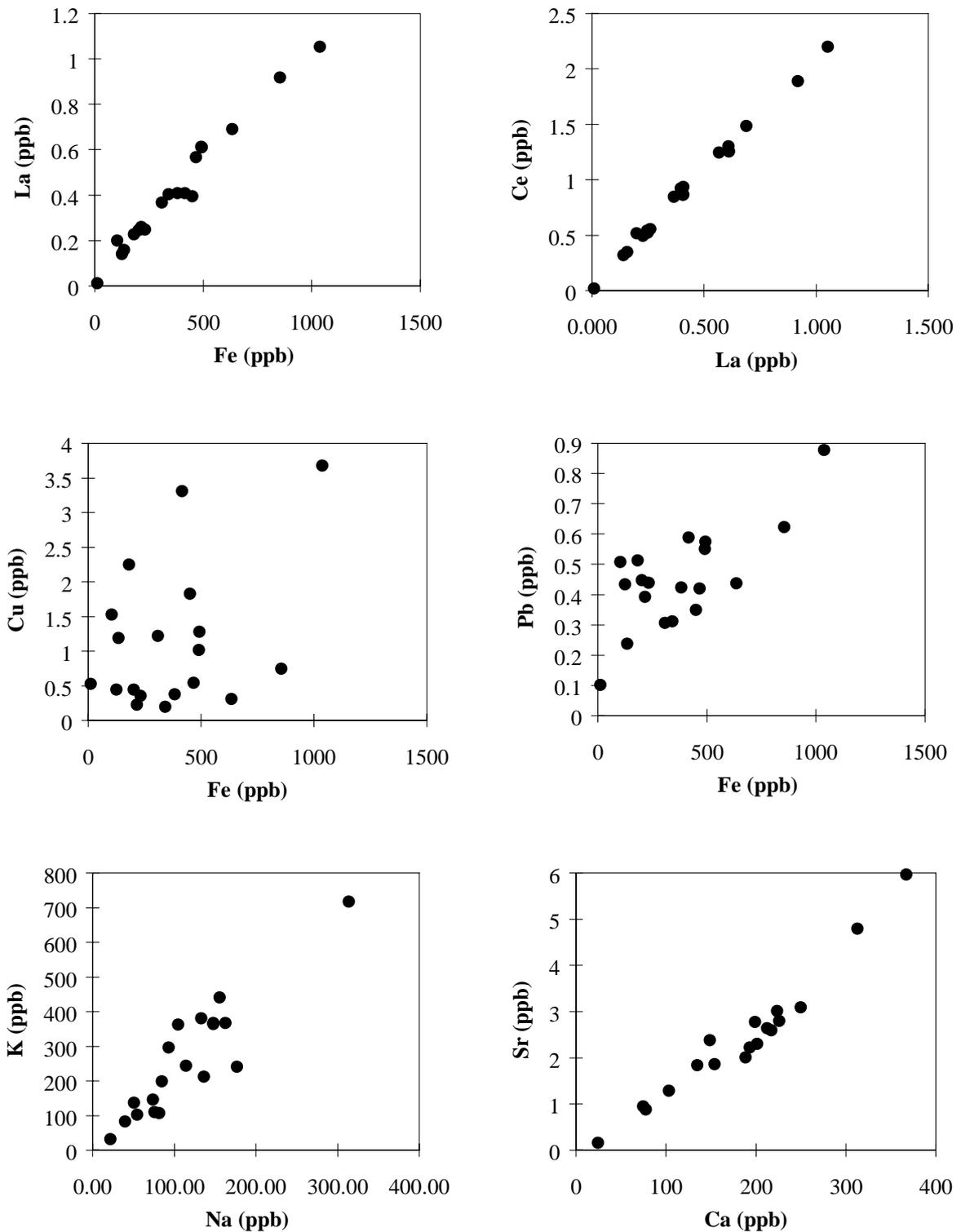


Figure 71. Quelques exemples de corrélations entre éléments dans la phase totale.

	Mg	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cd	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Yb	Hf	Ta	Pb	Th	U	Na	K		
Mg	1																																				
Ca	0.82	1																																			
Sc	0.96	0.61	1																																		
Ti	0.76	0.64	0.69	1																																	
V	0.98	0.71	0.97	0.73	1																																
Cr			0.96			1																															
Mn	0.79	0.88	0.59	0.77	0.73		1																														
Fe	0.97	0.67	0.96	0.7	1		0.69	1																													
Co	0.73	0.75	0.55	0.59	0.69		0.79	0.66	1																												
Cu				0.59							1																										
Zn	0.59	0.57		0.66			0.59			0.67	1																										
Ga	0.97	0.69	0.98	0.69	0.99	0.5	0.68	0.99	0.65			1																									
Ge	0.87		0.92	0.65	0.89			0.9				0.89	1																								
Rb	0.98	0.73	0.96	0.77	0.99	0.5	0.78	0.98	0.69		0.62	0.97	0.86	1																							
Sr	0.96	0.92	0.88	0.74	0.91		0.85	0.88	0.78		0.64	0.89	0.74	0.92	1																						
Y	0.99	0.83	0.93	0.79	0.96		0.85	0.95	0.74		0.55	0.95	0.83	0.97	0.95	1																					
Zr	0.99	0.81	0.96	0.81	0.97		0.77	0.95	0.68		0.62	0.95	0.87	0.97	0.95	0.97	1																				
Nb	0.92	0.64	0.91	0.79	0.93		0.62	0.92	0.57		0.58	0.91	0.85	0.91	0.85	0.89	0.95	1																			
Cd										0.81									1																		
Sb																		0.81	1																		
Cs	0.97	0.64	0.98	0.66	0.99		0.65	0.98	0.62		0.52	0.99	0.89	0.98	0.89	0.94	0.95	0.9			1																
Ba	0.97	0.79	0.95	0.76	0.97		0.79	0.95	0.7		0.62	0.95	0.82	0.97	0.95	0.95	0.96	0.9			0.96	1															
La	0.98	0.71	0.98	0.75	0.99		0.72	0.99	0.68			0.99	0.9	0.97	0.9	0.97	0.97	0.94			0.98	0.95	1														
Ce	0.98	0.73	0.97	0.76	0.99		0.76	0.99	0.69			0.99	0.89	0.98	0.91	0.97	0.97	0.94			0.98	0.96	1	1													
Pr	0.98	0.75	0.96	0.77	0.99		0.78	0.98	0.69			0.99	0.88	0.98	0.92	0.98	0.97	0.93			0.97	0.96	0.99	1	1												
Nd	0.99	0.75	0.96	0.75	0.98		0.77	0.97	0.67		0.55	0.97	0.87	0.98	0.93	0.99	0.98	0.92			0.97	0.96	0.98	0.99	1	1											
Sm	0.98	0.75	0.93	0.77	0.97		0.8	0.96	0.69		0.56	0.95	0.86	0.97	0.91	0.98	0.96	0.92			0.94	0.93	0.97	0.98	0.99	0.99	1										
Yb	0.94	0.77	0.91	0.79	0.9		0.8	0.88	0.65		0.52	0.9	0.8	0.91	0.91	0.96	0.93	0.86			0.9	0.9	0.93	0.93	0.95	0.95	0.95	1									
Hf	0.94	0.73	0.91	0.87	0.92		0.75	0.91	0.65		0.69	0.9	0.8	0.94	0.9	0.92	0.97	0.97			0.9	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.9	1								
Ta	0.72	0.61	0.66	0.64	0.7		0.68	0.53			0.56	0.67	0.64	0.67	0.72	0.66	0.78	0.83			0.63	0.71	0.7	0.68	0.67	0.66	0.62	0.58	0.78	1							
Pb	0.78	0.68	0.76	0.79	0.75	0.57	0.68	0.73	0.55	0.6	0.67	0.71	0.7	0.78	0.77	0.76	0.81	0.76			0.7	0.79	0.74	0.74	0.75	0.71	0.71	0.7	0.82	0.71	1						
Th	0.98	0.67	0.98	0.71	0.99		0.67	0.99	0.63		0.55	0.99	0.88	0.98	0.91	0.96	0.97	0.93			0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98	0.96	0.92	0.93	0.69	0.72	1					
U	0.98	0.8	0.92	0.75	0.95		0.8	0.94	0.64		0.57	0.93	0.84	0.96	0.95	0.98	0.97	0.9			0.94	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98	0.97	0.95	0.92	0.64	0.73	0.95	1				
Na	0.73	0.7	0.56	0.76	0.72		0.86	0.69	0.69	0.71	0.77	0.64		0.78	0.77	0.75	0.73	0.65			0.64	0.78	0.68	0.71	0.71	0.69	0.71	0.65	0.76	0.46	0.65	0.66	0.74	1			
K	0.83	0.72	0.7	0.81	0.81		0.88	0.79	0.64	0.74	0.72	0.75	0.63	0.87	0.8	0.86	0.83	0.74	0.54		0.75	0.84	0.78	0.81	0.82	0.82	0.83	0.75	0.83	0.5	0.75	0.76	0.83	0.91	1		

Tableau 37. Matrice de corrélation entre éléments majeurs et traces dans la phase totale (N=19).

2. SOURCES DES ELEMENTS

L'ensemble des traitements réalisés ci-dessus (calcul du facteur d'enrichissement, matrice de corrélation entre éléments) permet de mettre en évidence plusieurs groupes d'éléments sans doute liés à différents types d'aérosols d'origines diverses. Cette partie du chapitre est donc une discussion sur les sources possibles pour expliquer les teneurs en éléments chimiques dans les eaux de pluie à la station de Katibougou au Mali.

2.1. Origine marine

La source marine est principalement caractérisée par les chlorures et le sodium provenant des aérosols marins apportés par les flux de mousson (chapitre I). Le rapport Na/Cl moyen, calculé à partir des concentrations moyennes pondérées par les hauteurs d'eau est de 1,1 sur la totalité des événements et de 1,45 sans 3 échantillons. Ces rapports sont faibles par rapport au rapport marin de 1,80 (Brewer et al, 1975, cités dans Freydier, 1997) et des rapports obtenus par Freydier sur les stations les plus proches de Katibougou : Kollo (1,65) et Lamto (1,87).

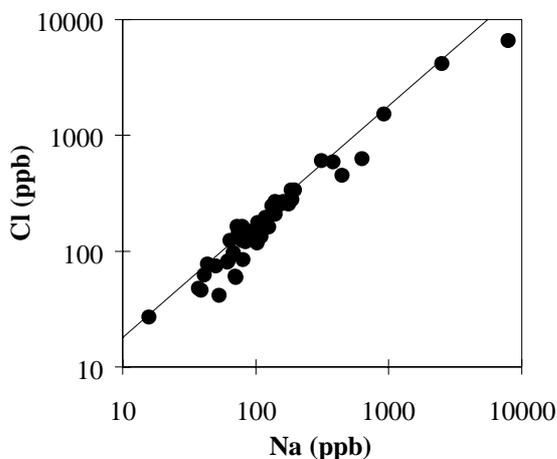


Figure 72. Relations entre les concentrations individuelles en Cl⁻ et Na⁺ à Katibougou.

La Figure 72 présente les concentrations individuelles de Cl⁻ et Na⁺ à Katibougou et la droite représentant le rapport marin. Plusieurs remarques peuvent être faites :

- Les points se répartissent de façon générale en-dessous de la droite correspondant au rapport marin, avec un rapport moyen de 1,1 (avec n=46) et de 1,45 avec n=43. Les deux pluies avec les très faibles hauteurs d'eau et les très fortes concentrations se trouvent sur la droite tandis que la troisième pluie "anormale" s'en écarte notablement.
- Le coefficient de corrélation est très bon (R=0,96), un peu plus faible avec les 3 échantillons à fortes teneurs en éléments majeurs (R=0,92).

- Les rapports individuels Cl/Na sont assez variables (CV= 23%), ils varient de 0,78 à 2,23 mais 80% d'entre eux sont inférieurs au rapport marin de 1,8.

Pour expliquer la faiblesse de ces rapports par rapport à l'eau de mer, on peut supposer soit qu'il y a un excès de Na⁺ (par rapport aux Cl⁻) soit qu'il y a très peu de Cl⁻. Ce dernier constat élimine l'hypothèse d'apport anthropique riche en chlorures courant dans les zones industrialisées (comme le bassins de la Seine en France ; Roy, 1996) ou émis par les feux de brousse (Andreae *et al.*, 1996 ; cités par Freydier, 1997). Plusieurs hypothèses sont envisageables :

- **Un fractionnement chimique entre ces deux éléments :** l'évaporation de HCl peut avoir lieu dans les petites particules d'aérosols marins ce qui peut provoquer un appauvrissement de Cl⁻ par rapport à Na⁺ de l'ordre de 40 % (Möller, 1990, cité dans Apello & Postma, 1993). Mais comme le HCl contribue aussi à la chimie totale des pluies, l'effet final est que le rapport Na/Cl redevient similaire à celui de l'eau de mer sur les côtes européennes, aux USA et sur l'Amazone (Appelo & Postma, 1993) ; et aussi sans doute sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest. Il peut aussi exister des fractionnements liés à la végétation, ce qui pourrait expliquer une partie de la dispersion des points.
- **Des apports d'origine terrestre, riches en sodium :** Il peut effectivement y avoir aussi un excès de Na⁺ dans les aérosols en plus des sels marins, provenant des particules arrachées aux sols dans les climats arides (Nativ *et al.*, 1987 ; Yair *et al.* ; 1991 - désert du Negev, Israël) ou sahélien (Modi *et al.*, 1995). Dans les pluies du Mali, le sodium est sans doute également présent dans les sols de la région ce qui expliquerait l'excédent observé.

Cet excès de Na⁺ est très bien traduit par la Figure 73 représentant les relations liant la concentration de Na⁺ en fonction de la distance à l'Océan Atlantique pour des stations de mesures de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. La décroissance de la teneur en Na⁺ dans les pluies en fonction de la distance à l'océan est une relation bien connue (e.g. Meybeck, 1983), qui s'applique bien aux stations de Dimonika (Congo), aux stations de Lamto (Côte d'Ivoire), Nsimi (Cameroun) et Bangui (RCA) (Freydier, 1997). Pour les deux stations de Kollo (Niger) et Katibougou (Mali), étant donné l'éloignement par rapport à l'Océan, une autre source de sodium doit être recherchée.

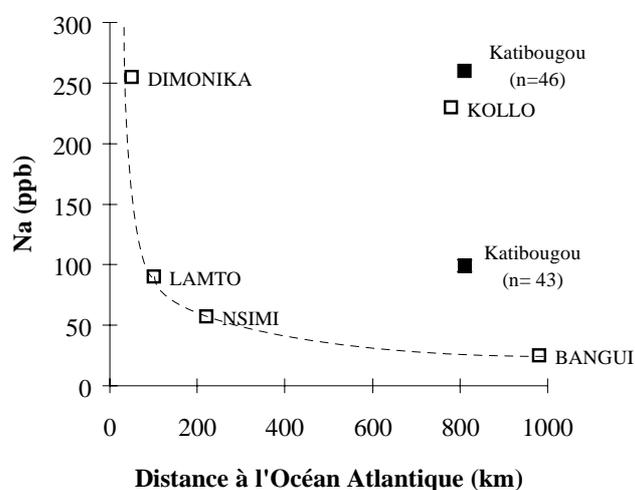


Figure 73. Concentration de Na⁺ en fonction de la distance à l'Océan Atlantique.

Au vu de ces résultats, il est préférable d'utiliser le chlore comme référence pour le calcul des contributions marines (même si cet élément peut subir des fractionnements), car il semble que les apports de Na par les poussières terrigènes soient importants. Ainsi, en admettant que le chlore présent dans les pluies provient uniquement de l'eau de mer, on peut calculer, pour chaque espèce chimique dans les pluies, la contribution marine à partir des concentrations moyennes en Cl⁻ et les rapports des concentrations en éléments dans l'eau de mer selon la formule :

$$[X]_{marine} = [Cl]_{pluie} \times \left[\frac{X}{Cl} \right]_{mer}$$

[X]_{marine} : Contribution marine pour l'espèce X
[Cl]_{pluie} : Concentration de chlore dans les pluies
[X/Cl]_{pluie} : Rapport en l'espèce X et le chlore dans l'eau de mer

Les contributions marines ont été calculées à partir des concentrations moyennes pondérées par les débits uniquement dans la phase dissoute pour les majeurs (avec n= 43). Seuls Na, K, Mg, Ca, SO₄ et Sr ont des pourcentages non négligeables qui sont présentés dans le Tableau 38.

ppb	Na	Mg	SO ₄	K	Ca
[X] _{marine}	79,6%	13,2%	6,4%	2,9%	0,5%

Tableau 38. Contribution de la source marine aux concentrations moyennes pondérées par les hauteurs d'eau en % dans la phase dissoute des pluies recueillies à Katibougou (n=43).

Dans la phase dissoute, après le sodium, le magnésium est l'espèce pour laquelle la contribution marine dans les pluies est la plus importante (13,2%), viennent ensuite SO₄²⁻ (6,4%), le potassium et le calcium (respectivement 2,9% et 0,5%).

Ainsi, Na, Mg, SO₄, K, et Ca sont fortement, à très fortement enrichis par rapport à l'eau de mer, ce qui implique d'autres sources pour ces éléments. **Les eaux de pluies à Katibougou montrent un caractère continental marqué!** Pendant leur transport les masses d'air et les nuages s'enrichissent en poussières continentales, gaz, d'origine naturelle ou industrielle, qui vont modifier la composition de la pluie.

2.2. Origine crustale

Afin de déterminer les éléments qui ont une origine crustale silicatée, nous avons retenu ceux qui vérifient les conditions suivantes :

- ① Eléments dont les concentrations normalisées au Fer sont constantes et se rapprochent du rapport de la croûte silicatée, ce qui se traduit par un FE proche de 1.
- ② Les éléments dont les coefficients dans la phase totale sont très élevés.

Les éléments répondants à ces deux critères sont : Ca, Mg, K pour les majeurs, Sc, Y, Zr, Cs, les terres rares, U, Th pour les éléments traces. On trouve aussi dans ce groupe V, Rb, Sr, et Ba. Les éléments V et Rb semblent pouvoir être classés avec les éléments d'origine purement crustale ; en revanche, une autre source peut être impliquée pour Sr et Ba, dont les relations (FE/quantité de fer) montrent une plus grande dispersion des points. Sr peut provenir des apports marins. En effet, le calcul de la contribution marine dans la phase totale (à partir de Na) montre que c'est le seul élément trace ayant une origine marine non négligeable. Pour Ba une autre source doit être invoquée.

On a vu au chapitre I, que la zone géographique au sud du Sahara est bien connue pour être une zone de dépôts des poussières sahariennes et qu'au niveau des zones arides, où le couvert végétal est peu important ou inexistant, l'érosion éolienne peut aussi injecter des particules dans l'atmosphère. Comme 25% de ces retombées sèches peuvent se produire pendant la saison des pluies (Orange & Gac, 1990), il est certain que par simple effet de "*self-cleaning*" au cours de la tombée de la pluie, une part importante des poussières de l'air se dissout. La composition chimique de l'aérosol d'origine terrigène va ainsi dépendre de la composition chimique du sol dont il est issu.

Des analyses de poussières réalisées en différents sites d'Afrique de l'Ouest (Orange & Gac, 1990 ; Orange & Gac, 1993 ; Modi *et al.*, 1995 ; Herrmann *et al.*, 1997 ; Orange *et al.*, 1998) ont montré que les pluies s'enrichissent par dissolution des cations échangeables contenus dans les particules atmosphériques. Celles-ci sont surtout siliceuses : les principaux minéraux sont le quartz, feldspaths, micas. Les particules sont très enrichies en Ca, Mg, Na et sont donc une source de cations supplémentaire pour les rivières (Orange *et al.*, 1993). Les aérosols provenant du Sahara contiennent de la calcite (5-30%), de la dolomite (1-4%), du gypse (<2%) et probablement d'autres particules évaporitiques (Loye-Pilot *et al.*, 1986 ; Rodà *et al.*, 1990). L'ensemble de ces caractéristiques peut expliquer des fortes concentrations en Ca, K, Mg et SO₄ dans les pluies.

Les éléments Ca, Mg, K, Sc, Y, Zr, Cs, TRs, U, Th, V, Rb, Sr, et Ba ont une origine terrigène prépondérante. Ca, K, Mg, Ba, Rb et Sr qui sont en général préférentiellement dans la phase soluble peuvent provenir d'une autre source...

2.3. Origine biogénique

La source biogénique est caractérisée par les éléments K, Ca, Mg, Cl et Rb, contenus dans des particules d'origine végétale (pollen, spore, débris végétaux ...) ou animale (virus, bactéries, autres micro-organismes, débris animaux...). La présence de potassium dans les aérosols émis par la forêt tropicale a été clairement mise en évidence par Crozat (1979). La végétation vivante (forêts, savanes) émet principalement des hydrocarbures gazeux (Sharkey *et al.*, 1991). Elle émet aussi des acides organiques et des composés soufrés.

Dans les pluies recueillies à Katibougou, on a mis en évidence la bonne corrélation qui existe entre K et Rb dans la phase totale (Figure 74 ; R=0,87). Les facteurs d'enrichissement pour ces deux éléments sont inférieurs à 1 (appauvrissement par rapport à la croûte) sauf pour 2 échantillons.

L'origine biogénique pour ces deux éléments n'est pas évidente. Pourtant, il semble que les FE de K augmentent inversement avec la quantité de fer total et que les concentrations dans la phase dissoute sont moyennement corrélés avec les nitrates ($R=0,69$). Ces deux observations peuvent traduire qu'en plus de la source biogénique et/ou terrigène une source additionnelle peut exister dans cette région. La source agro-pastorale est une hypothèse avancée par Modi (1995). En effet, le Mali est un pays à vocations agricoles (agriculture et élevage) où 80% de la population (environ 11 000 000 ha en 1996 - source FAO) vit grâce à l'agriculture (chapitre I). Enfin, le K peut provenir des fertilisants qui contribuent aux poussières terrigènes (Berner & Berner, 1987), puisque le site de prélèvements se situe dans une école d'agriculture où l'on trouve une ferme et des cultures expérimentales (chapitre II) et où l'utilisation d'engrais est courante (N/P/K). Une étude plus approfondie sur chaque pluie en tenant compte de vents, des périodes d'épandage, permettrait sans doute de mettre en évidence un tel phénomène.

Les nitrates et le potassium des eaux des pluies peuvent aussi être de bons indicateurs de l'influence des feux de brousse sur la chimie des précipitations (Lacaux *et al.*, 1991 ; Gaudichet *et al.*, 1995). Mais comme notre période d'étude ne couvre que la saison pluvieuse, cet effet des feux de brousse (qui ont lieu en saison sèche) ne devrait pas intervenir. Ils restent toutefois une source possible au début de la saison des pluies.

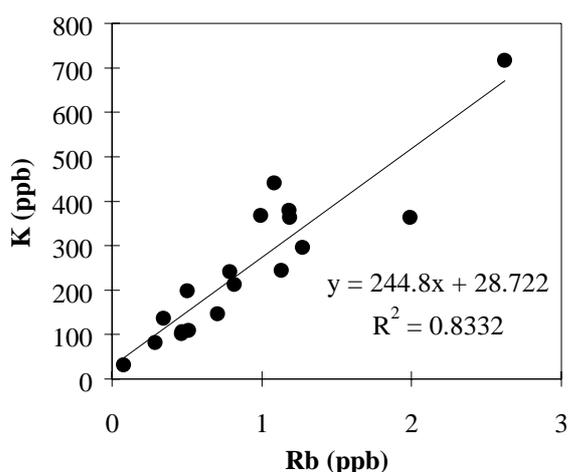


Figure 74. Relations entre les concentrations individuelles en Rb et K à Katibougou

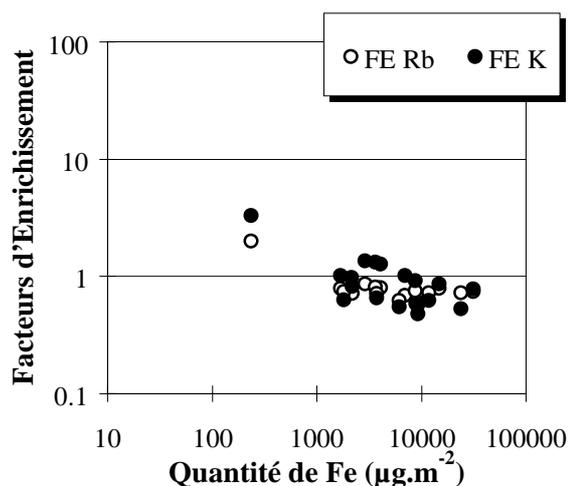


Figure 75. Facteur d'enrichissement de Rb et K en fonction du fer total.

Les coefficients de corrélation entre SO_4^{2-} et NO_3^- et SO_4^{2-} et K^+ dans la phase dissoute sont respectivement de 0,73 et 0,76 et indiquent peut-être une source de SO_4^{2-} liée aux émissions biogéniques. Mais les coefficients de corrélations entre SO_4^{2-} , Ca^{2+} (0,85) et Mg^{2+} (0,84) indique plutôt la présence de gypse (CaSO_4) contenu dans les poussières terrigènes.

2.4. Origine anthropique ?

En général, les éléments pour lesquels des enrichissements sont observés sont des métaux lourds. Ils existent très peu à l'état naturel et sont, à l'heure actuelle, remis en circulation dans les cycles biogéochimiques par les pollutions anthropiques. Ils peuvent ainsi être utilisés comme traceurs de ces sources. A l'échelle mondiale, les sources d'éléments métalliques émis dans l'atmosphère sont principalement la métallurgie et en plus faible proportion, l'incinération des déchets domestiques, l'utilisation de combustibles fossiles et de fertilisants (Nriagu et Pacyna, 1988 ; Nash, 1993). Mais la présence de Zn a été aussi identifiée dans des aérosols biogéniques (Artaxo et al, 1988) et dans les aérosols provenant des feux de brousse (Gaudichet et al, 1995), même si les quantités mondiales émises sont infiniment plus faibles.

Dans les eaux de pluies à Katibougou, les seuls éléments qui présentent des FE conséquents sont des éléments métalliques (Zn, Sb et Cd). Le plomb (traceur de l'activité industrielle par excellence) est difficilement classable dans ce groupe. En effet, d'une part les coefficients de corrélation sont importants entre Pb et des éléments considérés comme d'origine terrigène uniquement (Tableau 39): coefficient de 0,8 avec Zr ; ou de l'ordre de 0,75 (Mg, Sc, Ti, V, Fe, Rb, Sr, Y, Nb, La). D'autre part, les facteurs d'enrichissement individuels ne dépassent qu'une seule fois la limite arbitraire de 10. Ce point est pourtant concomitant avec une quantité de fer total faible et une source autre que terrigène peut alors être impliquée dans ce cas. Mais dans l'ensemble le Pb est essentiellement d'origine naturelle à Katibougou et les teneur en Pb dans la pluie dépendent du taux de particules d'origine terrigène. S'il existe des quantités de plomb anthropique, elles sont alors fortement diluées dans les particules d'origine naturelle.

Eléments	Eléments corrélés (avec $R \geq 0,5$)
Pb	Mg (0,78) ; Sc (0,76) ; Na (0,77) ; K (0,72) ; Ti (0,79) V (0,75) ; Fe (0,73) ; Rb (0,78) ; Sr (0,77) ; Zr (0,62) , Y (0,76); Zr (0,81) ; Nb (0,76); Cs (0,7) ; Ba (0,79) ; La (0,74); Th (0,72); U (0,73)
Zn*	Na (0,77) ; K (0,72) ; Ti (0,66) ; Rb (0,62) ; Sr (0,64) ; Zr (0,62) , Ba (0,62) ; Pb (0,67)
Sb	Cd (0,81)
Cd	Sb(0,81) ; Cu (0,77)

Tableau 39. Coefficients de corrélation supérieurs à 0.5 pour Cr, Zn et Pb.

Pour les éléments Zn, Sb et Cd, il semble qu'une origine anthropique peut expliquer les forts FE rencontrés. Les éléments Sb et Cd, montre des FE importants ($FE_{moyen} > 10$) et ne sont corrélés qu'entre eux ($R=0,81$). Ceci pourrait soutenir l'hypothèse d'une origine anthropique commune pour ces deux éléments. En revanche le zinc est corrélé avec plus d'éléments, mais les coefficients restent faibles (maximum de 0,77 avec Na). De plus la moyenne du facteur d'enrichissement calculée en enlevant un échantillon, est inférieure à 10. Il est difficile de conclure sur le Zn étant donné les doutes qui pèsent sur la fiabilité des manipulations et des analyses (chapitre II).

Les enrichissements en éléments dans les pluies observées peuvent être attribués aux transports sur de longues distances de fines particules (Appelo & Postma, 1993), poussées par la circulation atmosphérique générale, provenant de l'Europe ou des pays voisins plus industrialisés (Nigeria, Côte d'Ivoire...). Mais il existe aussi au Mali des industries susceptibles de générer des pollutions en éléments traces. La plupart des unités industrielles sont situées au bord du fleuve Niger, dans la zone qui s'étend de Bamako à Koulikoro où l'on recense des industries chimiques qui produisent ou préparent des peintures, détergents, piles, engrais et composés organiques simples (chapitre I). L'augmentation de la population dans les villes et donc du trafic et de la consommation de bois pour la cuisine a aussi pu provoquer une augmentation des émissions de gaz et de particules dans l'air.

Au vu de ces observations, il semble que les éléments Sb et Cd sont uniquement d'origine anthropique, tandis que les éléments Pb, Zn semblent provenir d'une origine mixte (anthropique et terrigène). Une étude synoptique, en prenant en compte le vent notamment, s'avère nécessaire pour identifier les masses d'air susceptibles d'apporter ces polluants métalliques.

3. ESTIMATION DES DEPOTS HUMIDES

Ce paragraphe présente les résultats obtenus pour le calcul des flux d'éléments déposés lors des précipitations. La quantité de dépôts humides (Q en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) est calculée à partir des moyennes pondérées par les hauteurs d'eau (C en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) et de la hauteur précipitée totale (H en mm) selon l'équation : $Q = (C \times H) / 1000$.

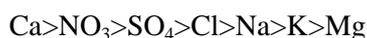
3.1. Dans la phase dissoute

Pour les majeurs presque l'ensemble de la saison pluvieuse (de mi-mai à octobre) a été échantillonné, ce qui représente 697 mm ($n=43$). Le bilan que nous avons établi (Tableau 40) pour ces éléments peut donc être considéré comme significatif des dépôts humides.

	Hmm	Cl	NO3	SO4	Na	K	Mg	Ca
Flux ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$)	697	99	441	218	69	69	50	494
Estimation Flux BV ($10^3 \text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$)		11,88	52,92	26,16	8,28	8,28	6	59,28

Tableau 40. Flux moyens d'éléments majeurs ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) dans la phase dissoute des eaux de pluies recueillies à la station de Katibougou (Mali). Estimations des retombées totales sur le bassin versant du Niger à Koulikoro (en $10^3 \text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$).

Ces résultats montre que dans la phase dissoute, l'ordre des quantités déposées est :



- **L'apport au sol du Ca** ($494 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est dans l'ordre de grandeur établie par Orange (1998), mais reste faible pour la zone climatique concernée (zone soudano-sahélienne où les dépôts de Ca sont estimés à $1200 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$). La quantité de dépôts en Ca est plus forte que celle mesurée aux stations étudiées par Freydier (1997) : Kollo ($360 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1994), Lamto ($200 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1995), N'Simi ($145 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1996) et Bangui ($184 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1995).
- **La quantité de dépôts en Cl** ($99 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est très faible par rapport aux stations de Lamto ($300 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1994) et Kollo ($275 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1994 sans 2 échantillons). Ce taux se rapproche des valeurs rencontrées dans les zones plus humides de forêts denses de Bangui ($108 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1995) et N'Simi ($133 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1996). De plus, les apports dissous en Cl sont plus faibles que les apports en NO_3 et SO_4 , comme pour les quatre autres stations.
- **La quantité de dépôts en Na** ($69 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) est intermédiaire entre les stations de Kollo ($166 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sans 2 échantillons en 1994), Lamto ($121 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1995), N'Simi ($113 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1996) et les très faibles valeurs de Bangui ($38 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ en 1995).
- **Les quantités de dépôts de K, NO_3 et SO_4** sont plus faibles que pour les quatre stations étudiées par Freydier (1997). En revanche **les dépôt de Mg** semblent être les plus élevés des 5 stations réunies. Cet élément représente toujours l'élément minoritaire, avec des apports de 35 (à Bangui en 1995) à $50 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (cette étude).

Pour établir les retombées en éléments dissous en relation avec notre étude sur le bassin versant du fleuve Niger, nous pouvons considérer de manière très approximative que ces taux de dépôts sont constants sur l'ensemble du bassin. Comme le point d'échantillonnage se situe près de l'agglomération de Koulikoro, nous avons pris ce bassin de $120\,000 \text{ km}^2$ pour le calcul des retombées totales (Tableau 40). Les résultats montrent que les retombées totales estimées sont très faibles. On verra par la suite qu'elles sont très faibles par rapport aux flux de matière dissoute qui transitent par le fleuve Niger.

3.2. Dans la phase totale

La période d'échantillonnage pour les éléments traces dans la phase totale des pluies correspond à une période de 2 mois, d'août à septembre 1997 (chapitre II). Comme ces deux mois représentent la période où les précipitations sont les plus abondantes, les 19 échantillons de pluies analysés représentent environ 70 % des pluies totales ($390,3 \text{ mm}$). Mais les lacunes du début de la saison des pluies, au moment où les concentrations sont en général les plus importantes, ne permettent pas de faire des bilans représentatifs des dépôts humides annuels. Les résultats des dépôts atmosphériques humides sur les 2 mois échantillonnés sont reportés dans le Tableau 41.

Les flux en éléments sont généralement compris entre ceux observés sur la station de Kollo et Lamto (Freydier, 1997). Ils sont toutefois assez proches de ceux calculés à la station de Lamto en Côte

d'Ivoire. Les flux de Pb sont toutefois très faibles ($0,163 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) par rapport à ceux observés à Kollo ($1,1 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et Lamto ($0,41 \text{ mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$).

Au vu de ces résultats, il est préférable d'avoir une estimation des retombées totales en éléments en se basant sur les flux observés à Kollo et Lamto (en pondérant les valeurs par les distances entre ces deux stations et la station de Katibougou).

	Na	Mg	K	Ca	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co
Flux ($\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)	42,3	46,7	89,2	72,6	0,05	0,4	0,4	3,5	144,8	0,10
Estimation Flux BV $\cdot (10^3 \text{ t.an}^{-1})$		12,35			0,019	0,14	0,098	1,138	47,72	0,025
	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cd	Sb	Cs
Flux ($\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)	0,34	3,51	0,34	0,94	0,096	0,260	0,035	0,044	0,011	0,015
Estimation Flux BV $\cdot (10^3 \text{ t.an}^{-1})$		0,864	0,116	0,315	0,04					
	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Yb	Pb	Th	U
Flux ($\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)	2,19	0,16	0,34	0,041	0,16	0,030	0,009	0,163	0,037	0,009
Estimation Flux BV $\cdot (10^3 \text{ t.an}^{-1})$	0,622	0,069	0,144					0,083	0,020	0,004

* Estimation à partir du flux moyen entre Lamto et Kollo pondérée par les distances entre ces deux stations et la station de Katibougou et du bassin du fleuve Niger à Koulikoro ($120\,000 \text{ km}^2$).

Tableau 41. Flux (en $\text{mg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) dans la phase totale (N=19 et H = 390.3 mm) et estimation des taux de Dépôts à partir des stations de Lamto et Kollo.

4. CONCLUSIONS

L'analyse de la composition chimique des eaux de pluies à la fois dans la phase dissoute (éléments majeurs) et totale (éléments majeurs et traces) à la station de Katibougou au Mali, a permis de réaliser une étude détaillée de la chimie des pluies à l'aide de différentes méthodes d'investigation : calcul des facteurs d'enrichissement par rapport à la croûte continentale, spectre des terres rares et de certains éléments traces, corrélations entre espèces chimiques. Celles-ci ont permis d'estimer l'importance relative des différentes sources de gaz et de particules dans l'atmosphère :

- source terrigène due à l'érosion des sols du bassin versant (notamment de Na),
- apports océaniques régulés par la distance à la côte atlantique,
- émission d'aérosols par la végétation
- apports anthropiques (Zn, Pb, Sb, Cd).

Les pluies recueillies dans cette région font partie des pluies les moins polluées du monde. et c'est en premier lieu la quantité de particules d'origine terrigène qui influence directement la composition chimique de la pluie à Katibougou.

Aucune mesure de la composition chimique de la pluie sur le delta intérieur du Niger n'a été réalisée à ce jour. Du fait de sa situation plus septentrionale (proche du Sahara), des faibles pluies (il pleut en moyenne entre 400 et 200 mm du delta aval au delta amont), et de la faiblesse de la végétation exondée, il semblerait logique que la composition des eaux de pluies arrivant sur le delta ait un cachet plus terrigène que celles recueillies à Katibougou. Elle devrait être plus proche de la composition de Kollo qui se situe dans la même zone climatique. Les apports humides sur le delta (sur les superficies mises en eau) pourront alors être estimés à partir des taux moyens mesurés à Kollo par Freydier (1997).

Chapitre VI. Chimie des eaux du Niger amont : cations et anions majeurs, éléments traces, suspensions

Les chapitres I et II, ont permis de définir et de mettre en évidence les facteurs qui contrôlent la composition chimique de l'eau d'un cours d'eau. A une station donnée, le contenu chimique de l'eau d'une rivière dépend de nombreux facteurs dont, la proportion d'eau provenant du ruissellement ou des nappes (avec des compositions en éléments dissous différentes), les apports atmosphériques (pluies et poussières), les réactions à l'intérieur du système gouvernées par des processus internes (réactions biologiques ou physico-chimiques), le mélange des eaux de plusieurs tributaires, les apports anthropiques... (Meybeck, 1979 ; Berner & Berner, 1987 ; Sigg *et al.*, 1994 ; Appelo & Postma, 1993 ; Langmur, 1997).

Ce chapitre est conséquent car il traite une quantité d'informations importante (informations accumulées depuis 8 ans) . Il permet dans un premier temps de donner un aperçu assez global sur la composition chimique des eaux du Niger (et leurs flux associés) avant son entrée dans le delta (tant dans la phase dissoute que particulaire). Dans une deuxième temps, un intérêt particulier est apporté aux éléments traces, notamment aux métaux lourds, pour lesquels aucune donnée antérieure n'existe sur cette zone. Puis, l'utilisation d'un modèle géochimique permet enfin d'estimer, à partir de la composition moyenne des eaux sur les différentes stations du bassin du Niger amont, les taux d'altération chimique actuels sur ce bassin versant.

1. RESULTATS DANS LES EAUX DU NIGER ET DU BANI CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN AMONT

La quantité de données importantes recueillies pour les éléments majeurs (de 1991 à 1997) et traces (en 1996 et 1997) (BD ORSTOM, chapitre II), ne nous permet pas d'exposer ici tous les résultats de l'analyse. Le lecteur peut se reporter aux annexes où sont regroupés des tableaux de résultats (annexe 4 et annexe 5) ainsi que les premières interprétations sur la variabilité des concentrations au cours d'un cycle hydrologique (annexe 6) et sur les quantités de matières transportées sur le bassin du Niger amont (annexe 7).

1.1. Composition chimique de la phase dissoute

La caractérisation géochimique moyenne de la phase dissoute des eaux du bassin amont du Niger (Sankarani et Bani compris) est basée, pour les majeurs, sur les observations bimensuelles réalisées dans le cadre du réseau ORSTOM (Chapitre II) et, pour les éléments traces et le carbone organique, sur 9 campagnes de prélèvements étalées sur presque un cycle hydrologique et demi (1996-1997).

1.1.1. Les éléments majeurs

Les compositions chimiques moyennes des eaux (concentrations pondérées par les débits en mg.l^{-1}) sur les 5 stations du bassin amont sont reportées pour les majeurs et pour le COD dans le Tableau 42.

	Niger			Sankarani	Bani
	Banankoro	Koulikoro	Ké-Macina	Sélingué ^c	Douna
Années ^a	6	3	6	1	6
Analyses	108	63	110	8	112
Débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	746	1042	794	326	225
pH	6,8 +/- 0,4	6,9 +/- 0,2	7,1 +/- 0,2	7	7,2 +/- 0,2
Cond 20° ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	35,8 +/- 3,1	36,9 +/- 2,1	39,0 +/- 3,9	35,7	44,4 +/- 10,8
Ca (mg.l^{-1})	2,1 +/- 0,3	2,4 +/- 0,3	2,4 +/- 0,4	3	2,8 +/- 0,3
Mg (mg.l^{-1})	1,1 +/- 0,2	1,1 +/- 0,2	1,1 +/- 0,3	1,2	1,2 +/- 0,2
K (mg.l^{-1})	1,3 +/- 0,4	1,9 +/- 0,7	1,5 +/- 1,3	1,5	2,1 +/- 0,2
Na (mg.l^{-1})	2,5 +/- 0,1	2,8 +/- 0,2	3,0 +/- 0,4	3,2	2,6 +/- 0,6
Tac (mg.l^{-1})	20,5 +/- 2,4	22,3 +/- 2,2	22,1 +/- 4,6	27	23,8 +/- 2,1
Cl (mg.l^{-1})	0,5 +/- 0,2	1 +/- 0,2	0,7 +/- 0,2	0,5	0,6 +/- 0,2
SiO ₂ (mg.l^{-1})	13,5 +/- 0,7	11,1 +/- 3,2	13,3 +/- 1,7	14,4	11,9 +/- 3,1
TDS (mg.l^{-1})	41,9 +/- 2,1	43 +/- 4,5	44,5 +/- 3,5	51,4	45,6 +/- 5,9
Σ^+ ($\mu\text{eq.l}^{-1}$)	341 +/- 28	367 +/- 45	373 +/- 21	434	406 +/- 44
Σ^- ($\mu\text{eq.l}^{-1}$)	358 +/- 33	481 +/- 82	386 +/- 25	469	421 +/- 40
BI (%)	-5	-4	-3	-8	-6
COD ^b (mg.l^{-1})	1,7	1,4	1,6	2,3	1,7

^a : nombre d'années et d'analyses fiables. ^b : quelques valeurs réparties sur l'année 1996/97

^c : Pour Sélingué, les calculs ne concernent que l'année 1994/95 (débits journaliers indisponibles pour les autres années)

Tableau 42. Composition chimique moyenne des eaux du Niger et de ses deux affluents principaux au Mali.

Comme l'ensemble des pH sur les eaux du bassin du Niger amont (Tableau 42) sont proches de la neutralité, les concentrations en bicarbonates sont assimilées au TAC mesuré (chapitre II).

Les eaux du Niger et de ses deux principaux affluents, le Bani et le Sankarani, se caractérisent par leur **faible minéralisation** : les conductivités à 20°C se situent autour de 35 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro et aux alentours de 40-50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sur le Bani à Douna ; la charge cationique moyenne varie, suivant les stations, entre 320 et 450 $\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$. La rivière la plus diluée est le Niger, le Sankarani à Sélingué (à l'aval du barrage) est la plus concentrée. Ces valeurs sont très en dessous de la valeur moyenne de 800 $\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$ des rivières non polluées du globe (Meybeck *et al.*, 1996).

Les concentrations moyennes annuelles en TDS (charge totale dissoute inorganique) varient respectivement **de 31,9 \pm 2,2 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro (n=6) et de 45,6 \pm 5,9 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Bani à Douna (n=6)**. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues lors de précédentes études sur le fleuve Niger (Gourcy, 1994 ; Boeglin & Probst, 1996) et sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour la plupart des autres grands fleuves d'Afrique de l'Ouest (Tableau 43).

Fleuve (station)	TDS en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Source
Congo (Brazzaville)	36,4 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Laraque et al, 1995 ; Sondag <i>et al.</i> ; 1995
l'Oubangui (Bangui)	48 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Sondag <i>et al.</i> ; 1995 ; Orange <i>et al.</i> , 1995
Sénégal (Bakel)	42 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Gac, 1986
Gambie	44 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Meybeck <i>et al.</i> , 1987
Fouta Djallon (tributaire moyen)	33,0 \pm 3,9 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	Orange & Gac, 1990 ; Orange, 1992

Tableau 43. concentrations moyennes annuelles en TDS sur d'autres rivières de l'Afrique de l'Ouest.

Les compositions ioniques (en $\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$) des eaux du Niger à Banankoro et du Bani à Douna sont décrites Figure 76. **La concentration des anions** suit l'ordre $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{NO}_3 > \text{SO}_4$ pour les deux rivières. L'anion HCO_3 est le plus abondant, et représente quelle que soit la station plus de 92 % de la somme des anions (en $\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$). Les ions chlorures représentent seulement environ 5% de la charge négative. Les faibles teneurs en sulfates et nitrates ne sont pas significatives vu le temps de stockage des échantillons.

L'abondance des cations pour le Niger à Banankoro varie dans l'ordre $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} \geq \text{K}$. le cation Na est légèrement prédominant (32% de la somme des cations (en $\mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$)). Le Bani montre une plus forte proportion de Ca et l'ordre d'abondance des cations devient $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$. Cette minéralisation légèrement différente entre le Niger à Banankoro et le Bani à Douna, s'explique sans doute par les différences morphologiques et géologiques de leur bassin versant. La part des grès est par exemple beaucoup plus importante sur le bassin du Bani que sur le bassin du Niger où les formations granitiques dominant. A Koulikoro et Ké-Macina (Niger), la répartition des cations est similaire à celle observée à Banankoro tandis qu'à Sélingué (Sankarani), elle est similaire à celle observée à Douna.

(a) Niger à Banankoro

(b) Bani à Douna

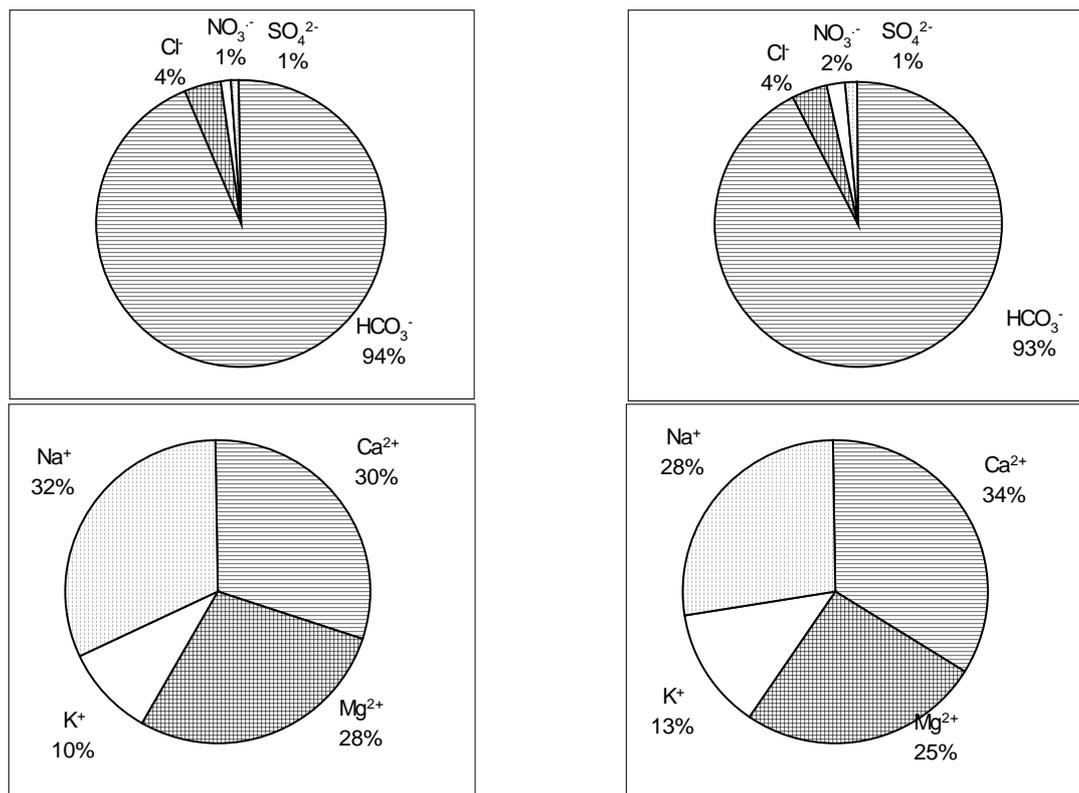


Figure 76. Les compositions ioniques (proportion moyenne interannuelle de chaque cation et anion en $\mu\text{eq.l}^{-1}$) des eaux du Niger à Banankoro (a) et du Bani à Douna (b).

Les balances ioniques moyennes ($BI = 200 * (\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)$; avec, Σ^+ somme des cations et Σ^- somme des anions) sont inférieures à 5 % (excepté à Sélingué où $BI = 8\%$). Ceci montre que les ions non mesurés comme les anions organiques ne sont pas des composants importants des eaux du fleuve Niger et du Bani, contrairement aux eaux riches en matières organiques observées dans les bassins du Congo (Probst *et al.*, 1992 ; Dupré *et al.*, 1996) et de l'Amazone (Gaillardet *et al.*, 1997).

Les concentrations moyennes pondérées par les débits des différents éléments composant la charge dissoute inorganique (TDS en mg.l^{-1}) montrent que l'importance des composés SiO_2 et HCO_3 qui représentent de 77,7 à 81 % des éléments dissous (entre 26 et 32% des éléments dissous pour la silice et entre 49 à 52,5 % pour le bicarbonate). Les fortes teneurs en silice ($11,9$ à $13,5 \text{ mg.l}^{-1}$) s'expliquent par le fait que les terrains du bassin versant sont essentiellement de nature silicatée. Ces teneurs sont proches de la moyenne mondiale de $10,8 \text{ mg.l}^{-1}$ (Meybeck *et al.*, 1996a). Les eaux du Bani à Douna sont plus concentrées par rapport au Niger à Banankoro, et ont des concentrations en calcium et bicarbonate (mg.l^{-1}) plus fortes et des concentrations en silice plus faibles. Ces différences sont liées aux lithologies contrastées évoquées ci-dessus.

Enfin, les concentrations en matières organiques dissoutes (COD) ($2,3 \pm 1,2 \text{ mg.l}^{-1}$ à Sélingué et $1,5 \text{ mg.l}^{-1}$ pour les autres stations) sont faibles par rapport à la teneur mondiale estimée à $4,2 \text{ mg.l}^{-1}$ (Meybeck *et al.*, 1996), et d'autant plus, par rapport aux teneurs rencontrées en milieu tropical humide

(e.g. entre 10 et 20 mg.l⁻¹ sur le Mengong au Cameroun - Viers, 1998 ; 10,5 mg.l⁻¹ sur le Congo à Brazzaville - Seyler *et al.*, 1995).

Le calcul du **transport spécifique moyen en éléments dissous** (sans le COD) pour chaque bassin versant a été effectué à partir des concentrations moyennes interannuelles en TDS, des modules interannuels et des superficies des bassins versants. L'ensemble des résultats et une partie de la discussion se trouve en annexe 7. Cette grandeur varie pour la période 1991 à 1997, de 9,6 à 19,8 t.km².an⁻¹ pour le Niger à Banankoro, de 7,7 à 17,5 t.km².an⁻¹ à Koulikoro ; de 6,7 à 17,7 t.km².an⁻¹ à Ké-Macina ; et de 2,0 à 7,7 t.km².an⁻¹ pour le Bani à Douna. Les **faibles transports spécifiques observés à Douna** s'expliquent en première approximation par la **faiblesse du drainage sur le bassin versant du Bani**. Nous reviendrons sur ces valeurs et sur les phénomènes d'altération ultérieurement.

1.1.2. Les éléments traces

Les concentrations en éléments traces analysées par ICP-MS pour chaque échantillon (années 1996 et 1997) se trouvent en annexe 4, les moyennes pondérées par les débits dans la phase dissoute < 0,2 µm sont reportées dans les tableaux de l'annexe 5. Ce calcul n'a été réalisé que pour les éléments pour lesquels au moins 70 % des valeurs sont supérieures à la limite de détection. Les statistiques élémentaires (coefficient de variation, médiane, minimum et maximum, quartiles inférieur et supérieur) sont également reportées dans ces tableaux. Rappelons que les problèmes de reproductibilité et d'échantillonnage (blanc de terrain notamment) ont été triés dans le chapitre II pour Cr, Zn, Cd, Pb.

Il n'existe aucune donnée antérieure sur les concentrations en éléments traces dans les eaux du bassin amont du Niger. En revanche des données similaires sur d'autres hydrosystèmes tropicaux telles que l'Amazone, le Congo ont été publiées récemment (Négré *et al.*, 1993 ; Dupré *et al.*, 1996 ; Gaillardet *et al.*, 1997). On verra qu'il existe certaines similitudes entre ces différents hydrosystèmes. Le Tableau 44 regroupe les différentes moyennes observées sur le bassin du Niger et les concentrations mesurées sur différents tributaires des bassins de l'Amazone et du Congo.

1.1.2.1. Concentrations absolues des éléments traces

Les abondances absolues varient de façon plus ou moins importantes suivant les éléments, mais les moyennes pondérées par les débits restent dans le même ordre de grandeur que les deux grands systèmes fluviaux Amazone et Congo (Tableau 44).

Hydrogéochimie du bassin amont et du delta intérieur du fleuve Niger

	Bassin de l'Amazone										Bassin du Congo						Bassin du Niger Amont			
	Rio Negro	Rio Solimoes	Rio Madeira	Rio Urucara	Trompetas	Rio Tapajos	Amazone5	Amazon2	Oubangui	Lobaye	Zaire	Likouala	Sangha	Alima	Kasai	Congo 64	Ban.	Kou.	Kéna.	Dou.
Cs																				
Rb	1,2	1,6	1,4	4,9	3,2	2,8	1,9	1,5	0,008	0,017	0,026	0,0063	0,018	0,04	0,009	0,016	0,008	0,010	0,010	0,017
U	0,019	0,043	0,023	0,035	0,044	0,019	0,046	0,052	2,99	2,5	3,8	4,1	3,6	3,9	2,7	3,2	3,5	3,8	3,8	4,4
Th	0,055	0,01	0,014	0,091	0,128		0,092		0,055	0,023	0,071	0,024	0,069	0,024	0,027	0,049	0,015	0,014	0,020	0,036
Pb	0,170	0,147	0,005	0,089	0,052	0,061	0,292	0,064	0,042	0,042	0,056	0,078	0,128	0,101	0,023	0,065	0,011	0,010	0,013	0,013
K	487	927	1431	912	827	827	879	879	1100	782	2190	1173	1486	1330	1290	1408	0,068	0,042	0,038	0,035
Ba	6,1	27,8	17,8	18,1	14,1	21,2	9,9	20,8	16,8	14,1	24,8	17	28	20,7	24	19,6	30,2	30,4	30,0	21,9
La	0,151	0,166	0,054	0,178	0,266	0,228	0,366	0,106	0,249	0,297	0,349	0,38	0,6	0,587	0,189	0,319	0,076	0,081	0,090	0,121
Ce	0,415	0,363	0,138	0,528	0,908	0,115	0,933	0,218	0,492	0,55	0,661	0,85	1,4	1,44	0,452	0,689	0,155	0,169	0,170	0,244
Ta																	0,009	0,015	0,014	0,012
Hf																	0,002	0,001	0,002	0,003
Nd	0,172	0,226	0,1	0,219	0,309	0,072	0,387	0,136	0,69	0,363	0,36	0,39	0,775	0,697	0,241	0,089	0,072	0,076	0,084	0,170
Zr																	0,057	0,057	0,084	0,075
Sr	3,7	45,7	19,6	13,3	6,8	9,9	7,3	25,8	17,1	12	24	9,3	9,6	10	12	16	26,6	26,0	26,2	23,7
Na	322	2414	1402	805	713	759	506	1494		529	3100	299	782	782	1219	1127				
Sm	0,038	0,052	0,031	0,045	0,060	0,018	0,085	0,035	0,060	0,079	0,082	0,080	0,140	0,143	0,047	0,062	0,012	0,013	0,015	0,031
Eu	0,009	0,015	0,008	0,008	0,011	0,003	0,016	0,010	0,016	0,021	0,022	0,016		0,033	0,014	0,017	0,004	0,004		0,008
Tb	0,004	0,007	0,005	0,005	0,006	0,002	0,010	0,004	0,007	0,012	0,010	0,008	0,019	0,015	0,006	0,010				0,003
Yb	0,010	0,021	0,009	0,017	0,026	0,006	0,034	0,016	0,024	0,036	0,027	0,026	0,059	0,047	0,019	0,029				0,003
Ca	367	7466	2640	1387	430	857	734		2600	1920	2720	1600	2520	1520	1760	2080				
Sc																				
Fe																				
Co	0,12	0,14	0,02	0,1	0,13	0,02	0,21	0,18	60	80	202	1097	273	0,46	0,05	0,017	126,9	112,0	104,4	98,1
Cr									0,07	0,1	0,07	0,52	0,272	0,272	0,4	0,501	0,045	0,038	0,040	0,042
Ni	0,21	0,77	0,57	0,61	0,012	0,22	0,62	0,74	0,533	0,33	0,386	0,838	0,781	0,88	0,41	1,15	0,684	0,413	0,440	0,346
pH	4,9	7,1	6,7	6,5	6,1	6,7	5,8	6,9	6,8	6,6	6,0	4,7	5,5	5,0	6,4	6,4	7,0	7,1	7,0	7,0
P	5	53	67	8	13	6	36	34	29,7								34,3	29,1	54,6	

Tableau 44. Comparaison des concentrations en éléments traces (ppb) dans la phase dissoute du bassin du Niger avec d'autres hydrosystèmes tropicaux (Congo et Amazone).

Une remarque importante est que les concentrations moyennes en métaux traces (Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) mesurées dans les eaux du Niger sont considérablement plus basses que les limites recommandées dans les normes européennes pour l'alimentation en eau potable (Gaujous, 1993). L'influence des activités anthropiques (si elle est significative) se limiterait donc à la proximité des centres urbains et/ou des zones industrielles telles que les villes de Bamako et Koulikoro (chapitre I). De toutes manières, les rejets possibles sont, a priori, rapidement dilués vers l'aval. Nous développerons plus amplement par la suite ce thème.

Les concentrations moyennes en éléments traces dans la phase dissoute sur le Niger et sur le Bani montrent quelques disparités entre ces deux rivières comme pour les majeurs : les concentrations en Rb, U, La, Ce, Zr, Sm sont par exemple plus importantes sur le Bani à Douna que sur le Niger à Banankoro, tandis que la tendance s'inverse pour les éléments Pb, Ba, Cr et Ni. Les autres éléments ayant des concentrations à peu près équivalentes.

1.1.2.2. Corrélation entre éléments

Afin de déterminer d'éventuelles relations entre les différents éléments majeurs et traces dans les eaux du Niger, des matrices de corrélations ont été réalisées station par station avec le coefficient de Pearson (même méthode que celle utilisée dans le chapitre Pluies). Pour les éléments majeurs et traces dans la phase dissoute, les matrices de corrélation entre éléments montrent quelle que soit la station (exemples de relations entre éléments reportés dans la Figure 77) :

- Une **très bonne corrélation entre les concentrations en Sr**, et dans une moindre mesure **Ba** avec les **teneurs en cations majeurs Na, Ca, Mg et l'alcalinité**. Rb et U ne montrent pas de corrélations significatives avec ces mêmes éléments. Cela tendrait à indiquer que Rb et U participent, ou sont contrôlés, par d'autres processus que ceux qui contrôlent l'abondance de ces ions majeurs dans les eaux. Par exemple, la bonne corrélation entre **Rb et K** tend à relier le comportement de ces deux éléments avec le cycle de la végétation.
- Tous les autres éléments sont faiblement corrélés avec les cations Na, Mg, Ca et l'alcalinité. Seuls Th, Co sont plus ou moins corrélés entre eux et avec les terres rares (Figure 78a). De telles relations ont déjà été évoquées par Gaillardet (1995) dans les eaux de l'Amazonie. La comparaison avec les concentrations des rivières de l'Amazonie et du Congo montre que les teneurs sur le Niger sont parmi les plus faibles, et les points sont dans la tendance observée (Figure 78b). Rappelons que les données utilisées sur les bassins du Congo et de l'Amazonie sont ponctuelles, alors que nous traitons ici des concentrations pondérées par les débits et réalisons des matrices sur une même station pour plusieurs événements. La variabilité des concentrations au cours du cycle hydrologique sera traité par la suite.
- Un groupe d'éléments corrélés à Al se distingue avec des coefficients de corrélation importants, c'est le cas de Th ($r_{Al/Th}=0,92$), Zr ($r_{Al/Zr}=0,92$) et Ti ($r_{Al/Ti}=0,92$).

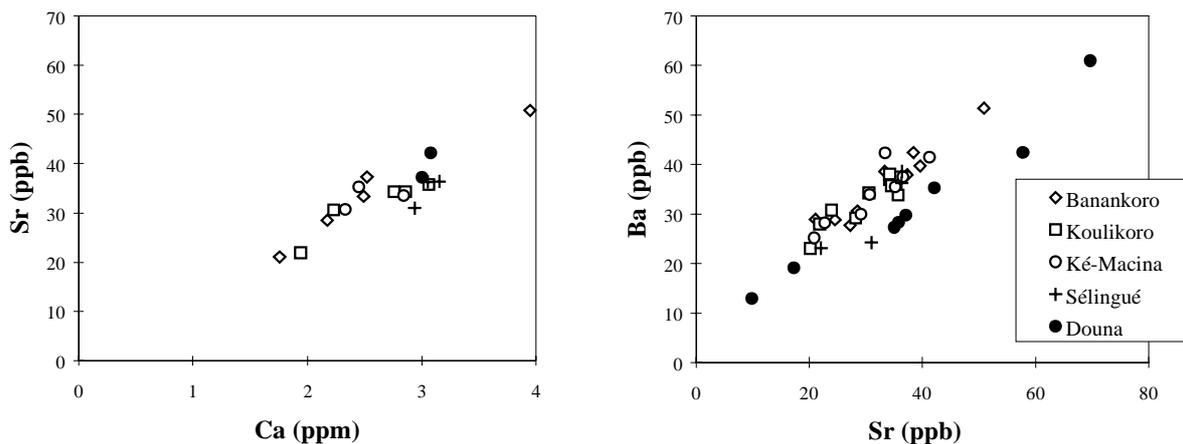


Figure 77. Exemples de relations entre les éléments Sr, et Rb et les éléments majeurs (Ca et K) pour les 5 stations du bassin du Niger amont.

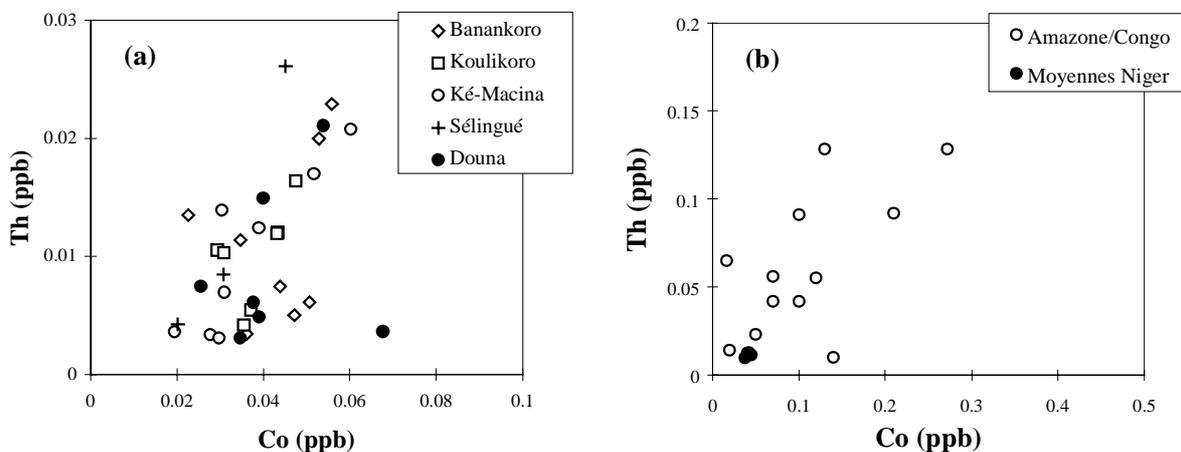


Figure 78. Exemples de relations entre Co et Th pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).

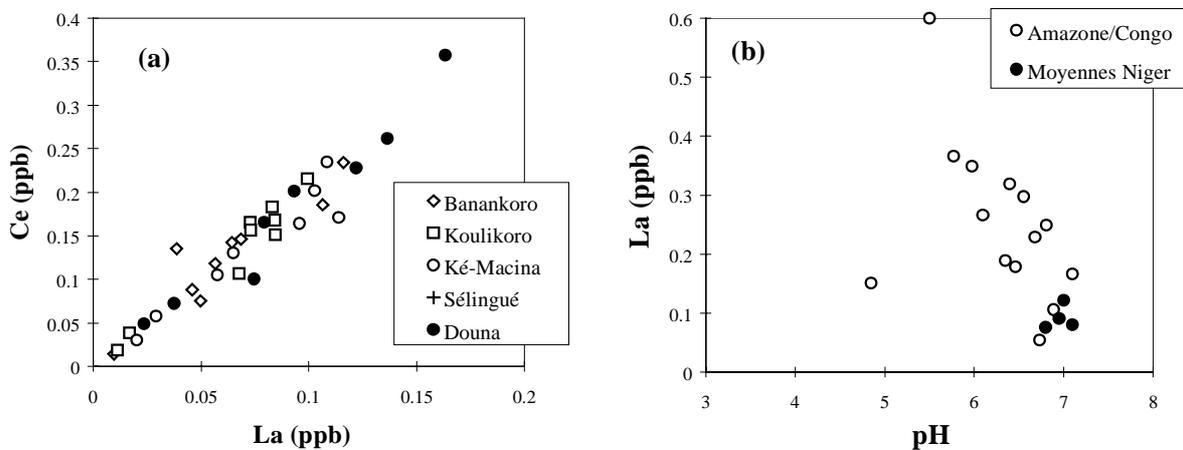


Figure 79. Relations entre La, Ce et pH pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).

Si l'on regarde plus particulièrement les **terres rares** (notées par la suite TRs), les concentrations dans la phase dissoute sont très faibles par rapport aux rivières de l'Amazonie et du Congo : par exemple à Banankoro, La est compris entre 0,0095 ppb et 0,116 ppb avec une moyenne pondérée par les débits de 0,076 ppb. Seules les concentrations rencontrées à la station de Douna, montrent des teneurs individuelles relativement élevées et proches de celles observées sur les bassins du Congo et de l'Amazonie (Tableau 44). Les relations entre terres rares sont très bonnes : la Figure 79a montre par exemple la bonne relation qui existe entre les teneurs en La et Ce sur toutes les stations du bassin amont. Etant donnée, la stabilité du pH, proche de la neutralité, et les faibles valeurs en COD, il n'y a aucune relation entre les concentrations en TRs individuelles dans la phase dissoute et ces deux paramètres. Les valeurs moyennes en La dans les eaux du Niger sont toutefois situées dans la tendance des teneurs observées pour les pH proches de la neutralité dans les eaux de l'Amazonie et du Congo (Figure 79b). **Le Niger ne montre pas la tendance générale des " rivières Coca-Cola "** (rivières à bas pH et riche en COD) pour lesquelles les concentrations en TRs montrent une tendance globale à être plus concentrées dans la phase dissoute du fait des fractionnements dans les processus d'altération et de transport (e.g. Dupré *et al.*, 1996 ; Gaillardet *et al.* 1997 ; Viers, 1998).

1.1.2.3. Spectres des éléments normalisés à la croûte continentale

Comme dans les pluies (chapitre V), on peut représenter les valeurs de concentrations dissoutes dans des diagrammes de concentrations normalisées à la croûte continentale (Figure 80). L'ordre des éléments a été choisi afin d'obtenir une décroissance de l'abondance crustale normalisée aux concentrations du manteau primitif, utilisant le modèle de la croûte de Taylor et McLennan (1985). Dans ce type de diagramme déjà utilisé par Dupré *et al.* (1996), l'ordre des éléments correspond à l'enrichissement progressif des éléments de Ni à Cs dans la croûte continentale supérieure par rapport au manteau primitif. Si les éléments étaient dans les mêmes proportions dans les eaux des cours d'eau et dans la croûte continentale, le diagramme serait plat.

La Figure 80 montre que les spectres des concentrations moyennes normalisées dans la phase dissoute ont la même forme quelle que soit la station (exceptée pour la station de Sélingué) et que l'ensemble des éléments est très appauvri par rapport à la croûte continentale. On retrouve les mêmes "anomalies" rapportées par Dupré *et al.* (1996) et Gaillardet *et al.* (1997) sur les bassins du Congo et de l'Amazonie : **les éléments connus comme solubles Rb, Ba, Sr, Ca sont systématiquement enrichis par rapport à leurs voisins, tandis que Th, Pb, Fe, Co, Ni et les TRs sont appauvris**. Les éléments Hf et Zr montrent un appauvrissement particulièrement important par rapport à ces derniers éléments.

Les profils moyens en terres rares des stations du bassin amont (Figure 81) sont plus ou moins plats, à convexes suivant les stations, avec pour toutes un léger appauvrissement en TRs lourdes par rapport au TRs légères (il existe beaucoup de variation étant donné les très faibles valeurs, proches de DL). Les concentrations normalisées à la croûte montrent une forte anomalie positive en Eu pour toutes les stations amont, et une légère anomalie négative en Ce, i.e., l'élément Eu est moins appauvri dans la phase dissoute que ses voisins et inversement pour le Ce.

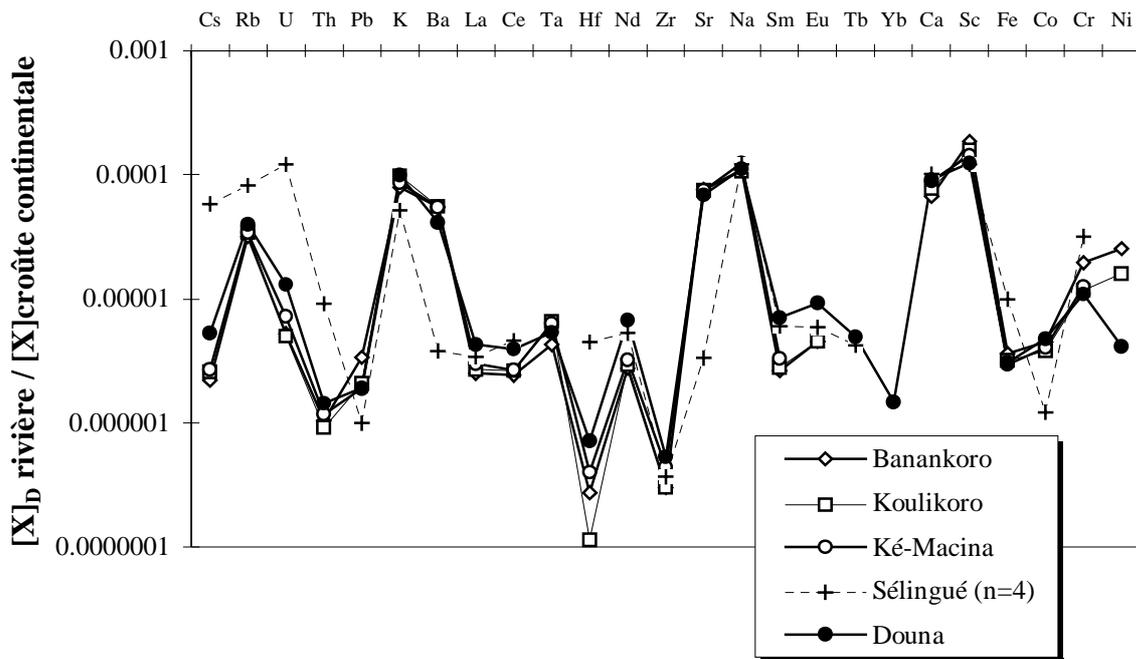


Figure 80. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase dissoute (pondérées par les débits) du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).

Les diagrammes en TRs légères présentent également des concentrations normalisées qui augmentent plus ou moins de La à Nd pour la station de Douna sur le Bani et dans une moindre mesure pour Ké-Macina (la station la plus aval du Niger supérieur).

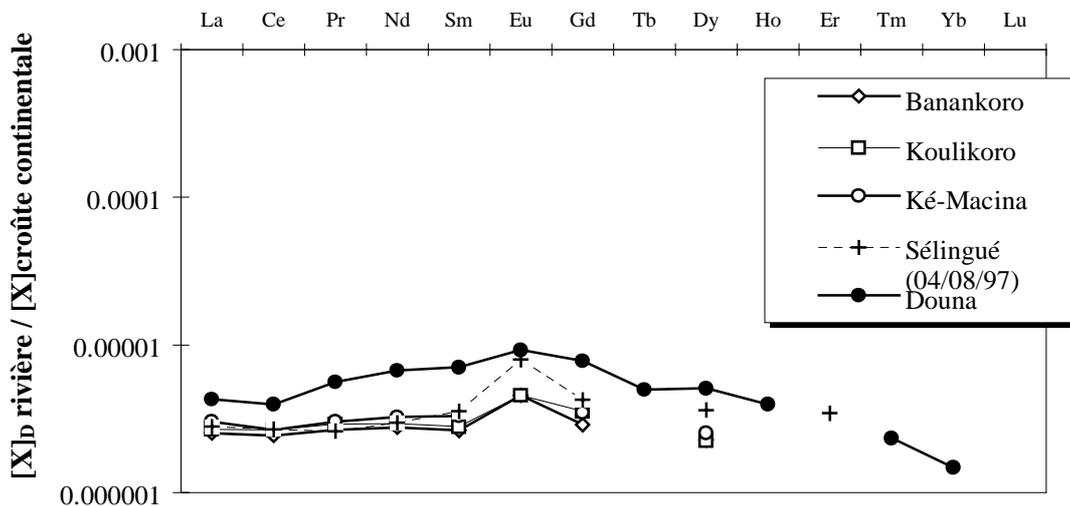


Figure 81. Diagrammes de normalisation des concentrations moyennes en terres rares dissoutes du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985). La station de Sélingué n'est représentée que par un seul échantillon (04/08/97).

1.1.3. Variabilité temporelle de la composition de la phase dissoute

L'ensemble des résultats obtenus station par station et année par année (de 1991 à 1997) a fait l'objet d'une étude détaillée présentée en annexe 6. Celle-ci montre que la **variabilité des concentrations en éléments dissous peut être importante au cours de l'année**, bien qu'elle soit beaucoup plus faible que celle des MES et, a fortiori, que celle des débits (chapitre III et IV). Seuls le pH et, dans une moindre mesure, la silice dissoute montrent des variations de concentrations plus faibles. Toutefois, toutes les concentrations en éléments majeurs ainsi que les éléments traces Rb, Ba, et Sr dosées dans la phase dissoute, suivent plus ou moins la même évolution au cours du cycle hydrologique quelle que soit la station du bassin amont considérée :

- au début de la saison des pluies (avril, mai), il y a une diminution importante et assez brutale des concentrations alors que les débits commencent à augmenter ;
- un minimum de concentration est atteint lors de la période d'étalement de la crue (avant ou pendant le maximum de débit), puis les concentrations augmentent progressivement alors que la crue progresse dans le temps ;
- à la fin de la crue, les concentrations augmentent plus franchement alors que les débits sont faibles.

La Figure 82 présente un exemple d'évolution des concentrations totales en élément dissous (TDS) et du débit au cours des années hydrologiques 1994-1995, 1995-1996 et 1996-1997 sur le Niger à la station de Banankoro.

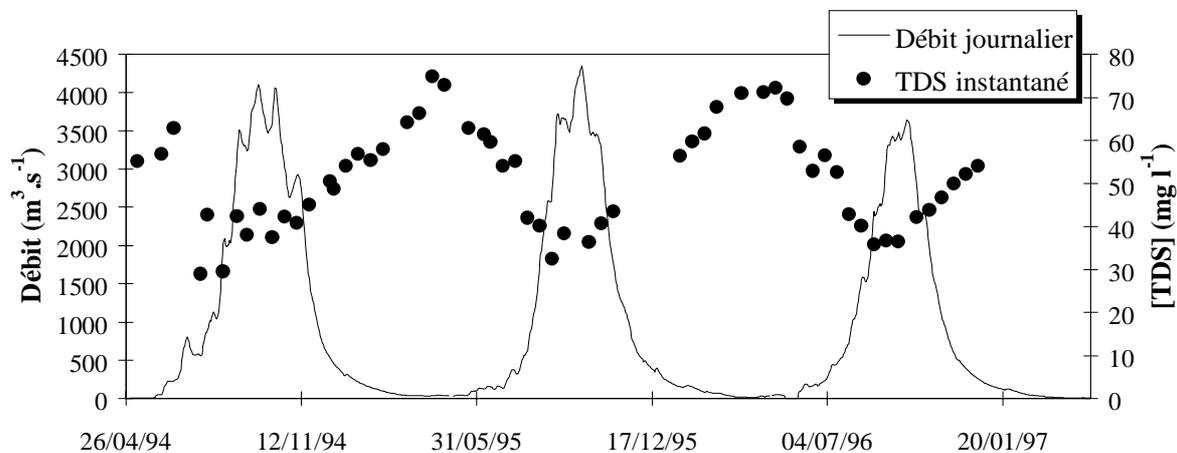


Figure 82. Exemple d'évolution conjointe des concentrations totales en éléments dissous (TDS) et du débit sur le Niger à la station de Banankoro (de 1994 à 1997).

Une telle variation dans les concentrations en éléments dissous est un phénomène déjà rencontré aussi bien à l'échelle des petits bassins versants que dans la plupart des fleuves du globe (e.g. Davis & Keller, 1983 ; Walling & Foster, 1975 ; Walling & Webb, 1980 ; Kattan & Probst, 1986 ; Ribolzi, 1996). La baisse des concentrations au début de la crue est attribuée à la **dilution des eaux**

concentrées du cours d'eau par les eaux de pluie et de ruissellement faiblement minéralisées ; tandis que l'augmentation des concentrations s'explique par une **contribution de la nappe plus importante**, celle-ci étant plus concentrée. Pendant l'étiage, les débits faibles sont assurés par la nappe ; l'évaporation est importante.

Cette dilution aboutit à une relation inverse entre le débit et la concentration en éléments dissous classiquement décrite par une loi logarithmique de type $C=aQ^b$. Toutefois, cette relation est plus ou moins bien définie suivant les éléments, les stations et les années. Elle présente parfois des **boucles d'hystérésis** (Figure 83) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (anti horlogique = les concentrations sont moins importantes en crue qu'en décrue) pour Na, Ca, Mg, HCO_3^- ; ou dans le sens des aiguilles et d'une montre (horlogique = les concentrations sont plus importantes en crue qu'en décrue ; cf. MES) pour K. De tels cycles sont bien marqués à Douna sur le Bani où le minimum de TDS précède nettement le maximum de crue (Figure 83b).

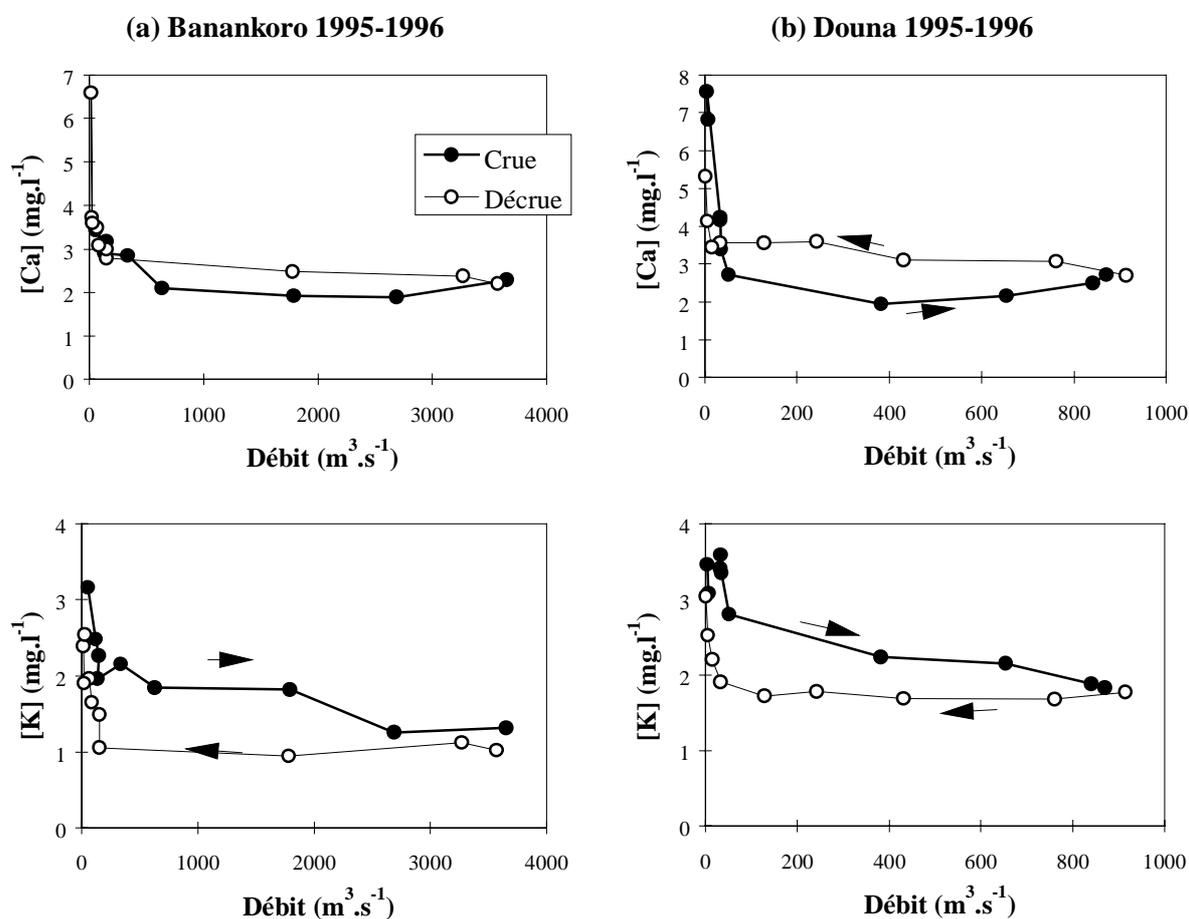


Figure 83. Exemple de relation entre les concentrations en éléments dissous (Ca et K) et le débit pour l'année hydrologique 1995/96, aux stations de Banankoro sur le Niger (a) et de Douna sur le Bani (b) .

Ce décalage entre les valeurs extrêmes de débits (maximum) et de concentrations (minimum) a souvent été remarqué. En partant du principe que les éléments dissous sont transportés à la même vitesse que l'eau, les facteurs les plus probables qui peuvent expliquer les relations en boucle entre concentrations et débits sur les bassins étudiés sont (Annexe 6) :

- une contribution saisonnière variable de différentes sources d'écoulement (pluie, ruissellement, écoulement hypodermique, eaux souterraines...).
- une contribution différée des diverses branches du réseau hydrographique.

L'analyse comparée des différentes évolutions entre éléments (notamment du rapport X/Na avec $X = K, Ca, Mg, HCO_3$) permet d'émettre quelques hypothèses sur la contribution des différents écoulements au débit du Niger et du Bani et ainsi d'expliquer ces boucles. Si l'on suppose que Na provient uniquement de la pluie et surtout de l'altération des roches et qu'il caractérise les eaux de la nappe, les proportions par rapport à Na seraient constantes si les autres éléments provenaient toujours de ce même réservoir. Or la Figure 84 montre que le rapport X/Na varie de manière importante et pas de la même manière sur le Niger et le Bani :

- **à la station de Banankoro sur le Niger**, on peut observer au début de la crue, bien que les concentrations absolues diminuent, un excès relatif en K (qui commence en avance par rapport aux autres éléments avec les premières pluies dès mai), puis pendant l'étale de la crue un rapport important en Ca et Mg, et finalement un rapport presque constant lors des basses eaux (excepté pour K pour lequel le rapport diminue, car il y a sans doute plus d'apports par la nappe dans laquelle K est connu pour être peu concentré, d'où la boucle horlogique ci-dessus). Le pic du rapport K/Na se produit de manière presque synchrone avec celui de MES et on peut imaginer que cet élément est amené rapidement avec les eaux de ruissellement. En effet, **K (et Rb) peuvent notamment provenir de la matière organique végétale** est donc a priori de la **composante ruissellement de l'écoulement** (Pierson et Taylor, 1994 ; Ribolzi, 1996). Les apports importants en potassium en début de crue peuvent être accentués par le lessivage des terrains et/ou par le lessivage des cendres laissées par les feux de brousse pratiqués pendant la saison sèche (surtout dans la région du haut bassin du Niger). Le fait que les autres éléments augmentent relativement plus tardivement laisse penser qu'il existe une source supplémentaire due à des apports retardés de la nappe superficielle ou d'écoulement hypodermique où les éléments Ca, Mg, HCO_3 , et K seraient concentrés. On a effectivement évoqué au chapitre III l'existence d'écoulements retardés de ce type.
- **à la station de Douna sur le Bani**, on peut observer un excédent relatif en K, Ca, Mg, HCO_3 (rapport supérieur à 1) au début de la crue alors que le reste de l'année ce rapport reste pratiquement stable (excepté pour K). Le fait que cet excédent relatif soit synchrone pour ces éléments avec le pic de MES laisse supposer que tous ces éléments sont apportés par les eaux de ruissellement. Il n'y aurait pas comme sur le Niger un sous-écoulement retardé important. La montée des eaux se fait plus rapidement dans cette rivière (avec un effet de dilution) et les apports souterrains, qui contribuent aux fortes concentrations, arriveraient aussi plus vite. La nappe (propriétés des aquifères différentes de celles du Niger) se vidangerait très vite et serait responsable de l'augmentation bien avant le maximum de crue. Cette hypothèse est envisageable

étant donné la forme de l'hydrogramme sur le Bani où l'augmentation des débits est très rapide et la décrue beaucoup plus progressive. A moins que cela ne reflète l'influence des zones inondées du lit majeur, importantes sur cette rivière. La différence de rapport très importante entre le potassium et les éléments Ca et Mg au début de la crue peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais (NPK) sur ce bassin agricole (sur le Niger, on n'observe pas une telle différence entre les rapports, Figure 84).

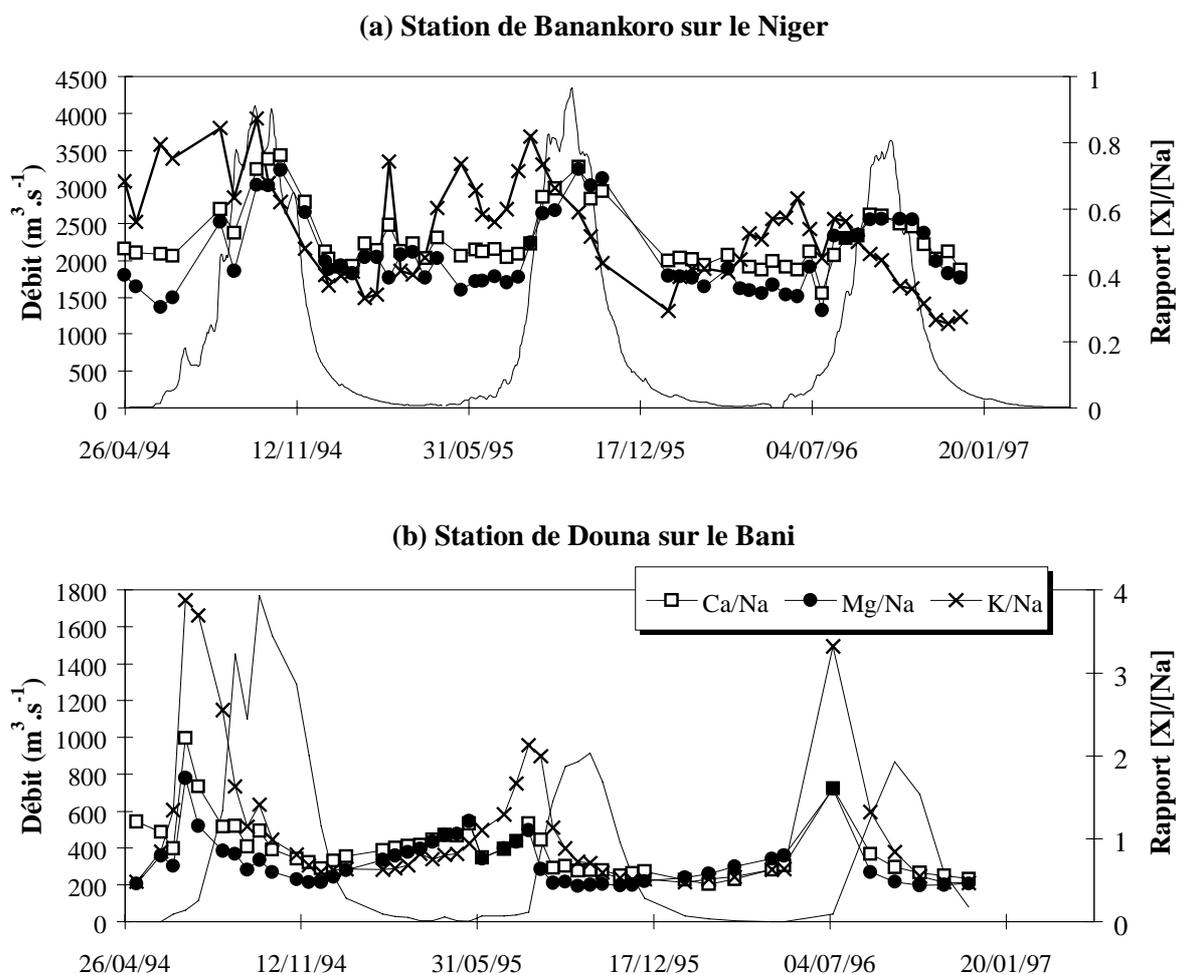


Figure 84. Evolution du rapport des concentrations X/Na avec X = K, Ca, Mg, sur les stations de Banankoro sur le Niger (a) et de Douana sur le Bani (b).

Nous n'irons pas plus loin dans l'interprétation du fonctionnement des écoulements pour laquelle il serait nécessaire d'identifier des traceurs pour chaque type d'écoulement, ce qui n'est pas notre propos. D'une manière générale, il faut noter l'effet de dilution important, qui nécessite l'utilisation des rapports d'éléments.

Les différences d'évolution des concentrations en éléments dissous entre les stations du Niger ont également été abordées en annexe 6 et plus amplement en annexe 7 avec l'étude des flux transportés d'amont en aval du Niger amont. On peut retenir que les variations de concentrations avec le débit sur les stations de Koulikoro et de Ké-Macina suivent les variations de Banankoro plus en amont. Il existe des différences entre ces stations au niveau de la décrue du fait **du soutien d'étiage dû au barrage de Sélingué dont bénéficient les stations de Koulikoro et Ké-Macina** (chapitre III). Quelques différences de concentrations en hautes eaux sont cependant observées. Elles sont dues aux apports du Sankarani (lorsque les débits déversés sont importants) dont la minéralisation des eaux est légèrement différente (§1.1.1).

1.2. Composition chimique de la phase en suspension

Les caractéristiques géochimiques (pour les éléments traces) de la phase en suspension (ou particulaire) des eaux du bassin amont du Niger ont été étudiées à partir des 9 campagnes de prélèvements de 1996 et 1997. Les teneurs en COP de la phase particulaire ont également été suivies durant une année de façon ponctuelle (chapitre II).

1.2.1. Minéralogie de la MES

La minéralogie des MES des rivières dépend de la composition minéralogique des roches du bassin versant. La composition minéralogique moyenne des suspensions et des berges réalisées par diffractométrie aux rayons X (Gourcy, 1994 ; Censier et al, 1995) reflète un **matériel soumis à la pédogenèse ferrallitique en milieu tropical** : ce sont les quartz qui dominent, puis dans une moindre quantité, la kaolinite. L'illite, un feldspath calco-sodique, du rutile et de la goéthite à l'état de trace sont également présents. Cette minéralogie est proche de celle des sédiments du lac Tchad (Gac, 1980).

	Station	date	Quartz	% kaolinite	% illite	feldspath	goethite	rutile
Niger								
	Ké-Macina	février 1992	++++	70	30	-	+	+
	Ké-Macina	octobre 1992	++	80	20	-	+	+
Bani								
	Douna	juin 1992	+	mauvaise cristallisation		-	+	+
	Douna	octobre 1992	++	85	15	+	+	+

Tableau 45. Composition minéralogique semi-quantitative des sédiments en suspension (d'après Gourcy, 1994).

L'estimation de la part relative de chacune des argiles montre que le taux de kaolinite varie entre 70 et 85%. Ces forts taux de kaolinite indiquent que le matériel érodé a été soumis à la latéritisation. Le Niger (à Ké-Macina) montre en basses eaux des quantités de quartz importantes. La présence de

reminéralisation de la silice dissoute sous diverses formes amorphes de la silice (comme le gel, le verre, le reste de diatomées...) a été mis en avant (Gourcy, 1994).

D'après Censier *et al.* (1995), de l'amont vers l'aval du Niger et du Bani, l'évolution de la composition du cortège argileux de la charge de fond est en accord avec la séquence climatique des associations géochimiques tropicales définie par Bocquier (1973). L'illite et la kaolinite constituent l'héritage détritique des sols des bassins supérieurs du Niger et du Bani sous climat tropical humide. La montmorillonite n'apparaît que dans les sédiments évoluant dans le domaine sahélien, zone climatique où il y a néoformation de montmorillonite par bisiallisation (Pedro, 1968).

1.2.2. Carbone Organique Particulaire (COP)

Les teneurs relatives en COP (>0,45µm) relevées lors des campagnes de 1996 à 1997 sur les 5 stations du bassin du Niger amont varient de 1,3 à 20,45 %. La moitié des valeurs est inférieure à 4,95 % et seulement 25 % sont supérieures à 7,1%. Les valeurs les plus fortes sont rencontrées en décrue et en basses eaux. Les concentrations, en mg.l⁻¹, sont le plus souvent comprises entre 0,1 et 1,85 (90% des valeurs).

	CV%	Médiane	Min.	-	Max.	Quartile 25%	-	Quartile 75%
Tout (38 valeurs)								
COP (%)	71%	4,95	1,3	-	20,45	3,95	-	7,1
TS * (mg.l ⁻¹)	159%	13	2,3	-	209,5	7,2	-	16
COP* (mg.l ⁻¹)	77%	0,62	0,10	-	3,01	0,46	-	1,4
Basses eaux (10 valeurs)								
%COP	51%	11,2	3,95	-	20,45	7,2	-	17
TS * (mg.l ⁻¹)	58%	7,4	2,3	-	16	5,5	-	9,07
COP* (mg.l ⁻¹)	65%	0,62	0,23	-	1,86	0,49	-	1,3
Hautes eaux (24 valeurs)								
%COP	64%	4,6	1,3	-	15,5	2,8	-	5,9
TS * (mg.l ⁻¹)	143%	13,75	3,8	-	209,5	8,125	-	38,62
COP* (mg.l ⁻¹)	78%	0,64	0,10	-	3,01	0,46	-	1,45

* filtration à 0.45µm.

Tableau 46. Concentrations en COP et en particule en suspensions (>0.45µm) sur l'ensemble des 5 stations du bassin du Niger amont. Différence entre hautes eaux et basses eaux.

Sur l'ensemble des points et des stations, il n'y a pas de corrélation significative entre le débit et le COP, mais la quantité relative de COP tend à diminuer avec le débit (Figure 85a). Ces premières remarques soulignent la différence entre la période de hautes eaux et l'étiage et, par conséquent, la relation qui existe entre le débit du fleuve et le COP transporté. **La relation inverse classique** (e.g. Wasson *et al.*, 1991, Meybeck *et al.*, 1996b, Veyssy, 1998) entre les teneurs en COP exprimées en % de matières sèches et la charge en particules en suspensions TS (>0,45µm) est vérifiée (Figure 85b) :

- entre 0 et 50 mg.l⁻¹ de TS, les teneurs relatives en COP dépassent toujours 1% et peuvent atteindre jusqu'à 20% ; (les particules minérales sont peu abondantes et la contribution relative des particules organiques est d'autant plus forte) ;
- pour les concentrations en TS supérieures à 50 mg.l⁻¹ ces valeurs oscillent entre 1,3 et 3% (contribution des sols du bassin versant)

De telles variations suggèrent l'existence de **deux réservoirs de matières organiques d'origine différente selon les saisons, autochtone phytoplanctonique et allochtone pédologique.**

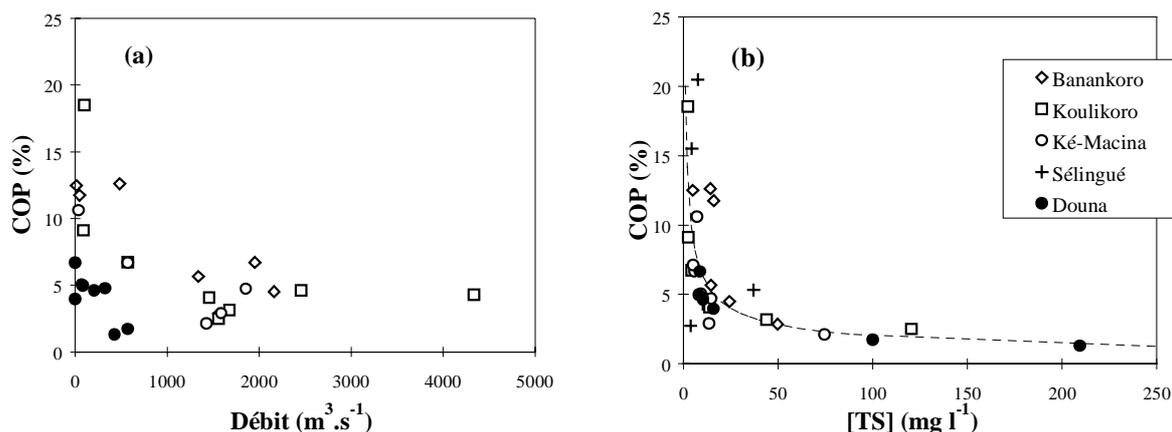


Figure 85. Relation entre les teneurs relatives en COP et le débit (a) ; relation entre COP et la quantité de particules filtrées (TS>0,45µm) (b), pour les 5 stations du bassin du Niger amont.

Il existe deux mécanismes qui agissent en opposition. D'une part, l'augmentation des particules en suspensions est générée par l'arrivée de l'onde de crue qui entraîne ainsi un lessivage des roches et de l'horizon humique des sols du bassin versant. D'autre part, ce sont les particules minérales qui sont majoritairement arrachées au bassin versant amont, ce qui a pour conséquence de "diluer" la matière organique par rapport à la matière minérale. C'est l'arrivée de cette matière minérale provenant du bassin amont et transportée par le fleuve qui conduit à une dilution des particules organiques autochtones.

La Figure 85 montre également la différence entre les stations de Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina, pour lesquelles une dispersion des valeurs importantes en basses eaux sont observées (entre 2,1 et 18,5 %), et la station de Douna sur le Bani pour laquelle, les valeurs relatives en carbone particulaire sont toujours plus faibles (entre 1,3 et 6,65 %). Sur cette station, d'une part les concentrations en MES sont très importantes (chapitre IV) et d'autre part les étiages sont plus sévères... La station de Sélingué sur le Sankarani présente des teneurs relatives particulièrement importantes entre 2,75 et 20,45 % (effet du barrage?) qui peut expliquer les valeurs plus importantes à Koulikoro qu'à Banankoro.

1.2.3. Les éléments traces dans la phase particulaire

Les concentrations en éléments traces dans la phase particulaire ($> 0,2 \mu\text{m}$) sont obtenues de manière indirecte à partir des concentrations totales (chapitre II). En effet, les mesures faites sur la phase totale (eau brute ou "bulk") sont difficilement interprétables pour les éléments "insolubles", c'est en fait une mesure de la quantité de MES dans les eaux du bassin : presque tous les éléments dans la phase totale (ppb) sont très fortement corrélés ($r > 0,9$) aux MES (en mg.l^{-1}), exceptés pour Zn, Rb, Sr, Ba, Mo. Pour les éléments qui se partagent entre les deux phases, les deux mesures dans les phases particulaire et dissoute sont donc nécessaires.

Remarques : Rappelons que pour les éléments Cr, Cu, Zn, Pb, et U, la concentration dans la phase totale était parfois inférieure à celle dans la phase dissoute (chapitre II, annexe 1). Ces échantillons ne sont pas pris en compte dans le calcul des moyennes.

1.2.3.1. Abondances relatives en éléments

Les résultats bruts sur l'ensemble des échantillons dans la phase totale sont en annexe 4. Les concentrations moyennes pondérées par les débits dans la phase particulaire (éléments pour lesquels au moins 70 % des valeurs étaient supérieures à la limite de détection) sont reportées dans l'annexe 5. Les valeurs moyennes sont présentées dans le Tableau 47. A titre de comparaison les valeurs sur le Congo (Dupré *et al.*, 1996) et l'Amazone (Gaillardet *et al.*, 1997) sont également reportées.

Une première remarque est que les concentrations moyennes pondérées par les débits sur le Niger sont proches de celles des deux hydrosystèmes. Par exemple, les concentrations en La varient de 25,2 à 63,5 ppm sur le Niger contre 37 à 57,4 ppm sur l'ensemble des rivières amazoniennes et congolaises (exception faite des rivières noires de type "Coca-Cola "). Les autres terres rares suivent les mêmes variations que La, en raison des forts taux de corrélation entre terres rares. La Figure 86 représente les relations entre La et Ce et La et pH pour ces différentes rivières. Ainsi, seules les concentrations en Pb sont très faibles, ou inversement, les concentrations en éléments Sr, Cr, Ni et Co sont plus importantes sur le bassin du Niger amont par rapport aux deux grands hydrosystèmes.

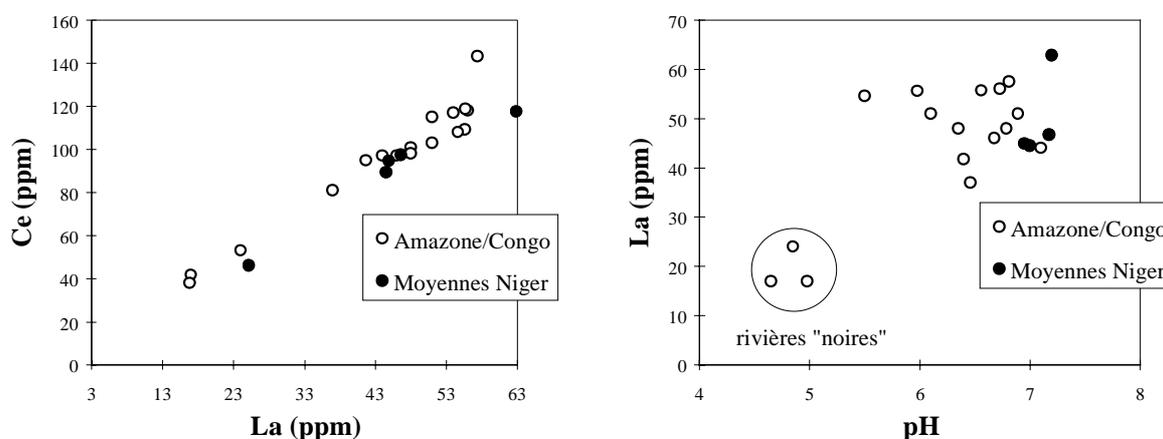


Figure 86. Relations entre La et Ce et La et pH pour les différentes rivières.

	Bassin de l'Amazonie										Bassin du Congo										Bassin du Niger Amont			
	Rio Negro	Rio Solimoes	Rio Madeira	Rio Uruçara	Trompetas	Rio Tapajos	Amazonie 6	Amazonie 20	Amazonie oubangui 1	Lobaye	Zaire	Likouala	Sangha	Alima	Kasai	Congo 64	Ban.	Kou.	Kéna.	Dou.				
Cs	3,7	8,6	15	3,7	3,4	9,3	10,4	11,7	4,4	4,7	6,9	1,4	4,6	1,9	2,7	4,4	3,3	3,4	3,8	9,6				
Rb	24	92	79	46	31,8	43,2	94	44	87	68	111	33	42	38	49	60	51,2	56,4	64,4	102,2				
U	2,4	4,1	3,9	2,7	4,3	3,5	3,7	3,9	3	2,8	4,3	0,9	2,5	0,9	1,7	2,4	2,4	2,8	2,5	4,0				
Th	12,5	15,4	19,1	15,7	14,7	14,7	17	16,7	17,6	17,8	15,6	4,7	15,1	6,9	13,3	13,8	12,1	13,2	13,3	18,1				
Pb	62,8	39,7	42	36,4	33,7	37,7	41,2	23,5	32,5	37,4	31,7	24,6	24,6	68,1	28,3	34,7	24,1	27,2	25,0	29,0				
K	11977	17540	13267	11342	5276	6064	17156	5744	10677							9110	18,6							
Ba	161	640	685	355	278	568	604	597	302	236	454	123	346	125	312	339	575	569	595	420				
La	24	44	56	37	51	46	48	51	57,4	55,7	55,6	17	54,6	16,9	48	41,7	44,5	44,9	46,6	62,9				
Ce	53	97	118	81	115	97	101	103	143,2	118,7	109,3	41,8	107,9	37,9	98,2	94,8	89,2	94,5	97,3	117,6				
Ta	1,8	1,6	1,9	1,1	2,2	1,4	1,6	1,6	1,6	1,8	2	0,73	1,2	0,56	1,4	1,6	1,1	1,5	0,8	2,8				
Hf	1,4	6,6	4,4	2,7	4,6	4,9	4,5	4,4	3,7	3,9	4,2	1,6	3	1,4	3,7	4	2,4	2,1	1,7	3,4				
Nd	21,8	43,5	53,7	31,7	45	46,5	47,4	47,4	56	57	49	12	46	14	43	39	35,3	36,5	37,2	52,0				
Zr	110	176	109	72	56	40	150	74	72	78	78	66	40	51	51	52	137	133	117	101				
Sr																								
Na		12080	5729	2372	2149	7411	6492	5632	2520	2000	3260		2950	1480	2890	2590								
Sm	3,6	8,3	9,8	5,3	6,7	8,3	8,5	9,1	9,7	10,1	8,4	2,1	8,2	2,3	7,1	6,7	5,3	6,0	6,9	9,3				
Eu	1,9	1,7	2,2	1,1	1,1	1,8	2,1	1,9	2,1	2,3	1,8	0,6	1,9	0,75	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	2,1				
Tb	0,36	1	1,13	0,53	0,6	0,93	1,04	0,98	1,1	1,2	0,86	0,28	0,88	0,28	0,69	0,72	0,7	0,8	0,7	1,2				
Yb	1,3	3,9	3,5	1,9	2,3	3,4	3,6	3,7	3,3	3,7	3	0,9	2,9	0,98	2,6	2,6	1,5	2,2	1,6	2,8				
Ca	24700	29300	26400	13800	21000	25400	28200	26500	26400							25000								
Sc	9,3	18,1	19,4	8,5	11	16,9	18,9	18,6	20,4							16,1								
Fe	41423	55023	62639	92948	80591	59997	71110	65515	85960							78420								
Co	8,1	21,1	18	11,1	7,4	16,4	21,9	17	21,8	23,8	27,2	6	25,3	8,1	17	23,9	25,8	24,8	23,5	24,7				
Cr	52	77	88	99	79	86	76	100	133,2	141,5	113,8	71,28	147,1	66,02	131,1	119	179	163	164	158				
Ni	69	55	43	20	14	37	50	38	99,6	80,3	73,7	129,8	141,4	53,4	73,8	65,6	87,5	82,7	81,6	79,2				
pH	4,9	7,1	6,7	6,5	6,1	6,7	6,8	6,9	6,8	6,6	6,0	4,7	5,5	5,0	6,4	6,4	7,000	6,950	7,175	7,2				
MES	5	53	67	8	13	6	36	34	29,7	16,2	30,6	5,9	18,6	13,8	16,8	20,7	13,8	27,9	54,6	99,3				
COP									4,3	5,55	4,62	13,6	10,1	6,78	4,95	5,1	8,1	8,4	5,6	4,0				

Tableau 47. Comparaison des concentrations en éléments traces (ppm) dans la phase particulière du bassin du Niger avec d'autres hydrosystèmes tropicaux (Congo et Amazonie).

Une deuxième remarque importante est la variabilité entre les stations du bassin du Niger amont. Pour permettre d'avoir une vue d'ensemble sur les différences entre stations, les concentrations moyennes obtenues dans la phase particulaire des différentes stations du bassin amont du Niger sont normalisées aux concentrations mesurées dans les suspensions à la station de référence (la plus amont) de Banankoro sur le Niger. Ces différents diagrammes, représentés dans la Figure 87, amènent plusieurs remarques :

- la station de Douna sur le Bani présente des concentrations supérieures à celle du Niger à Banankoro (rapport > 1),
- inversement la station de Sélingué sur le Sankarani présente des concentrations normalisées <1 ;
- les 2 autres stations du Niger plus aval (Koulikoro et Ké-Macina) montrent des rapports proche de 1 et ressemblent donc fortement à la station de Banankoro.

Cependant les diagrammes ne sont pas plats (rappelons que si les éléments étaient dans les mêmes proportions dans les particules de chaque station du bassin du Niger amont, le diagramme serait plat). Il y a donc des différences notables et notamment au niveau des éléments solubles, (appauvrissement ou enrichissement) entre éléments et entre stations.

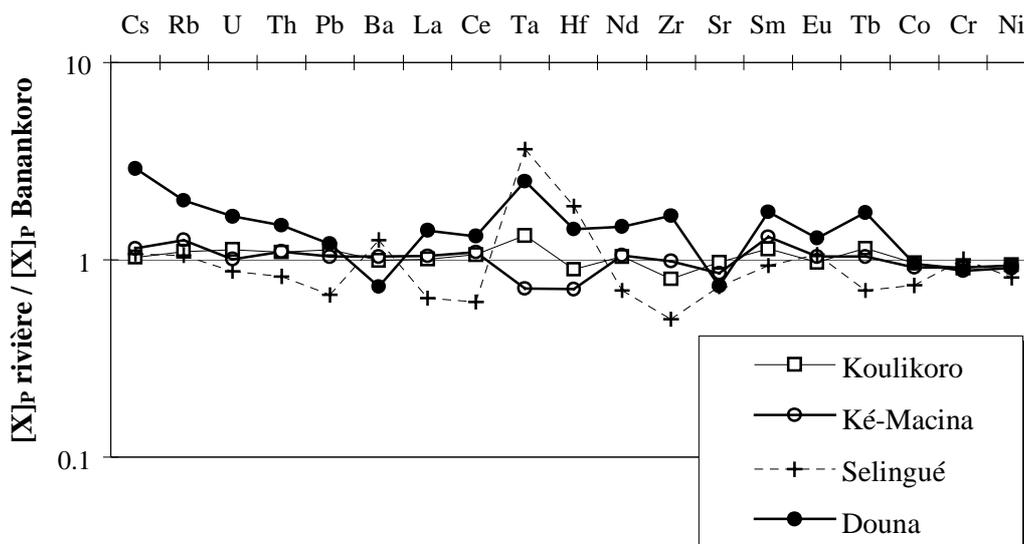


Figure 87. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire (pondérées par les débits) du bassin du Niger aux concentrations de la station de Banankoro sur le Niger.

Pour le Bani à Douna, les éléments Cs, Rb, et Ta sont nettement plus enrichis que les autres éléments par rapport à Banankoro sur le Niger et inversement nettement plus appauvris en Ba, Sr, Co, Cr et Ni (avec un léger appauvrissement en Eu). Pour le Sankarani à Sélingué, le commentaire du graphique est plus délicat puisqu'il s'agit d'une moyenne arithmétique des concentrations et seulement sur 4 échantillons (cf. annexe 5). Toutefois, les éléments Ba, Ta et Hf semblent enrichis par rapport

aux autres éléments alors que Pb, La, Ce, Nd, Zr, Sr, Tb et Co semblent appauvris. Les différences entre Koulikoro et Banankoro sur le Niger sont moins importantes, le diagramme est presque plat, on observe toutefois un enrichissement en Ta, très léger en Rb, U, Th, Pb, Sm et Tb et un appauvrissement également peu important en Zr et Hf, et dans une moindre mesure pour Cr et Ni. Les concentrations à la station de Ké-Macina sur le Niger, ont été normalisées aux concentrations de la station de Koulikoro : les rapports sont proches de 1, avec toutefois des différences importantes en Ta et Hf (anomalie négative) et Zr (anomalie positive). Cs, Rb sont, dans une moindre mesure, enrichis par rapport à Koulikoro, tandis que les éléments U et Sr sont appauvris.

Les différences d'appauvrissement entre stations en éléments solubles Sr, Ba, U et Rb soulignent sans doute la variabilité des zones sources de matières et/ou des différences dans les mécanismes d'altération.

1.2.3.2. Spectres des éléments normalisés à la croûte continentale

Le même type de graphique déjà utilisé pour la phase dissoute et ci-dessus, est employé dans la Figure 88 pour représenter les concentrations normalisées à la croûte continentale moyenne définie par Taylor et McLennan (1985) dans la phase en suspension (ppm).

Indépendamment des variations de concentrations évoquées ci-dessus, les diagrammes des concentrations moyennes normalisées à la croûte des 5 stations étudiées du bassin du Niger amont sont assez bien superposables à quelques exceptions près. Pb et Ta sont des éléments dont les variations sont erratiques, non corrélées avec celles des autres éléments. Ba sur la station de Sélingué n'est pas appauvri contrairement aux autres stations. L'observation de ces spectres, permet toutefois de retrouver la distinction déjà évoquée dans la phase dissoute (§1.1.2.) et d'avancer quelques interprétations :

- **Les éléments Rb, U, Ba, Sr** sont très appauvris par rapport à leurs voisins. Sr et Rb étant les éléments les plus fortement appauvris, U l'étant beaucoup moins. Ca et Na ne sont pas mesurés dans la phase particulaire, mais font partie de ce groupe (Dupré *et al.*, 1996 ; Gaillardet *et al.*, 1997). Cette forte dépression dans la phase particulaire associée à l'enrichissement dans la phase dissoute (Figure 88a) a été interprétée comme une mobilisation plus rapide des éléments les plus solubles de la roche mère lors de l'altération chimique (Dupré *et al.*, 1996). Cet appauvrissement plus rapide des éléments les plus mobiles pourrait alors concentrer tous les autres éléments restants dans la phase altérée des sols.
- **Les deux éléments Zr et Hf** sont aussi bien appauvris dans la phase dissoute que dans la phase particulaire. Ceci suggère que ces éléments se trouvent dans la phase non échantillonnée des eaux, i.e., la fraction sableuse. En effet, Dupré *et al.* (1996) rapportent les mêmes complémentarités « phase en suspension/phase dissoute », entre les matières en suspension et la fraction sableuse : les éléments Zr et Hf, peu mobiles dans les processus d'altération se retrouvent par tri granulométrique essentiellement dans le zircon, minéraux lourds, présents essentiellement dans le lit des rivières...

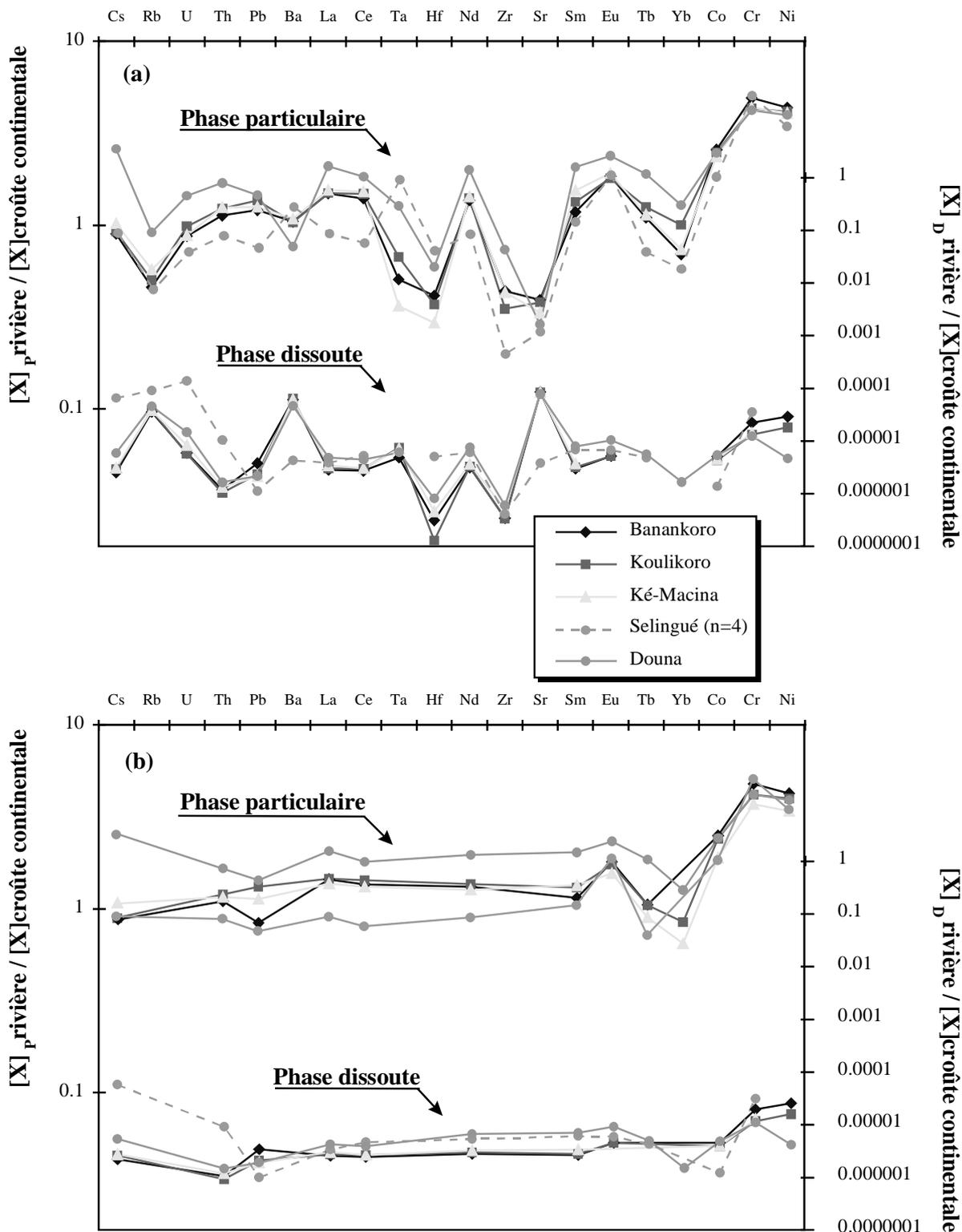


Figure 88. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire (pondérées par les débits) du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985) (a) ; diagramme de normalisation réduit (b).

- **Les autres éléments** (Cs, Th, Pb, TRs, Ta, Co, Cr, Ni), sont plus ou moins enrichis par rapport à leurs voisins. En premier ordre, si l'on ne regarde pas les éléments très solubles (ni Zr et Hf), les spectres normalisés à la croûte continentale sont presque plats (Figure 88b). Seul le Sankarani à Sélingué montre des valeurs de Cs, Th, Pb, La, Ce, Nd, Tb et Yb inférieures à la croûte. C'est aussi la station qui présente les quantités relatives de COP (% de matière filtrée à 0,45 μ m) les plus importantes. La présence de matière organique particulière sur les filtres pourrait expliquer la dilution par du matériel organique des autres éléments comme sur certaines rivières "noires" du bassin du Congo et de l'Amazone (Dupré *et al.*, 1996 ; Gaillardet *et al.*, 1997). La Figure 89a illustrent pour le cas de Th les relations entre les concentrations moyennes de Th et COP (%). Les valeurs de l'Amazone et du Congo sont portées à titre indicatif. La presque totalité des éléments (Ti, V, Co, Rb, Zr, Y, TRs, U) suit cette tendance. Toutefois, cette relation forme un nuage de points assez dispersés à l'échelle des échantillons individuels (Figure 89b).
- Il apparaît aussi dans la Figure 88b que les éléments **Cr** et **Ni** sont nettement enrichis par rapport aux autres éléments : l'hypothèse d'un apport supplémentaire en Ni par le matériel organique (complexation avec des molécules organiques) a été avancée par Dupré *et al.* (1996) sur le bassin du Congo.

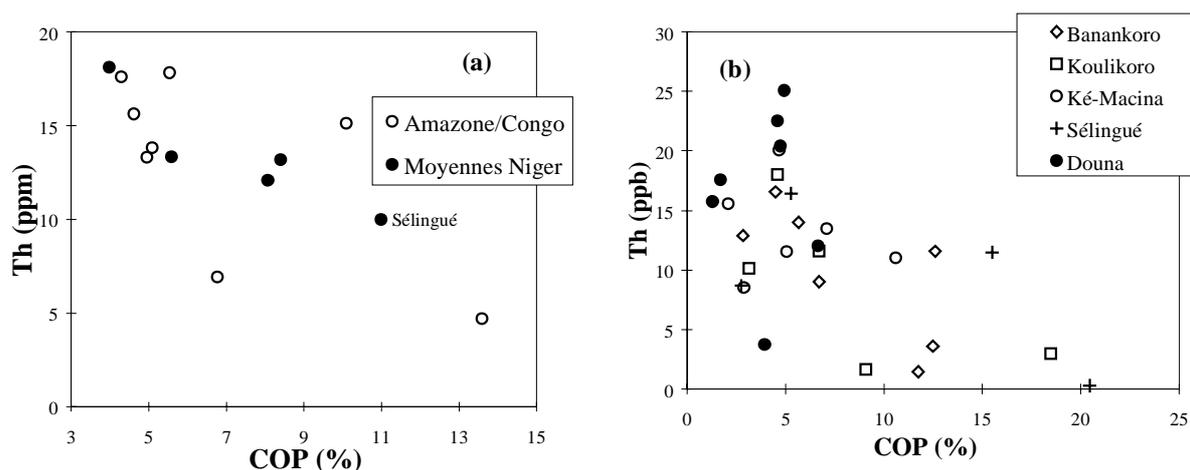


Figure 89. Exemple de relations entre Co et Th pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).

- Plus particulièrement pour les **Terres Rares**, les TRs lourdes (Tb et Yb) sont nettement appauvris par rapport aux TRs légères (La, Ce). Effectivement, les différentes stations du bassin amont présentent des profils en terres rares (Figure 90) légèrement enrichis en TRs légères proches de ceux observés sur l'Amazone (affluent rive gauche) et le Congo, avec des rapports moyens La/Yb normalisés variant de 1,5 à Sélingué (Sankarani) à 2,1 à Ké-Macina (3^{ème} station sur le Niger). De même, tous les spectres moyens présentent une anomalie positive en Eu. Toutefois, celle-ci disparaît si les concentrations sont normalisées aux sédiments du Congo. Ceci suggère que cette anomalie est un effet de normalisation à la croûte (on observe la même chose dans la phase

dissoute). Autre fait remarquable est que Ce est légèrement appauvri par rapport à La et Pr pour Sélingué et Douna.

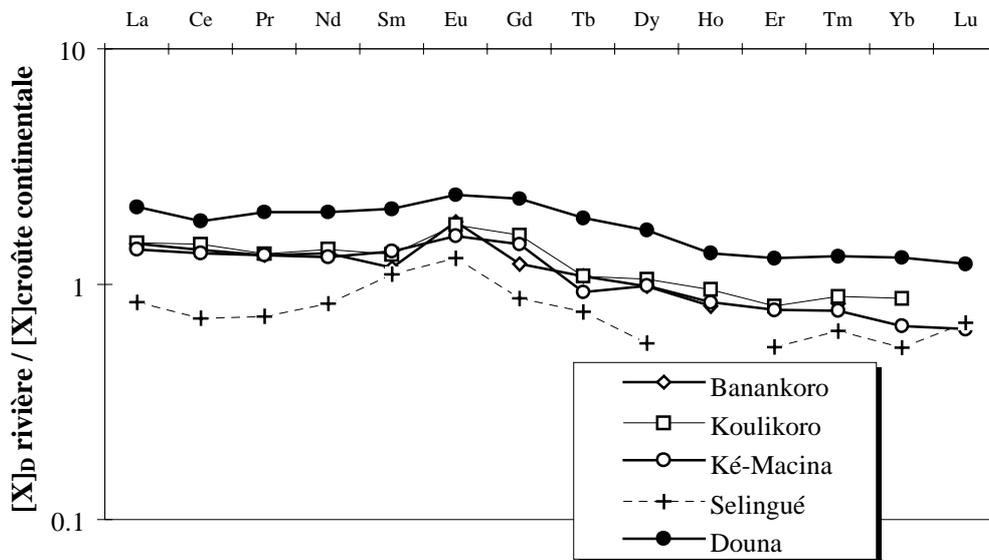


Figure 90. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes en Terres Rares dans la phase particulaire du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).

Un premier résultat de cette étude est que l'analyse des concentrations absolues et/ou relatives (par rapport à la croûte), aussi bien dans la phase dissoute que particulaire sont tout à fait concordantes avec les observations faites dans les deux plus grands hydrosystèmes tropicaux peu anthropisés du globe. Les données présentées dans ce travail, ainsi que les méthodes analytiques sont donc cohérentes.

2. BILAN DES ELEMENTS EN TRACES DANS LE NIGER AMONT - CONTRIBUTIONS ANTHROPIQUES ?

Cette seconde partie du chapitre permet dans un premier temps de synthétiser les résultats sur le comportement des éléments traces dans les eaux du Niger et du Bani et notamment leur distribution entre phases dissoute et particulaire. Dans un deuxième temps, le calcul des facteurs d'enrichissement permet de répondre à un des premiers objectifs par rapport à l'analyse des éléments en traces dans la phase dissoute et totale du Niger et du Bani, qui était de quantifier une éventuelle contamination du Niger par les éléments traces métalliques.

2.1. Distribution entre les deux phases

Les concentrations dans la phase totale et dissoute ont montré l'affinité pour la plupart des éléments pour la phase particulaire. **Les concentrations apparentes en éléments traces dans les eaux de surfaces et dans les suspensions, vont autant dépendre des conditions d'altération sur le bassin versant que de la chimie des rivières.** La distribution entre phases dissoute et solide est, a priori, régulée par un coefficient plus ou moins bien dénommé "coefficient de partage" K_d ou de solubilité (Zhang *et al.*, 1994 ; Roy, 1996), défini pour chaque élément comme :

K_d : Coefficient de partage pour l'élément X

$$K_d = 1000 \times \left(\frac{(X)_{particulaire}}{(X)_{dissous}} \right) \quad (X)_{dissous} : \text{Concentration de l'élément X dans la phase dissoute en } \mu\text{g.l}^{-1} \text{ (ou ppb)}$$

$(X)_{particulaire}$: Concentration de l'élément X dans la phase particulaire en $\mu\text{g.g}^{-1}$ (ou ppm)

Dans cette étude, on dispose pour chaque élément de deux mesures de concentration (en ppb) : l'une dans la phase totale, l'autre dans la phase dissoute. On peut donc calculer la part de l'élément en pourcentage sous forme dissoute de la manière suivante :

$\%S(X)$: pourcentage de l'élément X dans la phase dissoute

$$\% S(X) = \left(\frac{(X)_{dissous}}{(X)_{total}} \right) \times 100 \quad (X)_{dissous} : \text{Concentration de l'élément X dans la phase dissoute en ppb}$$

$(X)_{total}$: Concentration de l'élément X dans la phase totale en ppb

Ce calcul a été réalisé sur l'ensemble des stations du bassin amont du Niger, pour chaque mesure ; et pour les éléments pour lesquels la concentration totale n'est pas trop proche de la limite de détection ($(X)_{total} > 5DL$). Les éléments ont été classés de manière à présenter un %S croissant.

A titre d'exemple, les distributions entre les phases particulaires et dissoutes obtenues pour chaque échantillon pour les stations de Banankoro et Douna, sont reportées dans la Figure 91 et Figure 92. Les moyennes sont également figurées.

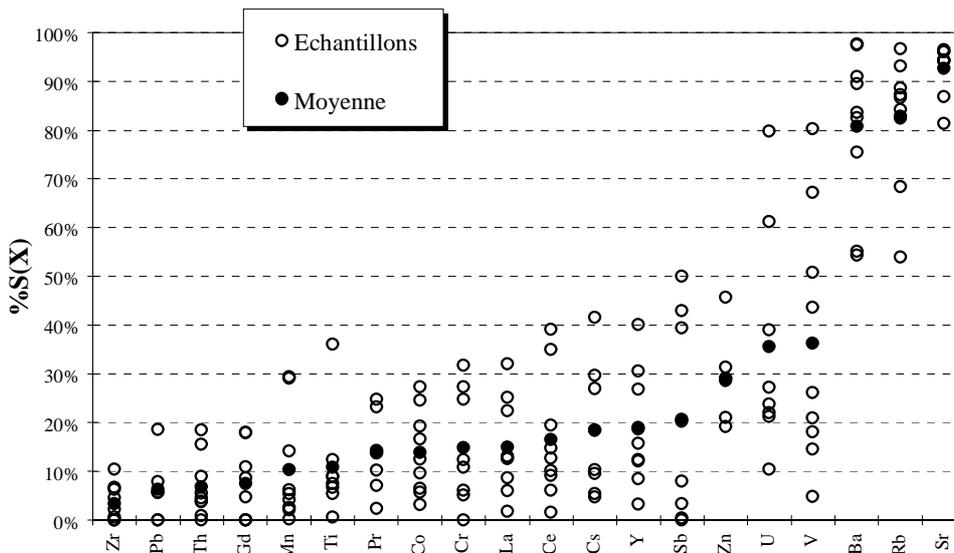


Figure 91. Distribution entre les phases particulières et dissoutes obtenues pour la station de Banankoro (Niger)

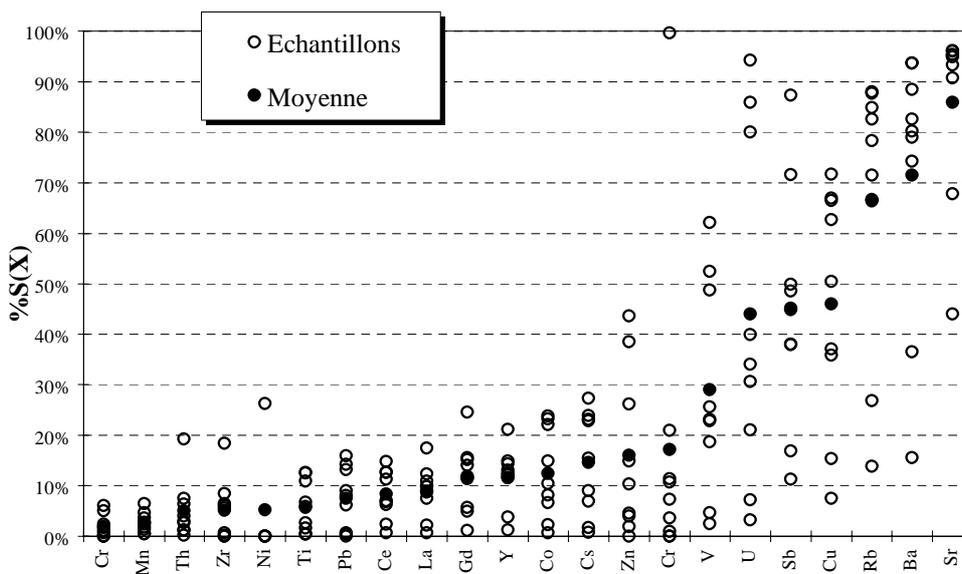


Figure 92. Distribution entre les phases particulières et dissoutes obtenues pour la station de Douna (Bani)

L'examen de ces figures permet de mettre en évidence 3 populations d'éléments :

- Une population qui présente toujours, quelle que soit la station, les %S dans la phase dissoute les plus élevés. On y retrouve les éléments connus comme solubles : Sr, Ba, Rb. La proportion de Ba transporté dans la phase dissoute est toutefois plus importante sur les stations de Sélingué (sur le Sankarani) et de Douna (sur le Bani) que sur les 3 stations du Niger.

- Une population qui est préférentiellement dans la phase particulaire avec des %S individuels qui ne sont jamais supérieurs à 50% dans laquelle on retrouve les éléments considérés comme peu mobiles lors de l'altération telles que les terres rares qui se retrouvent presque entièrement dans la phase particulaire.
- Une population intermédiaire, dont la gamme de variation est très grande : V, U, Cu et Sb.

Pour l'ensemble des éléments des variations importantes sont observées suivant la date des prélèvements (celle-ci correspond à des étapes du cycle hydrologique différentes). Le pH étant assez stable dans les eaux du Niger, on peut s'attendre à ce que ces variations soient plus ou moins bien corrélées avec les MES et le COP (on a d'ailleurs montré que la concentration totale de certains éléments était assez bien corrélée avec COP et MES). Les relations %S versus MES ont été étudiées pour chaque élément. La Figure 93 donne quelques exemples de ces relations.

Les relations %S versus MES amènent quelques remarques :

- Les éléments Sr, Ba, et Rb montrent un %S dans la phase dissoute qui diminue nettement lorsque les MES sont importantes. La Figure 93 représente notamment les variations de distribution de Rb en fonction de la quantité de MES dans l'échantillon.
- Ce type de décroissance de %S est également assez nette pour Co, V, U et La. Pour les éléments Sb, Cu, Pb, Cr, Mn, Th les valeurs sont plus dispersées pour les faibles concentrations en MES mais la tendance est respectée.
- les distributions dissous-total de Zn forment en revanche, un nuage de points.

Ce type de relation n'est pas étonnant. Effectivement, la classification des éléments réalisée à l'aide de %S, ne tient pas compte des processus de piégeage des différentes substances sur les particules. Zhang *et al.* (1994) sur le fleuve Jaune, Roy (1996) sur la Seine, ont montré que dans les cas où les concentrations en MES et le pH sont élevées, la quantité de particules dans la rivière avait une influence sur la distribution des métaux entre phases dissoute et particulaire. Une loi, construite à partir des définitions du coefficient de partage K_d (défini ci-dessus), et de la concentration totale d'un élément X dans la rivière, ($(X)_{total} = (X)_{dissous} + MES (X)_{particulaire}$), permet de relier la proportion de l'élément X dans la phase soluble au K_d et à la concentration en MES (MES) :

$$\% S(X) = \frac{1000}{1000 + MES K_d}$$

$\%S(X)$: pourcentage de l'élément X dans la phase dissoute

MES : Concentration des matières en suspensions en $mg.l^{-1}$

K_d : Coefficient de partage pour l'élément X

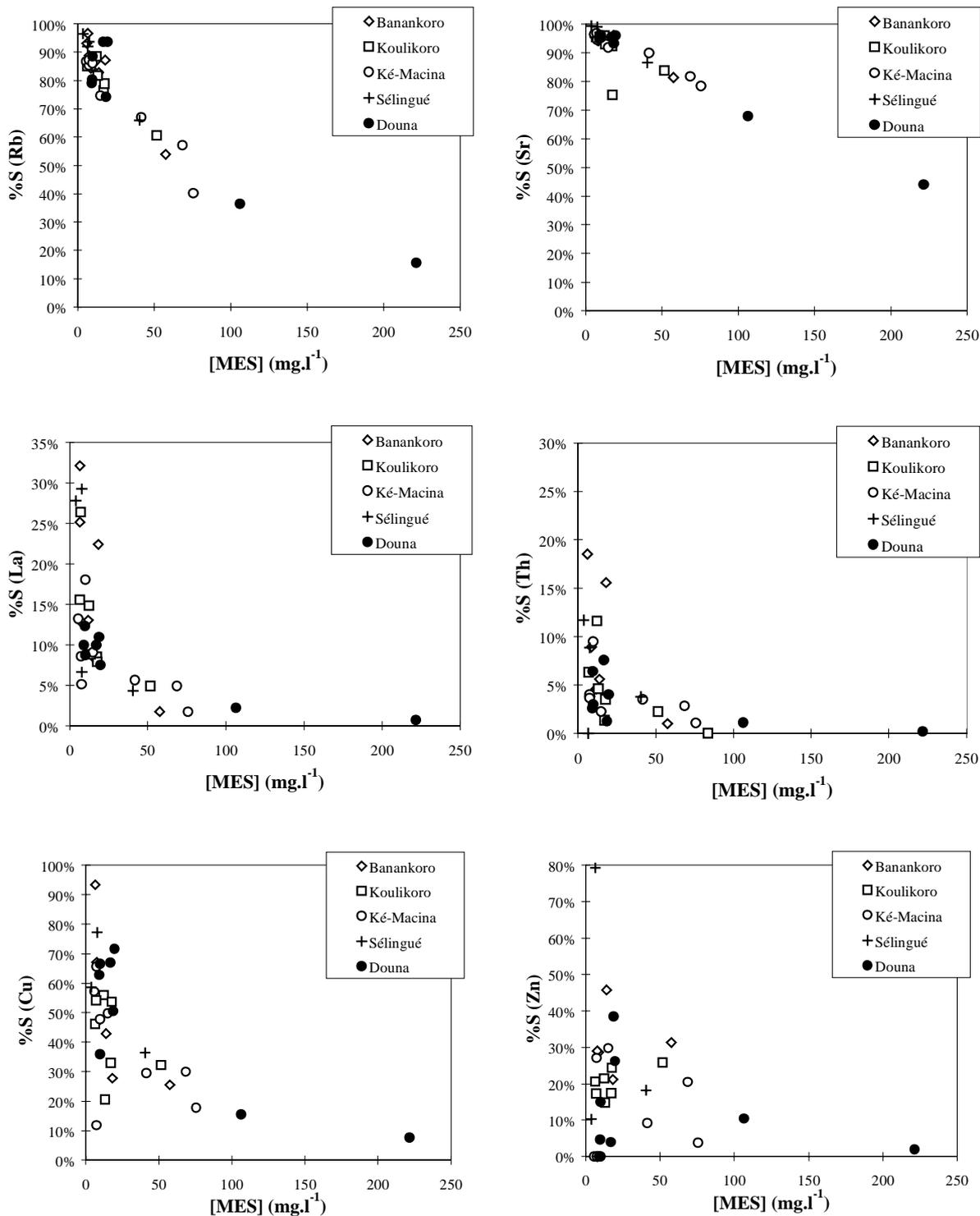


Figure 93. Relation entre %S individuels de quelques éléments et la quantité de MES (mg.l⁻¹) pour les 5 stations du bassin du Niger amont.

Ainsi :

- Pour un même échantillon (la quantité de MES est constante) %S va uniquement dépendre de K_d , et être inversement proportionnelle à ce dernier.
- Pour un même élément (avec un K_d donné), pris dans différents échantillons (MES variables), %S décroît avec l'augmentation de la quantité de MES, selon une loi hyperbolique (exemple pour Rb et La dans Figure 94).

Les très faibles S% s'expliquent donc sans doute par la présence de particules minérales en quantité importante lors de la montée de la crue (chapitre IV). Ces relations avec les MES induisent que les stations du Niger amont (Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina) et du Sankarani (Sélingué) dont les variations en MES sont beaucoup plus faibles, montrent des %S plus stables que la station du Bani dont les eaux sont beaucoup plus turbides en montée de crue (les taux de MES peuvent dépasser 200 mg.l^{-1} tandis qu'à Banankoro le maximum de MES atteint est de 100 mg.l^{-1}).

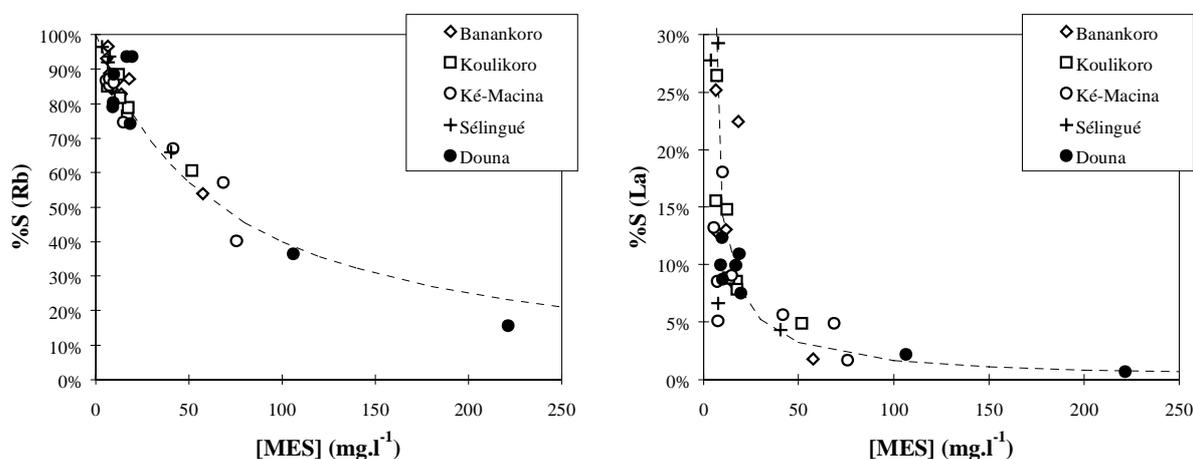


Figure 94. Exemple de relation entre la proportion de l'élément X dans la phase soluble et la concentration en MES pour Rb et La.

Pour les très faibles concentrations en MES, les valeurs de %S sont plus importantes mais aussi beaucoup plus dispersées pour les éléments "non solubles". Cette dispersion tient sans doute au fait que les faibles teneurs en MES se rencontrent lors de la décrue et en basses-eaux (chapitre IV). Dans le premier cas (décrue), il se produit une dilution des MES par le Débit. Dans le cas des basses-eaux, des développements de phytoplancton sont possibles ; la matière particulaire peut alors être représentée dans des proportions importantes par de la matière organique particulaire (% de COP important et également assez variable, § 1.2.2.). L'existence des éléments les plus insolubles dans la phase dissoute pour ces échantillons est donc sans doute due à la présence d'une phase colloïdale. En effet, les éléments traces mesurés dans la phase dissoute ($<0,2\mu\text{m}$) ne sont pas forcément réellement en solution. Les petites particules colloïdales (e.g., taille entre 0,2 et 0,01 μm) peuvent passer à travers le filtre et se retrouver dans la phase filtrée (et donc dans la phase dissoute). De nombreuses études ont

révélé cet artefact de filtration, et montré que les concentrations en élément traces (e.g., Terres Rares) pouvait décroître de 50 % ou plus lorsqu'on compare les concentrations mesurées dans la phase dissoute (<0,2µm) et les concentrations mesurées après ultrafiltration (Viers *et al.*, 1997). Une filtration inférieure à 0,2 µm permettrait de savoir si ces éléments sont transportés dans la fraction dissoute "vraie" ou par la phase colloïdale.

Les distributions entre les phases particulaires et dissoutes obtenues pour chaque échantillon ont permis de mettre en évidence :

- Une composition chimique moyenne du Niger dominée par la phase particulaire (>0,2µm)
- Un "contrôle", pour la plupart des éléments, de la quantité de chaque élément dans la phase aqueuse par la quantité de particules dans la rivière. Ainsi, entre les différents échantillons à teneurs en MES variables, la proportion soluble d'un même élément décroît avec l'augmentation de MES. Ce processus correspondrait à une dilution simple des MES par le débit .
- Une influence de la phase colloïdale qui permet à des éléments considérés comme "insolubles" de passer en solution lors des basses-eaux.

2.2. Facteur d'enrichissement

Comme dans le cas des précipitations (chapitre V), le facteur d'enrichissement calculé pour chaque élément par rapport à la croûte continentale moyenne définie par Taylor et Mc Lenman (1985), permet de faire une première estimation de la contamination des eaux du fleuve par des éléments d'origine anthropique. Les FE ont été calculés sur les différents cours d'eau, à la fois **pour les concentrations totales moyennes** (pondérées par les débits) et pour chacun des échantillons (les concentrations devant être supérieures à 5 fois la limite de détection). Le fer n'étant pas dosé dans les eaux du fleuve, c'est Th qui est pris comme élément de référence crustale dans l'équation :

$$FE = \frac{([X]/[REF])_{Ech}}{([X]/[REF])_{Croute}}$$

Les résultats ainsi que quelques paramètres statistiques (coefficient de variation, médiane, minimum, maximum, quartiles inférieur et supérieur) sont présentés dans le Tableau 48 au Tableau 52 et la Figure 95. Dans cette dernière, les éléments ont été classés arbitrairement, pour plus de lisibilité, par facteur d'enrichissement moyen croissant par rapport à la station de Banankoro sur le Niger. N'ayant pas de données de débit sur le Sankarani à Sélingué, la moyenne présentée ici est une moyenne arithmétique des FE observés.

	FE Moyen	Nbval.	CV%	FE médian	Min.	-	Max.	FE 25%	-	FE 75%	Nombre de FE>10
Ti	0,95	9	38%	0,71	0,41	-	1,17	0,62	-	1,10	
V	1,64	9	75%	1,79	1,51	-	7,19	1,66	-	2,26	
Cr	4,50	8	65%	4,08	2,96	-	13,84	3,74	-	7,14	2
Mn	1,61	9	83%	1,92	1,29	-	8,37	1,49	-	2,39	
Co	2,16	9	50%	2,77	1,64	-	6,01	1,97	-	3,43	
Ni	3,19	3	30%	3,61	3,40	-	5,69	3,50	-	4,65	
Cu	2,11	9	92%	2,83	1,73	-	15,48	2,50	-	6,67	2
Zn	1,44	7	96%	1,94	0,88	-	12,64	1,35	-	11,70	3
Rb	1,40	9	154%	3,54	0,81	-	40,9	1,85	-	4,33	2
Sr	2,79	9	170%	8,23	1,06	-	131,66	4,31	-	13,40	3
Y	0,68	9	20%	0,68	0,60	-	1,00	0,64	-	0,90	
Zr	0,42	9	49%	0,36	0,22	-	0,77	0,28	-	0,52	
Mo	1,63	9	150%	2,86	0,96	-	38,24	1,48	-	7,20	
Cd	8,49	6	163%	30,18	2,56	-	350	6,28	-	70,82	
Sb	48,7	7	129%	10,5	2,3	-	203	10	-	67	3
Cs	0,77	9	71%	0,82	0,70	-	3,09	0,72	-	1,24	
Ba	2,59	9	160%	5,98	1,38	-	82,5	3,49	-	9,89	2
La	1,31	9	21%	1,34	0,93	-	1,76	1,15	-	1,60	
Ce	1,24	9	29%	1,25	0,70	-	1,75	1,08	-	1,47	
Nd	1,19	9	30%	1,21	0,86	-	2,18	1,11	-	1,52	
Yb	0,57	6	18%	0,65	0,55	-	0,88	0,60	-	0,73	
Pb	0,89	8	40%	0,99	0,36	-	1,59	0,81	-	1,33	
U	0,92	9	81%	1,00	0,76	-	4,44	0,94	-	1,25	

Tableau 48. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Banankoro (Niger).

	FE Moyen	Nbval.	CV%	FE median	Min	-	Max.	FE 25%	-	FE 75%	Nombre de FE>10
Ti	0,69	8	41%	0,68	0,31	-	1,02	0,48	-	0,92	
V	1,64	8	79%	1,76	1,42	-	7,68	1,67	-	2,74	
Cr	3,66	7	41%	3,52	3,33	-	8,32	3,38	-	4,79	
Mn	1,91	8	85%	2,65	1,42	-	11,67	1,88	-	5,27	1
Co	2,02	8	52%	2,22	1,68	-	5,51	2,05	-	3,10	
Ni	2,10	3	35%	3,49	2,94	-	5,58	3,21	-	4,53	
Cu	2,22	8	91%	3,89	1,68	-	15,44	2,13	-	6,57	2
Zn	1,14	8	75%	1,78	0,79	-	5,94	1,17	-	4,84	
Rb	1,57	8	141%	3,00	1,07	-	34,43	1,59	-	8,51	2
Sr	2,94	8	151%	5,94	1,49	-	93,97	3,10	-	21,72	3
Y	0,68	8	22%	0,69	0,65	-	1,13	0,68	-	0,77	
Zr	0,30	8	24%	0,31	0,19	-	0,39	0,23	-	0,36	
Mo	1,42	8	138%	2,25	0,69	-	29,74	1,39	-	12,27	2
Cd	8,48	4	148%	12,76	3,73	-	118,76	6,10	-	43,67	
Sb	6,5	5	112%	14,5	3,05	-	97	5,5	-	81	3
Cs	0,81	8	72%	0,92	0,74	-	3,61	0,80	-	1,51	
Ba	2,75	8	138%	4,69	1,59	-	57,05	2,95	-	15,60	2
La	1,26	8	7%	1,28	1,16	-	1,41	1,18	-	1,32	
Ce	1,25	8	6%	1,25	1,15	-	1,36	1,23	-	1,29	
Nd	1,17	7	10%	1,21	1,02	-	1,36	1,10	-	1,25	
Yb	0,69	6	27%	0,63	0,61	-	1,08	0,62	-	0,84	
Pb	1,15	7	47%	1,30	0,88	-	2,84	0,96	-	1,69	
U	0,85	8	58%	0,95	0,75	-	3,02	0,91	-	1,44	

Tableau 49. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Koulikoro (Niger)

	FE Moyen	Nbval.	CV%	FE median	Min.	-	Max.	FE 25%	-	FE 75%	Nombre de FE>10
Ti	0,58	7	27%	0,83	0,34	-	0,95	0,72	-	0,87	
V	1,38	7	36%	1,60	1,28	-	3,05	1,41	-	2,22	
Cr	3,07	7	23%	3,55	2,51	-	5,29	3,35	-	3,81	
Mn	0,86	7	59%	1,80	0,70	-	3,35	0,82	-	2,49	
Co	1,45	7	28%	2,15	1,32	-	2,65	1,52	-	2,40	
Ni	2,61	4	15%	2,94	2,38	-	3,41	2,69	-	3,17	
Cu	1,57	7	131%	1,87	1,25	-	16,31	1,64	-	3,10	1
Zn	1,04	7	44%	1,23	0,78	-	2,59	1,02	-	1,57	
Rb	1,05	7	80%	1,51	0,82	-	6,45	1,21	-	3,67	
Sr	1,33	7	99%	3,32	0,69	-	15,44	1,66	-	9,73	2
Y	0,62	7	17%	0,75	0,56	-	0,96	0,68	-	0,82	
Zr	0,32	7	11%	0,34	0,28	-	0,39	0,31	-	0,35	
Mo	1,20	7	79%	1,65	0,90	-	6,83	1,30	-	3,36	
Cd	5,41	5	71%	9,74	3,78	-	26,35	6,92	-	17,16	2
Sb	3,43	4	120%	10,23	2,5	-	16,7	3,6	-	16,5	2
Cs	0,96	7	22%	0,92	0,69	-	1,40	0,89	-	1,05	
Ba	1,47	7	84%	2,99	1,00	-	10,54	1,73	-	7,00	1
La	1,11	7	14%	1,38	1,02	-	1,56	1,19	-	1,42	
Ce	1,06	7	15%	1,31	1,02	-	1,50	1,06	-	1,33	
Nd	1,04	7	14%	1,23	0,97	-	1,44	1,10	-	1,33	
Yb	0,55	5	11%	0,61	0,50	-	0,67	0,60	-	0,66	
Pb	1,02	6	15%	0,99	0,85	-	1,25	0,96	-	1,16	
U	0,74	7	38%	0,91	0,59	-	1,78	0,88	-	1,37	

Tableau 50. Facteurs d'enrichissement moyens et paramètres à la station de Ké-Macina (Niger)

	FE Moyen*	Nbval.	CV%	FE median	Min.	-	Max.	FE 25%	-	FE 75%	Nombre de FE>10
Ti	0,58	4	32%	0,59	0,35	-	0,81	0,52	-	0,65	
V	1,88	3	20%	2,00	1,46	-	2,17	1,73	-	2,09	
Cr	5,97	4	116%	2,75	2,07	-	16,33	2,27	-	6,45	1
Mn	16,70	4	107%	12,68	1,14	-	40,31	3,63	-	25,75	2
Co	3,03	4	67%	2,49	1,24	-	5,90	1,87	-	3,65	
Cu	4,92	4	64%	4,65	1,52	-	8,86	3,05	-	6,52	
Zn	5,97	3	141%	1,44	0,76	-	15,70	1,10	-	8,57	1
Rb	9,99	4	79%	10,34	1,04	-	18,23	4,68	-	15,64	2
Sr	21,70	4	87%	21,25	1,13	-	43,19	9,08	-	33,87	3
Y	0,80	4	36%	0,77	0,48	-	1,17	0,69	-	0,88	
Zr	0,24	4	21%	0,24	0,19	-	0,31	0,21	-	0,27	
Mo	14,47	4	114%	9,12	1,40	-	38,24	4,80	-	18,80	2
Cd	5,54	4	116%	5,37	0,00	-	11,45	0,00	-	10,91	2
Sb											
Cs	2,08	4	51%	2,06	0,87	-	3,35	1,44	-	2,71	
Ba	14,36	4	80%	14,83	1,25	-	26,54	6,97	-	22,22	2
La	1,27	4	27%	1,19	0,99	-	1,71	1,01	-	1,45	
Ce	1,23	4	43%	1,01	0,88	-	2,01	0,90	-	1,34	
Nd	1,27	4	28%	1,25	0,92	-	1,68	1,00	-	1,52	
Pb	1,05	3	59%	0,78	0,62	-	1,76	0,70	-	1,27	
U	1,76	4	41%	1,87	0,79	-	2,50	1,49	-	2,14	

* moyenne arithmétique car pas de débit!

Tableau 51. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Sélingué (Sankarani)

	FE Moyen	Nbval.	CV%	FE median	Min.	-	Max.	FE 25%	-	FE 75%	Nombre de FE>10
Ti	0,85	9	38%	0,71	0,46	-	1,39	0,64	-	1,05	
V	1,46	9	39%	1,89	1,42	-	3,81	1,66	-	2,35	
Cr	2,53	9	55%	2,55	2,07	-	7,88	2,49	-	2,86	
Mn	0,62	9	74%	2,12	0,43	-	6,19	1,19	-	3,66	
Co	1,32	9	31%	1,99	1,23	-	3,24	1,64	-	2,09	
Cu	1,25	9	46%	1,89	1,05	-	4,19	1,59	-	3,02	
Zn	0,84	9	136%	1,17	0,63	-	10,83	0,76	-	2,45	1
Rb	0,80	9	78%	2,57	0,62	-	7,24	1,67	-	5,01	
Sr	0,57	9	99%	4,79	0,20	-	17,42	1,69	-	10	3
Y	0,75	9	14%	0,86	0,73	-	1,04	0,80	-	1,01	
Zr	0,44	9	20%	0,38	0,31	-	0,54	0,36	-	0,47	
Mo	0,88	9	60%	2,78	0,61	-	11,40	1,35	-	10,27	3
Cd	3,88	6	104%	8,69	0,97	-	16,48	6,41	-	9,50	2
Sb	2,32	9	80%	5,25	1,2	-	18,9	3,4	-	16	3
Cs	1,65	9	18%	1,64	1,43	-	2,27	1,55	-	2,13	
Ba	0,65	9	86%	2,84	0,46	-	9,48	1,78	-	5,66	
La	1,21	9	9%	1,30	1,18	-	1,52	1,21	-	1,41	
Ce	1,09	9	14%	1,22	0,99	-	1,49	1,15	-	1,30	
Nd	1,17	9	13%	1,39	1,11	-	1,62	1,19	-	1,41	
Yb	0,69	8	11%	0,78	0,66	-	0,92	0,72	-	0,83	
Pb	0,83	9	15%	0,91	0,75	-	1,21	0,83	-	0,95	
U	0,89	9	77%	1,35	0,66	-	4,86	1,06	-	3,18	

Tableau 52. Facteurs d'enrichissement moyens et paramètres statistiques à la station de Douna (Bani)

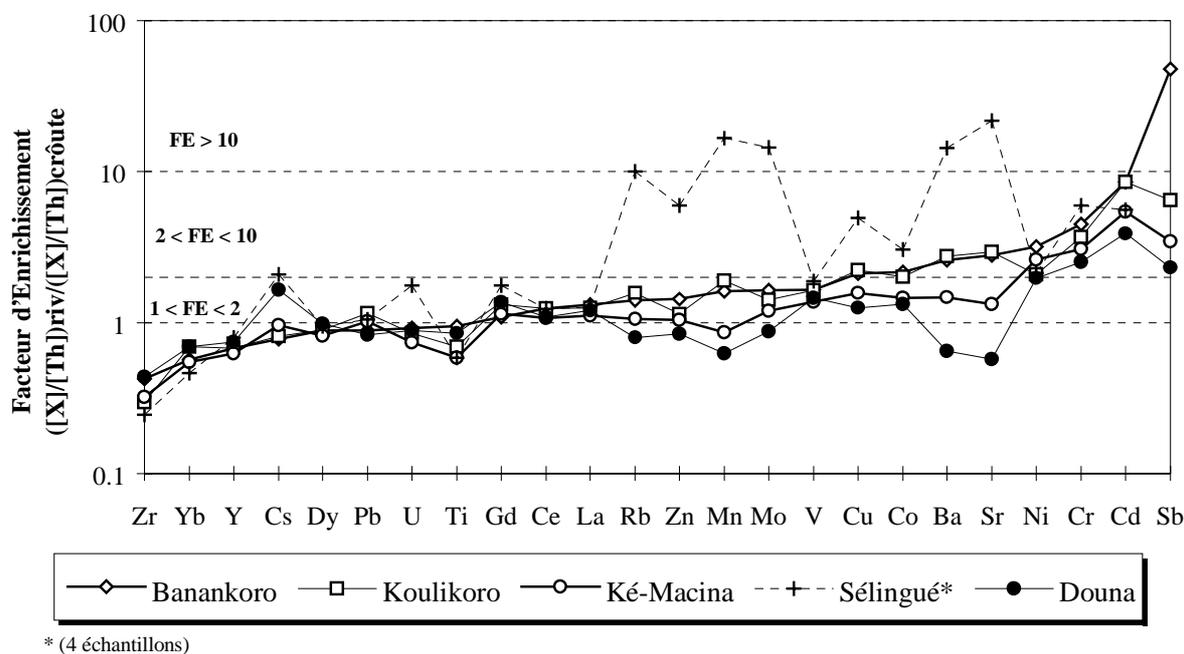


Figure 95. Facteurs d'enrichissement moyens obtenus pour les 5 stations du bassin du Niger amont (Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina sur le Niger ; Sélingué sur le Sankarani ; Douna sur le Bani).

Les FE moyens obtenus à partir des concentrations moyennes (pondérées par les débits) sont légèrement plus faibles que dans les précipitations. Ils ne dépassent en fait le seuil de 10 (seuil utilisé pour les précipitations pour définir les éléments « moyennement enrichis ») que sur la station de Sélingué (pour Rb, Ba, Sr et Mn et Mo) dont la concentration moyenne de départ n'est pas pondérée par le débit et pour Sb à la station de Banankoro. Une nouvelle valeur égale à **2** (critère déjà utilisé par Roy, 1996) est ainsi arbitrairement utilisée comme seuil pour séparer les éléments pour lesquels des apports autres que crustaux devront être invoqués. La seconde limite de **10** est maintenue pour permettre de séparer les **échantillons « moyennement enrichis » et « fortement enrichis »**. Ces seuils étant fixés de façon arbitraire, certaines exceptions seront prises en compte.

Avant de présenter les résultats, une remarque importante peut être faite sur la distribution des facteurs d'enrichissement individuels (Tableaux précédents) : pour un même élément et une même station, les FE peuvent être très variables d'un échantillon à un autre (les coefficients de variation peuvent être très élevés) et les écarts entre minimum et maximum très importants. Par exemple, à la station de Banankoro (n=9) les FE de Sr varient d'un rapport de 1 à 100. Inversement les terres rares possèdent les FE les moins variables et toujours les plus faibles. Cette importante variabilité implique un comportement parfois ambigu pour certains éléments.

C'est pourquoi, par la suite, on distinguera selon différents critères (valeurs seuil, FE moyens et variabilité individuelle des FE de chaque élément), plusieurs groupes d'éléments :

- Les éléments pour lesquels le FE moyen est inférieur à 2 et la valeur FE 75 (quart supérieur du facteur d'enrichissement) toujours inférieure à 2 seront considérés comme **"jamais enrichi"** et d'origine crustale. A l'opposé de ce groupe, on considère que les éléments dont les FE moyens sont supérieurs à 2 et les FE minimums (FE min.) toujours supérieurs à 2, comme **"toujours enrichi"** par rapport à la croûte continentale. La Figure 96a et Figure 96b illustrent la distribution des FE pour ces deux groupes.

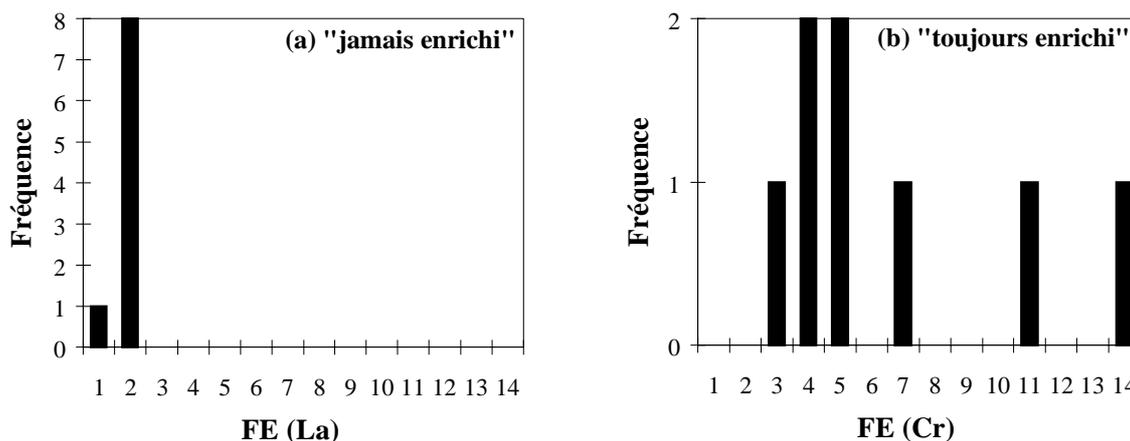


Figure 96. Exemple d'histogramme de la distribution des facteurs d'enrichissement (FE) du groupe "jamais enrichi" (a) et du groupe "toujours enrichi" (b), pour la station de Banankoro sur le Niger (n=9).

- Pour les éléments dont la variabilité est importante entre échantillons et qui ne vérifient par les deux conditions ci-dessus, on parlera du groupe des éléments "**parfois enrichis**"; avec une distinction entre les éléments dont les valeurs de quarts supérieurs sont comprises entre 2 et 10, et les éléments dont le FE 75 est strictement supérieur à 10 (Figure 97).

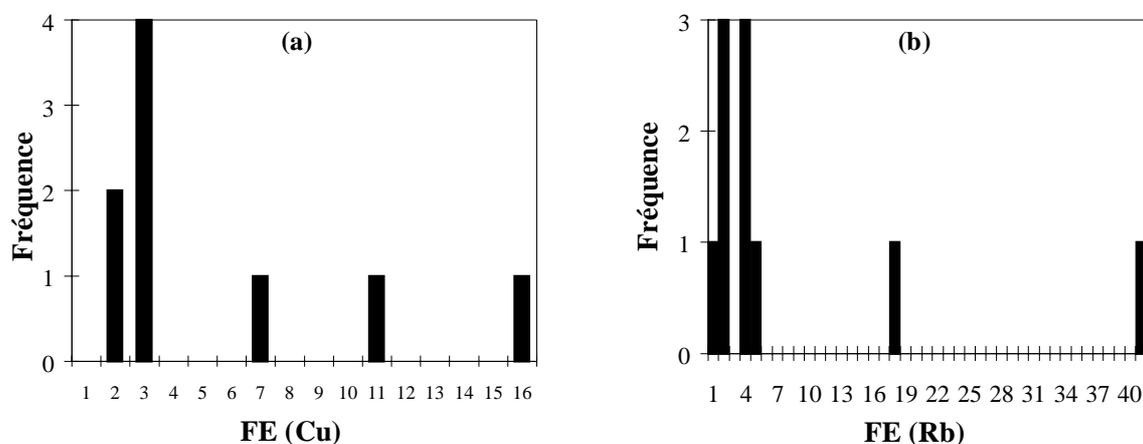


Figure 97. Exemple d'histogramme de la distribution des facteurs d'enrichissement (FE) du groupe "**parfois enrichi**", modérément (a) et fortement (b) pour la station de Banankoro sur le Niger (n=9).

Le Tableau 53 reprend les résultats de ce classement en 4 groupes pour les 5 stations du bassin amont.

Tributaires	Station	"Jamais enrichis" FE et FE 75. ≤ 2	"Parfois enrichis" (modérément) 2 ≤ FE 75 ≤ 10	"Parfois enrichis" (fortement) FE 75 > 10	"Toujours enrichis" FE et FE min. ≥ 2
Niger					
	Banankoro (9)	Ti, Al, Fe, Zr, Y, TRs, Pb, U	V, Mn, Co, Cu, Rb, Mo, Ba, Eu	Zn, Sr	Cr, Ni, Cd, Sb
	Koulikoro (7)	Al, Fe, Ti, Zr, Y, TRs, Pb, U	V, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Eu	Ga, Sr, Mo, Ba	Cr, Ni, Cd, Sb
	Ké-Macina (7)	Al, Fe, Ti, Zn, Zr, Y, Cs, TRs, Pb, U	V, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Mo, Ba, Eu		Cr, Ni, Cd, Sb
Sankarani					
	Sélingué (4)	Ti, Zr, Y, TRs, Pb	V, Co, Cu, Zn, Cs, U	Mn, Rb, Sr, Mo, Ba	Cr, Ni, Cd
Bani					
	Douna (9)	Al, Fe, Ti, Zr, Y, TRs, Pb	V, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Cs, Ba, U	Sr, Mo, Sb	Cr, Ni, Cd

Tableau 53. Classification des éléments en groupes "enrichis", "non enrichis" et "parfois enrichis" pour les 5 stations du bassin amont.

Plusieurs remarques peuvent être faites à partir de ce tableau et des précédents :

- Il existe des différences plus ou moins importantes entre stations, la station de Douna semble être celle qui présente les FE les moins importants, et les moins variables d'un échantillon à un autre. La station de Ké-Macina est plus semblable à celle de Douna, qu'à celle de Banankoro et Koulikoro sur le Niger plus en amont.
- Les éléments qui ne sont jamais enrichis quelle que soit la station sont, Ti, Al, Fe, Zr Y, TRs, Pb ; U et V sont à la limite de ce groupe.
- Les éléments qui sont toujours enrichis sont Cr, Ni, Cd et Sb.
- Les autres éléments V, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Ba, sont donc les éléments parfois enrichis mais dont les FE individuelles peuvent être très variables

2.2.1. Groupe des éléments a priori d'origine crustale

Le premier groupe d'éléments que l'on peut distinguer, quelle que soit la station comprend les éléments :

Sc, Ti, Zr, Y, TRs, Pb et dans une moindre mesure V et U

Il est remarquable que le plomb, élément indicateur de pollution anthropique, fasse partie de ce groupe. La Figure 98 montre que les valeurs du facteur d'enrichissement sur l'ensemble des 5 stations (n=33) sont effectivement regroupé entre 0 et 2.

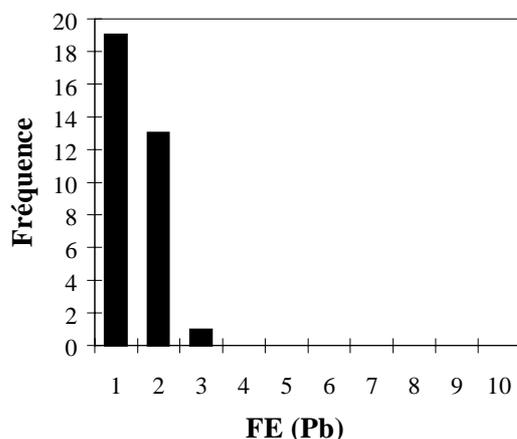


Figure 98. Histogramme de la distribution du facteur d'enrichissement de Pb sur l'ensemble des 5 stations (n=33).

Au sein de ce groupe, les éléments U et V possèdent des FE qui sont assez variables avec parfois des valeurs supérieures à 2, ce qui les rend difficiles à classer. Le FE moyen de U est toujours inférieur à 1, mais avec une variation entre échantillons pouvant aller de 0,59 à 4,86 toutes stations confondues. Le FE moyen de V est compris entre 1 et 2, avec une échelle de variations des FE individuels allant de 1,28 à 7,68. Leur enrichissement n'est donc pas du tout systématique et leur classement dans ce groupe est donc a priori correct. L'exception de Eu qui atteint des FE>2 est une anomalie de normalisation à la croûte déjà évoquée.

Quelle que soit la station, les éléments Ti, Al, Fe, Zr, Y, TRs, Pb, U et V peuvent être considérés comme des éléments d'origine crustale, dérivant de l'altération des roches silicatées. Ces éléments sont très bien corrélés entre eux et avec les MES.

2.2.2. Groupe des éléments "enrichis" par rapport à la croûte continentale

Tous les autres éléments font donc, a priori, partie de ce groupe des éléments "enrichis" par rapport à la croûte continentale. Comme nous l'avons vu ces enrichissements ne sont pas constants et on distingue les éléments "enrichis" des éléments "parfois enrichis".

2.2.2.1. Groupe des éléments « enrichis »

Dans ce groupe pour lequel les facteurs d'enrichissement moyens sont toujours supérieurs à 2, on retrouve dans l'ordre croissant :

Ni, Cr, Cd et Sb

Ces éléments sont des métaux, et donc susceptibles d'être d'origine anthropique. Les valeurs données par Taylor et Mc Lenman (1985) sont peu contraignantes pour ces éléments. Pour le cadmium, la variabilité du facteur d'enrichissement importante et la faiblesse de la reproductibilité de la mesure ne permettent pas de conclure sur cet élément. Pour Sb, en revanche, la Figure 99, montrent que les FE sont bien distribués entre 2 et 100.

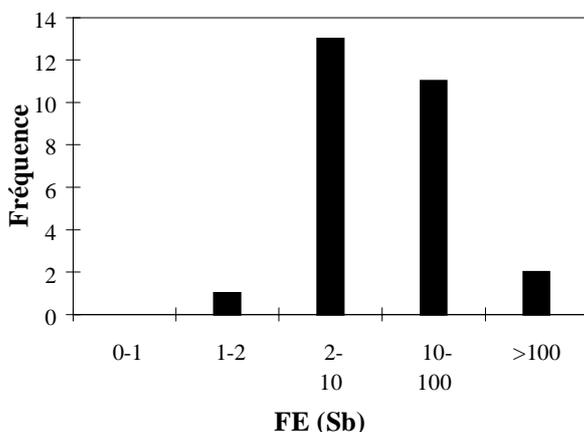


Figure 99. Histogramme de la distribution du facteur d'enrichissement de Sb sur l'ensemble des 5 stations (n=27).

Les FE sont très importants à Banankoro puis diminuent jusqu'à Ké-Macina. Ils sont les plus faibles à Douna. Ceci suggère qu'un apport d'antimoine est possible au niveau de Banankoro (en Guinée?). Cet élément est utilisé dans la métallurgie (pour les alliages), dans les piles, dans la fabrication de produits manufacturés, en médecine¹....

¹ <http://www.shf.ac.uk/chemistry/web-elements/webelements/elements/text/uses/Sb.html>

Le chrome est le seul des 3 éléments de ce groupe à être enrichi quelle que soit la station : les FE moyens varient entre 2,53 à Douana et 4,5 à Banankoro ; les FE individuels (n=33) varient entre 2,07 et 16,33 toutes stations confondues (Figure 100). Pour Ni, les FE sont peu nombreux (n=14), car la plupart des concentrations sont comprises entre LD et 5LD et ne sont donc pas pris en compte pour le calcul des FE individuels. Ces derniers sont assez stables et fluctuent entre 2,01 et 5,58. Pour ces deux éléments, il existe peut-être un apport supplémentaire permanent dans la rivière qui n'est pas forcément d'origine anthropique. Comme les métaux de transition, tels que Ni, peuvent être concentrés dans les cuirasses des sols, leurs teneurs dans les eaux peuvent alors être relativement concentrées (Seyler & Elbaz-Poulichet, 1996).

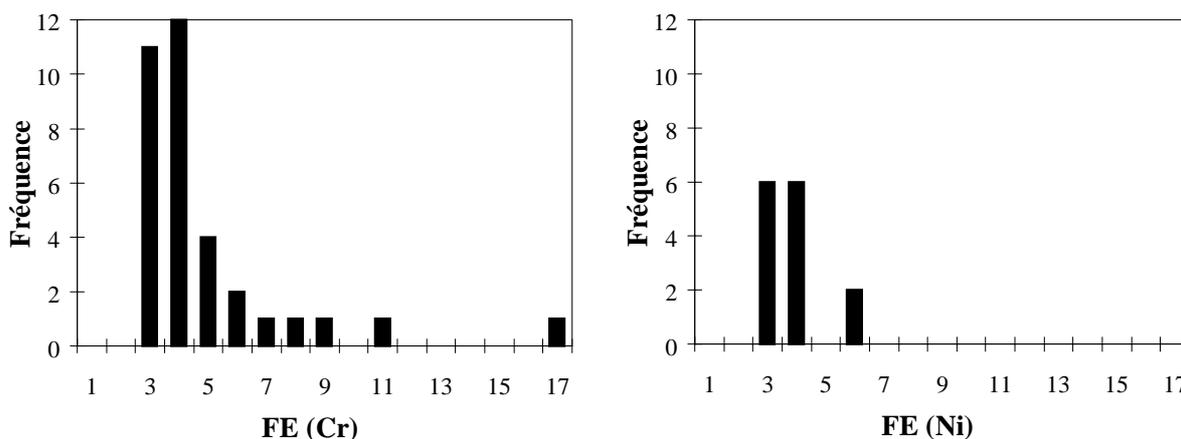


Figure 100. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Cr (n=33) et Ni (n=14) sur l'ensemble des 5 stations.

2.2.2.2. Groupe des éléments non systématiquement enrichis

Ce groupe comprend les éléments qui sont "parfois enrichis" :

V, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Ba

(a) Le cas des éléments métalliques

Parmi ces éléments, on retrouve des métaux (Mn, Cu, Co, Zn) qui sont plus ou moins enrichis suivant les stations. Le Tableau 54 présente l'ordre croissant des FE moyens de ces éléments pour chaque station, en prenant en compte les 4 autres métaux du groupe "enrichis" (ci-dessus).

Les distributions des FE présentées dans les Figure 101 et Figure 102 montrent que seul Co présente des FE assez groupés autour de sa moyenne ($1,23 < FE < 6$). Les FE de Cu, Mn et Zn montrent des écarts plus importants, avec des FE supérieurs à 10. Ceux-ci ne s'observent qu'en très basses eaux pour Cu et Mn (excepté à Sélingué pour ce dernier). Toutefois, les FE restent bien répartis sur

plusieurs intervalles : pour Cu, 67% des valeurs sont strictement supérieures à 2 ; pour Mn, cette valeur tombe à 56%.

Tributaires	Station	ordre éléments
Niger	Banankoro (9)	Zn < Mn < Cu < Co < Ni < Cr < Cd < Sb
	Koulikoro (7)	Zn < Mn < Co < Ni < Cu < Cr < Sb < Cd
	Ké-Macina (7)	Mn < Zn < Co < Cu < Ni < Cr < Sb < Cd
Sankarani	Sélingué *(4)	Zn < Ni < Cr < Co < Cu < Cd < Mn
Bani	Douna (9)	Mn < Zn < Cu < Co < Ni < Cr < Sb < Cd

* classement par rapport à la médiane des 4 valeurs

Tableau 54. Classement des éléments métalliques par ordre d'enrichissement croissant dans les eaux des 5 stations du bassin amont du Niger. (Nombre d'analyses).

On peut admettre que pour Cu, il existe un enrichissement, et un apport permanent dans le fleuve pour les stations de Banankoro et Koulikoro. Pour le manganèse à la station de Sélingué, deux échantillons atteignent respectivement un FE de 20 et 40, ce qui classe cet élément parmi le métal le plus enrichi.

Le cas du zinc est plus complexe. Il existe en effet des FE importants autres que pour des échantillons de basses eaux. Cependant, sur les 34 valeurs de FE calculés, seulement 35% sont supérieurs à 2.

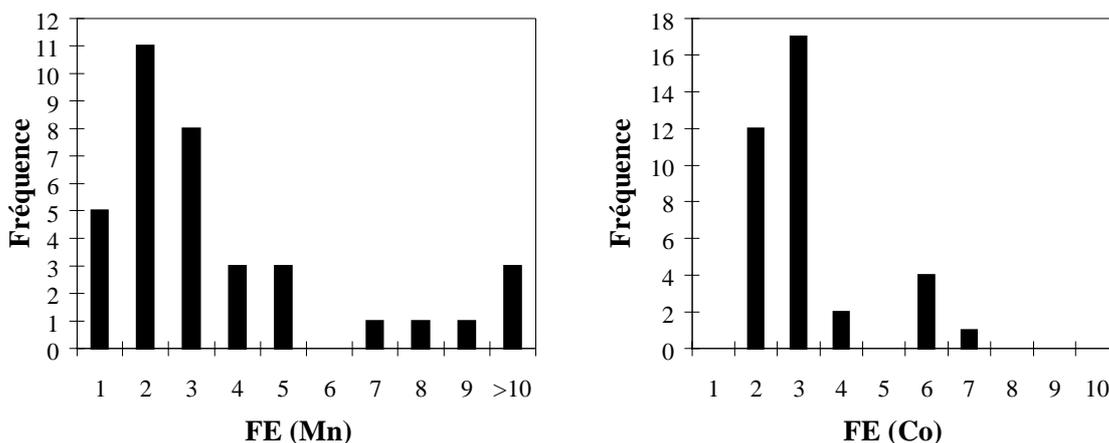


Figure 101. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Mn et Co l'ensemble des 5 stations.

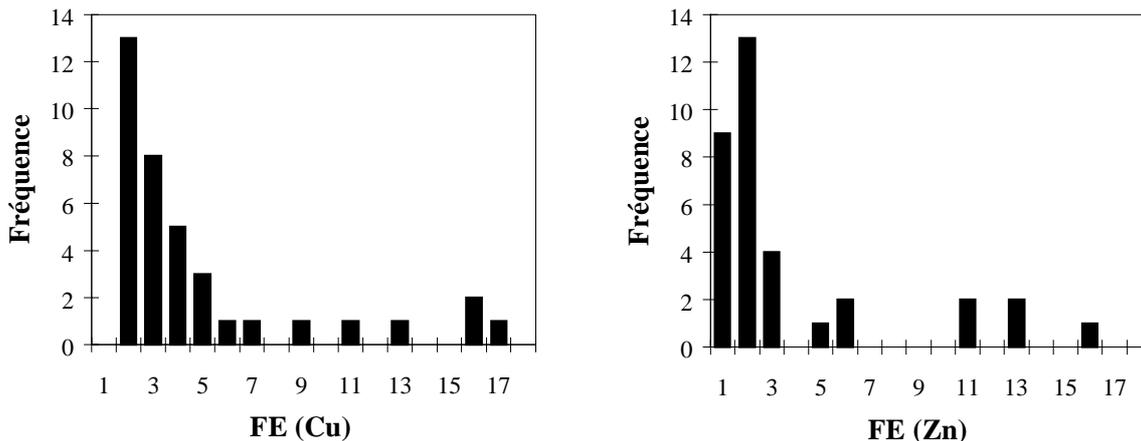


Figure 102. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Cu et Zn sur l'ensemble des 5 stations.

(b) Le cas des éléments Rb, Sr et Ba

Il est surprenant que les éléments **Rb, Sr et Ba** soient dans ce groupe avec souvent des FE individuels distribués sur une **large gamme de valeurs** (Tableaux précédents). Les FE très importants (>>10) sont toutefois limités comme pour les éléments précédents aux échantillons de très basses eaux. Sans ces derniers, la distribution des FE (n=28) reste régulière mais sur plusieurs intervalles (Figure 103).

Les facteurs d'enrichissement moyens pondérés par les débits de ces éléments sont en revanche toujours inférieurs à 3, avec des différences entre stations et entre éléments (on retrouve les différences déjà évoquées entre stations pour ces éléments).

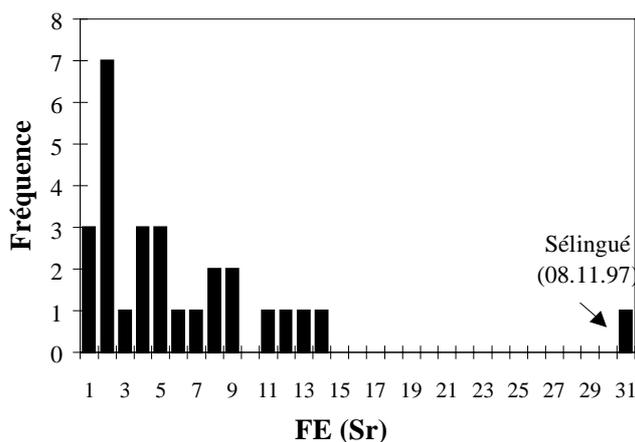


Figure 103. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Sr, sans les échantillons de très basses eaux (février, mars, avril) sur l'ensemble des 5 stations (n=28).

Vu les valeurs observées, il est difficile d'imputer une autre source que crustale à ces différents éléments. L'analyse des concentrations à la fois dans les phases particulaire et dissoute (§2.1.) ont confirmé que Rb, Ba, Sr, étaient des éléments "solubles", qui suivent le comportement des éléments majeurs. La diversité des terrains traversés expliquerait les différences entre stations (chapitre I). Ces

éléments ont donc, a priori, un comportement normal et ces très forts enrichissements pourraient être dus à plusieurs origines :

Artefact de normalisation à la croûte continentale - pour expliquer ces forts FE en éléments "solubles" il est possible que la norme de la croûte continentale moyenne silicatée définie par Taylor & Mc Lenman (1985) ne corresponde pas à la lithologie des bassins versants. En effet, cette estimation ne prend pas en compte les carbonates et leurs fortes teneurs en éléments alcalino-terreux tels que Ba et Sr. Une première objection à cette hypothèse est que si tel était le cas les FE moyens seraient importants. Ensuite, il n'y a pas, a priori, de carbonates sur le bassin versant pour créer de telles anomalies. De plus le rapport Sr/Ca dans la phase dissoute (non corrigé par les apports atmosphériques) des différents tributaires, qui varient entre 0,005 et 0,015, est très similaire à celui obtenue dans la croûte continentale moyenne (0,012). Ces rapports sont inférieurs à ceux obtenus par Négrel *et al.* (1993) pour des rivières drainant des terrains silicatés (Figure 104). Il est donc assez difficile d'incriminer la présence de roches carbonatées sur le bassin versant pour expliquer ces forts FE.

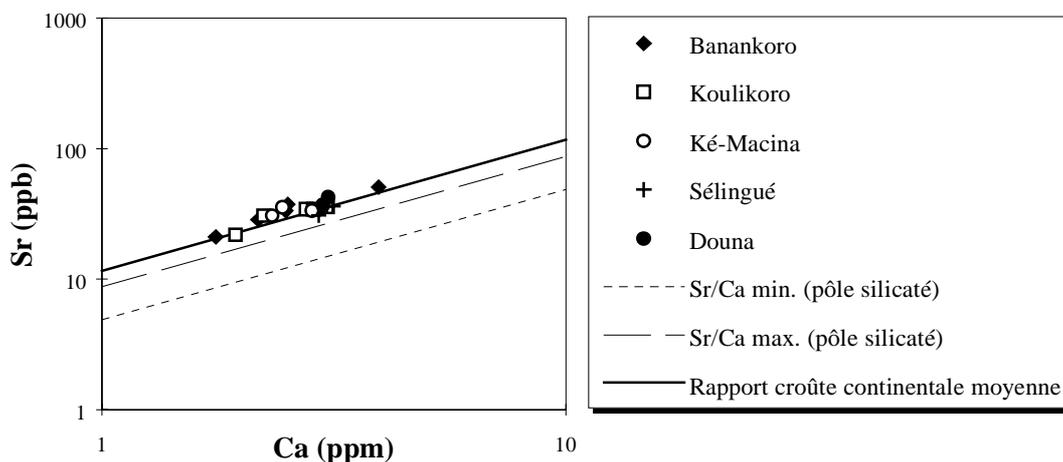


Figure 104. Relation entre les concentrations en Ca (ppm) et Sr (ppb) dans la phase dissoute sur les différents tributaires du bassin du Niger amont. Comparaison avec les rapports obtenus sur des terrains silicatés et sur la croûte continentale moyenne.

Variabilité très grande des FE - les FE en éléments solubles varient dans de très fortes proportions (entre 1,06 et 131,6 pour Sr à Banankoro par exemple) contrairement aux métaux pour qui la variabilité ne dépasse pas un rapport de 1 à 10. Nous avons donc étudié l'évolution du FE en fonction de la concentration en MES dans l'eau et du flux de MES (Débit * Conc). Les différentes valeurs des éléments classés dans le groupe des éléments "non enrichis" forment une droite proche de 1 dans le diagramme FE versus MES (et/ou Flux). En revanche pour tous les autres éléments, qui appartiennent aux groupes "parfois enrichis" ou "enrichis", une tendance nette à la diminution des FE alors que les concentrations en MES augmentent est observée (différence d'un rapport en général de 1 à 100). **Les FE les plus importants sont toujours rencontrés pour les concentrations en particules dans l'eau les plus faibles** (ce qui correspond à la période des basses eaux et donc à des flux faibles).

Comme on l'a vu, il existe une bonne relation inverse entre % COP et MES, les fortes valeurs ci-dessus se rencontrent donc pour les % COP les plus élevés.

Si l'on revient à la définition du FE et à la méthodologie d'échantillonnage (chapitre II). Pour calculer le FE on a utilisé les concentrations mesurées dans l'eau brute. Ensuite le facteur d'enrichissement, pour un élément donné X, est égal au rapport des concentrations $([X]/[Th])_{ech}$ dans la phase totale sur le rapport constant $([X]/[Th])_{cc}$ dans la croûte. Or les concentrations en Th dans la phase totale sont étroitement liées à la quantité de matières en suspension dans le fleuve (Figure 105).

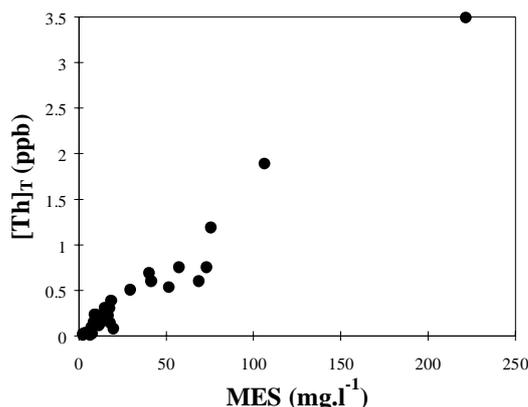


Figure 105. Relation entre la concentration totale en Th et la quantité de MES pour l'ensemble des 5 station amont

Ceci implique deux comportements de FE suivant l'évolution de la concentration totale de l'élément X en fonction du temps :

- **Si l'élément X est un élément dont les concentrations dans la phase totale sont fortement corrélées avec celles de Th et des MES**, les FE ne varieront pas en fonction de la quantité de MES. C'est le cas, on a vu des éléments d'origine crustale (exemple pour La, Figure 106). Ces éléments varient de manière synchrone au cours du cycle hydrologique avec les MES.

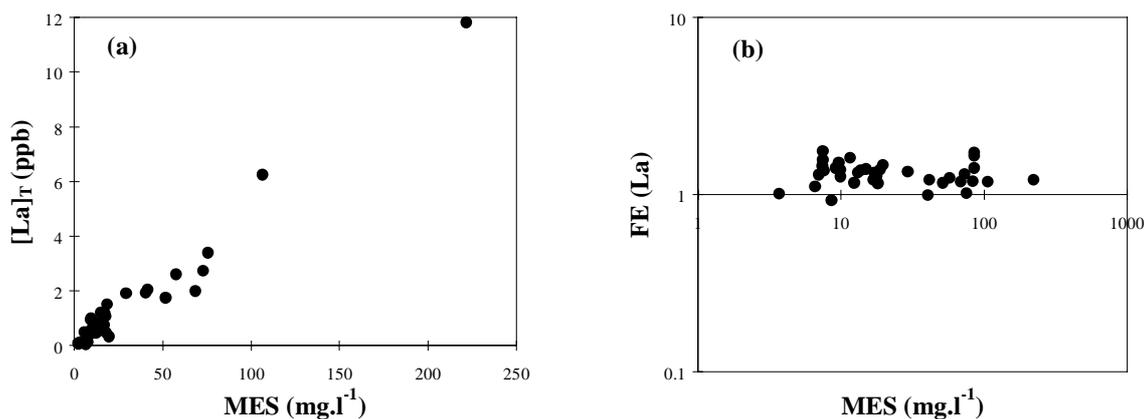


Figure 106. Exemple des relations entre la concentration totale en La et la quantité de MES (a), et entre le FE de La et la quantité de MES (b) sur l'ensemble des stations amont.

- **Si l'élément X n'est pas corrélé avec Th dans la phase totale (et donc avec MES)**, le FE est inversement proportionnel à la quantité de MES. Les variations de MES pouvant être très

importantes entre échantillons suivant la période de l'année, **ceci permet d'expliquer la très grande variabilité des FE en éléments solubles** (exemple de Sr dans la Figure 107).

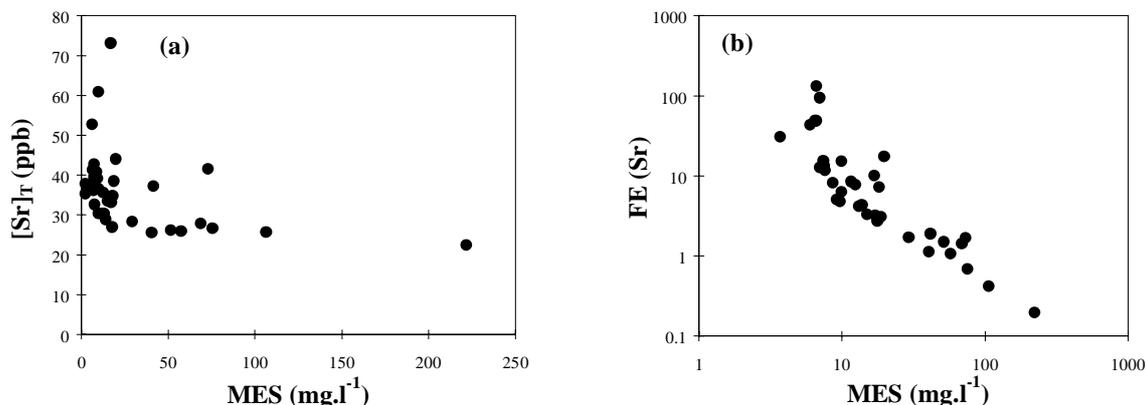


Figure 107. Exemple des relations entre la concentration totale en Sr et la quantité de MES (a), et entre le FE de Sr et la quantité de MES (b) sur l'ensemble des stations amont.

Finalement le comportement des FE au cours de l'année est lié à l'évolution des concentrations avec les variations de débits. Les éléments qui sont principalement portés par la phase particulaire comme Th vont suivre les mêmes cycles d'hystérésis que les MES. Inversement, les éléments solubles vont suivre le même comportement que les éléments majeurs, avec une première phase de dilution par les apports des eaux de ruissellement peu minéralisées, puis augmentation des concentrations avec la contribution de l'écoulement souterrain et l'évaporation, de plus en plus importantes.

2.2.3. Comparaison avec les précipitations et entre stations

Il est intéressant de comparer les facteurs d'enrichissement moyens calculés pour les éléments mesurés dans les eaux du Niger avec ceux observés dans les pluies à Katibougou (chapitre V). La Figure 108 présente les valeurs des FE obtenus sur deux stations du Niger proches de Katibougou et sur les précipitations, selon l'ordre défini dans ces dernières.

Les éléments considérés comme d'origine crustale dans le fleuve et dans les pluies sont les mêmes. Ils sont liés aux phénomènes d'érosions fluviale et/ou éolienne. On ne retrouve pas dans les pluies les forts enrichissements observés pour les éléments Sr, Rb et Ba définis comme solubles (§2.1.). Il est d'ailleurs intéressant de constater que les enrichissements sont plus importants à Koulikoro qu'à Banankoro, et encore plus qu'à Ké-Macina où il n'y a plus d'enrichissement (excepté pour Sb à Banankoro). Pour les autres éléments, les FE sont en général inférieurs à ceux des pluies. Pour les éléments métalliques, la station de Koulikoro montre des enrichissements plus importants que les deux autres stations du Niger, proches des FE dans les pluies (Pb, Cd, Zn) et même parfois supérieurs comme pour Mn et Mo (excepté pour Sb à Banankoro).

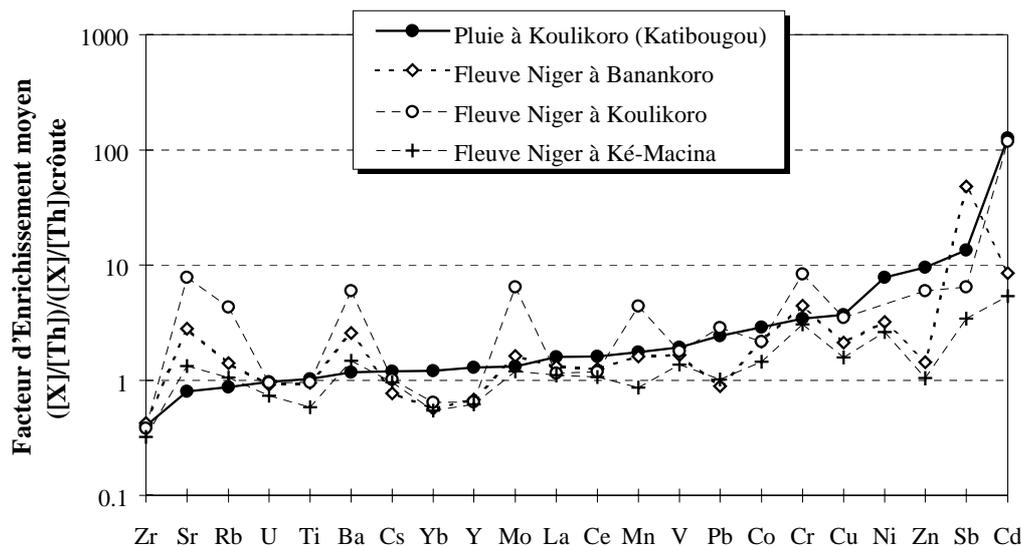


Figure 108. Comparaison des facteurs d'enrichissement moyens obtenus pour les 2 stations du bassin du Niger amont proche de Katibougou (Banankoro, Koulikoro) et pour les eaux de pluies à la station de Katibougou (1km de Koulikoro).

Ces facteurs d'enrichissement ne révèlent pas une contamination anthropique importante ni dans les eaux de pluie, ni dans les eaux du fleuve. Cependant il semble que les eaux à Koulikoro soient plus enrichies que celles des deux autres stations qui sont pourtant situées l'une à l'amont et l'autre à l'aval de celle-ci. Cette station se situe, d'une part à l'aval de la confluence avec le Sankarani où la présence du barrage de Sélingué pourrait expliquer ces différences, et d'autre part et surtout, à l'aval de la ville de Bamako où l'on trouve les principales industries susceptibles de déverser des éléments métalliques (tannerie, teinturerie, galvanisation, industrie textile...). Le fort enrichissement en Sb à Banankoro reste inexpliqué.

3. EROSION CHIMIQUE SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER

La composition chimique des eaux est souvent considérée comme un bon indicateur des processus d'érosion de surface (e.g. Garrels & Mackenzie, 1971 ; Meybeck, 1979 ; Berner & Berner, 1987 ; Summerfield & Hulton, 1994, Bluth & Kump, 1994). Toutefois, l'ensemble de la communauté scientifique estime que **le simple calcul du transport spécifique dissous, calculé à partir de la charge dissoute des fleuves, ne reflète qu'en partie les phénomènes d'érosion chimique du bassin versant** et ne peut pas être assimilé à un taux de dénudation réel sur le bassin versant. Une partie des éléments dissous ne provenant pas de l'altération des roches mais des précipitations atmosphériques ou encore des phénomènes biologiques internes.... (chapitre I). Le problème est plus complexe encore, car même si on néglige les deux derniers phénomènes et que l'on corrige les mesures avec les mesures sur les pluies, il existe une hétérogénéité à l'intérieur même du bassin versant qui présente des roches plus

ou moins solubles. Il est évident que les roches les plus solubles (calcaires et plus encore évaporites) vont contribuer différemment (en se dissolvant plus vite) à la charge dissoute des rivières que l'altération des silicates, cela en fonction du climat local et de la structure géomorphologique.

Enfin, rappelons qu'une hypothèse implicite pour l'utilisation de la charge dissoute des rivières afin de calculer des taux d'érosion, est que celle-ci a un comportement conservatif ; autrement dit, que la charge dissoute en tous points de la rivière reflète fidèlement l'altération de son bassin versant amont, aux apports atmosphériques près. Or cette grandeur est loin d'être un "traceur parfait" de l'altération étant donné les nombreux mécanismes qui peuvent perturber le message chimique de l'altération : adsorption sur les particules solides ; précipitation (par exemple, la calcite dans les rivières à haut pH) ; formation de complexes organiques ou inorganiques ; entraînement des éléments, et donc leur stockage éventuel, dans les cycles biologiques (exemple du potassium, rubidium, silice).

Un dernier problème pouvant gêner la compréhension des processus d'altération en prenant pour objet d'étude la charge dissoute des rivières est la pollution par les activités humaines. Or on a montré que la composition chimique du fleuve Niger n'était pas influencée ou très peu significativement par les activités humaines.

3.1. Typologie des eaux du Niger

Les diagrammes ternaires de la Figure 109 permettent de rappeler brièvement que les compositions ioniques des eaux du bassin Niger et du Bani sont très proches l'une de l'autre, et dominées par les bicarbonates.

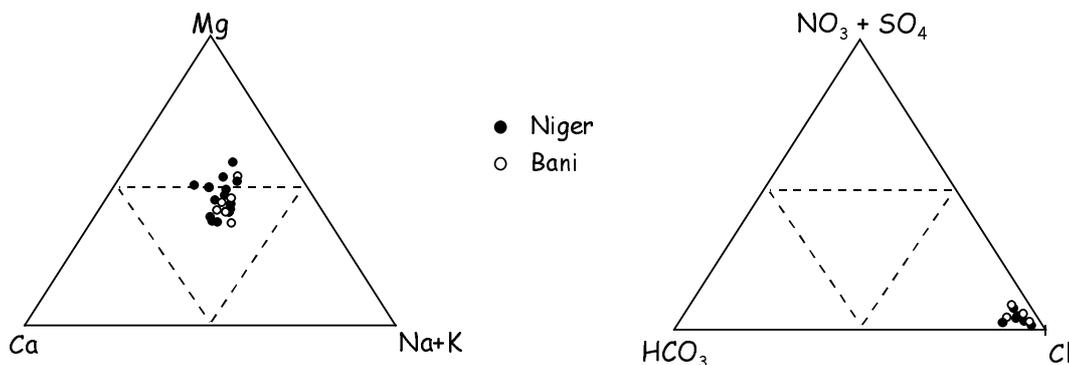


Figure 109. Diagramme ternaire des eaux du bassin du Niger amont (moyennes annuelles)

3.2. Influence des apports atmosphériques

Il est maintenant bien connu qu'une partie des éléments dissous provient des précipitations atmosphériques (e.g. Stallard & Edmond, 1981, 1983, 1987 ; Meybeck 1983). Le chlore et le sodium sont les éléments les plus concentrés dans les océans. Dans les milieux non pollués, ils sont d'ailleurs

souvent utilisés pour effectuer la correction des apports atmosphériques pour le transport des éléments dans les cours d'eau. Le chlore est un élément intéressant, car il n'est répertorié en milieu continental que dans les roches évaporitiques, i.e., s'il n'y a pas d'évaporites sur le bassin, tout le chlore présent dans l'eau est d'origine marine. Etant donné la lithologie du bassin du Niger amont où aucune évaporite n'a été recensée (chapitre I), c'est cet élément qui a été utilisé pour la correction des apports atmosphériques.

3.2.1. Principe de la correction des apports atmosphériques

La correction des apports atmosphériques peut être réalisée à partir de la concentration en Cl⁻ de la rivière, qui est supposée d'origine atmosphérique uniquement (pas d'évaporites), de deux façons :

- en utilisant la concentration en Cl⁻ de la pluie de la région d'étude (Meybeck, 1983 ; Tardy, 1986 ; Négrel, 1992), et en leur appliquant un facteur d'évaporation pour estimer la concentration dans la rivière,
- en se basant sur les rapports mesurés dans l'eau de mer (Stallard & Edmond, 1981).

La quantité d'éléments provenant de l'atmosphère X_a , est alors égale à la quantité de Cl⁻ dans la rivière Cl_{riv} , multipliée par la proportion de cet élément par rapport à Cl⁻ dans la pluie ou dans l'eau de mer $(X_a/Cl)_a$:

$$X_a = Cl_{riv} \times \left(\frac{X_a}{Cl} \right)_a$$

Les deux méthodes correspondent à des objectifs différents : la première permet une correction des apports en éléments ayant transité par l'atmosphère ; ils peuvent être originaires du bassin ou de l'extérieur du bassin (apports atmosphériques totaux) ; la deuxième ne prend en compte que les éléments d'origine marine (apports atmosphériques marins). Dans le but d'estimer l'érosion chimique réelle des versants à partir des éléments retrouvés en solution dans les rivières, il est en principe nécessaire de caractériser les apports atmosphériques uniquement extérieurs au bassin. Pour rajouter encore à la difficulté de cette correction, les apports atmosphériques sont de deux types : humides (précipitations) ou secs (aérosols), les éléments qu'ils contiennent ayant plusieurs origines extérieures et/ou intérieures au bassin. Orange (1992) et Négrel (1992) ont tenté de trancher sur la question en étudiant à la fois les pluies et les aérosols respectivement sur les bassins du Sénégal et du Congo. Ils ne proposent aucune solution définitive à ce problème. L'importance de la correction pour des éléments tels que Ca et Sr, sera dépendante du modèle retenu (Négrel, 1992)

L'étude des pluies à la station de Katibougou a montré l'origine essentiellement continentale et locale des éléments contenus dans les pluies. De plus, la lithologie du bassin versant ne montre aucune formation évaporitique C'est donc la méthode de correction en utilisant le rapport marin qui sera utilisé ici. En utilisant le rapport marin pour la correction des apports atmosphériques, nous considérons que les apports liés au lessivage de l'atmosphère par la pluie pouvant contenir des éléments provenant des poussières et/ou d'émission de la végétation, font parties du bilan de l'érosion du bassin. Les ratios dans

l'eau de mer utilisés, sont tirées des concentrations de Michard (1989) et Roy-Braman *et al.* (1996) cités par Freydier (1997).

3.2.2. Teneurs en chlorures dans les eaux de surfaces

Seules les concentrations en chlorures mesurées sur les stations du bassin amont à partir de l'année 1994/95 sont utilisées du fait de leur fiabilité (chaîne d'analyse différente). Ces teneurs en chlorures sont faibles et suivent une relation classique de dilution avec les débits au cours du cycle hydrologique (§1.1.3. et annexe 6) : c'est le processus d'évaporation qui domine. Les différences entre stations ne sont pas très importantes et aucune relation entre les teneurs en chlorures et la distance à l'océan n'est visible (Figure 110a). Cette distance est calculée à partir de la côte sud de l'Afrique de l'Ouest, étant donné que les précipitations arrivent par le sud avec la mousson (Chapitre I). La relation inverse entre les concentrations en Cl^- (d'origine océanique) et la distance à l'océan a pourtant été mise en évidence sur de nombreux cours d'eau, à l'échelle de petits bassins versants non pollués (Meybeck, 1983) ou de grands hydrosystèmes tels que l'Amazone (Stallard & Edmond, 1981) ou le Congo (Négre *et al.*, 1993). La Figure 110b présente l'évolution des concentrations moyennes sur les différentes stations du bassin amont en fonction de la distance à l'Océan, ainsi que les valeurs obtenues sur les bassins de l'Amazone et du Congo. Sur le Niger, les concentrations moyennes varient peu du fait de la direction sud-est/nord-ouest du cours du Niger : les apports atmosphériques sont de moins en moins importants (au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte) et les concentrations en chlorures sont influencées par l'évaporation.

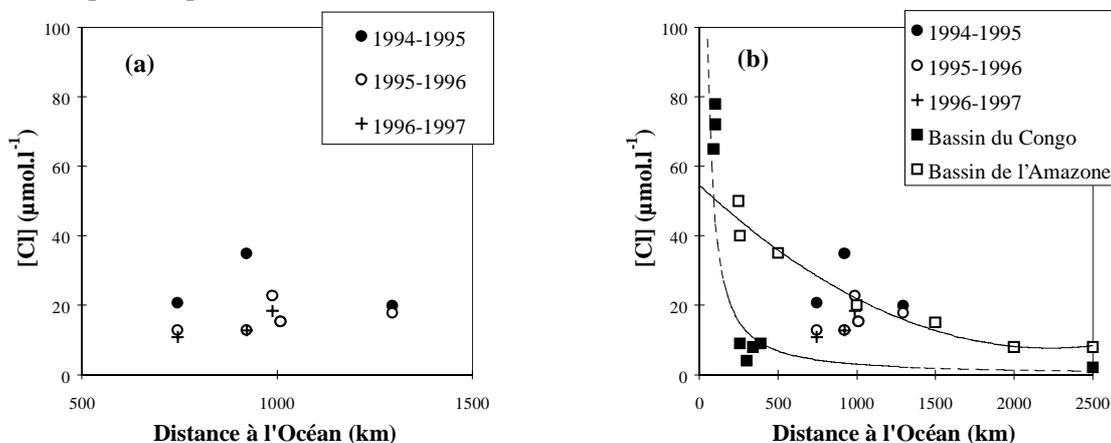


Figure 110. Evolution des concentrations en Cl^- avec la distance à l'océan pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison avec les bassins de l'Amazone et du Congo (b).

3.2.3. Résultats de la correction atmosphérique océanique (Apport marin)

Les résultats de la correction des apports atmosphériques océaniques en utilisant les rapports molaires d'éléments marins montrent que pour Na le pourcentage d'apport océanique varie de 9,7 à 20%, avec une moyenne de 12,5 %, sur l'ensemble des 4 stations du bassin amont et des 3 années

d'études (1994 à 1997). L'apport en Ca et K est inférieur à 1%, l'apport en Mg est compris entre 2 et 6% avec une moyenne de 3,5 %. Ces pourcentages confirment la faiblesse des apports marins à la composition ionique des eaux du Niger et du Bani.

La position du bassin du Niger amont, au nord de l'Afrique de l'Ouest, et celle de son cours qui se dirige vers le nord-est, impliquent que ses rivières sont peu soumises à des apports d'éléments chimiques marins par les précipitations. Seul le chlore provient uniquement de l'atmosphère (pas d'évaporites), les cations sont, a priori, peu influencés, et proviennent essentiellement des processus d'altération sur le bassin.

3.3. Influence de la lithologie

De manière générale, les concentrations en éléments dissous dans les rivières une fois corrigées des apports océaniques, proviennent de l'érosion chimique des trois grands types de roches présents sur le bassin : les roches carbonatées, les roches silicatées et les évaporites qui vont avoir chacune leur propre signature géochimique (Meybeck, 1983 ; Berner & Berner, 1987 ; Probst, 1992).

3.3.1. Principe des diagrammes normalisé à Na

En suivant la méthode mise en place par Négrel *et al.* (1993) sur le Congo, nous avons étudié les relations entre les rapports molaires Ca/Na, HCO₃/Na et Mg/Na². Toutes les concentrations en éléments chimiques sont normalisées au sodium (Ca/Na ; HCO₃/Na et Mg/Na). Le sodium est considéré exclusivement comme provenant de l'atmosphère et de l'altération des roches silicatées. La normalisation à Na permet de s'affranchir des effets de la dilution par les débits et de l'évaporation (§1.1.3.). Dans ces diagrammes, on a également représenté les différents pôles lithologiques pouvant participer à l'altération chimique des continents (roches carbonatées, roches silicatées et évaporites). Ces pôles sont basés sur l'idée qu'une roche va donner une signature spécifique à l'eau altérant sa "surface" (différence de solubilité entre roches, voir chapitre I). L'eau prélevée dans la rivière (corrigée des apports océaniques) va ensuite résulter d'un mélange entre plusieurs réservoirs (carbonaté ou silicaté...) présents sur le bassin versant et ayant chacun des caractéristiques différentes.

Les rapports entre éléments caractérisant les pôles des principaux types de roches sont pris dans Gaillardet *et al.* (1998) où la valeur des pôles est contrainte en utilisant différentes observations sur des petites rivières drainant des terrains uniquement silicatés ou carbonatés. Les rapports Ca/Na proches de 50 ; les rapports Mg/Na proches de 10 et les rapports HCO₃/Na proches de 120, représentent le pôle carbonaté. Pour le pôle silicaté, les valeurs prises sont : Ca/Na=0,35±0,15 ; Mg/Na=0,24±0,12 ; HCO₃/Na=2±1 (Figure 111). Le pôle des évaporites est plus difficile à estimer mais n'est pas d'une

² Dans le modèle initial de Négrel *et al.* (1993), le rapport isotopique du strontium est en plus utilisé.

grande importance dans cette étude. Il est tiré des études sur des bassin drainant des évaporites compilées par Gaillardet *et al.* 1998).

3.3.2. Résultats sur les eaux du bassin du Niger amont

Sur l'ensemble des données (individuelles) et des stations du bassin amont du Niger, de très bonnes corrélations entre les rapports chimiques normalisés à Na sont observées (Figure 111). Sur les 120 valeurs (après 1994), le coefficient de corrélation entre Ca/Na et Mg/Na est de 0,89 ; il est de 0,94 pour HCO_3/Na vs. Ca/Na. Le rapport Ca/Na varie entre 0,3 et 2,2 mais la plupart des valeurs (80% des valeurs sur 120) sont comprises entre 0,4 et 0,7. C'est aussi 80% des valeurs qui sont comprises entre 0,3 et 0,7 pour Mg/Na, et entre 2,9 et 4,3 pour le rapport HCO_3/Na . Les rapports moyens (obtenus à partir des concentrations pondérées par les débits pour les valeurs sûres et corrigées des apports atmosphériques) varient suivant les stations entre 0,5 et 0,8 pour Ca/Na ; entre 0,4 et 0,7 pour Mg/Na et entre 3,2 et 4,6 pour HCO_3/Na (Figure 112). Cette figure présente, à titre de comparaison, les valeurs obtenues pour d'autres fleuves du globe (données prises dans Gaillardet *et al.*, 1998, et corrigées des apports atmosphériques en utilisant Cl comme référence).

Vu les rapports obtenus sur le bassin du Niger amont, il semble que la composition chimique des eaux du Niger implique deux pôles sources d'éléments chimiques : un pôle silicaté et pôle carbonaté. Toutefois, les rapports sont proches du pôle silicaté et celui-ci explique sans doute presque toute la variabilité des données entre stations et années. Plusieurs observations vont dans ce sens :

- aucune roche carbonatée n'a été, a priori, recensée sur le bassin versant.
- la définition même du pôle silicaté peut être controversée. On a pris, comme valeurs des rapports de $\text{Ca/Na}=0,35\pm 0,15$; $\text{Mg/Na}=0,24\pm 0,12$; $\text{HCO}_3/\text{Na}=2\pm 1$. Mais d'autres auteurs ont pris des pôles plus larges, Négrel *et al.* (1993), $\text{Ca/Na}=0,35\pm 0,25$, $\text{Mg/Na}=0,25\pm 0,2$.
- la concentration en HCO_3^- importante dans la nappe (chapitre I) pourrait expliquer qu'en hautes eaux on tend vers le pôle carbonaté. Des apports supplémentaires en bicarbonates pourraient également provenir des poussières atmosphériques lessivées par les pluies (non prises en compte dans la correction atmosphérique) et/ou déposées sur le bassin.

Après avoir situé les eaux du fleuve Niger dans les diagrammes de mélange, on voit bien que le réservoir supposé contribuer au chimisme du fleuve se limite a priori aux **roches silicatées**...(après correction des apports océaniques) et **aux pluies**.

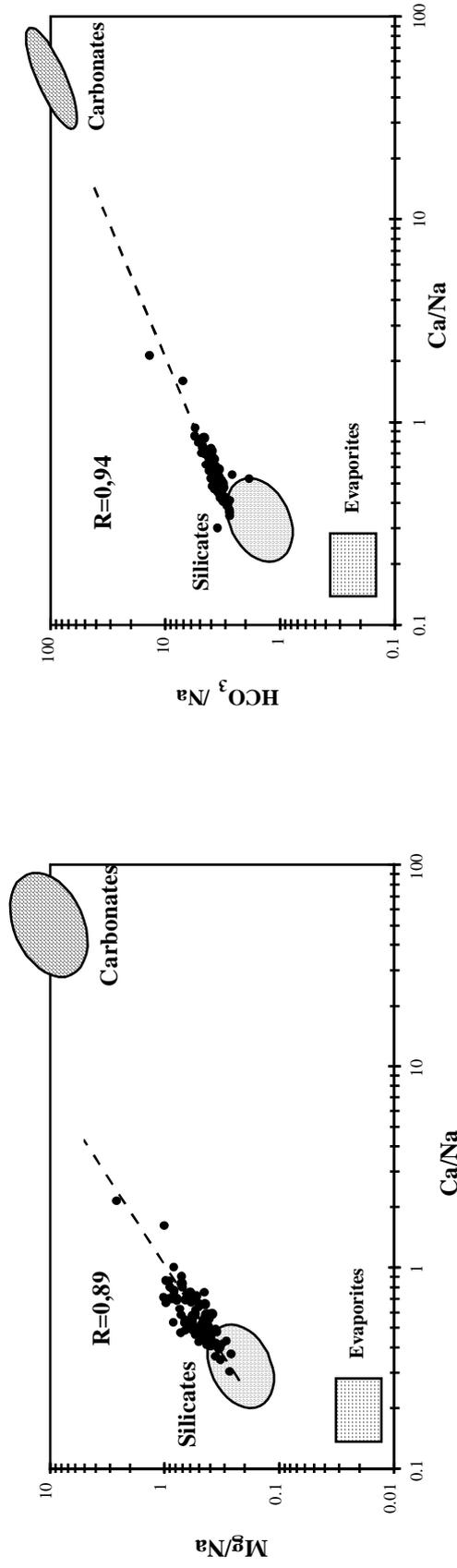


Figure 111. Diagramme de mélange avec les rapports molaires normalisés à Na individuels dans la phase dissoute (corrige des apports atmosphériques océaniques) des 5 stations du bassin du Niger supérieur (années 1994 à 1997).

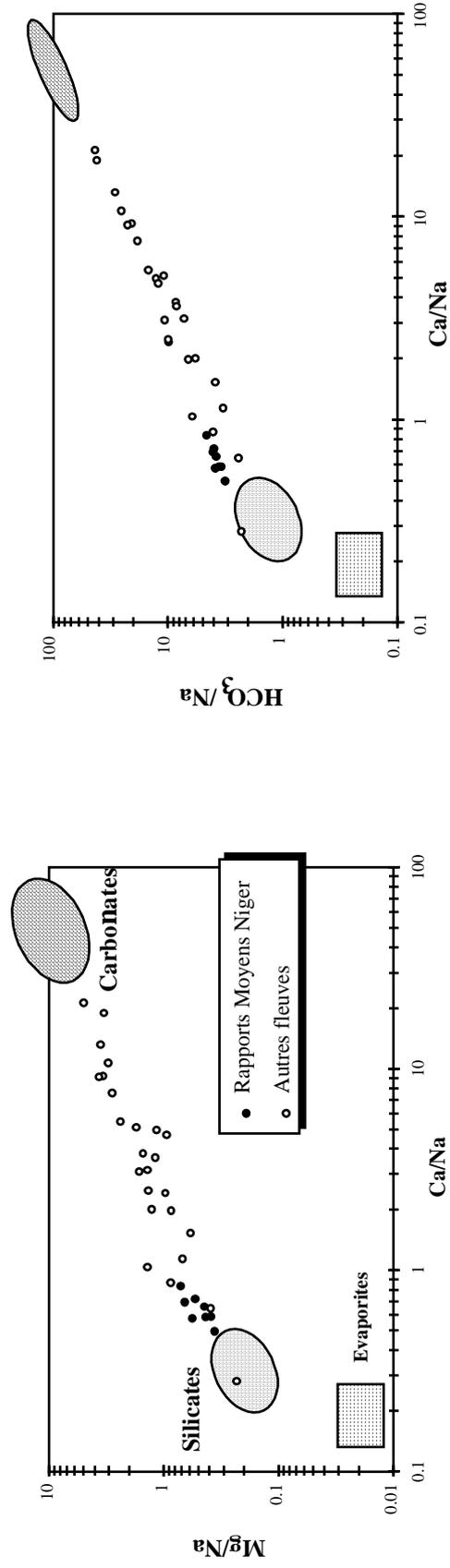


Figure 112. Diagramme de mélange avec les rapports molaires normalisés à Na moyens dans la phase dissoute (corrige des apports atmosphériques océaniques) des 5 stations du bassin du Niger supérieur. Comparaison avec d'autres fleuves du globe.

3.4. Bilan de l'altération chimique sur le bassin amont

Malgré les réserves émises ci-dessus, la composition chimique des rivières reste un bon indicateur des processus d'altération sur le bassin versant et plusieurs modèles géochimiques existent à l'heure actuelle (e.g. Gac & Pinta, 1973 ; Négrel *et al.* 1993 ; Amiotte-Suchet & Probst, 1995 ; Boeglin *et al.*, 1997). Nous en distinguons principalement deux :

- Le premier permet d'estimer des vitesses de progression des fronts d'altération dans le sol à partir des bilans de masses de la silice entre la roche mère, le sol et l'eau (Gac & Pinta, 1973 ; Tardy, 1998). Ce type de modèle a notamment été appliqué sur le bassin du Haut-Niger en Guinée par Orange (1992) et au Mali par Boeglin & Probst (1998). La silice apparaît en effet comme un des éléments les plus faibles pour étudier l'altération chimique (Bluth & Kump, 1994).
- Le second est également un modèle qui se base sur des bilans de masses. Il permet une déconvolution du message dissous des rivières en plusieurs signaux : carbonaté, silicaté, atmosphérique, et par conséquent la possible estimation de l'érosion chimique et la consommation de CO₂. Cette approche a été mise en place et appliquée avec succès au bassin du Congo (Négrel *et al.*, 1993), puis au bassin de l'Amazone (Gaillardet *et al.*, 1997) et sur 60 rivières du monde (Gaillardet *et al.*, 1998). Cette méthode est également basée sur les données chimiques des rivières, mais la résolution des équations du modèle passe par une méthode que ces auteurs ont nommée "méthode inverse", inverse, car les données sur la rivière sont utilisées pour contraindre le modèle hypothétique de mélange global entre les produits de l'érosion.

Ces deux modèles d'érosion chimique sont ensuite appliqués aux différentes stations du bassin du Niger amont.

3.4.1. Vitesse d'approfondissement des profils

La zone du bassin du Niger étudié est une zone de sols à complexe d'altération kaolinique. Différents types de sols se succèdent, d'abord les sols ferrallitiques jusqu'en Guinée puis des sols ferrugineux au sud du Mali et vers le nord du Mali (Chapitre I). Une étude des cuirasses ferrugineuses au Sud-Mali a montré que les échantillons contiennent des quantités notables de kaolinite, alors que le quartz n'est conservé qu'en petite quantité (Novikoff & Tardy, 1990). Pour ces zones latéritiques où le produit d'altération est la kaolinite, il est possible de calculer une vitesse d'érosion chimique à partir **des flux de silice en solution dans la rivière** (Tardy, 1998). Cet auteur calcule que l'évacuation de la silice en solution, correspondant à une altération des minéraux hydrolysables en kaolinite, est telle qu'il faut évacuer environ une tonne de silice par mètre cube de roche. Il faut donc compter environ 100 000 ans pour transformer en totalité un mètre cube de granite en un sol latéritique à kaolinite (Tardy, 1998).

En considérant la composition chimique moyenne des roches du bassin versant soumise à l'altération ainsi que la composition chimique du front d'altération (front de dissolution chimique à la base du profil du sol), Boeglin & Probst (1998) proposent une méthode pour évaluer de manière plus précise les taux d'érosion chimique. Avant de suivre cette méthode, il est possible de vérifier le type d'altération dominante sur le bassin (déjà mis en évidence avec la minéralogie des MES).

3.4.1.1. Type d'altération sur les bassins du Niger et du Bani

Pour déterminer le type d'altération dominante sur un bassin donné, Tardy (1968) proposait de calculer un rapport molaire Re à partir des concentrations en éléments chimiques des eaux de surface drainant des granites ou des gneiss :

$$Re = \frac{6Na_2O + 6K_2O + 2CaO - SiO_2}{Na_2O + K_2O + CaO}$$

Re permet ainsi de déterminer le degré de l'altération des roches mère d'un bassin donné, et n'est autre que le rapport moléculaire $(SiO_2)/(Al_2O_3)$ de l'ensemble des minéraux secondaires néoformés dans le profil d'altération (Tardy, 1968, 69 ; Boeglin & Probst, 1998). Les différents coefficients utilisés dans la formulation de Re dépendent des minéraux primaires de la roche mère (qui correspond dans le cas ci-dessus à une composition moyenne granitique, avec feldspath, micas...). Une amélioration de cet index a été proposée sur le bassin du Niger supérieur à Bamako (entre Banankoro et Koulikoro) par Boeglin & Probst (1998). Ces auteurs prennent en compte les silicates magnésiens. Cet indice s'écrit alors :

$$Re = \frac{3(Na^+) + 3(K^+) + 1,25(Mg^{2+}) + 2(Ca^{2+}) - (SiO_2)}{0,5(Na^+) + 0,5(K^+) + 0,75(Mg^{2+}) + 1(Ca^{2+})}$$

Re = Rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 dans les produits d'altération ;

Si $Re < 2$, alors la gibbsite $(Al(OH)_3)$ apparaît dans les profils ;

Si $Re > 2$, alors il se forme des smectites comme par exemple la montmorillonite (bisiallitisations) ;

Si $Re = 2$, alors la kaolinite $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ prédomine.

Sur le bassin du Niger amont (Niger et Bani), il est possible de calculer un rapport molaire de ce type à partir des moyennes annuelles (corrigées des apports atmosphériques), car les roches silicatées forment l'essentiel du substratum rocheux sur le bassin du Niger amont.

Le Tableau 55 présente les différentes valeurs du rapport Re, calculé à partir des concentrations moyennes annuelles, sur les 4 stations du bassin du Niger et pour l'ensemble de la période d'observation (1991 à 1997). Le rapport moyen Re est légèrement supérieur à 2 pour toutes les stations confondues (entre 2,1 et 2,5). **Ceci tend à signaler qu'en plus de la kaolinite, il se forme de la smectite lors de l'altération des roches sur le bassin versant.** Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues par Boeglin & Probst (1998) sur la période 1990-1992 sur le Niger à Bamako (située entre

Banankoro et Koulikoro) où $Re=1,83$; ou par Orange (1992) sur les branches mères du Niger, où $Re=1,84$ sur le Milo à Kankan, $Re=2,07$ sur le Tinkisso à Dinguiraye, et $Re=1,92$ sur le Niger à Siguiri. Ces dernières valeurs de Re (<2) correspondent à la monosiallisation : la gibbsite et la kaolinite sont alors les minéraux dominants dans le sol.

Re	1991-1992*	1992-1993*	1993-1994*	1994-1995	1995-1996	1996-1997	moyenne
Banankoro	2.1	2.3	2.4	2.1	2.1	1.9	2.1
Koulikoro	3.1			2.5	2.3	2.3	2.5
Ké-Macina	2.4	2.5	2.5	2.6	2.2	2.3	2.4
Douna	2.5	2.6	2.4	2.6		2.3	2.5

* Doute sur certaines valeurs de Cl.

Tableau 55. Résultats du rapport Re pour 4 stations du bassin du Niger Amont.

Le rapport à Banankoro est plus faible que sur les deux autres stations plus aval du Niger (Koulikoro, Ké-Macina) et que la station de Douna sur le Bani (qui se situe au nord-est de Koulikoro). La variation spatiale de Re montre donc une évolution des produits d'altération d'amont en aval qui passe du couple gibbsite/kaolinite au couple kaolinite/smectite. Une telle évolution amont - aval a déjà été décrite sur la minéralogie des MES et des berges (§1.2.1) et correspond au fait que le type de produit de l'altération des silicates va dépendre de certaines conditions climatologiques et topographiques (notamment de la quantité d'eau qui va s'infiltrer, chapitre I).

3.4.1.2. Taux d'altération chimique actuelle

Pour calculer un bilan précis du taux d'érosion chimique, il est nécessaire de connaître la composition chimique des roches mères, la composition chimique à la base du profil d'altération (où se trouve de la kaolinite néoformée et du quartz résiduel), et les quantités de silice dans l'eau de drainage. Il est également nécessaire de faire quelques **hypothèses simplificatrices** de départ qui limitent évidemment la validité de la modélisation. Ces hypothèses sont principalement de considérer que :

- la silice dissoute du fleuve a un comportement conservatif (alors que nous avons vu que des phénomènes biologiques peuvent jouer un rôle sur les concentrations en silice dissoute dans la rivière),
- toute la silice mesurée dans la rivière provient de l'hydrolyse des minéraux silicatés se produisant à la base du profil d'altération,
- tous les minéraux primaires (excepté le quartz) sont entièrement transformés en kaolinite à la même vitesse (or Re , suggère qu'il se forme également de la smectite),
- la transformation du cube de roche unité ($1m^3$) au cours de l'altération est considérée comme isovolumétrique.

(a) Composition moyenne de la roche des bassins

Dans le chapitre I, nous avons observé différentes classes de roches présentes sur le bassin versant et calculé leur pourcentage de recouvrement. A partir de la composition chimique moyenne de ces différentes classes, on peut établir la composition chimique de la roche moyenne par bassin versant. Les compositions moyennes des roches sont tirées de Boeglin & Probst (1998), elles-mêmes en partie obtenues à partir des analyses et des descriptions pétrographiques de roches provenant de l'Afrique de l'Ouest, publiées par Blanchot (1958). Ces compositions moyennes sont également utilisables sur le bassin du Bani où les mêmes formations géologiques sont observées.

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	LOI	total	Quartz
Banankoro	67.2	15.0	4.3	3.8	2.5	1.9	2.8	0.5	1.5	99.4	27.1
Koulikoro	69.1	14.2	4.0	3.7	2.3	1.7	2.5	0.7	1.5	99.6	30.7
Ké-Macina	69.7	13.6	4.2	3.4	2.1	1.8	2.6	0.7	1.6	99.6	33.3
Douna	79.0	10.1	2.3	2.6	1.6	0.9	1.5	0.5	1.2	99.7	52.3

*LOI "Loss Of Ignition"

Tableau 56. Composition chimique de la roche moyenne par bassin versant (en % d'oxydes).

Le Tableau 56 permet de rappeler la différence entre les deux bassins du Niger et du Bani du point de vue du recouvrement des différents types de roches (dont les conséquences sur la chimie des cours d'eau ont été évoquées tout au long de ce chapitre) : le bassin du Bani est caractérisé dans toute sa partie basse par des grès ; alors que cette formation géologique ne représente qu'une faible partie du bassin du Niger supérieur (entre Koulikoro et Ké-Macina) où ce sont les granites et les schistes qui dominent.

En prenant une densité moyenne de 2,65, on établit alors que 1 m³ de roche dans la zone non altérée contient entre 1780 et 2094 kg de silice (dont 717 et 1385 kg de quartz) suivant la station considérée. C'est évidemment la station de Douna pour laquelle le recouvrement de grès est important, qui présentent la quantité moyenne de silice la plus importante.

(b) Principe

L'hydrolyse des minéraux silicatés de la roche mère va produire de la kaolinite et de la silice dissoute tandis que le quartz, très peu soluble, ne produit que de la silice dissoute (Berner & Berner, 1987 ; Appelo & Postma, 1993 ; Tardy, 1998). On suppose ainsi que la quantité de silice qui reste à la base du profil d'altération (kaolinite et quartz résiduel) est ainsi égale à la quantité de silice de la roche mère soustrait de la quantité de silice qui doit être évacuée en solution (Figure 113). Le bilan de l'érosion E_{ch} (en m/Ma), calculé pour 1 m³ de roche, peut être considéré comme le rapport entre le flux annuel de silice dissoute (F_{SiO_2}) mesuré dans la rivière, ramené à la surface du bassin versant (flux spécifique en kg.km².an⁻¹) et la quantité de silice totale (Q_E) disponible pour être évacuée en solution (en kg.m⁻³) :

$$E_{ch} = \frac{F_{SiO_2}}{Q_E}$$

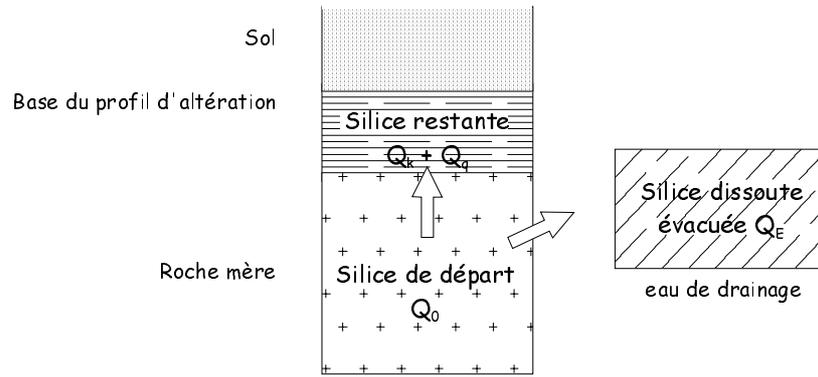


Figure 113. Schématisation du bilan de masse de la silice à la base du profil d'altération.

Cette dernière quantité Q_E n'est autre que la différence entre la quantité de silice présente dans la roche mère (Q_0) et celle contenue, à la base du profil d'altération, dans la kaolinite néoformée (Q_k) et le quartz résiduel (Q_q) (en kg/m^3) : $Q_E = Q_0 - (Q_k + Q_q)$. Ces deux paramètres Q_k et Q_q sont reliés à la quantité relative de quartz restant à la base du profil (quantité de quartz résiduel = P_q en %), à sa densité et à celle de la kaolinite (respectivement $d_q = 2,65$ et $d_k = 1,45$) ainsi qu'aux proportions de silice contenue dans le quartz ($P_{\text{SiO}_2} = 100\%$) et la kaolinite ($P_{\text{SiO}_2} = 46,5\%$). Les expressions de ces quantités s'écrivent :

$$Q_q = 1000P_q \left(\frac{P_q}{d_q} + \frac{100 - P_q}{d_k} \right) \text{ en } \text{kg.m}^{-3}$$

$$Q_k = 10P_{\text{SiO}_2} (100 - P_q) \left(\frac{P_q}{d_q} + \frac{100 - P_q}{d_k} \right) \text{ en } \text{kg.m}^{-3}$$

On peut dès lors écrire pour la vitesse d'approfondissement du profil E_{ch} (en m/Ma) l'expression suivante :

$$E_{ch} = \frac{F_{\text{SiO}_2} \left[P_q (d_k - d_q) + 100d_q \right]}{Q_0 \left[P_q (d_k - d_q) + 100d_q \right] - 10d_k d_q \left[(100 - P_{\text{SiO}_2}) P_q + 100P_{\text{SiO}_2} \right]}$$

Tous les termes de cette équation sont connus excepté le terme relatif à la quantité de quartz résiduel présent à la base du profil d'altération (P_q). Le taux moyen de dissolution du quartz généralement admis est de 15% (e.g. Tardy, 1969 ; Gac & Pinta, 1973 ; Orange, 1992 ; Boeglin & Probst, 1998). Ce taux, nommé TD_q , permet de calculer le taux de quartz résiduel présent à la base du profil d'altération (P_q). Sachant que la roche de départ contient une quantité de quartz Q_{0q} et qu'il ne reste plus qu'une quantité de quartz résiduel Q_q à la base du profil d'altération, le taux de dissolution du quartz peut s'écrire simplement : $TD_q = 100(Q_{0q} - Q_q) / Q_{0q}$. Soit en utilisant les équations ci-dessus, on obtient une expression de TD_q ou de P_q :

$$TD_q = 100 - \left(d_k d_q P_q \times 10^5 \right) / \left[Q_0 \left(P_q d_k - P_q d_q + 100d_q \right) \right] \text{ en } \%$$

$$P_q = 100d_q Q_{0q} (100 - TD_q) / \left[d_k d_q \times 10^5 + Q_{0q} (100 - TD_q) (d_k - d_q) \right] \text{ en } \%$$

(c) Résultats

A partir d'un taux moyen de dissolution du quartz TD_q de 15% (correspondant à une proportion de quartz résiduel à la base du profil d'altération de 35,3% à Banankoro et 59,4% à Douna) et de l'ensemble des paramètres cités ci-dessus, les vitesses de progression du front d'altération ont été estimées sur chaque station et pour chaque année (Tableau 57. Cette démarche étant basée sur un concept d'érosion à l'échelle globale, seul la **moyenne interannuelle** est à prendre en compte. Les valeurs annuelles sont présentées à titre indicatif et pour permettre la comparaison avec des données antérieures.

m/Ma	1991- 1992	1992- 1993	1993- 1994	1994- 1995	1995- 1996	1996- 1997	Moyenne
Banankoro	4,62	5,80	4,99	8,45	8,23	7,84	6,65
Koulikoro	4,44			11,93	12,58	10,55	9,87
Ké-Macina	6,74	7,20	6,92	8,86	11,78		8,30
Douna	1,80	1,75	1,40	3,43		2,20	2,11

Tableau 57. Estimations des vitesses de progression du front d'altération pour l'ensemble des stations du bassin amont du Niger et des années d'observations (en m/Ma).

Les valeurs obtenues à Banankoro, station située entre Siguiri et Bamako, pour les années "sèches" (de 1991/92 à 1993/94) sont concordantes avec celles obtenues par Boeglin & Probst (1998) à la station de Bamako (4,7 m/Ma) pour la période de 1990/1992 ; et de celles obtenues par Orange (1992) sur le Niger en Guinée (4,6 m/Ma). L'intérêt de notre étude est qu'elle recouvre des années beaucoup **plus humides**, alors que les études précédentes ne regroupent que des années de sécheresse. La **moyenne interannuelle est ainsi de 6,65 m/Ma** à la station de Banankoro sur le Niger. L'autre intérêt de cette étude est aussi de constater la faiblesse de cette altération sur le bassin du Bani pour lequel la **valeur interannuelle est de 2,1 m/Ma à la station de Douna.**

3.4.2. Taux de TDS d'origine silicatée

Le modèle d'érosion chimique largement décrit par Négrel *et al.* (1993) ; puis par Gaillardet *et al.*, (1997), est appliqué au fleuve Niger sur son bassin amont. Le modèle est constitué de plusieurs équations de masse utilisant des rapports molaires. Ces équations sont données par Négrel *et al.* (1993). L'équation générale du bilan de masse pour calculer la quantité totale de chaque élément provenant des différents réservoirs : silicates, carbonates, évaporites et pluie, s'écrit (pour X = Cl, Ca, Mg, HCO₃, Sr) :

$$\left(\frac{X}{Na}\right)_{riv} = \sum_i \left(\frac{X}{Na}\right)_i \alpha_i(Na)_i$$

Avec i = silicates, carbonates, évaporites et pluie ; α_i est la proportion de Na provenant des différents réservoirs ($\alpha_{pluie} + \alpha_{silicate} + \alpha_{carbonate} + \alpha_{évaporite} = 1$), duquel sont déduites les proportions des autres éléments.

Les paragraphes précédents, ainsi que la composition moyenne de la roche sur le bassin, ont mis en évidence que les réservoirs supposés contribuer au chimisme du fleuve se limitent a priori aux roches silicatées et aux pluies. L'application au fleuve Niger amont du modèle d'érosion chimique, va donc être assez simple : on retrouve les valeurs de concentrations après corrections des apports atmosphériques océaniques calculés ci-dessus (§3.1.). Le flux de TDS provenant de l'érosion silicatée (F_{TDS}) est alors simplement la somme des flux en éléments dissous corrigés des apports atmosphériques océaniques.

Les résultats obtenus sur le bassin amont du Niger (Tableau 58) ont été comparés à ceux obtenus sur les 60 plus grandes rivières du monde. Pour ceux-ci, les flux en éléments dissous dérivés des silicates (F_{TDS}) ont été calculés par Gaillardet *et al.* (1998).

		1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Banankoro								
$F_{\Sigma+}$	(10^3 t an^{-1})	94	105	117	110	232	206	166
F_{TDS}	(10^3 t an^{-1})	582	646	753	686	1384	1216	1103
Koulikoro								
$F_{\Sigma+}$	(10^3 t an^{-1})		711				1367	1012
F_{TDS}	(10^3 t an^{-1})		913				1939	1491
Ké-Macina								
$F_{\Sigma+}$	(10^3 t an^{-1})	177	145	148	164	306	286	
F_{TDS}	(10^3 t an^{-1})	942	871	915	947	1647	1719	
Douna								
$F_{\Sigma+}$	(10^3 t an^{-1})	33	46	39	35	125	58	50
F_{TDS}	(10^3 t an^{-1})	175	256	223	195	642	302	290

Tableau 58. Flux de TDS et de cations dérivés des silicates pour l'ensemble des stations du bassin amont du Niger et des années d'observations (corrigés des apports océaniques).

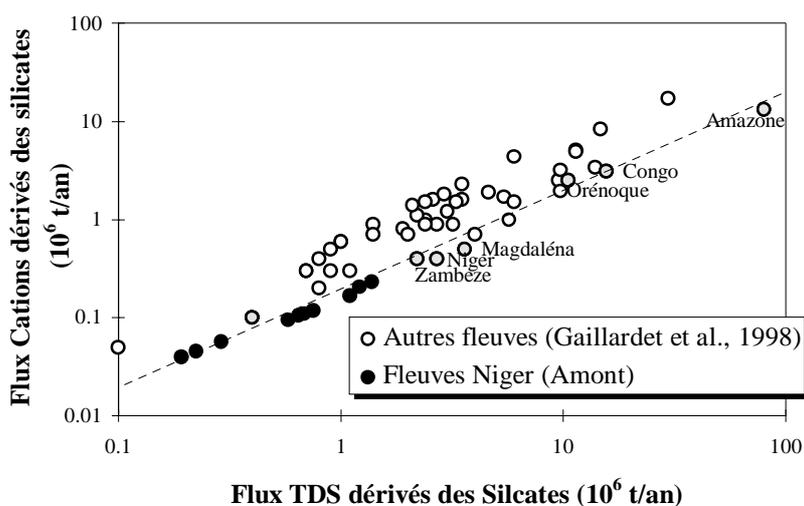


Figure 114. Relation entre le flux en éléments dissous dérivés des silicates (F_{TDS}) et le flux des cations dérivés des silicates.

La Figure 114 montre qu'il existe une bonne corrélation entre F_{TDS} et la somme des flux de cations dérivés des silicates $F_{\Sigma+}$. Les rivières pour lesquelles la silice dissoute représente une part dominante du TDS issu de l'altération des silicates (Amazone, Congo, Orénoque, Niger, Zambèze) dévient de la tendance globale. Les résultats sur le bassin du Niger amont montre qu'il se situe pleinement dans cette dernière tendance des rivières tropicales mais vers des valeurs bien plus faibles. Nous avons effectivement tout au long de ce chapitre remarqué les similitudes entre le Niger et les deux grands fleuves que sont l'Amazone et le Congo.

A l'échelle globale, **la faiblesse du drainage du bassin du Niger** (et d'autant plus celui du Bani) explique sans doute les faibles taux de TDS issus de l'altération des silicates sur ce bassin par rapport aux autres rivières du même type.

Comme une des questions sous-jacente de ces taux d'érosion chimique est leur complémentarité avec les taux d'érosion mécanique, nous aborderons ce point en détail dans la **conclusion de la partie II**.

Conclusion partie II

Comparaison des Taux d'exportation chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger

Les quantités de MES et de TDS transportés par le fleuve Niger et son affluent principal le Bani, ont été estimés respectivement dans les chapitre IV et VI. Une estimation des taux d'altération des silicates a également été présentée dans le chapitre VI. Ces différents résultats sont comparés et discutés ci-dessous, et nous permettent d'apprécier le **bilan d'érosion** et la **dynamique actuelle des paysages** du bassin amont du Niger.

Bilan d'érosion sur le bassin amont du Niger

On définit généralement le *bilan d'érosion* comme étant le résultat final de l'évacuation du matériau produit sur les continents vers les océans, quels que soient l'importance du stockage et des reprises de matériaux (Bravard, 1998) ; dans ce cas le bassin versant est considéré comme une boîte noire. Nous ne considérons ici que le bilan des apports de matières au delta intérieur du Niger et estimons la contribution relative de chaque type de transport (le transport en solution, le transport en suspension et le transport par charriage qui est négligé car mal connu et a priori faible dans notre cas d'étude).

Transport de TDS

Le détail des flux annuels de matières dissoutes totales (sans COD) est présenté en annexe 7. Il ressort de ces calculs que 1,13 à 2,3 millions de tonnes de matières en solution sont exportées vers le delta intérieur du Niger suivant les années : **72 à 85 % de ce flux est apporté par le Niger (station de Ké-Macina)**. Ceci représente un flux spécifique de 4,7 à 9,7 t km⁻² an⁻¹. Le flux spécifique est très faible à la station de Douna sur le Bani (de 1,7 à 6,5 t km⁻² an⁻¹) par rapport à celui observé à Ké-Macina sur le Niger (6,2 à 12,3 t km⁻² an⁻¹). Ce dernier est lui-même plus faible que ceux calculés sur les stations du Niger plus amont de Banankoro (8,2 à 19,6 t km⁻² an⁻¹) et de Koulikoro (8,6 à 17,5 t km⁻² an⁻¹). Cette différence entre stations mais aussi pour une même station et pour différentes années est liée en premier approximation à l'intensité de drainage plus ou moins importante.

Transport de MES

On a déjà vu que les flux de matières particulaires exportées présentent des variations importantes suivant l'hydraulicité de l'année, mais la corrélation est moins bonne par rapport aux flux dissous (Chapitre IV). Il semble notamment y avoir une relation différente pour la station de Ké-Macina et dans une moindre mesure pour celle de Douna, entre le taux de transport de MES spécifique et le débit spécifique. Il en résulte que pour un même débit spécifique, les taux de transports spécifiques de MES sont plus importants à la station de Ké-Macina que sur les deux stations du Niger plus amont. On a effectivement vu que le transport de MES augmentait entre Koulikoro et Ké-Macina alors que les débits spécifiques eux diminuaient. Ceci a notamment été attribué à l'effet conjugué d'une reprise de l'érosion sur le bassin intermédiaire et des pertes en eau entre les deux stations (notamment à cause des prélèvements de l'Office du Niger et de plaines d'inondations...). Les valeurs du transport spécifique varient ainsi de 4,8 à 12,1 t km⁻² an⁻¹ à Banankoro et de 4,9 à 10,8 t km⁻² an⁻¹ à Koulikoro ; tandis qu'à Ké-Macina ce taux varie de 6,2 à 12,2 t km⁻² an⁻¹. Sur le Bani, cette valeur devient faible avec une gamme de variations sur la période d'étude (1991 à 1998) de 2,3 à 7,2 t.km⁻².an⁻¹. Bien que ce soit un bassin agricole, la faiblesse du drainage annuel explique en grande partie cette faiblesse des exportations de matières particulaires sur le Bani. Il en résulte que les apports du Bani au delta intérieur du Niger sont très faibles par rapport à ceux du Niger (uniquement de 19 à 28% des entrées).

La similitude des relations entre les stations de Ké-Macina et Douna suggèrent que l'érodibilité de ces deux bassins est plus importante que celle du Niger à Banankoro et Koulikoro. Le facteur limitant le transport de MES à Douna est bien le drainage annuel.

Importance relative de chaque type de transport

Les bilans totaux interannuels ont été établis pour les années communes de suivi des MES et de TDS, de 1992 à 1997. Pour la station de Koulikoro où uniquement 3 années de flux de TDS sont disponibles, les flux manquants sont estimés à partir de la relation obtenue entre les flux de TDS et le volumes écoulés annuels. Les résultats sont présentés dans la Figure 115 où la part de chaque type de transport est indiquée. Celle-ci met évidence les différences entre les quatre stations du bassin du Niger amont.

Pour les stations les plus à l'amont sur le Niger, le transport solide ne représente pas plus de 40% du transport total. La faiblesse des exportations de MES sur ces stations est en accord avec les données publiées sur les proportions sortants du Fouta Djallon (Orange, 1992). Le déséquilibre entre les taux de transport spécifiques à Banankoro et Koulikoro reflète en partie les processus hydrologiques dominants liés aux systèmes morphoclimatiques de cette zone (Bravard, 1998) : l'écoulement de subsurface typique de cette zone, favorise l'altération chimique et se traduit par une dominance de la charge en solution. La couverture végétale (zone guinéenne en partie), les sols ferrallitiques de la zone limitent les phénomènes d'ablation.

A Douna et Ké-Macina (excepté pour l'année 1992-93), le bilan solution-suspension est équilibré voir faiblement déséquilibré en faveur du transport solide. Pour la station de Ké-Macina, le

changement de zone climatique plus aride, avec l'apparition des sols peu profonds sensibles à l'érosion, accentué par les pertes en eau qui conduisent à un débit spécifique plus faible, peuvent expliquer la différence par rapport à l'amont.

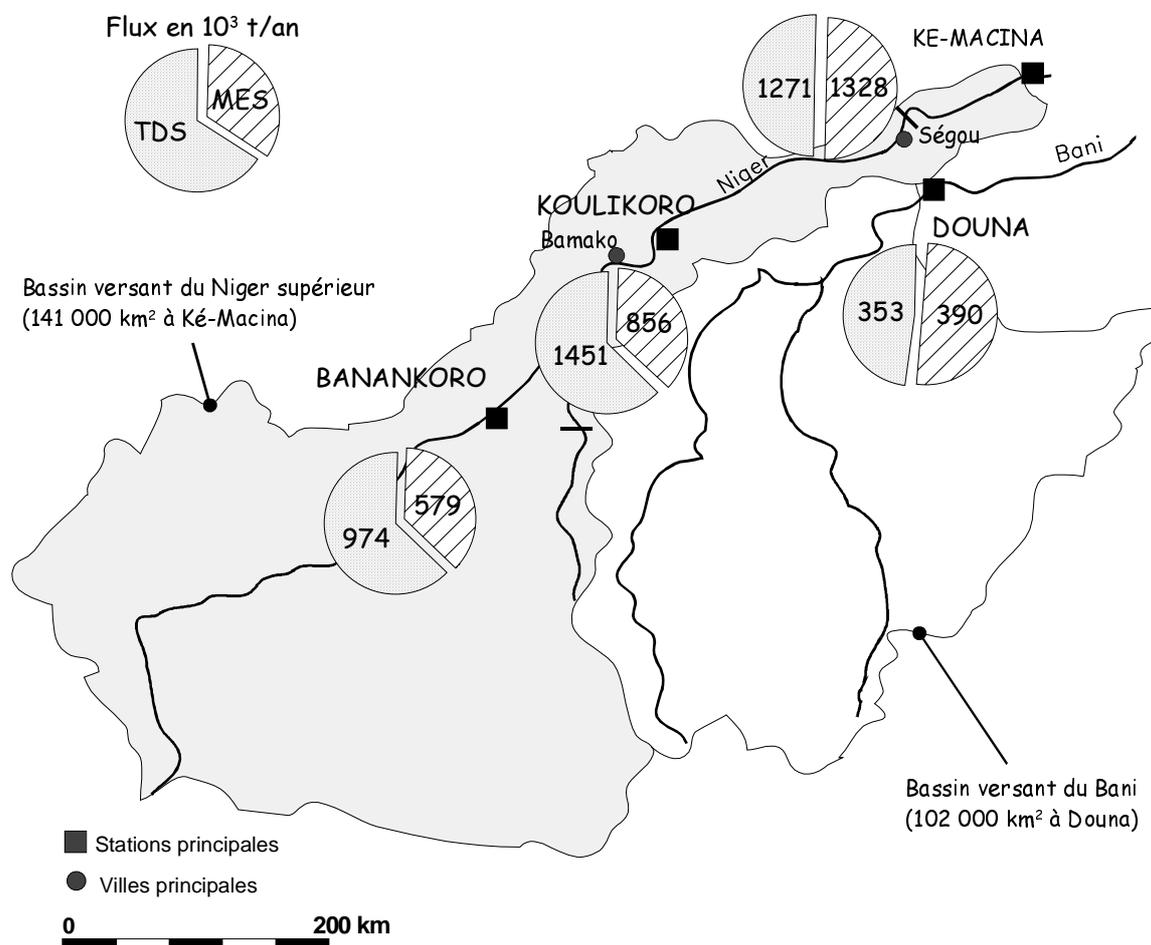


Figure 115. Bilan global du transport sur le bassin amont du Niger. Répartition des exportations de matières dissoutes et particulières vers le delta intérieur du Niger (moyenne interannuelle de 1992 à 1997).

Enfin, le bilan global du transport vers les entrées du delta montre que 2 à 5 millions de tonnes de matières entrent dans le delta intérieur du Niger. Il n'y a pas de dominance de l'un ou l'autre des modes de transport puisque ces matières sont, à l'erreur de calcul près, pour moitié transportées sous forme particulière et sous forme dissoute.

Vitesse de progression des fronts d'altération

On a vu que la composition chimique d'une rivière en zone non polluée, comme c'est le cas du bassin amont du Niger, est souvent considérée comme un outil pour appréhender les processus d'altération à la surface des continents. Dans cette optique, on considère que le sol résulte d'un équilibre entre l'érosion mécanique et l'érosion chimique. **Ces deux processus sont complémentaires, le premier éliminant (ablation) au cours du temps les produits formés par le second à la base du sol au contact de la roche fraîche (le front d'altération).** Si le système ainsi constitué est en état stationnaire (il se forme en un temps Δt autant de particules que l'érosion mécanique en exporte), alors le sol garde une épaisseur constante. S'il existe un déséquilibre en faveur de l'un ou l'autre de ces deux phénomènes, le sol s'épaissit (l'érosion chimique est plus importante que l'érosion mécanique) ou se réduit (inverse). Les éléments produits libérés par l'altération chimique et l'érosion mécanique des roches et des sols sont ensuite transportés à la fois dans la phase dissoute et solide vers la rivière.

L'importance de ces mécanismes est utilisée pour appréhender le régime de dénudation actuel sur le bassin amont du Niger (Niger et Bani).

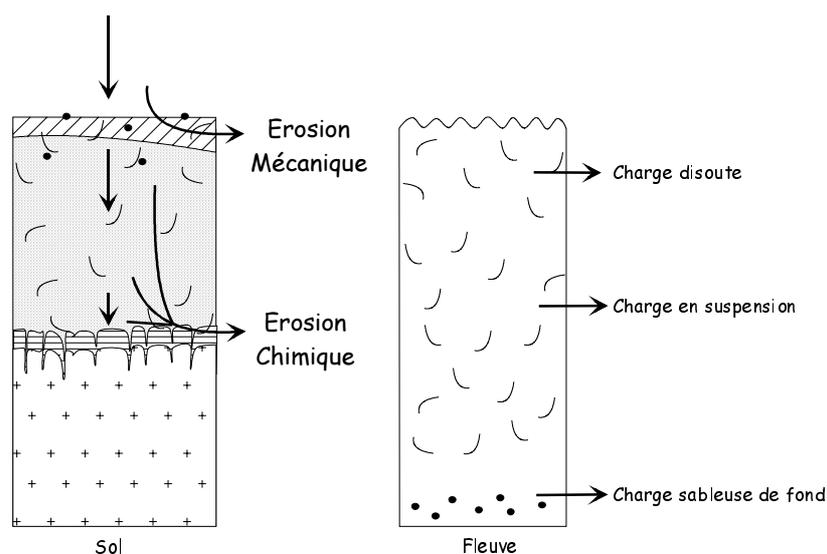


Figure 116. Schématisation des processus de formation du sol, lien avec la charge observée dans les fleuves.

Le taux d'érosion mécanique est calculé à partir de la charge en MES transportée par le fleuve. On a déjà vu que cette approche était très contestable sur le pas de temps très bref de nos observations (quelques années). En effet, les bilans réalisés annuellement dans le fleuve ne reflètent pas exactement les phénomènes d'érosion sur le versant du fait de nombreux aspects évoqués précédemment qui limitent fortement cette approche. Brièvement, deux aspects sont importants : d'une part, il est reconnu qu'une partie des matériaux érodés sur les versants ne parvient pas au réseau hydrographique (dépôt en bas des pentes) ou même à la station étudiée (présence de plaines inondables, lacs... constituant autant de pièges à sédiments), d'autre part, l'érosion des berges participe aussi à la charge en suspension, mais

il ne s'agit là que d'un transfert différé dans le temps de dépôts antérieurs. Les perturbations liées aux activités humaines peuvent également être importantes (Zhang *et al.*, 1995).

L'approche pour **les taux d'érosion chimique** est moins limitée bien que l'incertitude reste importante (notamment du fait des phénomènes de fixation et de relargage d'éléments par la biomasse et de la connaissance limitée des apports atmosphériques). Une fois corrigé des apports atmosphériques (on a vu qu'ils pouvaient participer à la charge dissoute des rivières) et des apports des roches non silicatées (on a vu que les roches solubles peuvent contribuer pour une part importante à la charge dissoute), il est possible d'avoir un taux de dénudation chimique. Les deux approches utilisées pour déterminer des taux d'altération issue des silicates ont été décrites au chapitre VI.

Approche par TDS sil

La Figure 117 montre la relation qui existe entre le taux de dénudation mécanique et le taux de TDS provenant de l'érosion silicatée (chapitre VI). On retrouve la distinction entre les stations de Banankoro et Koulikoro sur le Niger et celles de Ké-Macina, également sur le Niger, et de Douna sur le Bani.

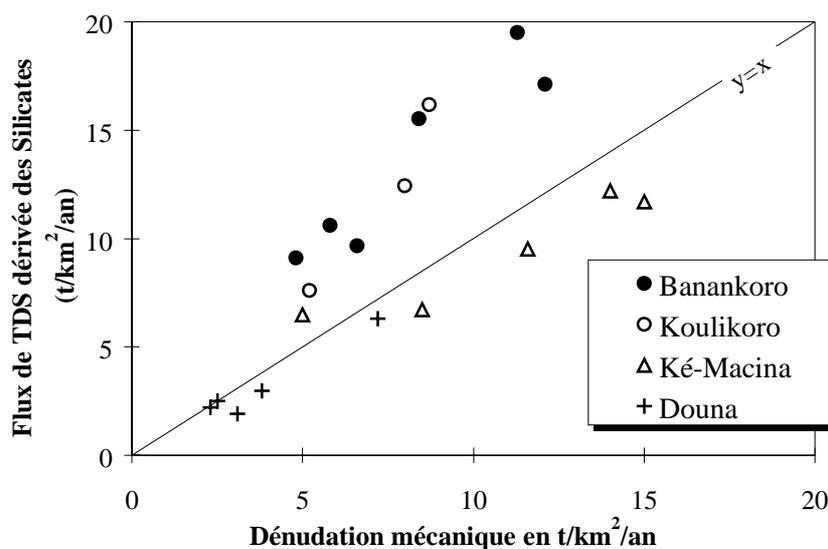


Figure 117. Relation entre TDS sil et le transport spécifique de MES sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont de 1991 à 1997.

Pour les deux stations du Niger les plus amont, on observe un léger déséquilibre en faveur de l'érosion chimique qui est alors prédominante sur les deux bassins. Cela signifie que l'épaisseur des sols se développe encore, en moyenne, sur ces bassins. On peut sur la base des descriptions des géomorphologues dire que l'on est dans un régime de transport limité déjà évoqué dans le chapitre I. Dans ce dernier, le taux d'érosion mécanique des sols est faible ce qui conduit à la formation de sols épais. Cette épaisseur des sols limite à son tour l'altération des roches qui sont enfouies en profondeur.

Pour la station de Douna il semble il y avoir un équilibre entre les deux formes d'érosion. En revanche à Ké-Macina le déséquilibre d'érosion en faveur de l'érosion mécanique, signifie que l'épaisseur des sols, en moyenne, sur ce bassin n'est pas constante et tend à diminuer. Comme ce bassin se situe à environ 340 km de la station de Koulikoro où le bilan est inverse, le déséquilibre que nous observons doit être limité au bassin intermédiaire entre les deux stations. Cette partie du bassin est comme nous l'avons rappelé ci-dessus caractérisée par des formations lithologiques essentiellement gréseuses et un climat plus aride (zone climatique sahélienne). Les sols de cette zone sont peu épais et facilement érodés. Toutefois la différence entre les deux mécanismes n'est pas très grande, et il faudrait plutôt parler d'équilibre.

Approche par le calcul des vitesses d'approfondissement des profils

Cette approche conduit à comparer les différentes vitesses d'ablation de la surface et la vitesse d'altération des roches. Ces dernières ont été établies au chapitre VI à partir d'une méthode décrite par Boeglin & Probst (1997). En admettant une densité moyenne de 2,0 pour le sol - gravillons, bauxites plus ou moins poreuses, cuirassement (Orange, 1992 ; Boeglin & Probst, 1998) - on peut à partir des valeurs d'érosion mécanique spécifiques calculer la vitesse de dénudation physique E_{ph} en mm pour 1000 ans¹. Ces calculs sont présentés dans le Tableau 59, uniquement pour les deux stations de Banankoro sur le Niger et de Douna sur le Bani pour lesquelles le régime hydrologique n'est pas influencé par des barrages, et comparées aux vitesses de dénudation chimique E_{ch} .

	1991- 1992	1992- 1993	1993- 1994	1994- 1995	1995- 1996	1996- 1997	Moyenne
Banankoro							
E_{ph} (mm/1000a)	2,38	2,89	3,29	5,63	6,07	4,19	3,97
E_{ch} (mm/1000a)	4,62	5,80	4,99	8,45	8,23	7,84	6,65
Douna							
E_{ph} (mm/1000a)	1,26	1,13	1,55	3,58	1,92	2,08	1,97
E_{ch} (mm/1000a)	1,80	1,75	1,40	3,43		2,20	2,11

Tableau 59. Résultats du calcul des vitesses de dénudation en mm pour 1000 ans.

La différence de vitesse de ces deux phénomènes est positive et assez constante pour la station du Niger supérieur à Banankoro, elle est en revanche proche de 0 et assez variable pour la station de Douna sur le Bani. Ces résultats permettent de conclure que :

- Sur le bassin du Niger en amont de Banankoro, les sols continuent en moyenne à l'heure actuelle à s'approfondir à une vitesse moyenne de 2,68 mm/1000a (moyenne sur 6 années hydrologiques

¹ Cette unité, appelé le *Bubnoff*, est une unité de mesures des très faibles vitesses moyennes d'érosion représentant une quantité uniformément érodée sur l'ensemble du bassin.

contrastées). Nous rejoignons donc les conclusions faites ci-dessus et celles de Boeglin & Probst (1997) sur leurs observations en années sèches à la station de Bamako.

- Sur la bassin du Bani, bien que les bilans soient assez variables d'une année sur l'autre, le bilan moyen est équilibré et on peut estimer que les sols restent constants.

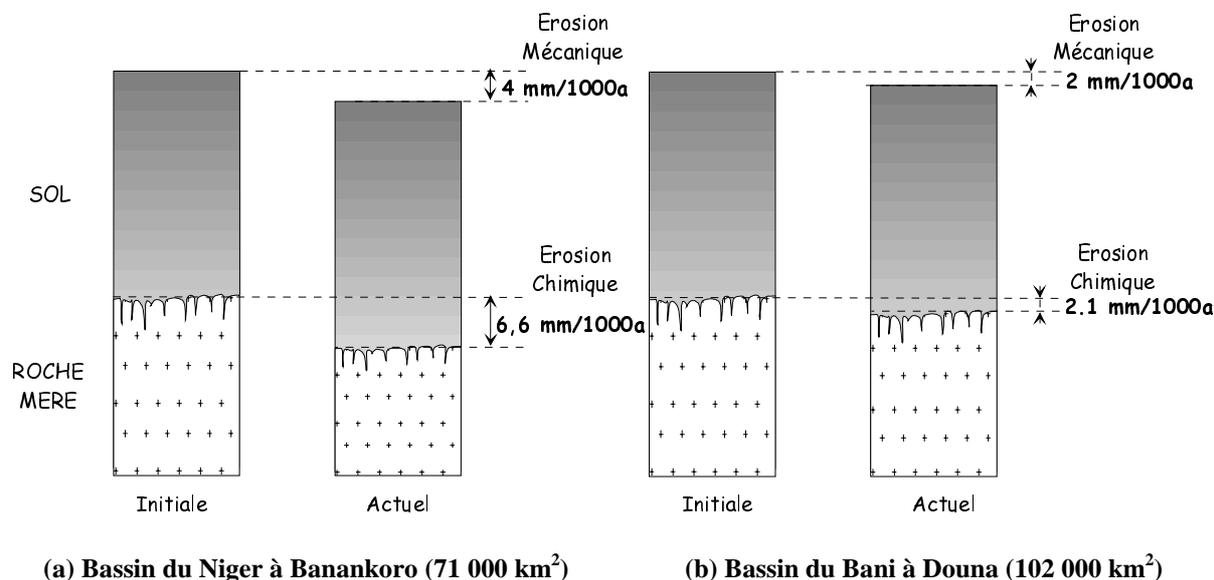


Figure 118. Bilan actuel de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur les bassins du Niger (a) et du Bani (b).

Il faut garder à l'esprit que ces valeurs sont obtenues à partir de valeurs moyennes. Il est certain qu'elles ne rendent pas compte de la variabilité locale des sols qui sont susceptibles sur ce bassin, suivant leur position dans le paysage, de s'approfondir ou de se réduire. Il est également certain que ces vitesses ne sont pas extrapolables à l'échelle des temps géologiques, pour lesquels on ignore tout des conditions climatiques.

PARTIE III : LE DELTA INTERIEUR DU NIGER

La partie précédente a permis de qualifier et quantifier les flux hydriques, particuliers et chimiques exportés par le bassin amont. La partie présente a pour problématique le devenir de ces trois types de flux lors de leur traversée du delta intérieur du Niger. Après avoir souligné la complexité du milieu, nous décrirons tout d'abord le fonctionnement hydrologique de cet hydrosystème très particulier, pour quantifier le devenir des eaux qui s'y introduisent et ainsi aboutir à un bilan hydrique. De ce dernier vont dépendre en partie les changements dans la composition chimique des eaux. Ensuite pour les différentes années étudiées, nous quantifierons à l'aide des nombreuses mesures de MES et d'éléments dissous sur les différentes stations du Niger dans le delta, l'impact de la traversée d'une zone comme le delta sur les différents flux de matières dissoutes et particulaires. L'étude de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations et des flux et notamment des bilans de matière particulaire entre entrées et sorties du delta, permettront de conclure sur les phénomènes dominants qui se produisent lors de la traversée du delta.

Chapitre VII. Eléments du régime hydrologique du Delta Intérieur du Niger

La géographie, la géomorphologie et la genèse du delta intérieur du Niger ont été abordées dans le chapitre I. L'originalité de ce type d'hydrosystème a été soulignée : le delta se trouve au coeur du système fluvial du Niger, au coeur de l'Afrique de l'Ouest et en bordure des régions désertiques du Sahara. Son originalité tient aussi à son fonctionnement hydrologique, qui est présenté dans ce chapitre.

1. RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET INONDATIONS

A partir des entrées dans le delta intérieur du Niger définie dans le chapitre III, les écoulements empruntent un réseau hydrographique très dense et complexe de bras, de défluent (mayo en peul, et mayodji au pluriel), et lacs qui s'organisent autour d'axes principaux. Les principaux axes d'écoulement sont sommairement présentés ici afin de permettre une meilleure compréhension du fonctionnement du delta.

Le delta intérieur du Niger commence en amont, dans les plaines et dépressions où les crues du Niger et du Bani communiquent (au sud de Mopti), et se termine en aval à Korioumé où tous les écoulements se sont rejoints. La surface de son "pseudo bassin versant" (hors bassin amont) a été estimée à 80 000 km² par Brunet-Moret (1986) et plus récemment à 74 000 km² par Bamba *et al.* (1997). En fait cette valeur représente la zone influencée par l'hydrosystème et il est difficile de parler de bassin versant dans le sens classique ; celui-ci variant avec l'extension des liaisons hydrographiques suivant la saison et les années.

Le delta intérieur du Niger est constitué de deux grandes unités hydrographiques (Figure 119) basées sur des différenciations morphologiques:

- une **partie amont** et centrale en aval de Ké-Macina et Douana avec constitution de deux branches majeures ; elle s'étend jusqu'aux lacs centraux (lac Débo, lac Wallado, lac Korientze) et est composée de vastes zones d'épandages encore largement inondées par la crue annuelle..
- une **partie aval** qui s'étend des sorties des lacs centraux, avec trois axes drainants principaux (Issa Ber, Barra Issa, Koli Koli) jusqu'à Diré, où une géomorphologie très différente caractérisée par une surimposition aux formes deltaïques antérieures d'un erg holocène orienté est-ouest,

conduit à observer un réseau hydrologique très diffus, souvent commandé par les sillons interdunaires, avec des zones d'inondations plus réduites.

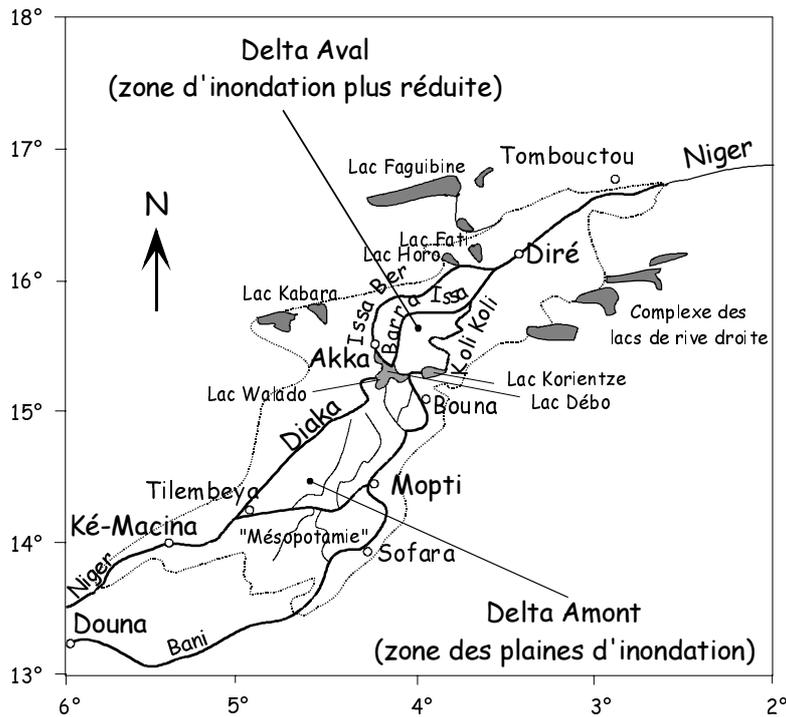


Figure 119. Le delta intérieur du Niger et ses axes d'écoulement principaux.

1.1. Le réseau hydrographique

1.1.1. Le delta Amont

A l'aval de Ké-Macina au niveau de Diarafabé, le bras principal du Niger se sépare en deux pour former un bras secondaire, le Diaka, plus ou moins bien marqué jusqu'à la jonction avec le lac Débo après la traversée du Walado. Le bras principal transite du sud au nord-est jusqu'à Mopti où il reçoit le Bani puis rejoint le lac Débo. Ces 3 cours d'eau (Niger, Diaka et Bani) constituent les principaux axes d'écoulement au niveau du delta amont autour desquels s'agencent, se hiérarchisent, le réseau de défluent et les plaines inondées. En rive gauche du Bani, des défluent rejoignent le Niger à travers le complexe Djénné-Kouakourou (également appelée la "Mésopotamie"), ce qui explique les pertes importantes du Bani entre Douna et Sofara. Le milieu hydrique de cette zone s'organise autour de grands troncs hydrographiques permanents ou semi-permanents bien marqués. Entre Tilembeya et Mopti, d'autres défluent en rive gauche ramènent à travers la partie centrale du delta suivant une direction N-NE une partie non négligeable des écoulements vers le Diaka. Ces zones constituent des réseaux compliqués, de bras d'eau libre s'écoulant imperceptiblement ou non, disparaissant,

réapparaissant, changeant continuellement de topographie ou s'épandant brusquement dans une succession de mares. Le Diaka et le Fatoumao (bras secondaire) sont bordés par des levées alluviales sableuses dont l'altitude est comprise entre 270 et 274 m (Blanck & Lutz, 1990). Des brèches entaillent ces levées par lesquelles s'échappent les eaux de débordement.

A l'aval de Mopti, le Niger s'élargit encore et la pénétration des eaux d'inondation derrière les bourrelets de rive est profonde sur la rive gauche. Toute la zone Diaka-Niger est encombrée de mares, de plaines inondées et de mayodji aux méandres nombreux mais dont la direction générale du réseau est orientée vers le nord. A 25 km de Mopti, le mayo Dembé rejoint le lac Débo à partir de la rive gauche de l'axe principal du Niger. Au niveau de Saya, à environ 50 km de Mopti, le Yamé (4 670 km²) forme l'unique affluent qui regroupe les eaux drainant le massif gréseux du plateau Dogon.

Au niveau de Bouna, il n'existe plus réellement de bras privilégiés. L'arrivée de la crue au lac Débo se fait par d'innombrables bras plus ou moins bien calibrés et envahis par la végétation.

1.1.2. Le delta Aval

Le delta aval est caractérisé par trois défluent qui sortent du lac Débo :

- L'Issa Ber, branche majeure à l'ouest qui est le seul défluent à couler toute l'année. Il quitte le lac Débo vers Akka, puis alimente le système lacustre de la rive gauche.
- Le Barra Issa défluent central du Débo qui sort au niveau d'Awoye. Les plaines reliées à ce bras sont assez bien inondées durant la crue. Il rejoint l'Issa Ber en amont de Diré.
- Le Koli Koli, à l'est, est le plus petit défluent du lac Débo. Il traverse le lac Korientze (du fait de bords abrupts, une partie de ce lac est toujours en eau) puis rejoint le Barra Issa à Saraféré.

L'inondation par les chenaux longitudinaux se propage en bordure immédiate des grands cours d'eau dans les creux inter-dunaires.

En bordure du delta en rive droite et en rive gauche apparaissent de nombreux lacs qui sont alimentés plus ou moins directement et naturellement par les défluent du lac Débo (parfois en cascade d'un lac à un autre), suivant les conditions d'écoulement amont (hydraulicité de l'année) et locales (bassin versant local). Les lacs de la rive droite sont actuellement à sec. Certains lacs de la rive gauche sont encore plus ou moins alimentés par les défluent du lac Débo : l'alimentation du lac Horo est régulée par une vanne (une grande zone de culture est installée dans cette plaine) ; le lac Kabara a également été aménagé (Puech et Gadelle, 1993) ; le chenal menant au lac Fati est aujourd'hui presque à sec. Certains de ces lacs, comme le lac Korarou, lorsqu'ils sont remplis par une crue exceptionnelle du Niger, ne se vidangent jamais lors de la décrue du fleuve et peuvent donc piéger des quantités d'eau non négligeables. La Figure 120 résume les données disponibles sur la capacité de piégeage de ces lacs de rive droite.

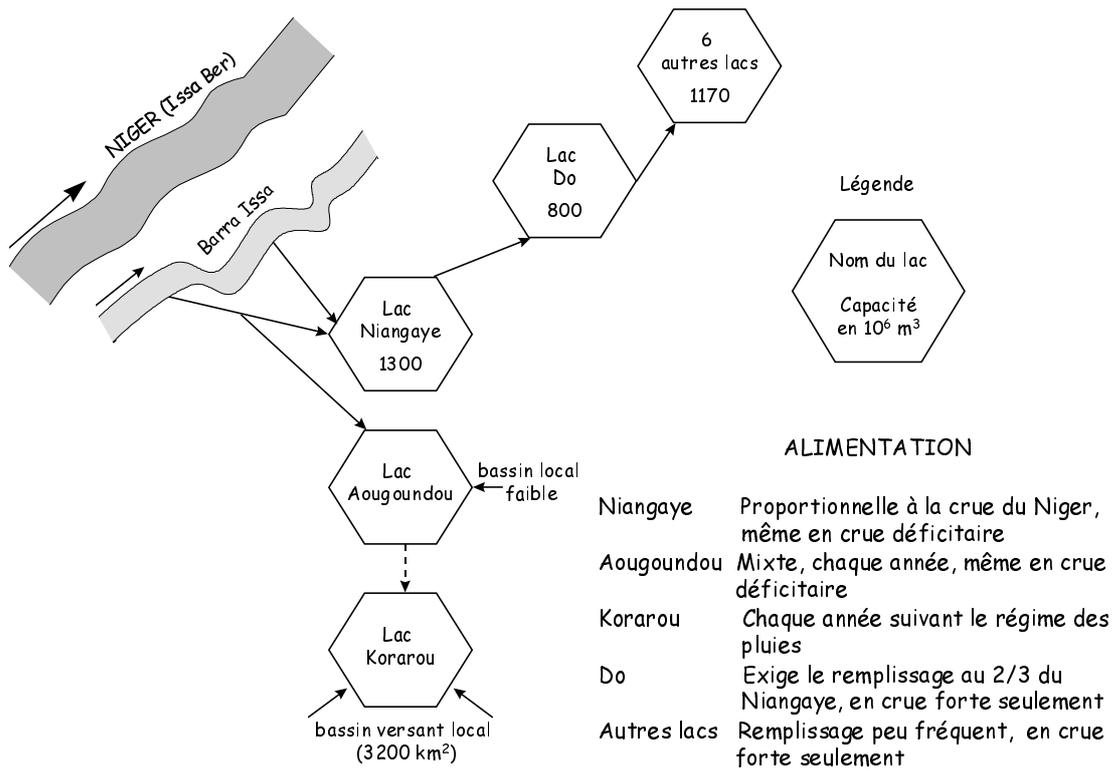


Figure 120. Données disponibles sur la capacité de piégeage des lacs de rives droite (d'après Brunet-Moret et al., 1986).

La totalité des écoulements est quasiment réunie à Diré après la confluence de l'Issa Ber et du Barra Issa. L'extrémité nord du delta intérieur du Niger, de Diré à Korioumé (15 km de Tombouctou) est surtout marquée par le défluent du marigot de Goundam alimentant le système lacustre Télé-Faguibine (l'eau ne pénètre que très exceptionnellement dans ces plaines à l'heure actuelle). Le Niger a alors atteint son parcours ultime vers le nord et aborde la boucle du Niger avec le contrôle hydrologique du seuil de Tossaye.

1.2. Description sommaire de l'inondation dans le delta

1.2.1. Modalités de l'inondation

Avec l'arrivée de la crue amont, l'eau va s'épandre dans le delta intérieur du Niger. Le delta amont est la région régulièrement submergée et de manière importante. Les modalités de mise en eau de ses plaines deltaïques sont très mal connues faute de données topographiques précises. Elles sont variées, car conditionnées par des caractères particuliers d'ordre hydrographique, géomorphologique et biologique comme les liaisons entre plaine et réseau hydrographique, existence de seuil, comblement de plaine, effet de barrage dû à des levées, action de la végétation.

La pente superficielle du Niger dans cette zone est extrêmement faible (Lamagat & Molinier, 1983 ; Guiguen, 1985) : de Mopti à Diré elle est de l'ordre de 2 cm par kilomètre (pente moyenne sur 231 km) et de moins de 1 cm par kilomètre sur le tronçon allant de Niafunké à Diré (85 km). En fait, le passage du lac Débo marque une diminution assez brutale de la pente qui reste relativement élevée à l'amont (3 cm.km^{-1}). La faiblesse de ces pentes favorise des dépôts latéraux de matériaux qui forment un cordon riverain ou bourrelet de berge qui limite les eaux vives (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

Dans l'ensemble, les vitesses superficielles sont relativement nulles ou imperceptibles, sauf dans les bras ou les défluent principaux. L'endiguement naturel des bras principaux conjugué à la faiblesse de la pente et de la sédimentation dans le lit entraîne ainsi un exhaussement du lit de transit. Il en résulte une pente superficielle latérale entre le lit mineur et le lit majeur. Le fleuve se comporte comme un canal distributeur alimentant un lit majeur très étendu, comportant plaines d'inondation, lacs reliés par l'intermédiaire de bras, et d'émissaires (voir paragraphe précédent) qui en détournent d'importants volumes d'eau qui sont perdus pour l'écoulement (Figure 121). L'inondation des plaines se fait lors des années de forte hydraulicité, par déversement des eaux des mayodji par dessus les levées. La plaine du Kotia et l'est du Diaka sont les zones les mieux exposées aux inondations. Durant l'étalement de la crue, les seuls terrains exondés sont les levées récentes, les toguérés (buttes artificielles, composées de débris des très anciens villages) sur lesquels sont bâtis les villages, les buttes gréseuses de l'Aïre Soroba, l'Aïre Kadiel et l'Aïre Gourao vers le lac Débo.

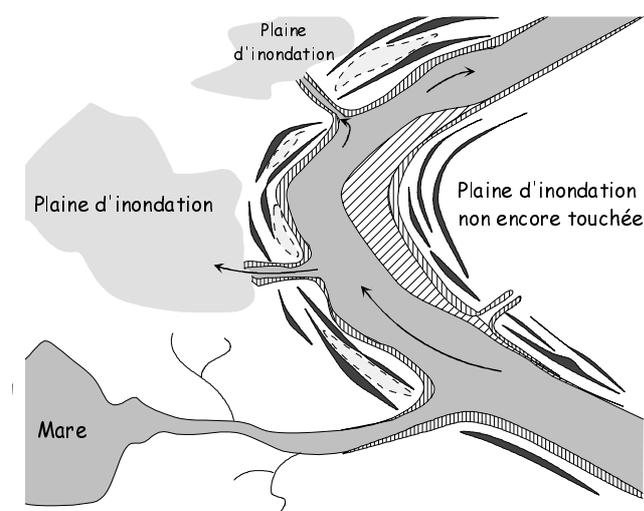


Figure 121. Schématisation d'une portion du delta amont - chenal principal, chenaux secondaires, berges, plaines d'inondation, mare,

Il faut également signaler que dans cette zone amont, principale zone d'activité du delta, de nombreux aménagements hydrauliques "artisansaux" peuvent changer les modalités de mise en eau et de drainage des plaines inondées (Chamard *et al.*, 1997). Des chenaux plus ou moins larges et plus ou moins longs, ont été creusés dans la partie supérieure des berges et des défluent par les pêcheurs (pour faciliter les déplacements et la capture des poissons) ou les riziculteurs (pour notamment assurer la mise en eau des plaines à l'occasion des crues faibles). En cas de crue forte et soudaine, la submersion des plaines est rapide et la translation des eaux vers l'aval est accélérée.

Lors de la décrue, les écoulements peuvent changer de direction. En effet, une plaine alluviale remplit deux fonctions hydrologiques : comme réserve temporaire pour une part du volume de crue du lit majeur mais aussi comme pourvoyeur qui alimente le chenal principal (Wilby & Gibert, 1993).

Avec le Niger et le Bani, le Diaka, l'Issa Ber et le Barra Issa sont les seuls chenaux à couler toujours dans le même sens (du sud au nord). Les chenaux secondaires (y compris le Koli Koli aval), et les chenaux encore plus petits, voient leur cours s'inverser selon les phases de remplissage ou de drainage des cuvettes inondables avec lesquelles ils communiquent.

Un modèle graphique de l'hydrosystème (Figure 122) qui résume bien les différentes interactions possibles entre les nombreux éléments du réseau hydrographique (axes principaux et secondaires ; lieu de confluence ou défluence entre chenaux ; plaine d'inondation et lacs) a été proposé par Poncet & Maïga (1997). A chacun de ces trois éléments est attribué une fonction :

- Les grands drains et les multiples chenaux sont considérés comme des éléments qui participent à la « Transmission » de l'eau ;
- Les convergences des affluents ou les divergences des défluent sont des lieux de « Connexion » des flux hydriques ;
- Enfin, les lacs et plaines sont des zones de « Stockage » de l'eau.

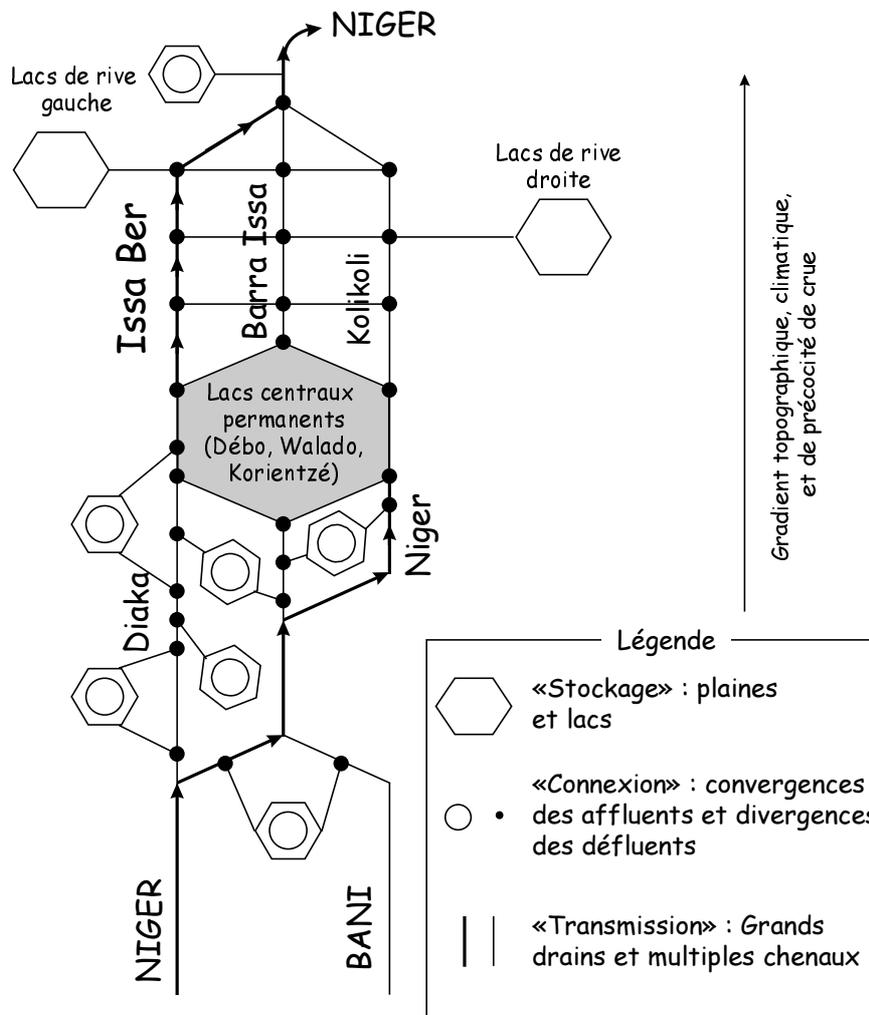


Figure 122. Modèle graphique et éléments du réseau hydrographique du delta intérieur du Niger (d'après Poncet & Maïga, 1997- Communication personnelle).

1.2.2. Extension spatiale de l'inondation

Le delta intérieur du Niger est donc classiquement défini comme la vaste zone d'épandage des eaux du Niger et du Bani, délimitée par l'extension d'un ensemble de plaines inondables, de chenaux et de lacs. Cette délimitation correspond en fait à un état hydrographique bien identifié, celui des hautes-eaux des années 1955 à 1965 environ (Poncet Y., 1994). Mais, l'extension réelle actuelle de la crue, observée depuis une dizaine d'années, ne correspond plus à ce vaste ensemble de plaines inondées et de grands lacs. Par exemple, la superficie des terrains restant exondés dans la zone délimitée par le Diaka et le bras du Niger, est passée de 291 à 1690 km² entre 1953 et 1989 (Chamard *et al.*, 1997).

Il existe quelques données sur les superficies actuellement inondées mais qu'il faut prendre avec précautions (faute d'études précises de l'ensemble des surfaces inondées, par image satellite par exemple). La représentation du tracé et de la nature des zones d'inondation actuelles a été réalisée à partir des cartes IGN et de la carte d'inventaire des ressources ligneuses à 1/200 000 (programme PIRL, 1990) par Poncet (1994). Avec la sécheresse, les aires inondées sont devenues discontinues, inégalement réparties dans l'espace et variables dans le temps. Dans la situation "moyenne" des années 1970 à 1990, les surfaces régulièrement inondées (12 400 km²) plus les surfaces non régulièrement inondées (y compris les lacs) représentent une superficie estimée à 18 500 km². La situation réelle observée des années 1990-1992 correspondrait à des superficies encore moindres.

Les superficies inondées ne sont pas les mêmes sur les différentes parties du delta. L'inondation en amont de Mopti (ou « haut delta ») était estimée par Gallais en 1967 à 7200 km² dont 684 km² exondés en permanence. Avec le contexte hydroclimatique de ces dernières années, Poncet (1994) évalue les surfaces régulièrement inondées à seulement 1500 km². Le "delta moyen" (zones des grandes plaines), et le "bas delta" (zone des dépôts alluviaux et de colmatage à proximité des lacs centraux) représente la majeure partie des surfaces inondées : elles sont estimées à 19 400 km² (dont 600 km² de lac en hautes eaux) par Gallais (1967), et à 8750 km² (Poncet, 1994) pour la période récente d'inondation restreinte. Une estimation de 14 000 km² pour le seul delta des plaines est également avancée par Chamard *et al.* (1997). Le rôle de cette zone va donc être prédominant dans le bilan global. Aucune valeur n'est donnée pour la deuxième partie du delta en aval des grands lacs. Cette zone inondée ne représente qu'une faible part de l'inondation annuelle.

Cette image statique de l'inondation maximale ne correspond pas à la réalité de la superficie inondée à un instant t. Il faut garder à l'esprit que les hautes eaux ne surviennent pas à la même période en amont et en aval du delta : il y a un décalage de deux mois environ entre le maximum à Ké-Macina et le maximum à Diré (cet aspect de la dynamique de l'inondation sera traité par la suite). L'image réelle de la crue est un glissement du sud au nord, avec des variantes sur les bordures du delta.

Il faut encore souligner le rôle des pluies locales qui n'est pas négligeable. En effet, les zones inondées se remplissent d'abord grâce à ces dernières, puis avec l'arrivée des eaux de l'amont qui s'étendent par l'intermédiaire des chenaux et des micro chenaux. Elles se vident ensuite par drainage des chenaux et par évaporation à la descente des eaux de février à avril.

- De Ké-Macina à Diré, le Niger a parcouru environ 550 km et perdu seulement 12 mètres d'altitude, soit une pente moyenne de $2,2 \text{ cm.km}^{-1}$.
- Le delta intérieur du Niger se distingue par deux zones hydromorphologiques : le delta amont et le delta aval.
- **Le delta amont** allant des entrées du delta (Ké-Macina et Douna) aux grands lacs centraux, est caractérisé par de vastes plaines d'inondations et un réseau complexe et hiérarchisé de défluent, parfois aménagés de façon artisanale par les populations locales.
- **Le delta aval** allant des lacs centraux à Korioumé est caractérisé par 3 défluent qui sillonnent et inondent des plaines de plus faible ampleur, limitées par des sillons interdunaires, en relation plus ou moins fréquentes avec des lacs périphériques en rives droite et gauche.

2. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER

Le delta intérieur du Niger, caractérisé par des pentes très faibles et un réseau hydrographique complexe, est donc une vaste zone d'épandage pour les eaux apportées par le Niger et le Bani, ainsi que pour les pluies tombées sur son propre bassin versant.

Son fonctionnement hydrologique va ainsi être largement dépendant :

- des **conditions d'écoulement exogènes**, l'essentiel des ressources en eau provenant des régions beaucoup plus arrosées de l'amont et donc des régimes hydroclimatiques des bassins supérieurs du Niger et du Bani ;
- des **conditions morphologiques** propre au delta central, régissant les écoulements (topographie, micro-relief, forme et altitude des plaines, lacs, cuvettes...); les faibles pentes dans le delta entraînent des vitesses maximales du courant de surface n'excédant pas $0,3$ à $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ dans les bras principaux (Olivry, 1995).
- et enfin des **conditions climatologiques** (pluie, évaporation, infiltration) qui entrent en considération dans le bilan hydrologique du delta intérieur .

Les conséquences d'un tel système sur la crue du Niger vont être double. D'une part le stockage temporaire de quantités d'eau importantes va provoquer l'amortissement de la crue à la sortie du delta ; d'autre part, ces mêmes stockages, qui favorisent une évaporation intense et une éventuelle percolation (fonction de la superficie inondée), vont entraîner des pertes hydriques importantes. Ces deux caractères sont bien sûr étroitement liés, et fonction de l'extension spatio-temporelle de l'inondation.

2.1. Propagation de la crue amont - aval

Une première caractéristique importante de l'hydrologie du Delta tient dans l'amortissement de la crue annuelle. C'est la propagation de la crue longitudinalement (d'amont en aval) et transversalement (vers les plaines inondées) qui explique la forme amortie de l'hydrogramme à Diré. En effet, l'amortissement de la crue annuelle qui se perd dans l'immense plaine d'inondation du delta intérieur du Niger provoque un étalement des hydrogrammes et un décalage du maximum pour les stations aval. La vitesse de propagation et de retrait des eaux va être influencée par les connexions affluents-défluent, par l'effet de stockage non-uniforme des lacs centraux et des plaines d'inondation.

Remarque : Gallais (1979) montre qu'à cause du goulot d'étranglement de Akka à la sortie principale du lac Débo, il y a une remontée de la crue de l'aval vers l'amont qui s'accompagne de l'inondation des bourgoutières de la rive méridionale du lac. Ces observations suggèrent que le stockage effectué par les lacs centraux n'est donc pas un stockage uniforme.

2.1.1. Estimation des temps de transfert

Le Tableau 60 présente les dates d'apparition et le décalage du point le plus haut de l'hydrogramme vers l'aval entre différentes stations du delta pour les différentes années de la période d'étude (rappelons que ce calcul ne correspond, en aucun cas, à la vitesse du courant à travers le delta intérieur). Les Figure 123 et Figure 124, établies à partir des débits moyens journaliers, montrent cet étalement des hydrogrammes de l'amont vers l'aval pour les années hydrologiques 1992-93 et 1994-95. Les rapports moyens (1991-1997) $Q_{MAX}/Module$ passent respectivement de 4,3 à la station principale de Ké-Macina à l'entrée du delta à 2,5 à la station de Diré à la sortie du delta.

	1990/92		1991/92		1992/93		1993/94		1994/95		1995/96		1996/97	
	date	jours	date	jours	date	jours	date	jours	date	jours	date	jours	date	jours
Banankoro	16-sept		28-août		12-sept		10-sept		24-sept		28-sept		03-oct	
Koulikoro	22-sept	6	13-sept	16	17-sept	5	25-sept	15	03-oct	9	01-oct	3	04-oct	1
Ké-Macina	24-sept	2	16-sept	3	19-sept	2	28-sept	3	09-oct	6	05-oct	4	07-oct	3
Nantaka-Mopti	03-oct	9	05-oct	19	27-sept	8	1-oct	3	27-oct	(18)	26-oct	(21)	16-oct	(9)
Akka	22-oct	19	30-oct	25	23-oct	26	16-oct	15	01-déc	35	15-nov	20	10-nov	25
Dire	25-nov	(2)	01-nov	2	23-oct	0	30-oct	14	21-déc	(20)	20-nov	5	12-nov	(2)
Ké-Macina - Diré		30		46		34		32		(73)		(46)		(36)

Remarque : La crue étant très amortie en année humides à Akka et à Diré, il est parfois difficile de définir la date du débit maximum. Lorsque le choix de cette date a posé problème le nombre de jours est entre parenthèses.

Tableau 60. Dates d'apparition et décalage des maximums de crue entre différentes stations du delta pour la période d'étude.

Ces deux représentations montrent bien que l'amortissement de l'onde de crue varie considérablement suivant l'hydraulicité amont. En effet, le transfert de l'onde de crue est d'autant plus long que le maximum de crue est important et donc que l'inondation et les débordements deviennent importants, mais il n'est pas possible d'établir de relation précise. Effectivement sur la période étudiée, l'année 1991/92 de faible maximum a mis 46 jours pour effectuer le parcours entre Ké-Macina et Diré soit le même temps que l'année 1995/96 dont le maximum atteint est le double. Inversement, l'année 1994/95 voit son temps de parcours se rallonger de 27 jours pour un maximum de débit équivalent à celui de 1995/96. Olivry (1995) estime qu'entre les crues minimales et maximales, le transfert de l'onde de crue peut varier de 18 jours à 78 jours entre Ké-Macina et Diré.

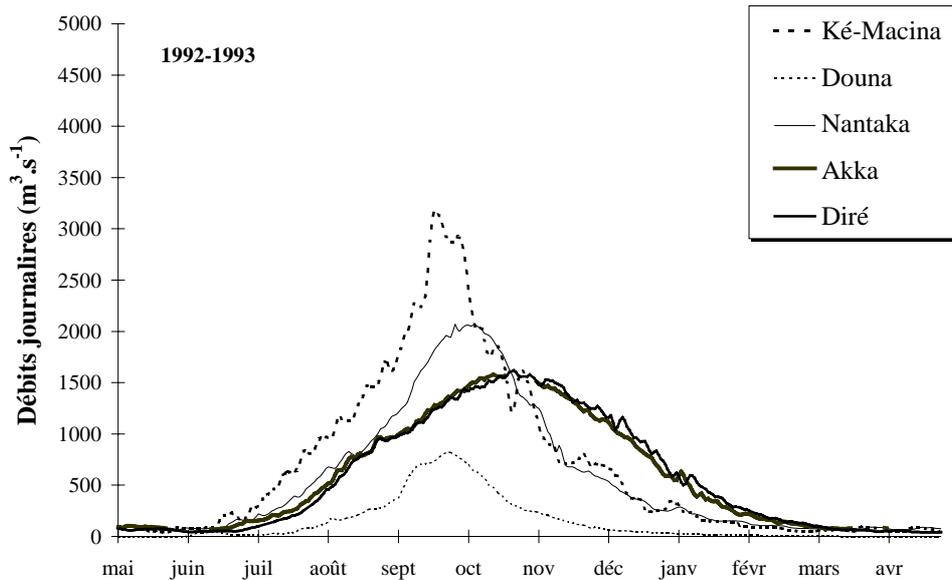


Figure 123. Amortissement des hydrogrammes de l'amont vers l'aval pour l'année hydrologique 1992-93

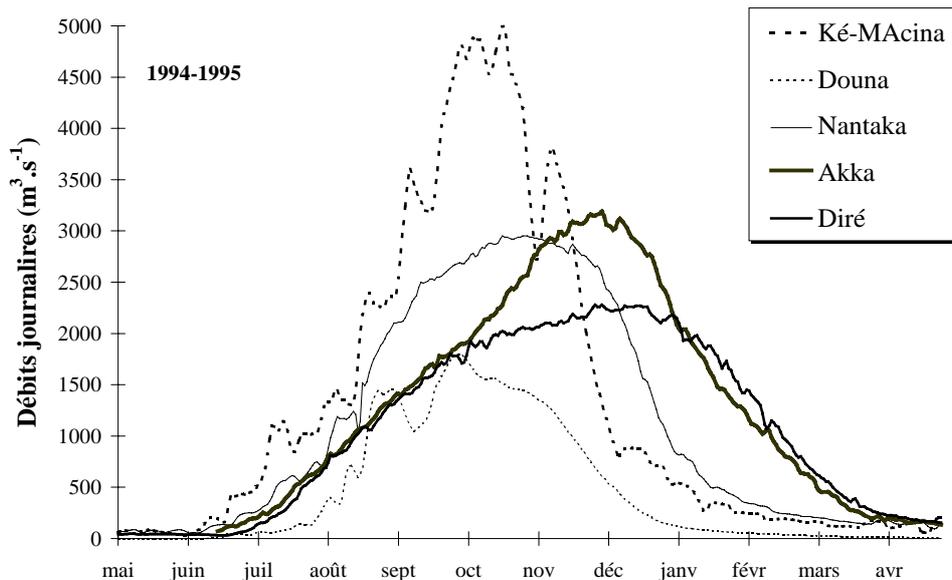
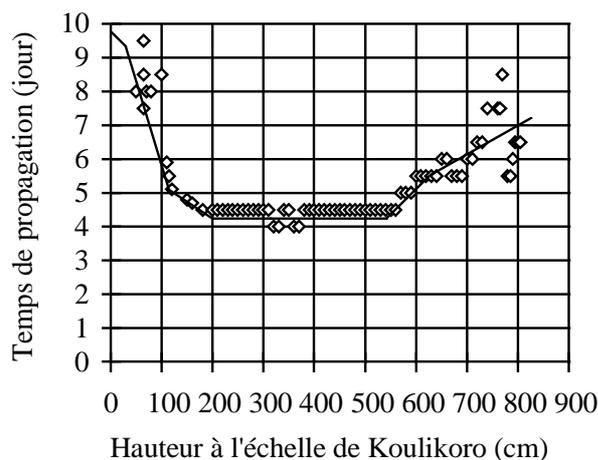


Figure 124. Amortissement des hydrogrammes de l'amont vers l'aval pour l'année hydrologique 1994-95

La rapidité de l'onde de crue n'est pas la même sur les trois tronçons principaux (Ké-Macina-Nantaka (Mopti), Nantaka-Akka et Akka-Diré) : l'onde de crue est la plus lente sur le deuxième tronçon entre Mopti et Akka (Tableau 60).

Lamagat *et al.* (1993) ont développé un modèle pour résoudre le problème de la transformation des hauteurs en débits pour les stations non-biunivoques tels que Ké-Macina, et modéliser le transfert de la crue dans des bassins hydrographiques complexes. Malheureusement son analyse se limite au bief Koulikoro-Ké-Macina (Figure 125) : elle montre toutefois que les temps de transfert ne sont pas les mêmes suivant la période du cycle hydrologique.



- une partie importante des eaux du Bani est dérivée en amont de Sofara par le mayo Manga qui rejoint le Niger entre Tilembeya et Mopti. Les débits alimentant les affluents de rive gauche ne sont fonction que de la puissance très inégale de crue du Bani entre Douana et Beneni-Kégnny (sur le Bani) : en dessous de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les apports sont identiques aux deux stations ; au delà de cette limite, la différence entre bassin versant amont et bassin aval augmente rapidement pour atteindre $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pour un module de $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Douana.
- 1/3 des écoulements du Niger sont déviés par le défluent principal, le Diaka pendant la période de hautes eaux ;
- enfin, le système des défluent de rive gauche entre le Diaka et Mopti dévie une proportion importante des écoulements qui rejoignent le lac Débo.

Il apparaît ainsi des différences notables sur les deux hydrogrammes de la période étudiée pour les stations de Nantaka-Mopti et Diré, avec des distinctions entre années de bonne et de mauvaise hydraulicité (Figure 123 et Figure 124). Par exemple, l'hydrogramme de crue de Mopti-Nantaka pour l'année 1992/93 est similaire à celui de Ké-Macina en décrue, les apports du Bani sont faibles devant ceux du Niger. Pour l'année 1994/95, les débits observés à Nantaka sont bien au-dessus de ceux de Ké-Macina et même supérieurs à la somme des débits à Ké-Macina et Douana. Il y a donc un gain de débit. Bien sûr, il y a un décalage entre les deux masses d'eau mais il s'agit ici sans doute, de la vidange de la plaine inondée entre les deux tributaires. L'inondation importante de la "mésopotamie" va sans doute avoir des conséquences sur les transports particulaires et dissous.

La station de Kara se trouve à l'entrée du Diaka, défluent principal du Niger (avec environ 1/3 du débit annuel du Niger). La liaison entre le Niger et le Diaka se fait par un seuil marqué : dès qu'une hauteur minimum est atteinte l'écoulement de l'eau est arrêté net. La période d'écoulement se limite sur la période d'étude (1990-1997) de juin à janvier - février.

2.1.3. Evolution des hydrogrammes de Nantaka à Diré

A la sortie du lac Débo, l'Issa Ber assure le transfert de 80 à 87% des sorties du lac Débo, le Barra-Issa, plus que 12 à 10 % des écoulements, et le Koli-Koli, le plus petit défluent, exporte de 3 à 10 % des sorties du lac Débo vers le lac Korientze, respectivement en période humide et sèche.

L'Issa Ber et les deux autres défluent du lac Débo alimentent aussi, suivant l'intensité de la crue et, plus ou moins directement et naturellement, les lacs de rive droite et gauche (§1.1.2) L'amortissement important observée pour l'année 1994/95 (Figure 126) est donc sans doute lié aux déviations d'une quantité non négligeable d'eau vers les lacs, dont une partie ne retourne pas au réseau (évaporation ou capture dans les lacs). On abordera par la suite plus amplement le rôle de ces lacs sur le bilan hydrique du delta.

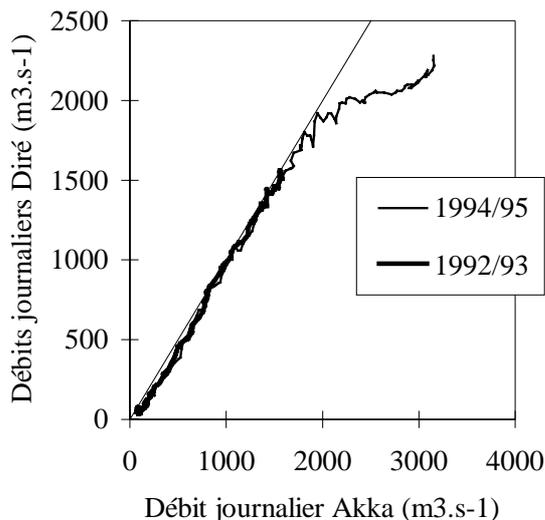


Figure 126. Relation entre les débits aval et amont sur le Bief Akka-Diré pour deux années à d'hydraulicité contrastées (période de crue).

2.2. Perte en eau dans le DIN

L'étude de l'amortissement de la crue lors de la traversée du delta a mis en évidence l'importance des pertes en eau entre les entrées et les sorties du delta mais aussi leur variabilité suivant l'hydraulicité de l'année. Pour l'étude des MES et des Dissous, le delta est séparé en deux parties entre le delta amont (des entrées aux sorties du lac Débo) et le delta aval (des sorties du lacs Débo à Diré), l'étude des pertes et du bilan hydrologique se limitera donc à cette séparation.

La Figure 127 permet de replacer les pertes hydriques annuelles du delta intérieur du Niger dans le contexte de la sécheresse des 25 dernières années. Comme à l'amont, la chronique des pertes sur la période 1951-1997 montre une diminution des pertes dans le delta intérieur du Niger, avec un sursaut pour l'année 1994/95.

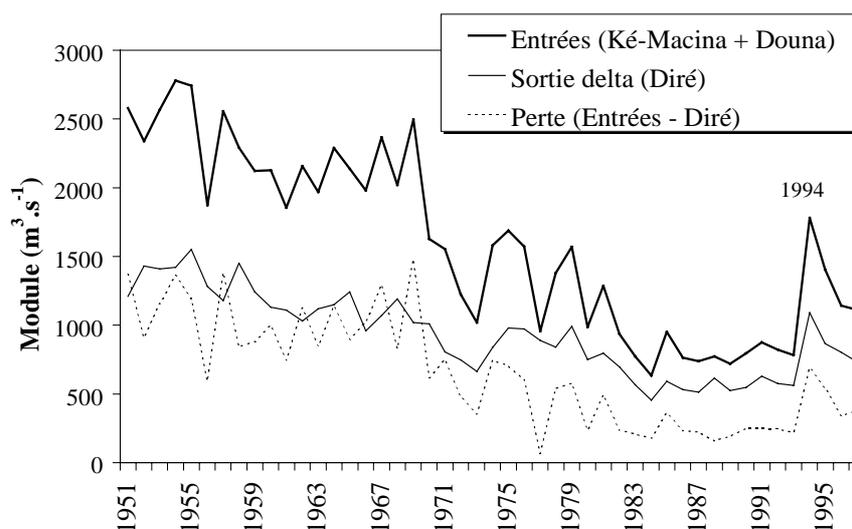


Figure 127. Chronique des pertes en eau dans le delta intérieur du Niger sur la période 1951-1997.

2.2.1. Perte annuelle

Le Tableau 62 présente pour les années d'étude des flux de matière les débits moyens annuels aux principales stations du Delta. Rappelons que les années 1994/95 et 1995/96 correspondent à des années humides pour la période de sécheresse actuelle (chapitre III) ; 1991/92, 1992/93, 1993/94 sont des années "sèches" et l'année 1996/97 une année "moyenne".

	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97
Volume en km³						
Ké-Macina	21,7	21,5	20,4	41,6	37,3	28,8
Kara	5,6	5,4	5,1	14,8	12,8	9,3
Douna	6,0	4,4	4,3	14,5	7,1	6,3
Entrée	27,7	25,9	24,7	56,1	44,4	35,1
Nantaka	19,3	17,2	16,9	35,0	28,3	23,0
Akka	19,6	18,3	18,1	38,2	28,2	24,4
Awoye	2,0	1,7	1,7	4,8	3,2	2,7
Korientze	0,8	0,6	0,7	2,8	1,6	1,3
Sortie Lac Débo	22,4	20,6	20,5	45,8	33,0	28,4
Diré	19,9	18,1	17,8	34,4	27,3	23,5
Pertes en km³						
Perte Amont	5,3	5,2	4,2	10,3	11,3	6,7
Perte Aval	2,6	2,5	2,7	11,4	5,7	5,0
Perte totale	7,8	7,7	6,9	21,7	17,0	11,7
Pertes en %						
Perte Amont	19	20	17	19	26	19
Perte aval	9	10	11	20	13	14
Perte Totale	28	30	28	39	38	33

Tableau 61. Variation des volumes et des pertes en eau de Ké-Macina à Diré, sur la période d'étude des flux de matières (1991 à 1997)

L'examen des volumes écoulés de la période d'étude (1991/1997) montre que les volumes observés après le confluent Mopti-Bani (soustrait de la dérivation du Diaka) ont déjà perdu environ 10%. Ceci est en accord avec les pertes de 18%, 14%, et 6%, suivant que l'on a une crue forte, moyenne ou faible trouvées par Olivry (1995). En effet, la non-représentativité de la station de Mopti a déjà été évoquée précédemment.

Etant donnée la complexité du réseau et de l'inondation sur cette partie du delta et l'absence de station contrôlant la totalité des écoulements, la suite du raisonnement sur les pertes hydriques, mais aussi sur les flux de matière, se fera sur l'intégralité du delta et également en séparant le delta intérieur du Niger en delta amont et delta aval.

Les pertes annuelles en eau entre les entrées et les sorties du delta sont importantes et variables suivant l'hydraulicité de l'année. Les différences entre apports cumulés du Niger et du Bani et volume écoulé à la station de Diré montrent que les pertes pour les années "sèches" (1992 à 1994) sont proches

de 30% des entrées tandis que les pertes des années "humides" (1994/95 et 1995/96) sont proches de 40 %. L'année moyenne est intermédiaire avec 33% de pertes. Ces dernières sont en fait des années moyennes sur l'ensemble de la période pour laquelle Olivry (1995) estime les pertes annuelles à 47%, 37%, et 32% de la crue forte à la crue faible. La diminution des pertes dans le delta entre les périodes plus ou moins "humides" traduit la diminution de l'extension spatio-temporelle de l'inondation (Olivry, 1995), celle-ci étant commandée par le régime amont. Les pertes sont d'autant plus importantes que les zones d'inondations augmentent (plus la crue est importante et plus il y a des débordements qui inondent les plaines, mares, et lacs), mais aussi que les défluent secondaires transfèrent des volumes plus importants qui peuvent être alors piégés dans des mares lointaines.

Une très bonne corrélation existe entre les modules initiaux à Ké-Macina et Douna et les pertes en eau sur la totalité de la période d'observation (de 1955 à 1997) (Figure 128). Plus les entrées sont importantes et plus les pertes dans le delta intérieur du Niger le seront aussi. Il n'y a donc pas de variations du régime hydraulique suivant l'hydraulicité de l'année entraînant des changements au niveau des pertes en volume dans le delta (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

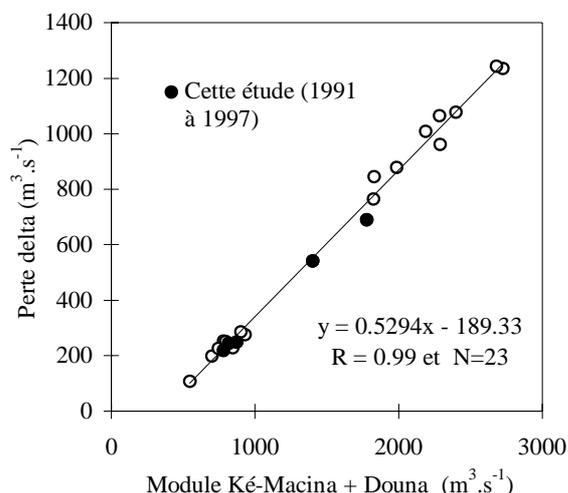


Figure 128. Relation entre les entrées et les pertes dans le delta intérieur du Niger (de 1955 à 1997)

Ces pertes en eau vont se répartir différemment entre le delta amont et le delta aval et suivant l'hydraulicité de l'année (Tableau 61). Par exemple pour l'année 1992/93, les pertes annuelles s'élèvent à 7,7 km³ (30% des entrées) et se répartissent en 20 % pour le bassin amont (soit 67% des pertes totales) et 10 % pour le bassin aval (soit 33% des pertes totales). En revanche, pour l'année 1994/95, les pertes totales sont plus importantes (39%) et se répartissent en 18 % pour le delta amont (soit 48% des pertes totales) et 21 % pour le delta aval (soit 52% des pertes totales).

2.2.2. Perte mensuelle et différence année humide (H) et sèche (S)

2.2.2.1. Répartition mensuelle des écoulements

La répartition des écoulements au cours de l'année sur la période 1992-1997 est donnée dans le Tableau 62. Les débits mensuels de chaque année sont présentés en annexe 2.

(m ³ .s ⁻¹)	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	annuel
Ké-Macina	101	193	548	1642	3112	3076	1504	597	267	137	92,2	84	948
Douna	2,46	21,3	70,3	455	880	773	382	119	39	17,3	6,66	2,7	231
Kara	0	7,1	95	460	995	1017	434	116	24	1,2	0	0	280
Nantaka	82	131	357	1100	1970	2130	1410	756	310	166	114	96,6	701
Akka	101	127	279	802	1394	1796	1968	1554	884	418	175	107	800
Awoye	0	0	9,31	72,8	158	224	260	192	87,8	27,8	4,34	0	86,3
Korientze	0	0	0	23,4	100	175	176	99,6	44	4,56	0	0	51,9
Diré	78,3	85,7	228	731	1346	1686	1722	1520	1001	500	204	99,2	767

Tableau 62. Modules interannuels (1992-1997) aux principales stations du delta intérieur du Niger.

(a) Stations principales, sans arrêt d'écoulement

Les stations principales du delta, sans arrêt d'écoulement, sont caractérisées par un amortissement de la crue annuelle plus ou moins important suivant leur situation. C'est ainsi qu'au niveau des écoulements mensuels, les trois mois d'août à octobre (qui représentaient de 75 à 70 % des écoulements annuels à Ké-Macina suivant les années) ne représentent plus que 50-60% à Nantaka, 40 à 50% à Akka et 35 à 50 % à Diré, suivant les années. Rappelons que plus l'année est de bonne hydraulicité et plus l'amortissement de la crue est important et donc les volumes mieux répartis sur la saison de hautes eaux.

Du fait d'un hydrogramme plus étroit, on observe pour l'année 1992/93 respectivement 70% des flux hydriques en septembre et octobre, alors que pour l'année 1993/94, qui est aussi une année sèche, ces deux mois ne représentent respectivement plus que 63 et 61 %. Bien que les volumes annuels soient sensiblement identiques (5%) et que la crue soit plus prolongée, les pertes annuelles sont plus importantes pour l'année 1992/93, que pour l'année 1993/94, la crue et donc les hauteurs d'eau étant plus importantes.

(b) Stations secondaires ne coulant pas toute l'année

Sur les deux années d'observations complètes (1992/93 et 1993/94), le Diaka ne coule que de juin à février. Il existe cependant des disparités suivant les années qui correspondent aux différences des caractéristiques de la crue arrivant de Ké-Macina.

Les deux stations à l'aval du lac Débo (Awoye et Korientze) sont également des stations à écoulements non permanents : pour Awoye de juillet à février en années "sèches" et de juillet à mars pour l'année "humide" 1994/95 ; pour Korientze de août à début janvier en années "sèches" et jusqu'à fin janvier pour l'année 1994/95. Comme sur la station de Akka, l'amortissement de la crue annuelle est plus important pour les années de bonne hydraulicité, et les flux mieux répartis sur les mois de hautes eaux.

2.2.2.2. Pertes mensuelles

L'étude des pertes mensuelles permet de mettre en évidence les grandes lignes de l'évolution du fonctionnement hydrologique du delta intérieur. Bien que cela ne soit pas entièrement satisfaisant, un décalage de 1 mois a été réalisé pour tenir compte de la propagation de la crue.

(a) Le delta des Entrées à Diré

La Figure 129 présente les pertes de volume en m³ entre les entrées (Ké-Macina+Douna) et Diré au pas de temps mensuel pour les années 1991 à 1997. Les moyennes interannuelles représentatives des périodes sèche et humide ont également été représentées (Figure 130, d'après Olivry, 1995).

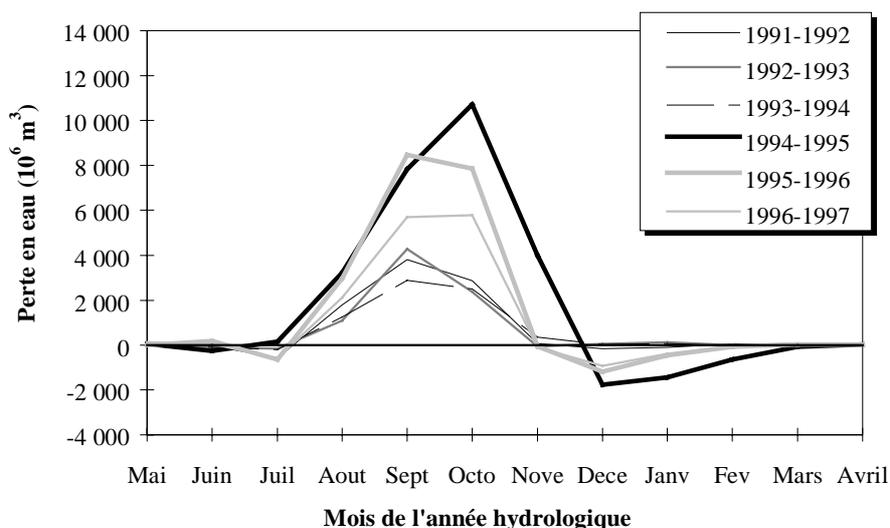


Figure 129. Pertes de volume en m³ entre les entrées (Ké-Macina+Douna) et Diré au pas de temps mensuel pour les années 1991 à 1997.

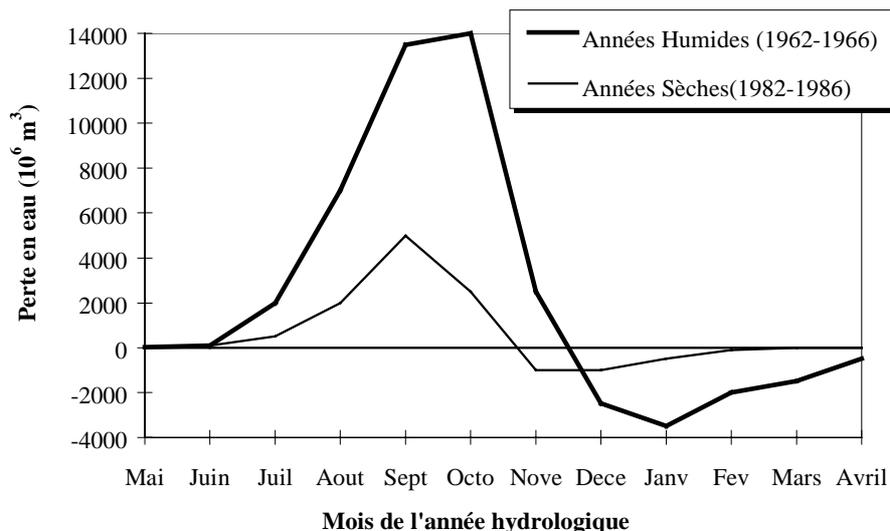


Figure 130. Moyennes interannuelles des pertes de volume en m³ dans le delta intérieur du Niger au pas de temps mensuel pour des années représentatives des périodes sèche et humide (d'après Olivry, 1995).

Avec le début de la crue, qui commence en juin, et la progression de l'inondation, il y a des pertes de volume qui correspondent à l'infiltration, à l'évaporation et surtout aux stockages de volumes importants dans les plaines d'inondation. Cette période atteint son maximum en septembre et octobre pour les années "humides" (H) (avec des pertes de 10 km^3 au mois d'octobre pour 1994/95) et en septembre pour les années sèches (S), avec moins de 5 km^3 de pertes. Le piégeage des eaux diminue rapidement en novembre (H) et octobre (S). Puis, une période de restitution partielle des volumes piégés apparaît, celle-ci correspond à la vidange des plaines d'inondation. En années humides, les mois de très fortes restitutions sont ceux de décembre, janvier, février avec un maximum en décembre de l'ordre de $1,7 \text{ km}^3$ pour l'année 1994/95. La restitution est très faible (inférieure à $0,1 \text{ km}^3$) ou inexistante en années sèches.

Pour les deux années représentatives des périodes sèche et humide, les restitutions ont lieu pour les mois de décembre, janvier, février avec un maximum en janvier de l'ordre de $3,4 \text{ km}^3$ pour les années humides. La restitution est plus précoce mais beaucoup plus faible en années sèches : autour de 1 km^3 en novembre et décembre.

Des différences au sein des groupes d'années sont visibles, elles correspondent à la forme et l'intensité de la crue de l'année considérée. Les pertes de l'année 1992/93 sont maximum en septembre puis décroissent très rapidement, alors que les pertes de l'année 93/94 sont à peu près équivalentes en septembre et en août. Ces constatations se retrouvent pour les deux années 1995/96 (H) et 1996/97 (M) où les pertes des deux mois de septembre et octobre sont à peu près équivalentes.

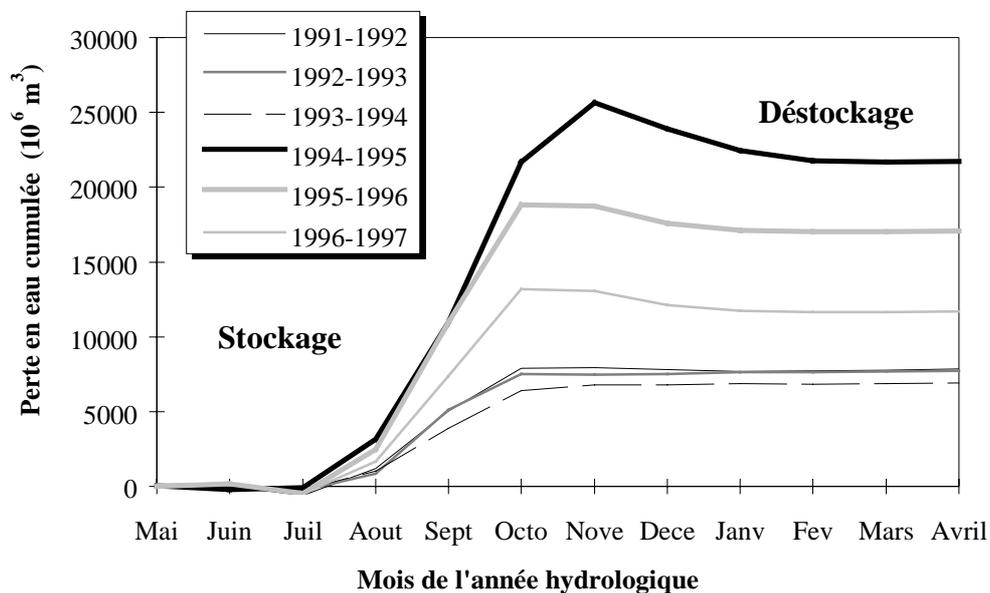


Figure 131. Cumul des pertes dans le delta intérieur du Niger au pas de temps mensuel pour les années 1991 à 1997 : phase de stockage et de destockage.

Cette différence s'explique d'une part, par le volume de départ stocké dans les plaines et d'autre part, par l'extension spatio-temporelle de l'inondation. En effet, plus la crue est importante et plus l'eau va aller loin dans les défluent, mares, lacs et donc plus la restitution sera tardive. Inversement, pour les années de faible hydraulité, le transfert des volumes est plus rapide dans le lit mineur et

l'inondation (et donc le stockage) réduite. Rappelons que ce déstockage ne concerne évidemment que les zones d'inondation en liaison avec le réseau hydrographique ; car il peut y avoir progressivement coupure entre certaines zones basses ou mares et le fleuve, les volumes résiduels passant alors dans le bilan évaporatoire de la région.

(b) Les différences delta amont / delta aval

L'étude du bilan annuel a montré une différence de comportement entre le delta amont et le delta aval vis à vis des pertes en eau, les bilans mensuels vont confirmer les importantes différences entre les deux parties du delta et entre les années H ou S.

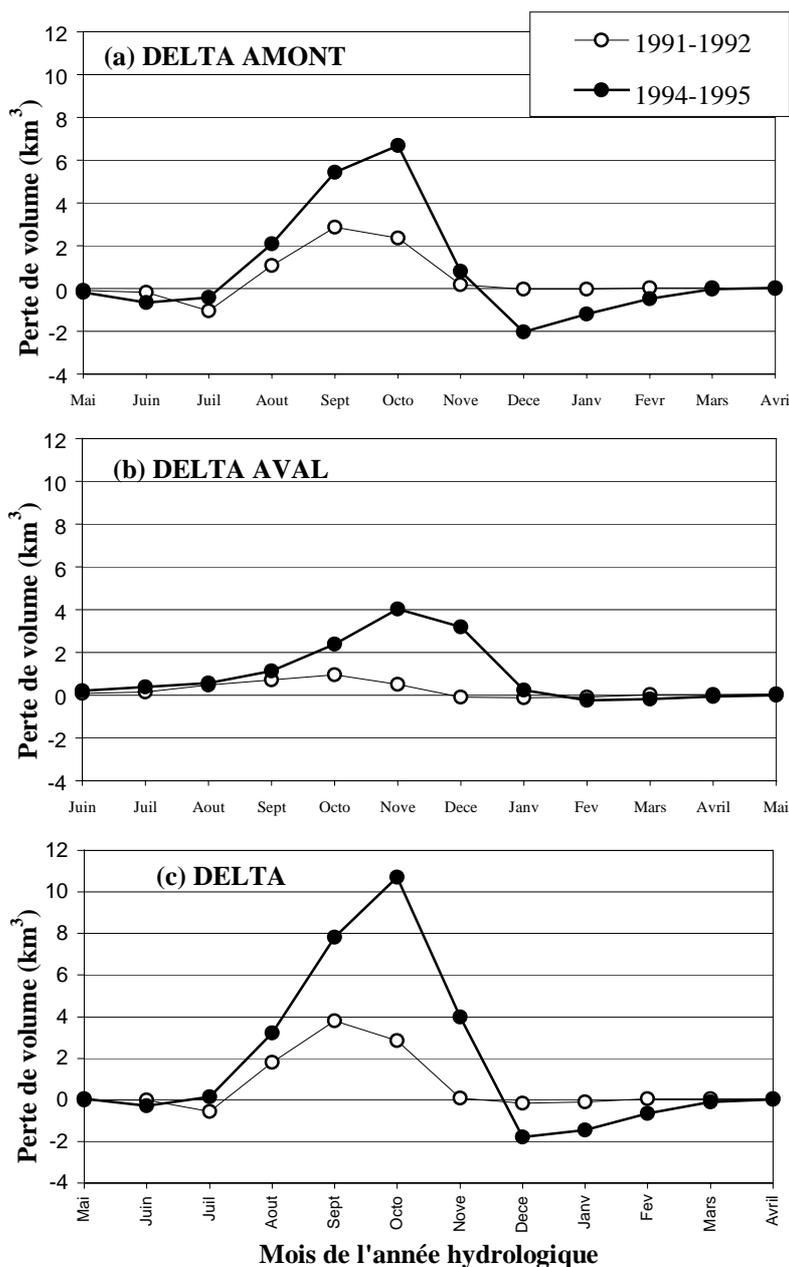


Figure 132. Comparaison des pertes mensuelles sur le delta amont (a) , sur le delta aval (b) et sur l'intégralité du delta (c) pour une année sèche (1991/92) et une année humide (1994/95).

La Figure 132 présente l'évolution des pertes en eau mensuelles au cours de l'avancement de la crue sur les différentes parties du delta et sur le delta entier et pour une année "sèche" (1991/92) et une années "humide" (1994/95). Un décalage de 1 mois a été adopté uniquement sur le delta amont (on a vu que c'est sur cette partie que la propagation de la crue est la plus lente). Pour les deux années le stockage de volume d'eau est plus important sur le delta amont que sur le delta aval, et plus important pour l'année humide que pour l'année sèche. Le phénomène de restitution ne semble survenir que sur le delta amont et que pour l'année humide. **Sur le delta aval, les volumes stockés ne sont pas restitués** ; il y a donc perte totale d'une quantité assez importante de volume (pas de restitution) que l'on peut attribuer aux lacs (pour les années humides), à l'évaporation ou l'infiltration. La forme du réseau hydrographique (Chapitre I et ce chapitre) explique ces différences, ainsi que la position plus septentrionale du delta aval.

2.3. Bilan hydrologique

Les pertes dans le delta sont très importantes, mais variables dans le temps, dans l'espace, ainsi que d'une année sur l'autre. Mais à quoi sont dues ces pertes? Se font elles par évaporation ou infiltration? D'autres éléments que les apports amont, sont-ils à prendre en compte dans le bilan hydrologique?

2.3.1. Importance de l'évaporation et de l'évapotranspiration vis à vis de l'infiltration

Les pertes annuelles en eau lors de la traversée du delta sont essentiellement liées à l'évapotranspiration ; mais en fait ces pertes, par infiltration, évaporation, et transpiration du tapis végétal sont mal connues.

2.3.1.1. L'Evaporation et l'évapotranspiration

L'importance des phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration (définis au chapitres I) dans les pertes hydriques est facilement concevable, étant données les surfaces en eau mise en jeu annuellement et l'abondance de la végétation aquatique qui y est liée, ainsi que la situation dans la zone climatique sahélienne du delta intérieur du Niger.

L'évapotranspiration sur nappe d'eau libre a été estimée à partir des évapotranspirations potentielles calculées par la formule de Penman sur les stations de Mopti et de Tombouctou affectées respectivement d'une pondération spatiale de 0,67 et de 0,33 (Olivry, 1995). Les résultats de ces calculs ainsi que les pluies moyennes observées sont présentés dans le Tableau 63. La différence entre années humides (1962-66) et sèches (1982-86) est à peine significative à l'échelle de l'année, avec des valeurs moyennes de 2260 mm et 2360 mm. Les évaporations des mois de forte inondation sont notamment très voisines (Pouyaud, 1986). Pour les mêmes périodes, les hauteurs moyennes de précipitations mensuelles ont été calculées à partir des relevés de neuf stations de la Cuvette (Ké-Macina, San, Tenenkou, Sofara, Mopti, Sah, Saraféré, Niafouké, Diré). Le total annuel pour la

période humide considérée est de 490 mm et de 330 mm pour la période sèche. Le total mensuel d'août est le plus affecté dans la période sèche considérée (moitié de la valeur de la période humide)

en mm	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Année
P _H	17	58	94	190	92	26	0	3	1	0	4	6	490
P _S	13	50	92	97	65	8	2	0	0	0	0	3	330
E _{nl} H	220	210	200	160	165	185	180	160	165	185	210	220	2260
E _{nl} S	240	220	210	180	170	195	180	160	170	190	215	230	2360

Tableau 63. Précipitations et évaporation sur nappe d'eau libre dans le Delta Central du Niger en période humide (H) et sèche (S) (d'après Olivry, 1995).

La Figure 133 présente l'évolution mensuelle des pertes en eau dans le delta intérieur du Niger pour l'année 1994/95, comparée à celles des pluies et de l'évaporation sur nappe d'eau libre estimée à partir des évapotranspirations potentielles calculées par la formule de Penman (Olivry, 1995).

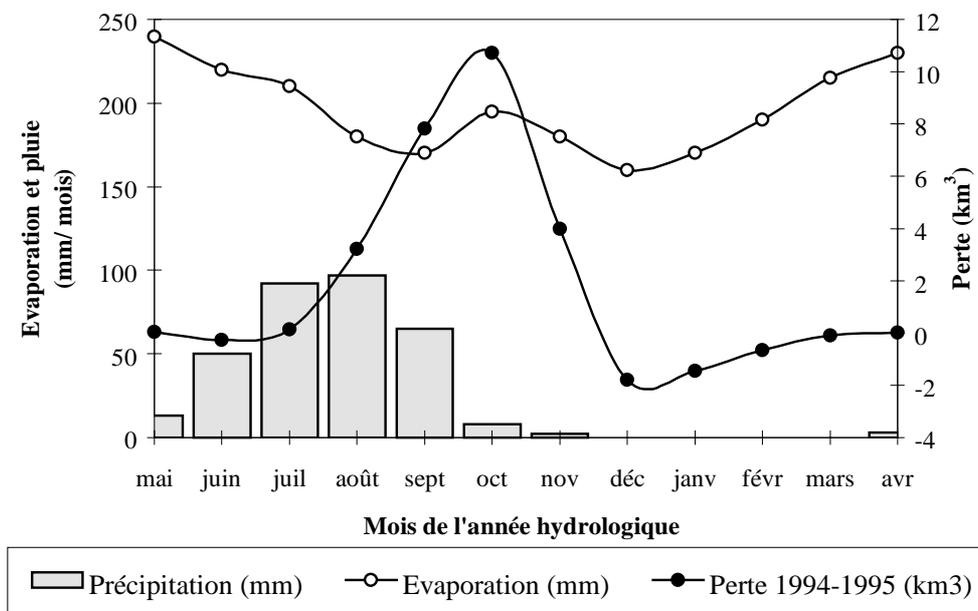


Figure 133. Evolution mensuelle des pertes en eau (année 1994/95), des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le delta intérieur du Niger (d'après Olivry, 1995).

2.3.1.2. L'infiltration

Dans la partie centrale du delta intérieur du Niger, le fond des mares, plaines d'inondation et lacs est colmaté par le dépôt d'éléments fins argileux provenant de la décantation naturelle des eaux.

Les sols du delta, à caractère argileux dominant (McCarthy, 1993 ; Censier *et al.*, 1995) ne permettent pas les échanges réguliers entre l'eau de surface et les nappes du Crétacé supérieur/Éocène inférieur et du Continental Terminal/Quaternaire (chapitre I). Les transferts d'eau sont donc limités et

ne semblent être importants que dans deux cas : pour les régions où l'inondation s'étend au delà du lit majeur, augmentant la surface d'infiltration ; et à la pointe avancée du cheminement des eaux où les sols sont entièrement sableux.

Selon Guerre & Aranyossy (1989), c'est effectivement à partir des plaines inondées les plus périphériques, des lacs remis en eau et pendant l'étale de la crue que se produit une possible infiltration. Cette recharge se fait aussi dans les mares et les bas-fonds où le temps de résidence de l'eau est important. La recharge directe par les eaux de pluies est également faible. Une grande partie de la recharge par les eaux de surface et par infiltration locale serait reprise par évaporation. En effet, dans le cas où une infiltration est possible, elle est limitée par l'évaporation qui agit aussi sur la nappe, et d'autant plus que cette dernière est moins profonde et souvent affleurante.

2.3.1.3. Conclusion

Les pertes par infiltration sont négligeables devant les pertes potentielles par évaporation de l'ordre de 2300 mm par an. Une évaporation journalière de 15 mm s'exerçant sur un plan d'eau absorbe un débit de $0,175 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ par km^2 de surface libre (Brunet-Moret *et al.*, 1986), il n'est donc pas étonnant que les pertes globales annuelles dans le delta intérieur du Niger varient de 9,33 à 42,7 milliards de m^3 suivant hydraulicité de l'année (Olivry, 1995). L'analyse des isotopes stables de l'eau confirme que les pertes au travers de la zone inondée sont dues à l'évaporation (Gourcy, 1994). La composition isotopique en ^{18}O et ^2H a été modifiée en premier lieu par l'évaporation puis l'infiltration (Fontes *et al.* 1991).

Les pertes dans le delta intérieur du Niger suivent le même principe que des mares étudiées au Niger (Desconnet *et al.*, 1997) : les grandes surfaces permettent de fortes évaporations et la perméabilité des sols est meilleure sur les parties périphériques des cuvettes. Les pertes seront donc d'autant plus importantes que les surfaces inondées durant les hautes eaux le seront aussi.

2.3.2. Bilan hydrologique

La première difficulté pour réaliser un bilan hydrologique est que, comme on l'a vu, le delta intérieur du Niger ne constitue pas un bassin versant dans le sens traditionnel. Les pertes hydrologiques sur le delta intérieur, ramenées à des volumes, peuvent toutefois s'exprimer de manière simple :

$$\frac{\Sigma (Vm_{(n)} - Vv_{(n+1)})}{\text{Pertes } (\Delta V)} \quad \begin{array}{l} (Vm_{(n)}) : \text{Volume mensuel Amont au mois } n \\ (Vv_{(n+1)}) : \text{Volume mensuel aval au mois } n+1 \end{array} \quad \text{Eq. 1}$$

ou plus simplement, dans les différences des volumes annuels mesurés aux entrées et aux sorties, le décalage d'un mois ayant peu d'effet en fin d'année hydrologique (30/4 en entrée et 31/5 en sortie).

Dans ce bilan des pertes, les **apports intermédiaires** n'ont pas été pris en compte. Il y a :

- D'une part, les apports d'affluents de rive droite issus du plateau de Bandiagara (dit plateau Dogon), dont le Yamé et le Bana, contribuent au débit du Niger. Leur bassins versants totalisent 5 310 km². Dans une rapide estimation, Brunet-Moret *et al.* (1986) montrent que l'écoulement annuel varie entre 300 et 600 millions de km³ suivant l'hydraulicité de l'année, soit une valeur moyenne de 2,7 l.s⁻¹.km⁻². Avec des lames écoulées et précipitées de 85 et 550 mm, le coefficient d'écoulement annuel atteindrait 15%, ce qui est énorme pour la région. Cette valeur doit être ramenée au contexte lithologique spécifique du plateau de Bandiagara (valeur confirmée sur le petit bassin de Sinkoroni étudié par Joignerez & Guiguen, 1992).
- D'autre part, il faut aussi tenir compte des précipitations estivales dont le volume est de l'ordre de 5,5 km³ (si on considère une superficie "utile" du delta amont de 14 000 km²). Pendant les premiers mois des pluies (mai, juin juillet) la majeure partie des précipitations tombe sur les plaines du delta qui ne sont pas en relation avec le système fluvial et contribue tout au plus au remplissage des mares (§1.2.1.). Les aires en liaison avec le fleuve évoluent dans la saison et la part des pluies du delta participant directement à l'écoulement fluvial, par les surfaces mises en eau, est difficile à estimer. Cette contribution est probablement inférieure à 1 km³.

Finalement, l'ensemble des apports intermédiaires ne représente que 5% des pertes mesurées en année moyenne. Pour Brunet-Moret *et al.* (1986) et Olivry (1995), ces apports sont du même ordre de grandeur que l'infiltration. Les pertes annuelles observées représentent donc la seule évapotranspiration réelle des superficies mises en eau dans le delta intérieur du Niger.

2.4. Modélisation des superficies des zones inondées

La propagation des crues et les superficies inondées qui lui sont liées, peuvent être décrites soit par une approche hydraulique, soit par une approche hydrologique. Les méthodes hydrauliques sont basées sur les équations des écoulements non permanents de Saint Venant alors que les méthodes hydrologiques utilisent pour la plupart le principe de continuité et une relation entre le débit et le stockage temporaire de l'eau lors de la crue. Les premiers requièrent une bonne caractérisation du milieu, et notamment de la topographie ainsi qu'une mise en oeuvre numérique complexe ; les seconds sont plus simples mais ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants (Shaw, 1994). Selon Cunge *et al.* (1980), les modèles mathématiques hydrauliques sont essentiels, pour comprendre les directions des écoulements dans des systèmes aussi complexes que la région du delta intérieur du Niger. Malheureusement, la topographie du delta intérieur du Niger est très mal connue et l'estimation de la surface inondée lors de la propagation d'une crue (qui dépend de la hauteur maximale atteinte), ne peut à l'heure actuelle faire appel aux méthodes hydrauliques. En revanche ; deux méthodes hydrologiques, se basant principalement sur les hauteurs et les débits observés en amont et en aval d'un bief, existent sur le delta intérieur du Niger, la première date de 1989 (Sutcliffe & Parks, 1989), la seconde a été développée par Olivry (1995). Ce dernier permet l'évaluation de la superficie maximale inondée dans

le delta intérieur à partir des bilans annuels des pertes en eau dans le delta. Il sera plus amplement développée par la suite.

2.4.1. Principe

Cette modélisation est une approche graphique du suivi des pertes mensuelles dans le delta intérieur du Niger. Elle aboutit pour les années d'étude à une détermination de la superficie maximale d'inondation et a servi à reconstituer une chronique de cette variable en km², variable concrète par rapport à tout indice adimensionnel de plus ou moins grande inondation exprimé à partir de caractéristiques hydrologiques.

La démarche a consisté à étudier le suivi saisonnier des pertes entre les volumes des entrées (Ké-Macina + Douna) et ceux des sorties (Diré) au **pas de temps mensuel** (déjà développé au §2.2.2.) :

- en considérant un bilan hydrologique simplifié, dans lequel les apports ruisselés dans le delta sont négligeables et où les termes précipitation et infiltration se compensent, qui s'écrit :

$$(1) \quad \text{Pertes } (\Delta V) = E - \Delta St$$

(E) : Évaporation
(ΔSt) : Variation du Stock

- en imaginant un fonctionnement homogène de l'hydrosystème sur l'ensemble du delta (ce qui est admissible au pas de temps mensuel) et en supposant que la courbe des pertes montre à un instant t, (t_{max}), un point caractéristique pour lequel l'inondation a atteint son maximum d'extension, et est "étale" : il n'y a plus stockage, il n'y a pas encore restitution. En ce point ΔSt=0 et la perte ΔV correspond à la seule évaporation. Celle-ci est connue à partir des informations données dans le Tableau 63 (§2.3.1.1.) et il est aisé de déduire la surface maximum d'inondation S : S= ΔV/E.

Le point caractéristique coïncide bien évidemment avec le maximum de crue, l'instant t_{max} ayant été choisi comme celui du maximum de hauteur observée à l'échelle Mopti/Nantaka.

La Figure 134 donne un exemple d'application de cette démarche.

Le graphe des pertes mensuelles et la date d'apparition du maximum de hauteur suffisent pour déterminer la perte maximale par évaporation (et par la suite la superficie maximale de l'inondation). La courbe des volumes mensuels évaporés est obtenue par approximations successives en limitant la période d'inondation significative de juillet à mars, de telle sorte que le volume annuel évaporé corresponde au volume annuel des pertes (stockage et restitution des réserves).

L'examen de la Figure 134 montre que cette estimation est très dépendante de la date d'apparition du maximum de la crue ; un décalage dans les dates choisies (le maximum peut être étalé sur plusieurs jours), dans une période où les pertes varient rapidement, peut entraîner une forte variation des estimations.

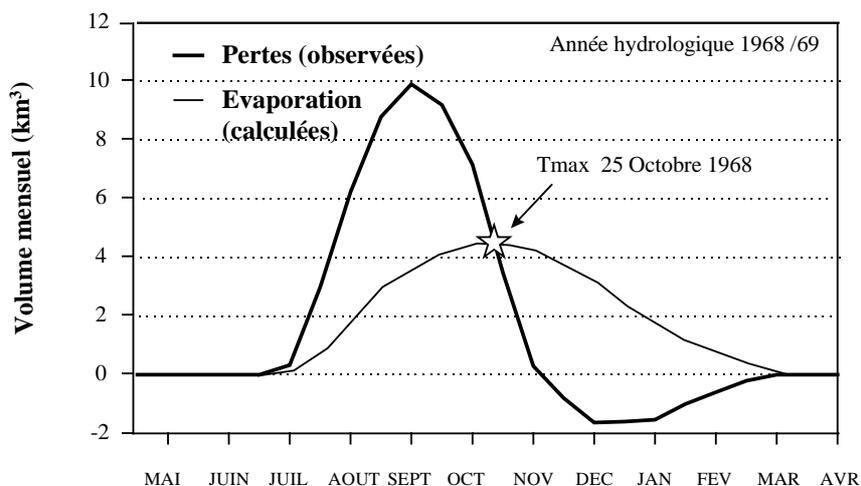


Figure 134. Exemple d'application du modèle Pertes / Evaporation dans le delta intérieur du Niger avec détermination du volume mensuel évaporé au maximum de l'inondation (t_{\max}) (d'après Olivry, 1995).

2.4.2. Quelques résultats

Une chronique de surfaces maximales d'inondation a été reconstituée sur la période 1953-1992. L'évaluation des surfaces d'inondation maximales en année humide (1954-1955), moyenne (1968-1969) et sèche (1985-1986) a ainsi été estimée respectivement à 43 200 km², 24 300 km² et 17 900 km². Les résultats ont montré pour les années de forte hydraulité des valeurs surestimées si on se réfère aux estimations faites sur carte de l'extension maximale de l'inondation dans la période contemporaine, plus proche de 35 000 km² que de 40 000 km².

Il a paru intéressant de réduire l'imprécision des estimations obtenues par le modèle ci-dessus en traitant de manière statistique les chroniques calculées précédemment. Les surfaces d'inondation maximales ont été corrélées à différentes variables hydrologiques : volumes des entrées annuelles, hauteurs maximales de la crue lues à l'échelle de Mopti/Nantaka, apports cumulés des entrées à la date du maximum,... Les régressions sont toutes de bonne qualité, les variables "entrées" et la hauteur maximale à Mopti apparaissant comme les plus pertinentes. On retiendra les deux modèles statistiques suivants :

$$(2) \quad S = 0,41 V_{\text{Entrées}} + 6 \quad (R=0,96) \quad S \text{ en } 10^3 \text{ km}^2 \text{ et } V \text{ en km}^3$$

$$(3) \quad S = 0,11 H_{M/N} - 41 \quad (R=0,94) \quad S \text{ en } 10^3 \text{ km}^2 \text{ et } H \text{ en cm}$$

L'application des modèles ci-dessus à la période d'étude des flux de matières (1991 à 1997) sont comparé dans le Tableau 64.

	Entrées Annuelles	Pertes annuelles	H max à Nantaka	date H max	Modèle (1)	f(V _E) (2)	f(V _H) (3)
	km ³	km ³	cm		10 ³ km ²	10 ³ km ²	10 ³ km ²
1991/92	24,6	7,9	503	11/10/1991	15,9	17,4	14,3
1992/93	25,8	7,8	510	08/10/1992	14,9	16,6	15,1
1993/94	27,7	7,1	473	09/10/1993	13,8	16,1	11,3
1994/95	56,1	21,9	622	06/11/1994	31,8	29,0	27,4
1995/96	44,3	18,6	586	29/10/1995	23,3	24,2	23,5
1996/97	35,1	11,9	570	23/10/1996	23,6	20,4	21,7

Tableau 64. Détermination des superficies maximales d'inondation calculées suivant le modèle graphique des pertes mensuelles (1), et les modèles statistiques (2 et 3) pour les années de 1991 à 1997.

2.4.3. Limites du modèle

Le modèle n'est pas adapté pour les très hautes-eaux, car le remplissage des systèmes lacustres périphériques et éloignés entraîne des pertes de volumes importantes (épuiement par évaporation pouvant demander plusieurs années, pertes par infiltration sur les marges sableuses très perméables lointaines). Enfin, le modèle utilise des hypothèses simplificatrices qui ne tiennent pas compte de la complexité du fonctionnement du delta, dont un aperçu a été donné dans les paragraphes précédents. Il ne tient notamment pas compte des différences entre le delta amont et le delta aval. La notion d'étale du maximum reste très théorique : l'inondation progresse encore aux marges des basses plaines quand la décrue est déjà amorcée sur les axes d'écoulement principaux, et cela est d'autant plus vrai qu'en forte hydraulicité, la mise en eau du système lacustre de rive droite apparaît tardivement. Enfin, les estimations de l'évaporation restent à vérifier ; bien qu'elles soient du même ordre de grandeur que sur le lac Tchad (2200-2300 mm an⁻¹), situé dans un contexte climatique comparable, elles demandent à être précisées par des mesures *in situ*.

Bien que le modèle ne soit plus adapté pour les très hautes-eaux, les déterminations proposées constituent une approximation acceptable des surfaces maximales d'inondation dans des conditions d'hydraulicités moyennes et faibles (Olivry, 1995). Des prévisions plus précises pour toutes situations d'hydraulicité sont probables en reprenant le modèle sur le seul delta amont du lac Débo. Un calage du modèle à l'aide d'images satellites traitées (ce qui reste à faire) permettrait sans doute d'améliorer cette modélisation.

3. CONCLUSIONS

Le fonctionnement hydrologique du delta intérieur du Niger est assujéti aux régimes du Niger et du Bani et donc de la pluviométrie dans les bassins supérieurs de ces deux cours d'eau. L'écoulement déficitaire enregistré depuis un quart de siècle sur le bassin amont a donc entraîné une diminution des apports au delta intérieur du Niger et une diminution des surfaces inondées

Les superficies inondées et l'épaisseur de la nappe d'eau sont essentiellement fonction des apports fluviaux et dans une bien moindre mesure des précipitations. L'inondation se fait par déversement, lors des années de forte hydraulité des eaux fluviales, par dessus les berges, les bourrelets de berges et les levées.

Une des caractéristiques de l'hydrologie du delta tient dans l'amortissement de la crue annuelle qui provoque un étalement des hydrogrammes et un décalage du maximum vers l'aval. Une autre caractéristique du delta sont les pertes en eau observées à la sortie du delta. Celles-ci sont plus importantes en année humide qu'en année moyenne et qu'en année sèche (Figure 135). En fait, les pertes sont d'autant plus importantes que les zones d'inondations augmentent, mais aussi que les défluent secondaires transfèrent des volumes plus importants vers la périphérie. Ces pertes en eau sont principalement liées à l'évaporation des surfaces en eau libre (mares, lacs...), l'évapotranspiration de la végétation aquatique, et dans une moindre mesure à l'infiltration dans la nappe (surtout à partir des mares périphériques et des marges sableuses). Les pertes en eaux liées plus spécifiquement au delta aval sont dues à l'évapotranspiration, et à la capture des eaux par les lacs de rives droite pour les années de bonne hydraulité.

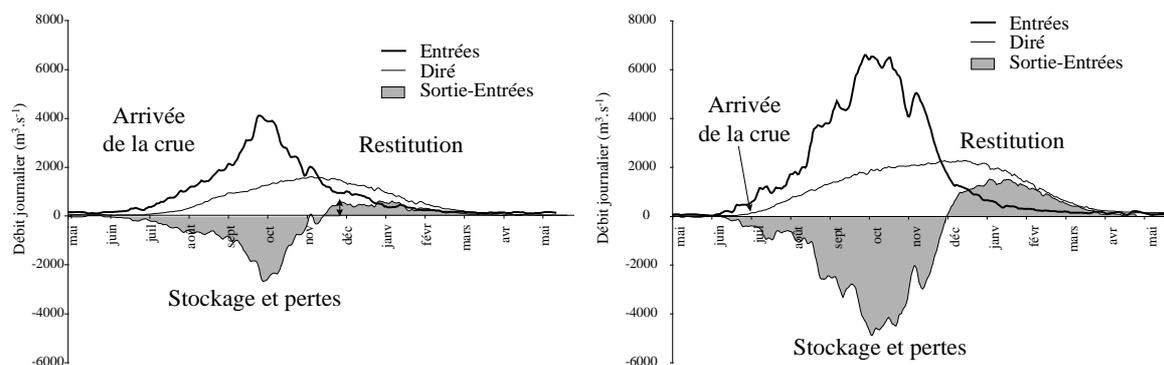


Figure 135. Comparaison des hydrogrammes d'entrée (Ké-Macina+Douna) et de sortie (Diré) du delta intérieur du Niger pour deux années hydrologiques contrastées (1994/95 et 1992/93)

L'ensemble de ces pertes et leur ampleur est une caractéristique hydrologique principale du delta intérieur du Niger qui fait de celui-ci, une *formidable machine évaporatoire* en Afrique de l'Ouest.

Chapitre VIII. Transport et dépôts de sédiments dans le delta intérieur

Le chapitre précédent a mis en évidence le rôle important que joue le delta intérieur du Niger sur les pertes en eau et sur la propagation de la crue du Niger. Le chapitre IV a permis de caractériser les quantités de MES apportées au delta. Ce chapitre vise à déterminer l'impact actuel sur le transport en suspension de cette immense zone d'inondation caractérisée par une morphologie très particulière (faibles pentes, multitudes de chenaux, ensemble de plaines d'inondation, de mares, et de lacs....).

Les plaines inondables jouent en effet un rôle essentiel dans la régulation des transferts de matières (Amoros *et al.*, 1993). De nombreuses études ont montré que ces sites constituaient des zones privilégiées de **sédimentation** des matériaux en suspension mais aussi des sources de sédiments par **remobilisation** de dépôts anciens. Les études prenant en compte les deux phénomènes sont rares (Dunne *et al.*, 1998). Le premier objectif de ces études était de quantifier l'impact de ces zones d'inondation sur les apports terrigènes aux océans. L'observation récente que les polluants d'origine agricole ou industrielle, tels que les métaux lourds, qui ont une affinité importante pour les sédiments en suspension, peuvent se déposer dans ces plaines alluviales et y être stockés (et constituer alors un danger pour la faune et la flore) a conduit le monde scientifique à estimer aussi des taux de sédimentation actuels dans les plaines d'inondation. Des mesures de sédimentation ont ainsi été réalisées à l'aide de différentes approches : trappes à sédiments (e.g. Brunet & Gazelle, 1995 ; Simm & Walling, 1998, mesure au Césium 137 sur des carottes de sédiment (e.g. Simm, 1995 ; Walling *et al.*, 1996 ; Allison *et al.*, 1998), modèle de transport solide couplé à un modèle hydraulique (e.g. Pizzuto, 1987 ; Simm *et al.*, 1997).

Dans le cas du delta intérieur du Niger, la modélisation hydraulique est rendue difficile du fait de sa géomorphologie complexe. Aucun piège à sédiments ou carottages n'y ont encore été réalisés. La seule approche possible à l'heure actuelle consiste donc à calculer **le bilan de matières en suspension** (bilan des flux entrants et sortants) le long du delta, comme pour l'hydrologie. Ce type d'approche a déjà été adopté (e.g. Walling *et al.*, 1986, Brunet & Gazelle, 1995 ; Haiada *et al.*, 1996) et peut permettre de donner un aperçu des phénomènes dominants de reprise ou de dépôt qui ont lieu lors de la traversée du DIN.

1. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN MES DANS LE DELTA INTERIEUR DU NIGER

Pour permettre le calcul des flux de MES aux entrées du delta (stations de Ké-Macina et Douna) et à la sortie (station de Diré), un suivi des concentrations hebdomadaires en MES a été réalisé de 1990 à 1998 dans le cadre du programme EQUANIS (Environnement et Qualité des apports du Niger au Sahel) (chapitre II). Par ailleurs, des observations de terrain supplémentaires ont été effectuées pendant les crues de 1996 et 1997 lors de missions ponctuelles. Rappelons qu'il existe en plus des stations citées ci-dessus, des stations situées à l'intérieur du delta. Celles-ci seront appelées par la suite stations intermédiaires : certaines sont à écoulement permanent telles que Nantaka sur le delta amont et Akka à la sortie du lac Débo ; d'autres sont à écoulement temporaire telles que Kara sur le Diaka, et Awoye et Korientze, les deux autres sorties du lac Débo.

1.1. Statistiques générales sur les données de MES

Le Tableau 65 présente quelques variables statistiques de distribution des valeurs ponctuelles de MES (médiane, minimum, maximum,...) sur les stations du delta. (les variables relatives aux stations de Douna et de Ké-Macina, qui forment les points "d'entrées" du delta, ont été présentées dans le chapitre sur le bassin amont, chapitre IV). Comme pour les stations du bassin amont, les concentrations en MES sont très variables sur un cycle hydrologique mais les coefficients de variation sont toutefois plus faibles et moins variables d'une année sur l'autre qu'à l'amont, excepté pour les deux stations secondaires à la sortie du Lac Débo (Awoye et Korientze). A ces deux stations, la variabilité des concentrations au cours d'un cycle hydrologique est importante et les maximums peuvent atteindre 900 mg.l^{-1} . Ces très fortes valeurs se rencontrent au tout début de la saison où les sites de prélèvements des eaux sont encore de véritables cloaques (dûs à l'arrêt total des écoulements entre février et juin et à la proximité de villages importants).

Sur les stations du delta amont (Kara et Nantaka), les dates d'apparition des concentrations en MES minimums ou maximums ne mettent pas en évidence une variabilité des concentrations directement liée à celle des débits comme cela a été observé pour les stations plus amont. En revanche, pour les stations du delta aval (Akka, Awoye, Korientze et Diré), les concentrations les plus faibles sont toujours observées lors de l'étale de la crue (généralement entre octobre et janvier). Ces valeurs ne descendent pas en dessous de $4,4 \text{ mg.l}^{-1}$ à Akka et jamais en dessous de $9,6 \text{ mg.l}^{-1}$ à Diré. Les maximums se rencontrent en basses eaux ou en début de crue.

Une autre remarque importante est que pour les stations à l'aval du lac Débo (Akka et Diré et les autres stations du delta aval), la distribution des valeurs de concentrations en MES montre que les médianes, et centiles sont beaucoup plus élevés que pour toutes les autres stations confondues.

Année	N	Médiane	CV	min.	max.	Quartile 25%	Quartile 75%	date min.	date max.
Kara (Diaka)									
1992/93	40	31,1	68%	3,7	91,5	15,5	47,8	23/11/92	19/10/92
1993/94	29	39,7	79%	9,2	184,9	25,1	57,7	27/12/93	30/6/93
1994/95	39	27,3	77%	4,7	118,1	17,9	49,8	6/2/95	28/11/94
Nantaka (aval Confluence Niger et Bani)									
1992/93	53	24,3	66%	2,0	111,1	16,8	44,3	25/5/92	3/8/92
1993/94	58	32,0	70%	4,4	141,8	21,2	50,1	27/9/93	26/7/93
1994/95	49	43,3	73%	4,1	219,9	24,7	68,9	6/6/94	9/1/95
1995/96	48	38,8	57%	15,2	110,5	24,5	55,1	19/2/96	4/12/95
1996/97	53	33,1	67%	11,1	128,0	22,4	44,7	17/3/97	12/8/96
1997/98	37	40,4	67%	14,2	160,6	26,6	77,0	30/3/98	21/7/97
Akka (sortie principale du lac Débo par l'Issa Ber)									
1992/93	52	53,5	59%	5,4	124,7	33,2	84,5	19/10/92	18/5/92
1993/94	53	53,7	59%	4,4	128,1	30,2	81,1	15/11/93	28/6/93
1994/95	55	38,2	79%	7,9	151,9	12,4	81,7	13/2/95	13/6/94
1995/96	56	75,0	78%	4,8	190,4	17,3	127,5	11/11/95	22/4/96
1996/97	51	93,0	74%	5,0	242	21,2	131,0	2/12/96	17/6/96
1997/98	54	61,9	71%	6,7	164	21,4	120,8	15/12/97	23/6/97
Awoye (sortie du lac Débo par le Bara Issa)									
1992/93	52	79,1	130%	7,1	767,7	40,2	126,0	30/11/92	8/6/92
1993/94	50	69,7	135%	12,5	815,1	34,5	113,4	27/12/93	5/7/93
1994/95	53	51,3	178%	9,8	934,8	19,7	97,4	21/11/94	20/6/94
1995/96	31	43,0	86%	4,1	160,2	9,5	100,0	30/10/95	5/6/95
Korientze (sortie du lac Débo par le Koli-Koli)									
1992/93	33	55,5	138%	6,5	636,8	17,6	124,2	9/11/92	8/6/92
1993/94	35	33,6	134%	7,9	404,9	17,8	54,7	27/12/93	16/8/93
1994/95	16	79,4	81%	10,9	315,5	46,9	207,5	31/10/94	8/8/94
Diré (sortie du delta)									
1992/93	51	58,0	66%	10,2	163,0	29,2	95,0	9/11/92	8/2/93
1993/94	58	63,7	63%	12,0	210,1	34,6	84,4	1/11/93	7/6/93
1994/95	51	54,1	69%	11,0	196,9	30,6	99,3	14/11/94	18/7/94
1995/96	57	85,1	73%	9,6	220,1	23,2	126,5	27/11/95	22/4/96
1996/97	55	50,7	81%	9,7	189,1	18,9	123,3	25/11/96	22/7/96
1997/98	53	56,1	63%	8,5	180,4	34,7	82,1	1/12/97	9/6/97

Tableau 65. Quelques variables statistiques de distribution des valeurs ponctuelles de MES (médiane, minimum, maximum,...) sur les stations du delta.

Les prélèvements ponctuels en suivant la même masse d'eau, effectués respectivement pour les missions de terrain de 1996 et 1997, ont montré qu'il existe, outre des différences de concentrations absolues durant l'année, une évolution générale des concentrations en MES, celles-ci diminuant progressivement entre Sensé (ou la concentration témoigne du mélange des eaux chargées du Bani et

des eaux moins turbides du Niger) et l'aval du delta (Figure 136a et b). Ces figures montre également un léger décrochement au niveau du lac Débo.

Les concentrations ponctuelles de MES au mois de mai (basses eaux) sont assez stables et faibles sauf à Akka où les écoulements sont très réduits et l'eau troublée par de nombreux passages d'hommes et de leurs troupeaux...

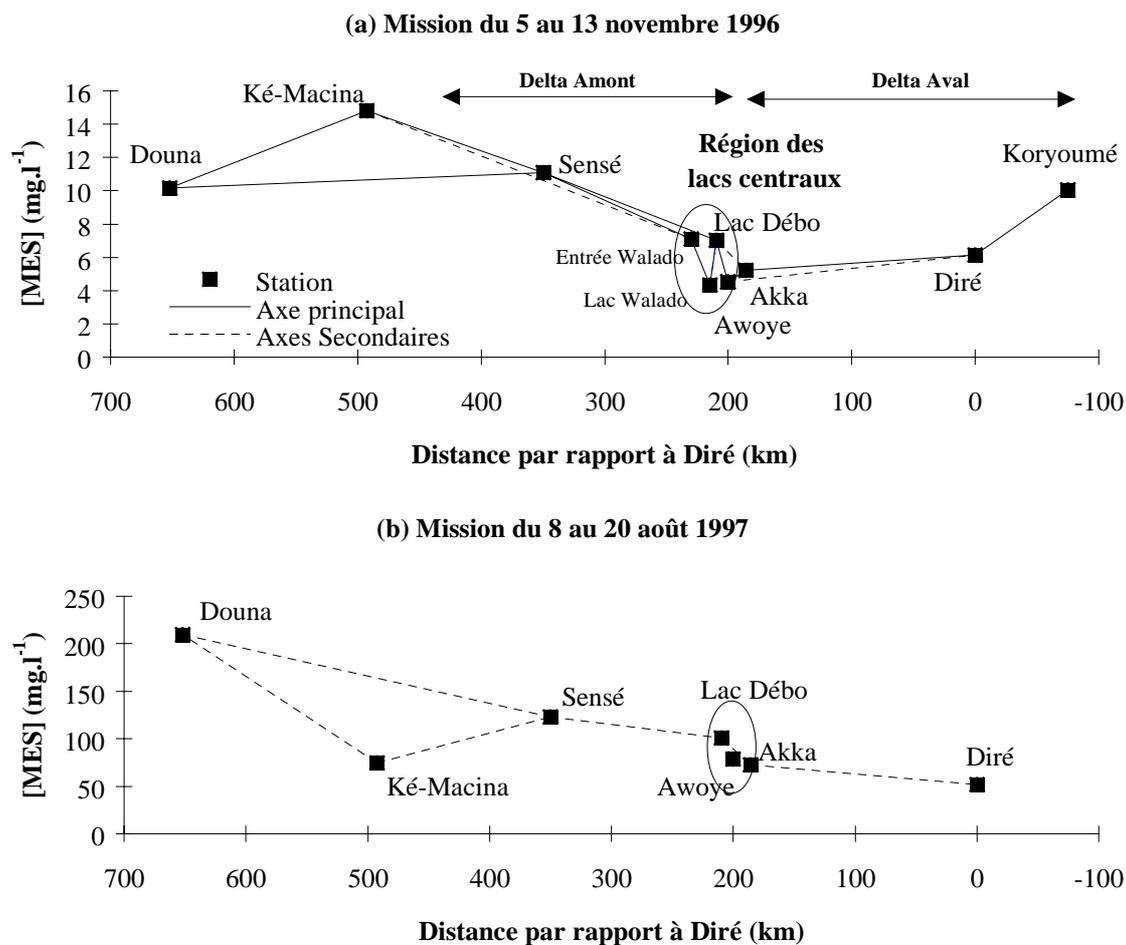


Figure 136. Evolution spatiale des concentrations en MES au cours de deux missions de terrains réalisées en suivant la même masse d'eau. Mission du 5 au 13 novembre 1996 (a), Mission du 8 au 20 août 1997 (b).

1.2. Evolution des concentrations au cours du cycle hydrologique

1.2.1. Evolution temporelle générale.

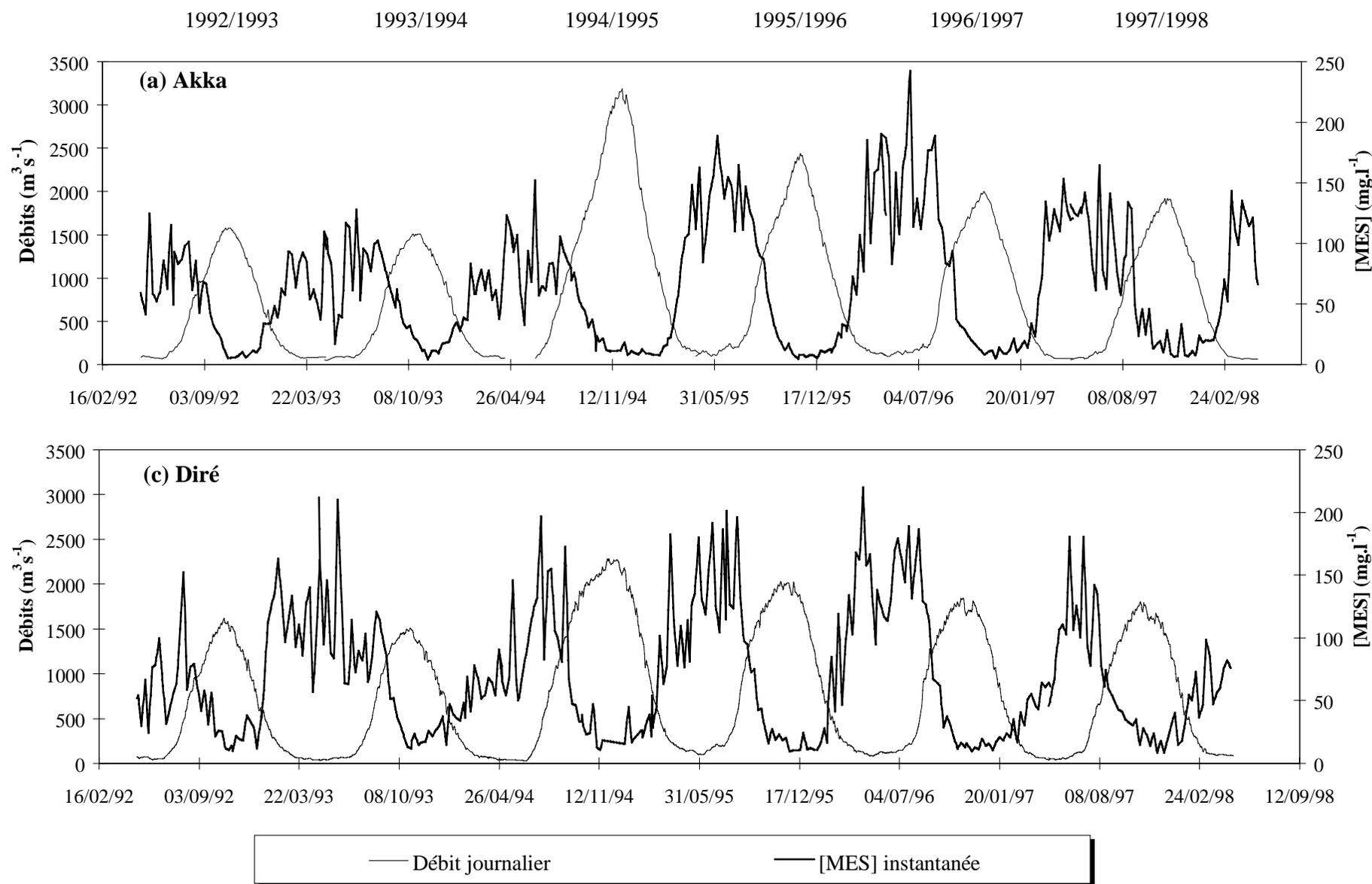
Les variations des concentrations en MES et des débits sur les deux types de stations précédemment évoqués montrent que :

- **Pour les stations à l'amont du lac Débo** (Kara, Nantaka), ces variations montrent le même type d'évolution que celles observées à Ké-Macina et Douna bien qu'il y ait de nombreux pics de concentrations (les causes possibles de ces pics ont été présentées dans le chapitre IV) : les maximums de concentrations précèdent généralement de un mois le maximum de débit puis les concentrations diminuent avec la décrue. D'autres pics de concentrations s'observent pendant la décrue. Ces fortes concentrations parfois rencontrées en décrue sont peut être liées à une reprise de sédiments lors de la vidange des plaines inondées de la "Mésopotamie" (chapitre VII).
- **Pour les stations à l'aval du lac Débo** (Akka, Diré...), l'évolution des concentrations présente également de nombreux pic au début de crue et en fin de décrue mais présente toujours des valeurs très faibles lors de l'étale de la crue (Figure 137). Les maximums de concentrations se situent plus de deux mois avant le maximum de crue et un mois après le début de la crue qui ne commence réellement qu'en juin sur ces stations (à l'amont la crue commence en mai). Durant les basses eaux, les concentrations rencontrées sur ces stations sont en général le double des concentrations observées aux stations à l'amont (Ké-Macina, Douna mais aussi Kara et Nantaka). C'est cette évolution particulière des concentrations au cours de la crue que nous allons plus amplement développer par la suite.

Ce premier aperçu sur les concentrations en MES mesurées sur les différentes stations du delta permet d'ores et déjà de distinguer deux types de stations, celles qui se trouvent proches des entrées du delta (Nantaka et Kara) et celles qui sont à l'aval des lacs (Akka et Diré qui sont des stations à écoulements permanents, et Awoye et Korientze à écoulement non permanents)

La région des lacs, des méandres, des mares et des plaines inondées, par son étendue, sa géomorphologie qui permet le développement d'une végétation abondante, joue donc un rôle charnière dans l'évolution des concentrations de matières particulaires entre les stations à l'entrée du delta et celles situées à l'aval des grands lacs centraux.

Figure 137. Page suivante. Variation des concentrations en MES et des débits journaliers au cours du temps pour les années 1992/1993 à 1996/1997 aux stations principales à écoulements permanents du delta intérieur du Niger. (a) sortie du lac Débo à Akka sur l'Issa Ber (b) sortie du delta à Diré. (Page suivante).



1.2.2. Relation entre les MES et les débits (Q)

La Figure 138 représente les relations MES/débits au pas de temps mensuel pour les stations principales du delta (écoulement permanent) et pour les stations secondaires. Même si les relations MES/débits décrivent toutes des cycles d'hystérésis horlogiques comme sur les stations amont (à débit égal, les concentrations sont plus importantes en crue qu'en décrue) on observe une déformation progressive de cette relation d'amont en aval : **l'écart entre le maximum de concentration en MES et le maximum de débit se creuse** des stations à l'amont du lac Débo (Figure 138a et d) aux stations à l'aval (Akka, Awoye, Korientze, Diré). Ces dernières présentent ainsi des relations MES/débits tout à fait originales (Figure 138b, c, f et e), a priori étroitement liées à la crue annuelle, pouvant être décrites en trois étapes :

1. **Arrivée de la crue** - Les concentrations augmentent avec le début de la crue jusqu'à un maximum de MES atteint en juillet, soit effectivement plus de 2 mois avant le maximum de crue (en octobre ou novembre), et seulement 23 à 45 jours après le début de la montée des eaux. L'arrivée de la crue et aussi sans doute les pluies locales (qui participent cependant peu au bilan hydrique) permettent un lessivage des dépôts de la crue précédente ou de dépôts atmosphériques, ce qui peut constituer une source locale de MES.
2. **Passage de la crue** - Avec l'avancée de la crue d'août à octobre (ou novembre suivant les années), les concentrations diminuent régulièrement. L'étale de la crue correspond à la dilution de la charge en MES par le débit et au phénomène d'alluvionnement. Les concentrations les plus faibles du cycle s'observent ainsi toujours pendant cette période de l'étale de la crue alors que pour le Niger amont, le minimum de concentration est enregistré pendant l'étiage.
3. **Vidange des plaines d'inondation** - Pendant la phase de vidange des plaines d'inondation (décembre à février) il y a une augmentation brusque des concentrations en MES qu'une diminution des débits n'explique qu'en partie : des apports extérieurs (apports de poussières atmosphériques par l'harmattan), des phénomènes locaux comme la remise en suspension de dépôts anciens (inversion du courant lors de la vidange des mares et des plaines, action de l'Harmattan créant des vaguelettes qui attaquent les berges) ou des phénomènes biochimiques (production algale, précipitations chimiques) peuvent aussi contribuer à expliquer cette augmentation des concentrations en MES.

On a vu à l'amont que les pics de concentrations se produisaient en avance par rapport au maximum de débit. Du fait de la propagation de la crue vers l'aval, une déformation de la relation MES/débits est fréquemment observée. Le plus souvent, cette déformation correspond au fait que les sédiments se déplacent à la vitesse de l'eau alors que la célérité de l'onde de crue est plus importante que celle-ci (Einstein, 1943 cité dans Bull 1997). Par suite, l'occurrence du maximum de MES va se produire de plus en plus tardivement par rapport au maximum de crue au fur et à mesure que l'on s'éloigne (vers l'aval) de l'exutoire du bassin à l'origine de la crue (dans le cas simplifié où les phénomènes de diffusion sont négligés et où il n'y a pas d'apports intermédiaires sur le bief étudié) (Glover et Johnson 1974). C'est le cas généralement observés dans de nombreux biefs.

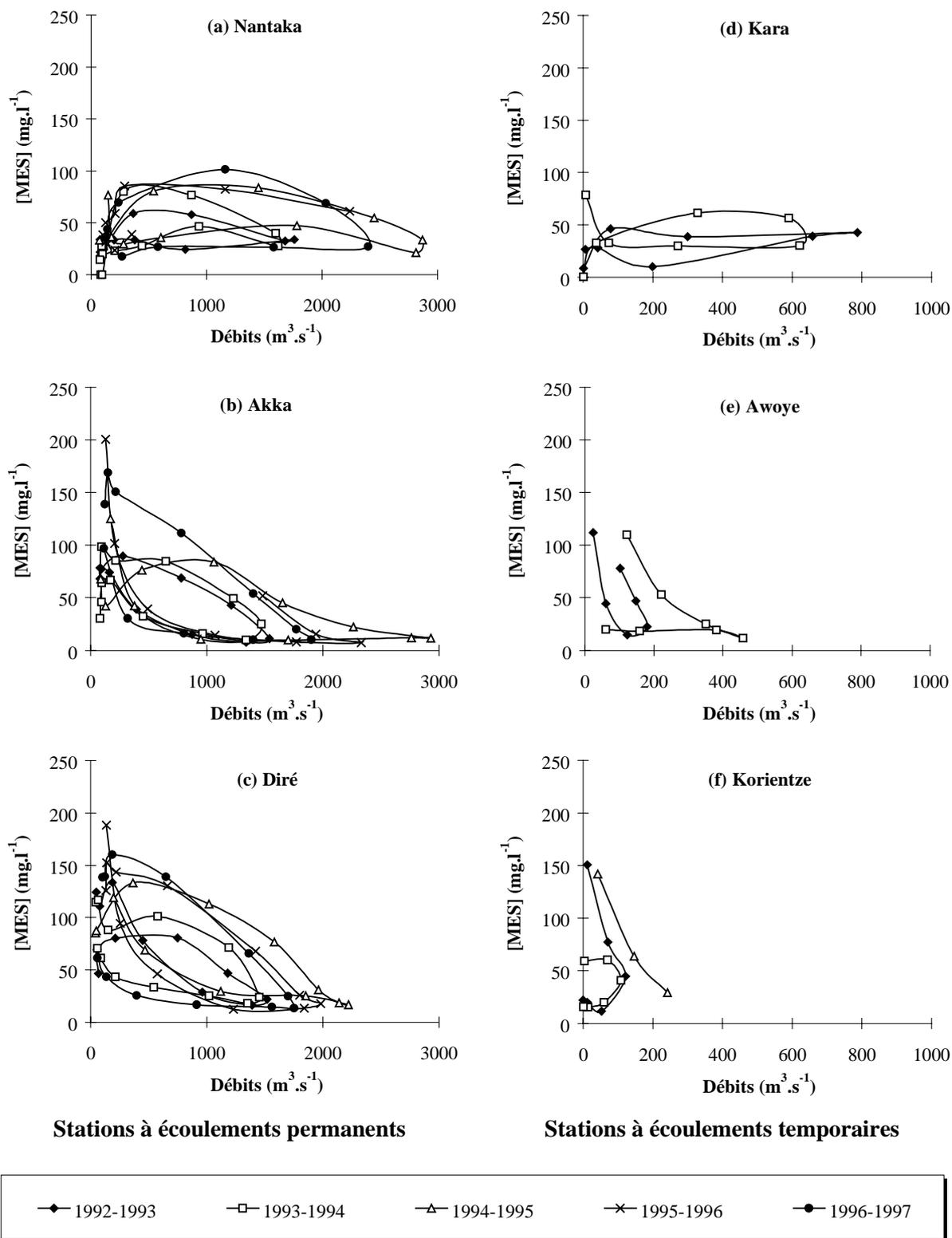


Figure 138. Relation MES-débit à l'échelle mensuelle pour les stations principales du Niger dans le delta - Nantaka (a), Akka (b) et Diré (c) - et secondaires, Kara sur le Diaka (d), Awoye sur le Barra Issa (e) et Korientze sur le Koli-Koli (f).

Or, les relations MES/débits observées aux stations à l'aval du lac Débo montrent une tendance inverse : vers l'aval, le maximum de concentration en MES est très en avance par rapport au maximum de crue (Figure 138 et Figure 139). Ce type d'évolution vers l'aval a été attribué à l'origine principale des sédiments qui est l'érosion des berges et du fond de lit mobilisés avec l'arrivée du front d'eau (Bull, 1997) et/ou à la présence de plaines inondables (Walling & Webb, 1980).

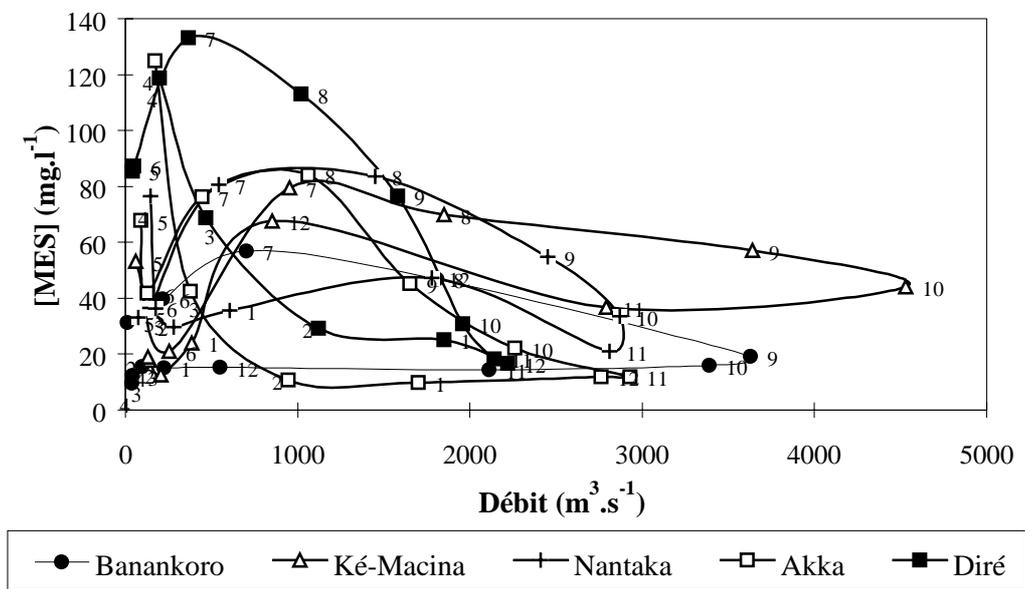


Figure 139. Exemple d'évolution de la relation MES/Débits vers l'aval sur quelques stations du Niger pour l'année 1994/95.

Dans le delta intérieur du Niger, ces deux phénomènes peuvent avoir lieu du fait des dépôts facilement mobilisables de la crue précédente (ce qui expliquerait les concentrations plus fortes qu'à l'amont au début de la crue) et de l'amortissement de la crue au cours de la traversée du delta. Pendant **la phase de montée de crue**, une partie de l'eau entrant dans le delta reste dans le chenal principal et se propage normalement vers l'aval ; le reste se propage dans les plaines inondables par débordements au-dessus des levées délimitant le chenal principal et/ou par les défluent. Lors de la montée de crue, les concentrations en MES à l'aval du delta (transportées dans le chenal principal) ont donc une évolution temporelle quasiment identique (au temps de propagation de l'eau près) à celle observée aux stations amont. En revanche l'inondation du delta, provoque un décalage temporel important entre les maxima de crue observés à l'entrée et à la sortie du delta (Chapitre VII). Le pic de crue observé à l'aval va être ainsi en retard sur le maximum des concentrations en MES et ce retard sera d'autant plus important que l'hydraulicité de l'année est bonne.

La déformation de la relation MES/Débits des entrées du delta à la sortie du delta témoigne, de l'amortissement de la crue de l'amont vers l'aval, mais aussi, de phénomènes qui semblent se produire dans le delta : apports de matières locales, pertes en sédiments.

1.3. Variabilité interannuelle des concentrations

On a vu que le grand intérêt de la période d'étude est qu'elle regroupe des années contrastées d'un point de vue hydrologique. Cette variabilité a eu des conséquences sur l'intensité des concentrations en MES atteintes sur la station de Banankoro (chapitre IV) sans que l'on puisse expliquer réellement pourquoi. Sur les stations du delta à l'aval du lac Débo, il semble aussi y avoir des différences dans l'évolution des concentrations suivant hydraulité de l'année. La Figure 140 présente les relations MES/Débits aux stations de Akka et de Diré après séparation des deux années humides (1994-1995 et 1995/1996) et des deux années sèches (1992/1993 et 1993/1994).

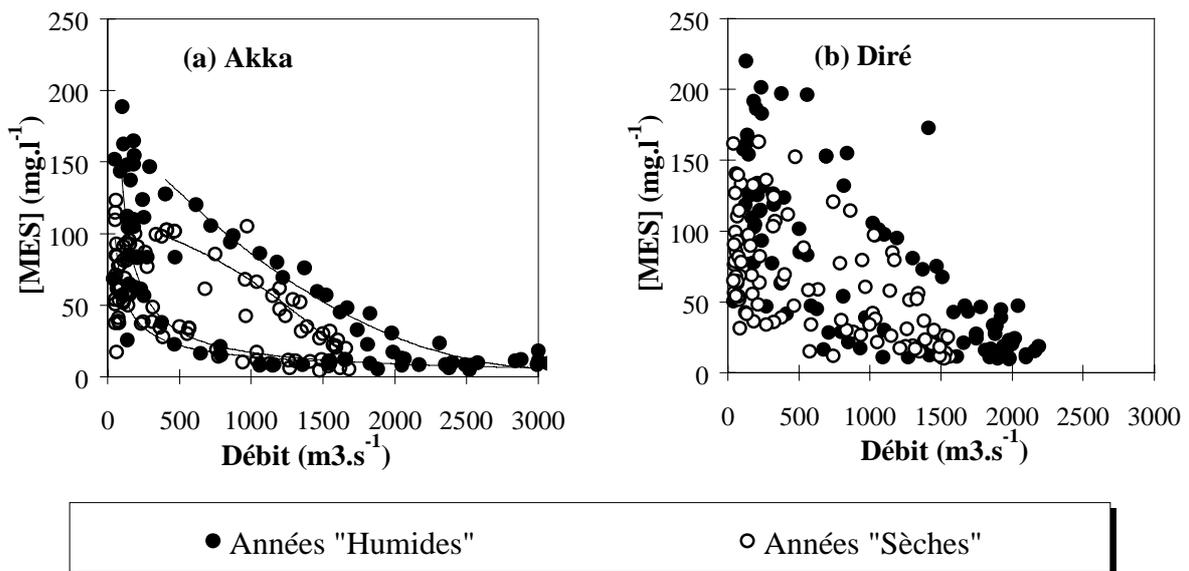


Figure 140. Relation MES/Débits au pas de temps hebdomadaires pour différents types d'années sur les stations à l'aval du lac Débo. (a) Akka, (b) Diré.

Dans un premier temps, la Figure 140a inspire quelques remarques :

- Les concentrations en MES pour les faibles débits à la station de Akka sont plus importantes en années humides qu'en années sèches. La Figure 136a (page 284) montre que ces fortes concentrations sont en réalité observées en fin de crue pour les deux années de bonne hydraulité (1994-1995 et 1995-1996). Ceci laisse penser que pour les crues fortes, la décrue aurait une capacité érosive plus importante ou que les reprises de sédiments seraient plus importantes.
- Les concentrations sont plus importantes en montée de crue pour les années humides. Une hypothèse est qu'il y a eu propagation de l'amont vers l'aval des concentrations plus élevées observées à l'amont ces deux années (chapitre IV).
- Lors de l'étalement de la crue, les concentrations en années humides restent très stables à Akka, alors qu'en années sèches les concentrations augmentent tout de suite après avoir atteint le maximum annuel. Cette période correspond sans doute à la période d'inondation de la partie amont du delta pendant laquelle les dépôts sont alors possibles. La longue période où les concentrations restent stables à Akka serait un indicateur de la durée de l'inondation.

Dans un deuxième temps, la Figure 140a montre une similitude frappante entre chaque type d'année à la station de Akka pour les relations MES/Débits en décrue qui sont alors décrites en première approximation par une même loi exponentielle de la forme $C=a.Q^b$ avec $-1 < b < 0$. Plus précisément, il semble que les concentrations commencent à augmenter fortement dès lors que le débit devient inférieur à un débit autour de $800-1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, qui coïncide avec les basses-eaux (hauteur d'eau à l'échelle inférieure à 300 cm à Akka). Les limites sont les mêmes en crue et en décrue. Cette limite correspondrait au niveau du lit mineur et l'augmentation serait alors due en partie à l'érosion des berges de pleins bords lors de la crue et de la décrue. Sous une hauteur d'eau et au-dessus d'une hauteur minimum (très basses eaux), le fleuve est dans son lit mineur et érode les berges. Quand la hauteur du fleuve augmente, il atteint le lit majeur et les plaines d'inondation, les dépôts sont alors possibles les berges ne sont plus soumises à l'érosion (Gilveard & Bravard, 1993). La végétation qui occupe ces sites facilite ces phénomènes de dépôt et la concentration en MES diminue.

À Diré les mêmes tendances sont observées mais les concentrations de matières en suspension d'une semaine à l'autre sont beaucoup plus variables (Figure 140b). L'augmentation des concentrations en fin de décrue est notamment plus ou moins brutale d'une année sur l'autre et on ne retrouve plus les distinctions entre années sèches et humides pour les faibles débits observées à la station de Akka. D'autres phénomènes peuvent sans doute avoir lieu entre les stations de Akka et Diré, bief qui est notamment caractérisé par une morphologie qui n'est plus deltaïque (chapitre I).

Finalement, il semble qu'il existe des variations entre années, essentiellement au moment de l'étale de la crue, qui correspondraient à la durée plus ou moins longue de l'inondation dans le delta amont. Celle-ci se traduit par des concentrations en MES qui restent stables durant l'étale de la crue pour les années de bonne hydraulité. L'influence de la durée de l'inondation sur les concentrations en MES est très visible à la station d' Akka qui se situe sur l'émissaire principal à la sortie du lac Débo.

2. BILAN DES FLUX DE MATIÈRES TRANSPORTÉES DANS LE DELTA INTÉRIEUR DU NIGER

Comme pour les bilans hydriques (chapitre VII), les stations de **Ké-Macina et Douna ont été choisies pour représenter les entrées** du delta et la station de **Diré pour la sortie du delta**. Pour permettre de comparer les différentes parties du delta des bilans intermédiaires ont par ailleurs été réalisés. On distinguera donc le **delta amont** qui est constitué des différentes régions comprises entre les entrées du delta (Ké-Macina et Douna) et les trois stations à la sortie du lac Débo (Akka, Awoye, Korientze). Le **delta aval**, dont la morphologie n'est plus deltaïque, est compris entre les stations à la sortie des lacs centraux et la station de Diré. La zone en amont de Mopti (zone du delta qui se situe entre les bras du fleuve Niger avant sa confluence avec le Diaka, et le Bani) implique un contrôle très complexe des écoulements (chapitre VII) qui sortait du cadre de cette étude ; c'est pourquoi le bilan de MES de cette zone n'a pas été individualisé et fait partie intégrante du bilan effectué sur le delta amont.

En établissant la différence entre les flux entrants et sortants sur la totalité du delta d'une part, et sur le delta amont et le delta aval d'autre part, il est possible de mieux appréhender les mécanismes d'érosion et de rétention qui sont susceptibles de se produire dans la zone étudiée.

2.1. Flux annuels de MES transportées de 1992-1993 à 1997-1998

Le Tableau 66 présente les résultats du calcul des flux annuels de MES sur les stations du DIN pour les années hydrologiques 1992-1993 à 1997-1998.

	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98
Akka							
Flux (10^3 t.an^{-1})		591	654	1 033	989	897	832
Débit ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)		577	571	1209	892	753	739
[MES] (mg.l^{-1})		32,5	36,3	27,1	35,2	37,8	35,7
Diré							
Flux (10^3 t.an^{-1})		784	766	1 487	1 183	962	887*
Débit ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)		574	563	1084	866	745	729*
[MES] (mg.l^{-1})		43,3	43,2	43,5	43,4	41,0	38,6*

* débit estimé en 1998 par corrélation de station à station.

Tableau 66. Flux de matières en suspension, concentrations et débit moyens annuels sur les stations principales du delta intérieur du Niger (Akka et Diré).

Comme sur les stations du bassin amont, les variations sont importantes suivant l'hydraulicité de l'année et l'on retrouve à l'échelle annuelle et pour chaque station la relation linéaire qui existe en première approximation entre les flux de MES et les volumes écoulés. On peut remarquer que les concentrations moyennes annuelles de MES à la station de Diré sont d'une stabilité exemplaire d'une année à l'autre : de 41 à 43,5 mg.l^{-1} (soit un coefficient de variation de 2%).

A l'échelle mensuelle, les relations reliant les flux de MES et les volumes écoulés mensuels sont différentes suivant qu'il s'agit des stations du delta à l'aval du lac Débo ou de celles situées à l'entrée du delta. Les fortes hystérésis observées précédemment sur les relations MES/débits expliquent les boucles en forme de cloche observées entre les flux de MES et les volumes écoulés (Figure 141). Le décalage entre flux et volume mensuels maximums est toujours d'autant plus important que l'on descend vers l'aval.

Une augmentation du flux de MES est parfois observée alors que les volumes écoulés commencent à diminuer à la station de Diré (Figure 141b)

L'ensemble de ces remarques se traduit par une meilleure répartition annuelle des flux par rapport à l'amont, mis en évidence dans la Figure 142.

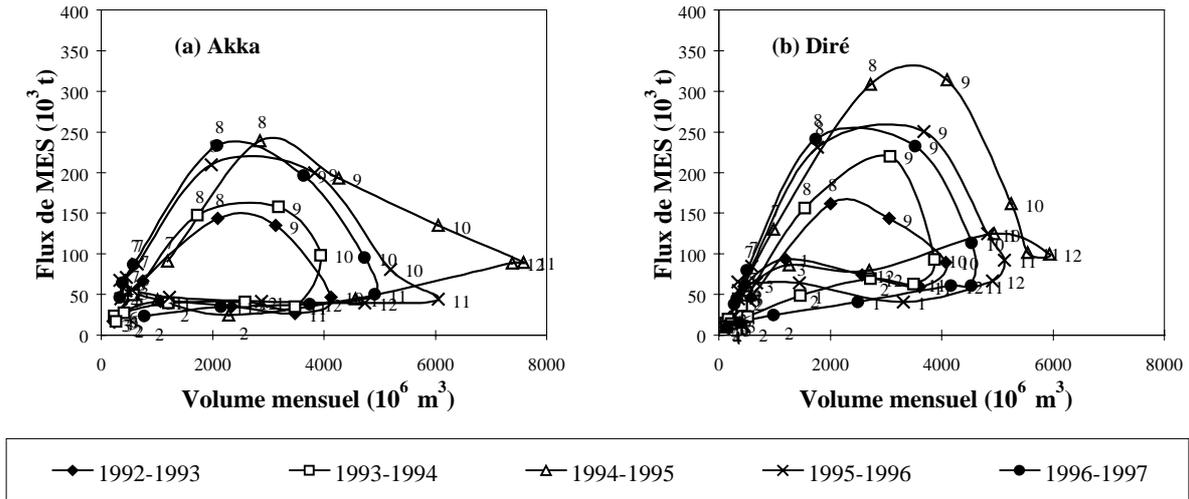


Figure 141. Relations entre les flux de MES et les volumes écoulés mensuels sur les deux stations principales à l'aval du lac Débo : Akka (a) et Diré (b).

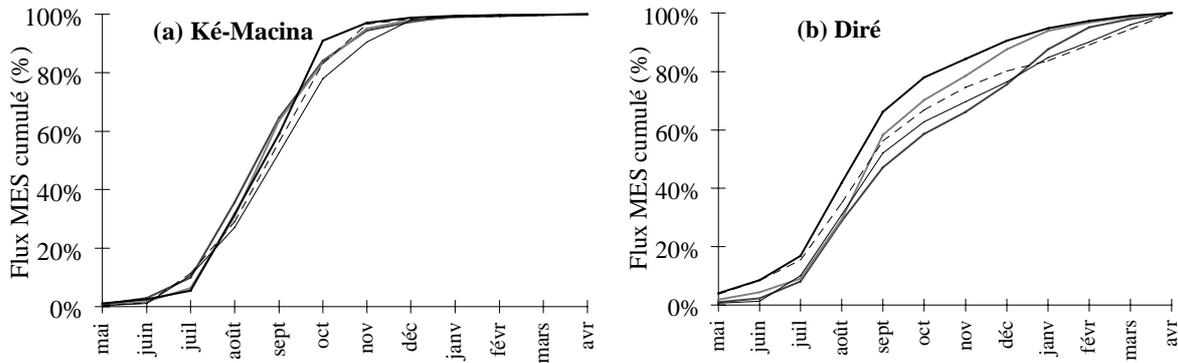


Figure 142. Evolution des flux cumulés à Ké-Macina principale station à l'entrée du delta (a) et à Diré à la sortie du delta (b).

Enfinement, il y a une diminution des concentrations annuelles (Flux/Volume) entre les entrées et la sortie de la première partie du delta intérieur du Niger (delta amont). Les concentrations moyennes annuelles en MES à la station de Akka ne sont plus que de 25 à 36,3 mg.l⁻¹ suivant les années alors qu'en entrées (somme des stations de Ké-Macina et Douna) elles varient de 36,5 à 54,4 mg.l⁻¹. Cette baisse des concentrations de MES suggère que la traversée de la zone des plaines du delta amont a provoqué des pertes en sédiments proportionnellement plus importantes que les fortes pertes en eaux observées sur cette partie du delta. En revanche, à la sortie du delta intérieur du Niger (station de Diré), les concentrations moyennes annuelles sont de 41 à 43,5 mg.l⁻¹, soit plus importantes qu'à la station de Akka, alors que les pertes en eaux, bien que moins importantes que sur le delta amont sont aussi la caractéristique hydrologique de cette partie du delta. Des apports complémentaires s'associent sans doute à l'évaporation au fil des écoulements pour reconcentrer les suspensions entre Akka et Diré.

2.2. Bilans annuels des flux de matières transportés

Les bilans annuels (différences entre les flux entrants et sortants) ont été calculés de 1992/1993 à 1997/1998 sur l'ensemble du delta, sur le delta amont et sur le delta aval. Les stations de Awoye et Korientze situées à la sortie du lac Débo n'ayant été que très partiellement étudiées (peu d'observations sur les concentrations en MES), les flux de MES sortant par ces deux émissaires ont donc été le plus souvent estimés à partir des observations réalisées à la station de l'émissaire principal du lac (station de Akka) : en considérant que les concentrations sur les trois émissaires du lac Débo sont les mêmes à un instant donné, les flux de MES sortant aux stations de Awoye et Korientze peuvent alors être calculés à partir des données hydrologiques qui sont connues sur ces deux stations. Cette approche apporte a priori peu d'erreurs sur le flux de MES : les flux hydriques annuels transités par ces deux bras, qui ne coulent d'ailleurs pas toute l'année, ne représentent que 15 à 20% du flux hydrique total sortant du lac.

2.2.1. Bilans annuels des MES dans le DIN - Sédimentation et reprise

Le Tableau 67 donne le détail des bilans de flux annuels de matières en suspension sur les différentes parties du delta définies en début de paragraphe.

10 ³ t	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997	1997/1998
Entrées delta ⁽¹⁾	944	1 343	2 703	2 090	1 645	1 587
Sortie lac Débo ⁽²⁾	696	747	1 250	1 162	1 032	957
Bilan delta Amont	-248	-596	-1 453	-928	-613	-630
Sortie delta ⁽³⁾	784	766	1 487	1 183	962	887
Bilan delta Aval	+88	+19	+237	+21	-70	-71
Bilan Total	-160	-577	-1 216	-907	-683	-700

Tableau 67. Bilan des flux de matières particulaires dans le delta intérieur du Niger du Niger en milliers

de tonnes. (1) Somme des flux des deux entrées (Ké-Macina et Douna) ; (2) Somme des flux des trois émissaires sortant du lac Débo (Akka, Awoye et Korientze) ; (3) Flux à la sortie unique du delta (Diré).

Le bilan global montre que le delta intérieur du Niger retient entre 0,16 et 1,2 millions de tonnes par an durant la période observée (soit de 17 à 45 % des flux entrants). **Les bilans intermédiaires montrent que l'essentiel des pertes en MES s'effectue sur le delta amont :**

- **Sur le delta amont**, le bilan annuel met en évidence pour chaque année un piégeage systématique de 0,25 à 1,45 millions de tonnes de suspension. Il y a donc décantation dans les plaines d'inondation de la zone amont de 26 à 54 % des flux entrants.
- **Sur le delta aval**, au contraire, les bilans de matière sont beaucoup plus faibles et représentent en valeur absolue 3 à 30% maximum des bilans de matières établis pour le delta amont. Ils sont par ailleurs très variables d'une année à l'autre et l'on peut observer entre le lac Débo et Diré des

gains de matières (représentant respectivement 15 et 20 % des entrées en 1992/1993 et 1994/1995) ou des pertes de matières (représentant 7% des entrées en 1996/1997 et 1997/1998). A l'exception de l'année 1994-1995 (voire 1992/1993), les bilans du delta aval, en gain ou en perte, sont peu significatifs compte tenu des erreurs d'estimations sur les flux.

La Figure 143 illustre l'évolution spatiale des flux transportés annuellement pour deux années contrastées (1993/94 et 1994/1995). Elle met en évidence les fortes pertes sur le delta amont et les éventuelles reprises sur le delta aval et donc un fonctionnement très différent des deux parties du delta.

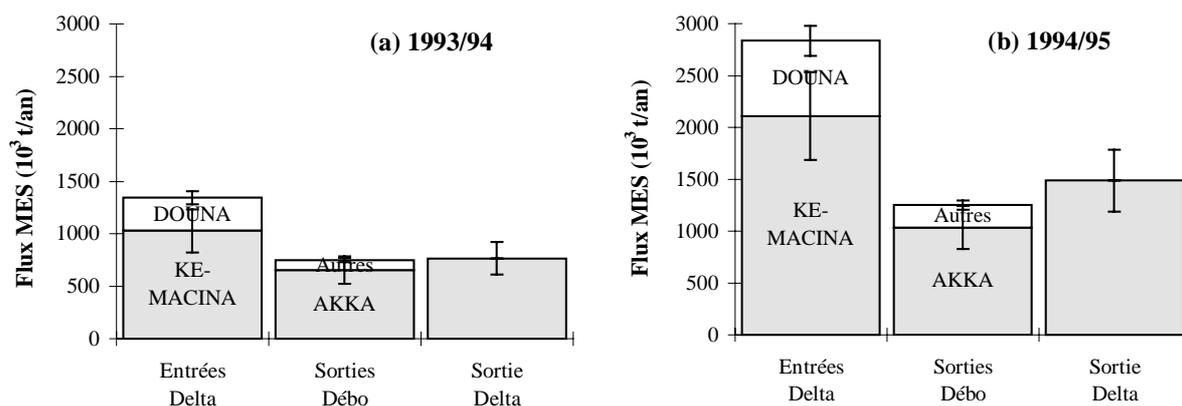


Figure 143. Evolution spatiale des flux de MES pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).

L'étude de la variabilité interannuelle des bilans de MES va nous permettre de mieux appréhender les relations entre les bilans hydriques et les bilans de sédiments sur le DIN.

2.2.2. Variabilité interannuelle des bilans de MES

De très bonnes relations existent entre les volumes annuels observés aux stations à l'entrée du delta intérieur du Niger et les pertes hydriques au sein du delta : plus le volume entrant est important et plus les pertes en eau seront importantes (chapitre VI). On a vu par ailleurs que, comme sur le bassin amont, les flux de MES sur les différentes stations, assez variables d'une année à l'autre, suivent plus ou moins les variations hydrologiques.

La Figure 144a et la Figure 144b présentent les variations du bilan de MES sur l'ensemble du delta (pertes totales en sédiments dans le delta) en fonction, respectivement, des flux de MES en entrées et des pertes en eau. Si l'on excepte l'année 1992-1993 (pour laquelle nous avons déjà évoqué le problème des concentrations très faibles à Ké-Macina par rapport aux autres années), ces figures permettent d'observer que :

- Les pertes en sédiments sont une fonction croissante, presque linéaire, des flux de MES entrants (Figure 144a).
- les pertes de MES dans le delta sont d'autant plus importantes que les pertes hydriques le sont aussi (Figure 144b).

Il semble, qu'en première approximation, les pertes annuelles en sédiments dans le delta suivent les pertes d'eau par évaporation et infiltration. En effet, les pertes plus importantes en eau pour les années humides correspondent à des surfaces mises en eau importantes (en durée et en surface) et donc de plus grand espaces de décantation et des vitesses moyennes d'écoulement plus faibles, mais aussi à une plus grande couverture des prairies aquatiques, une topographie particulière..., soit autant de paramètres qui pourraient augmenter le piégeage des MES

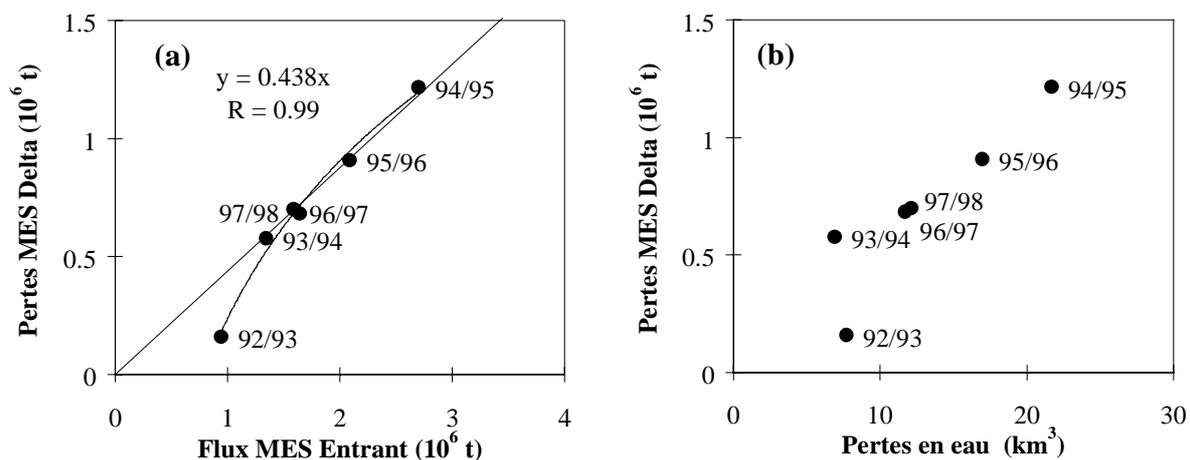


Figure 144. Evolution annuelle des pertes en sédiments dans l'ensemble du delta *versus* les flux de MES entrants (a); les pertes hydriques (b).

Les mêmes relations entre le bilan des flux de MES et les pertes en eau sont présentées dans la Figure 145, pour le delta amont et le delta aval.

- **Sur le delta amont** (Figure 145a), plus les pertes en eau sont importantes et plus les pertes en sédiments le sont aussi (excepté 1992-1993). La relation est cependant moins bonne que celle observée sur l'ensemble du delta : pour des pertes en eau équivalentes, les pertes en MES peuvent varier d'un facteur 1 à 1,5 (années 1995/96 et 1994/95) voire d'un facteur 1 à 2 (années 1992/93 et 1993/94).
- **Sur le delta aval**, il n'existe, en revanche, aucune relation entre le déficit d'écoulement observé entre les sorties du lac Débo (Akka+Awoye+Korientze) et Diré, et les pertes en sédiments entre ces mêmes stations : les bilans annuels de MES suggèrent que sur ce bief, les phénomènes de dépôts sont suivant les années plus ou moins équilibrés par des processus de reprise ou d'apport de sédiments. Sur le delta aval, il existe pourtant une très bonne relation entre les flux hydriques entrants et les pertes en eaux qui s'y produisent (chapitre VII). Lors des fortes crues, ces pertes hydriques devraient entraîner a priori des pertes en sédiments également importantes (la sédimentation pouvant avoir lieu dans les lacs alimentés lors des fortes crues). Or l'on observe au contraire pour l'année 1994/95 de forte hydraulité un gain de matière important. Celui-ci pourrait être expliqué par un phénomène de reprise des sédiments prédominant du fait que la crue fut importante et qu'elle suivit une longue période de crues de faible hydraulité.

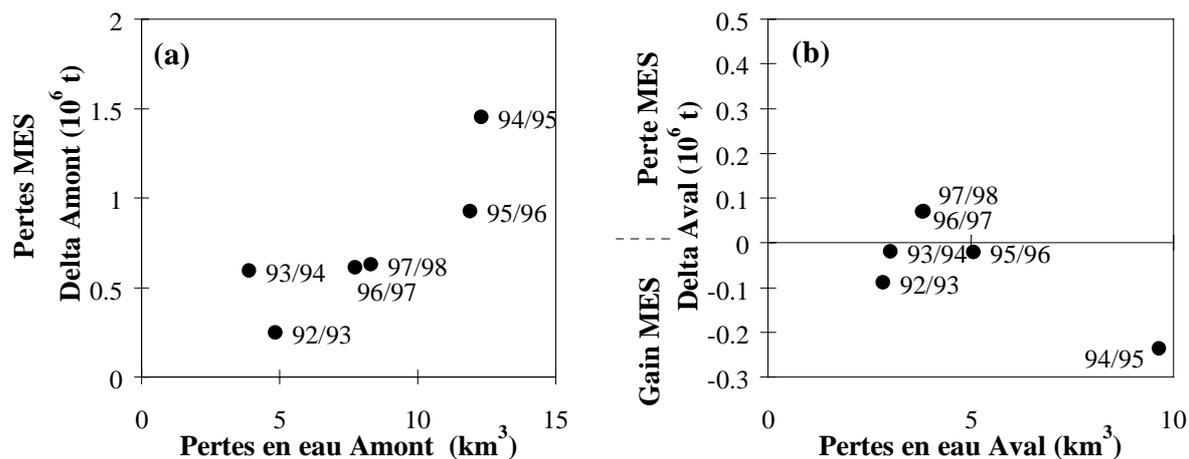


Figure 145. Relations entre les pertes en eaux et en sédiments dans le delta amont (a) ; et dans le delta aval (b).

Les bilans de MES entre flux entrants et flux sortants montrent qu'il se produit des pertes globales en MES dans le delta intérieur du Niger qui suivent les pertes hydriques. Un fonctionnement différent caractérise les deux parties du delta : **pour le delta amont, le bilan annuel correspond, quelle que soit l'année, à des pertes liées plus ou moins aux pertes hydriques ; tandis que sur le delta aval, le bilan est variable d'une année à l'autre et sans lien direct avec le bilan hydrique.** La particularité de l'année 1992/93, ainsi que la faible quantité d'années d'observation, ne permet pas de pousser plus loin l'interprétation de ces relations.

Le suivi des variations mensuelles des flux de matières apporte quelques précisions complémentaires sur le fonctionnement hydrodynamique du Niger lors de sa traversée du delta.

2.3. Bilans mensuels de MES dans le delta intérieur du Niger

Le bilan mensuel des flux de matières en suspension a été établi entre les entrées amont et les sorties du lac Débo et entre le lac Débo et la sortie aval à Diré sur les années hydrologiques de 1992 à 1997 (Figure 144). Un décalage de 1 mois a été appliqué pour établir les bilans mensuels des flux de MES sur le delta afin de prendre en compte le temps de propagation de la crue lors de la traversée du delta. Pour les bilans mensuels intermédiaires, un décalage de 1 mois est appliqué pour le delta amont étant donné que cette zone représente la majeure partie des surfaces inondées mais aucun décalage temporel n'a été appliqué pour le delta aval (comme pour les bilans hydriques) Comme pour le bilan annuel, l'entrée du delta intérieur du Niger est la somme des flux calculés à Ké-Macina et Douna, et la sortie est Diré. Le bilan des pertes ou des gains mensuels est représenté par la différence entre les sorties et les entrées : ainsi, si "Sortie-Entrées">0, alors il s'agit de gain entre les entrées du delta et la sortie à Diré; au contraire, si "Sortie-Entrées"<0, le bilan mensuel correspond à des pertes globales dans le delta. Ces bilans ont été comparés aux bilans hydriques calculés de la même manière.

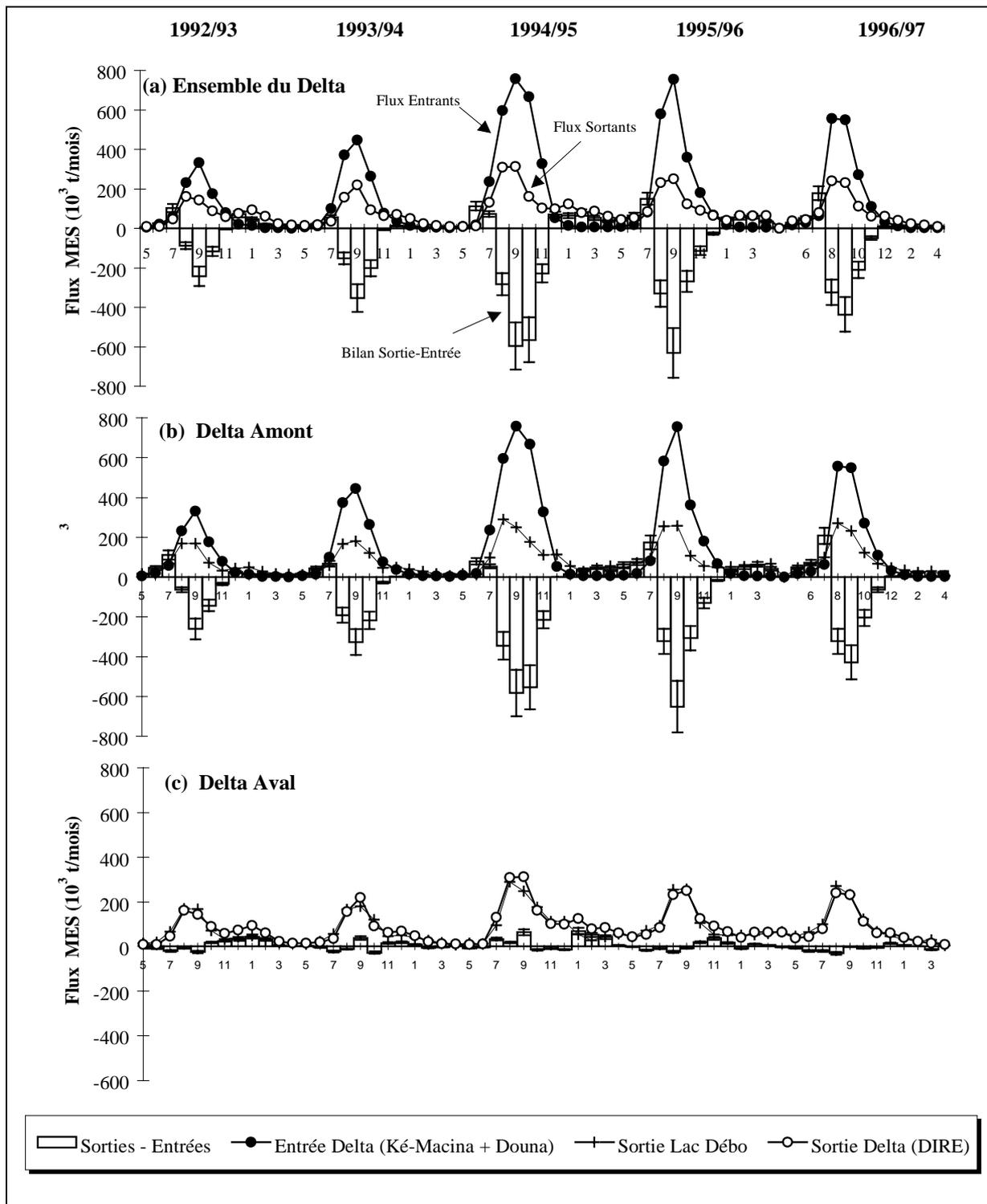


Figure 146. Variations mensuelles du bilan sorties-entrées des transports particuliers dans le delta central du Niger de 1992 à 1994

2.3.1. Le Delta (des entrées à Diré)

La Figure 146a, et la Figure 147 mettent en évidence, comme pour l'évolution des concentrations dans le temps, 3 périodes distinctes dans les bilans mensuels des MES en rapport avec le bilan hydrologique :

- **Au début de la crue** (juin et juillet), alors qu'il n'y a encore ni gain ni perte en eau, on observe **un gain de matière** lors de la traversé du delta. Les fortes concentrations rencontrées au début de la crue sur les stations à l'aval du lac Débo expliquent sans doute ces gains de matière.
- **La période d'août à novembre**, période pendant laquelle les pertes en eau sont également importantes quelle que soit l'année est caractérisée par des **pertes de matière importantes**. Les maximums de pertes ont lieu en septembre ou septembre-octobre et correspondent en général aux maximums de pertes hydriques.
- **A la fin de la saison des hautes eaux**, il peut se produire **un gain de matière faible** mais non négligeable pour les années humides, qui correspondrait à la période de restitution partielle des volumes piégés.

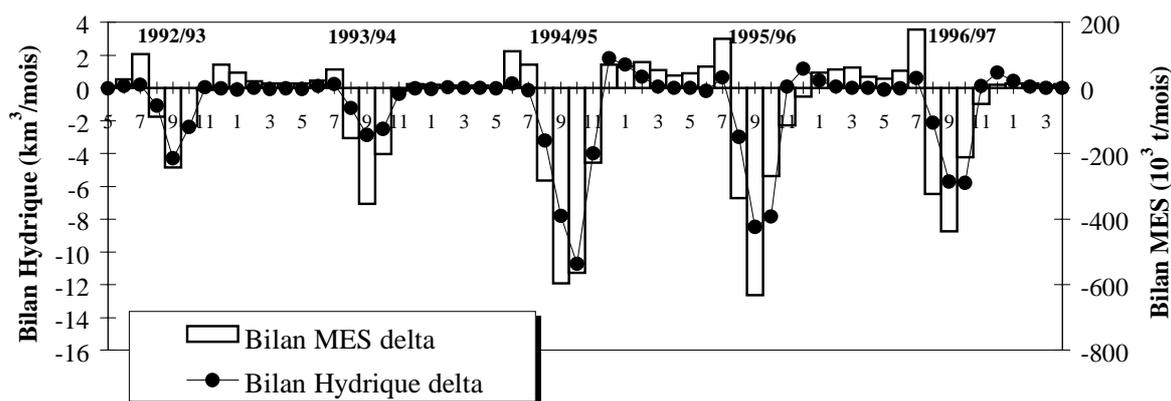


Figure 147. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta intérieur du Niger de 1992-1993 à 1996-1997.

En fin de compte on note une alternance de périodes de reprise et de sédimentation, ces dernières restent largement prédominantes en terme de flux bien qu'elle ne durent que 3 à 5 mois de l'année (la plus longue période de dépôt est observée pour l'année 1994-1995 de très bonne hydraulité dans le delta pour laquelle il y a eu concomitance d'une bonne crue sur le Niger et sur le Bani). Les périodes de sédimentation correspondent à la période des pertes hydriques.

2.3.2. Le delta amont et le delta aval :

La comparaison des bilans mensuels de MES et des bilans hydriques sur les deux parties du delta intérieur du Niger permet de confirmer les particularités de chacune de ces deux zones au cours du cycle hydrologique.

- **Sur le delta amont**, la Figure 146b et la Figure 148 montrent que l'on retrouve la même répartition des bilans mensuels que celle observée ci-dessus sur l'ensemble du delta. Cependant on observe un décalage entre la restitution des eaux et les "reprises" de MES qui se produisent plus tardivement (en basses-eaux). L'année 1994/95 illustre bien ce décalage, avec des reprises en eau qui commencent en novembre, mais des reprises de sédiments qui ne deviennent importantes qu'en février/mars.

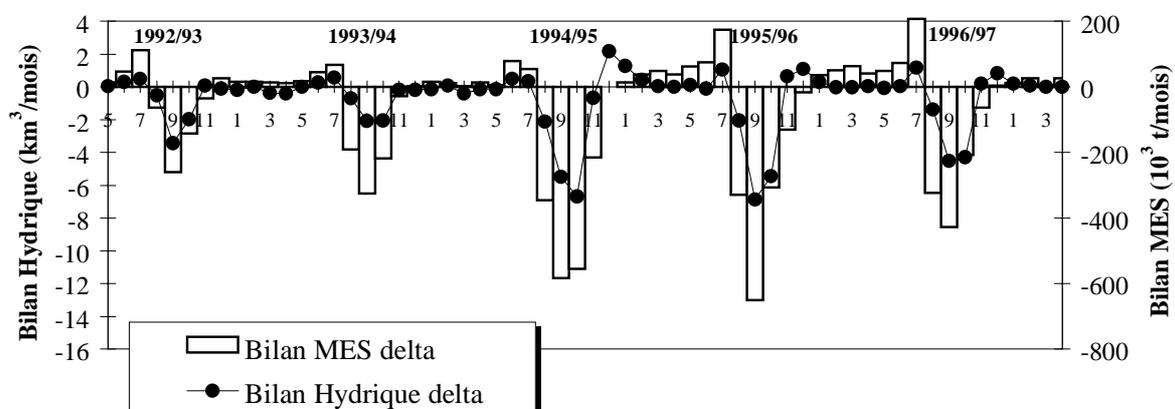


Figure 148. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta amont de 1992-1993 à 1996-1997.

- **Sur le delta aval**, la Figure 146c confirme que le comportement du système est effectivement différent de celui de l'amont : les gains et les pertes sont variables d'un mois à un autre et ne se reproduisent pas d'année en année. Ils semblent s'équilibrer plus ou moins suivant les années et expliquent les bilans annuels variables observés auparavant. On vérifie à l'échelle mensuelle que le bilan de MES sur le delta aval n'était pas lié au bilan hydrique (Figure 149). L'année 1994/95 illustre très bien ce propos : avec des pertes en eau conséquentes sur le delta aval qui se produisent de septembre à décembre (53% de pertes totales), le bilan mensuel de MES montre un gain important en septembre. Pendant cette période, il est certain que des pertes de MES se produisent (il peut y avoir dépôt de matière dans les régions soumises à l'inondation annuelle) mais des apports en MES conséquents, locaux ou extérieurs, doivent limiter cet effet. Nous verrons par la suite les hypothèses probables pour expliquer ces gains.

Enfin, il faut rappeler que les quantités de matières mises en jeu sur cette dernière partie du delta ne représentent qu'une très faible partie des flux annuels sur la totalité du delta et qu'elles ne sont pas significatives la plupart du temps. Par ailleurs, une hypothèse de départ est que le temps de propagation de la crue est faible pour le delta aval, ce qui a conduit à n'appliquer aucun décalage sur

les bilans hydriques et de MES. Or celui-ci peut être long pour les années de bonne hydraullicité (chapitre VI).

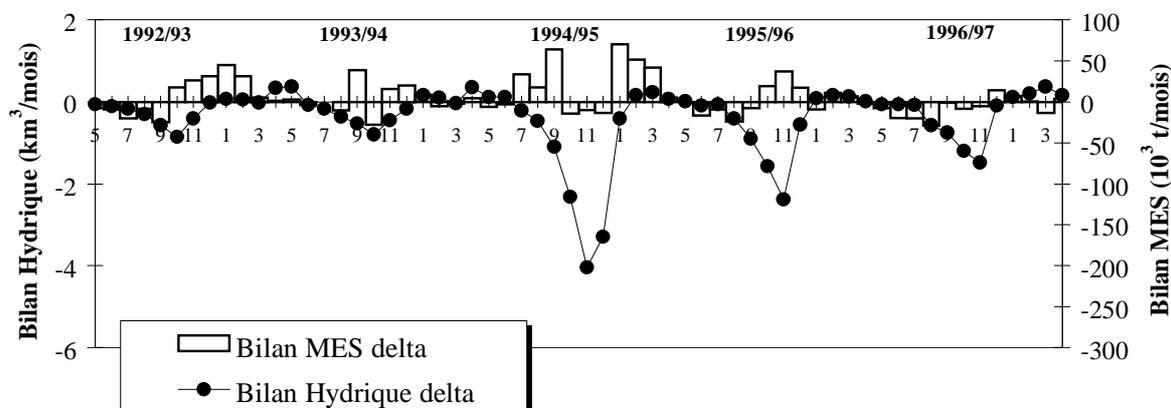


Figure 149. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta aval de 1992-1993 à 1996-1997.

Comme pour les bilans annuels, les bilans mensuels permettent de mettre en évidence les différences de comportement entre les deux parties du delta. Le delta amont est caractérisé, lors de l'inondation annuelle de cette zone deltaïque, par des pertes mensuelles liées aux pertes en eau. La restitution des eaux lors de la vidange des mares ne s'accompagne pas systématiquement d'une reprise de matières en suspension. Sur le delta aval, les pertes et les gains mensuels de matières sont très variables dans le temps et ne sont pas du tout liés aux bilan hydriques. Cela suggère qu'il existe sur cette partie du delta des phénomènes antagonistes d'apport ou de pertes qui s'équilibrent plus ou moins selon les années.

3. PROCESSUS MIS EN JEU DANS LES BILANS DE MES

Le delta amont est la zone proprement deltaïque du delta intérieur du Niger. Même si les pertes en eau peuvent être moins importantes sur cette zone que sur le delta aval en année humide (exemple de l'année 1994-1995), c'est elle qui subit l'inondation annuelle la plus importante tant en surface qu'en durée et ceci quelle que soit l'année (les pertes en eau sur le delta aval en année humide allant surtout dans les lacs...). C'est cette zone du delta qui joue un rôle déterminant dans les pertes de matières en suspension comme l'ont montré les bilans annuels et mensuels. Les processus mis en jeu vont varier en relation avec le cycle hydrologique et sont donc discutés dans les paragraphes suivant en trois étapes.

3.1. Arrivée de la saison pluvieuse et de la crue

Les gains observés au début de la saison des pluies et en début de crue suggèrent qu'il existe entre les entrées **du delta amont** et les stations à l'aval du lac Débo des **reprises de sédiments d'origine fluviatile** (dépôts de l'année précédente) mais aussi **d'origine atmosphérique** (poussières) qui ont pu s'accumuler durant toute la saison sèche. A ces sources, peuvent également s'ajouter des apports issus de débris végétaux et de déjections animales... Ces sources de matériaux sont facilement mobilisables soit par les **pluies** soit par la **montée des eaux** du fait de l'absence "totale" de couvert végétal et de l'absence de cohésion de ces dépôts superficiels avec les terrains sous-jacents :

- Le début de la **montée des eaux** induit une érosion des berges et des reprises de sédiments fins déposés l'année précédente dans le lit mineur du fleuve.
- **Les vents violents liés aux pluies locales** participent à l'augmentation des concentrations en MES dans le fleuve à l'aval du lac Débo. On a vu que les pluies dans ces régions sont précédées par des vents très violents qui déplacent des quantités de poussières locales très importantes. Des mesures ont été faites sur les apports atmosphériques par Gourcy (1994) qui ont mis en évidence un apport important par **recyclage** des poussières du delta soulevées lors des tornades de juillet, août. Ces mesures ont été confirmées par Orange *et al.* (1998) qui notent une pointe de dépôts de mai à juillet, expliquée par de fortes remobilisations de poussières locales ou sous-régionales (contributions des sols dans un rayon de 100 km) liée aux forts vents turbulents accompagnant le passage des lignes de grains (chapitre II).
- **Le ruissellement** qui découle de ces pluies (même s'il est considéré comme faible) sur les terres exondées et vierges de végétation peut provoquer la mise en charge des nombreux petits mayos qui se jettent ensuite dans les chenaux principaux (les concentrations ponctuelles mesurées sur des mayos ou sur les stations à l'aval du lac Débo peuvent atteindre environ 1 g.l^{-1}). Ce phénomène peut avoir lieu tant qu'il pleut et peut expliquer les nombreux pics de concentration observés à cette époque.
- **L'action mécanique du vent** est également un phénomène à prendre en compte puisqu'il permet d'une part, la formation de vaguelettes qui érodent les berges, d'autre part, la création de turbulences dans une eau encore peu profonde qui peut remettre en suspensions des dépôts de fond.

Le delta aval semble peu touché par ces différents phénomènes de reprise en début de crue excepté pour l'année 1994-1995 pour laquelle les gains sont importants en début de crue alors qu'il n'y a pas de pertes en eau. Ce gain est peut être lié à une érosion des berges importante, possible pour les crues de forte intensité. Gallais précisait en 1977 qu'une reprise érosive de fond et en bordure de chenal est possible pour la partie Nord-est du lac Débo, à proximité de la déflue de l'Issa Ber, sur la base d'une érosion vigoureuse observée sur la coupe de berge entre Akka et Attara.

3.2. L'étale de la crue

La diminution importante des concentrations en hautes eaux à l'aval du lac Débo et les fortes pertes dans les bilans de MES sur le delta amont s'expliquent par le stockage temporaire d'une part importante du volume de crue dans l'immense plaine alluviale que constitue le delta amont. Les eaux du Niger et du Bani empruntent un réseau très dense de défluent qui inondent les plaines de juillet à décembre (chapitre VII). Ces nombreuses zones inondées du delta ont une **capacité de rétention en sédiments** a priori importante du fait de plusieurs variables interactives qui vont notamment jouer sur la **vitesse du courant** (Simm, 1995 ; Wong & McCuen, 1981, cités dans Brunet & Gazelle, 1995) :

- Les très **faibles pentes** du chenal principal et de la zone en général induisent des vitesses faibles.
- la **topographie** des plaines inondées avec les réseaux de chenaux, les levées principales, secondaires, les micro-topographies, les aménagements humains (micro-barrages érigés par la population pour la pêche)... conduit à un cloisonnement de la plaine inondée plus ou moins marqué suivant l'intensité de la crue. Ce dernier qui détermine les séquences inondées et la conductivité de la plaine d'inondation, favorise l'alluvionnement de particules plus ou moins grossières en créant des zones à vitesses d'écoulement réduites.
- le **type de végétation** (macrophytes essentiellement) et sa densité, jouent un rôle important dans le piégeage des particules. La végétation dense des marais et des bourgoutières doit par exemple permettre une filtration des argiles fines en favorisant leur piégeage. L'étale de la crue (vers octobre, novembre) a effectivement été définie comme étant la période où la couverture spatiale végétale et l'intensité de celle-ci sont maximales (indice NDVI, chapitre I).

Finalement, les zones abritées du courant, envahies par les plantes aquatiques permettent un stockage de la matière en suspension. La présence de mares, de grands lacs (comme les lacs Débo et Walado) plus profonds que les plaines d'inondation vont sans doute faciliter les dépôts de matières et jouer le rôle de décanteur.

Les quantités de matériaux déposés annuellement sur le delta amont vont dépendre d'autre part des facteurs hydrologiques de chaque crue. **La superficie, le temps de résidence des eaux** vont également jouer un rôle dans le piégeage annuel des sédiments. La longue période en 1994-1995 au cours de laquelle les concentrations en MES sont très faibles aux stations à l'aval du lac Débo le laisse pressentir : pour des pertes en eau équivalentes à celle de l'année 1995/96, les pertes en MES sont beaucoup plus importantes en 1994/95 du fait de la durée de l'inondation plus longue pour cette année 1994/95.

Pour le delta aval, cette période est aussi sans doute caractérisée par des pertes par sédimentation dans les zones inondées entre les dunes, mais il est finalement assez difficile de montrer les processus majeurs mis en jeu.

3.3. Décrue et vidange des plaines d'inondation

Les plaines d'inondation stockent temporairement un certain volume d'eau ce qui conduit à l'écrêtement des crues et se vidangent ensuite pour réalimenter le chenal principal lors de la décrue (chapitre VII) L'accroissement rapide de la turbidité en décrue sur la station à l'aval du lac Débo peut résulter d'un **phénomène de chasse provoqué par la rapidité de cette vidange**. Phénomène qui favoriserait la remise en suspension des sédiments déposés auparavant dans le lit mais aussi sur les tiges des végétaux des plaines d'inondation... Ces apports pourraient s'accompagner de débris végétaux, de diatomées qui participeraient à la charge en suspension. Ce phénomène est pourtant difficilement mis en évidence dans les bilans mensuels sur le delta amont puisque l'on observe un décalage entre gain en eau et gain en MES.

Le fait que l'augmentation brutale des concentrations en décrue à la station d'Akka survienne pour toutes les années pratiquement pour un même débit suggère que **le retour du fleuve dans son lit mineur**, avec des berges encore humides, peut également expliquer une forte augmentation des MES due à l'érosion des berges. Après le passage de la crue, celles-ci, montrent effectivement des taux d'humidité plus importants et sont par suite plus facilement érodables (Asbridge *et al.*, 1995).

Cette période de l'année est aussi **une période de vent violent** (l'Harmattan, souffle de décembre à mai et provient du nord-est, soit dans le sens du cours du Niger) qui par son action mécanique sur la surface de l'eau en créant des vaguelettes peut favoriser l'érosion des berges. Le fait que les concentrations en 1994-1995 ne recommencent à augmenter qu'à partir de la mi-février suggère que l'action efficace du vent (en terme d'apport de MES) ne peut se produire que si la hauteur d'eau à la station de Akka est en dessous d'un certain seuil (sans doute le même que ci-dessus) pour lequel les berges sont de nouveau exposées.

Pour le delta aval, la plus grande variabilité des concentrations à la station de Diré, et les gains de matières généralement observées entre Akka et Diré suggèrent que ce même type d'érosion sur ce bief est possible. La station de Diré subit moins **l'effet tampon du lac Débo** et les concentrations commencent à augmenter plus tôt.

Des **apports atmosphériques d'origine extérieure au bassin** (venant du Sahara et véhiculés par l'Harmattan) peuvent aussi être incriminés pour expliquer les fortes concentrations en MES lors de la fin de la décrue. Nickling & Gillies (1993) ont montré que c'est pendant les mois de décembre à mars, que les apports allochtones de poussières atmosphériques étaient les plus importants. La réelle contribution des apports extérieurs transportés par l'Harmattan reste toutefois à démontrer. Les études récentes évoqués ci-dessus montrent qu'il existe bien des dépôts éoliens dans le delta intérieur du Niger qu'ils soient **d'origine locale ou plus lointaine** (Gourcy, 1994 ; Orange *et al.*, 1998). En fait, comme les apports liés à l'érosion hydrique et aux apports amont sont faibles à partir du mois de décembre, il semble que les apports liés à l'érosion éolienne deviennent relativement importants dans les processus d'exportation de matière par le fleuve.

Une année de mesures sur le site de Tossaye, à 350 km à l'aval de Diré dans la boucle du Niger, permet de mettre en évidence des gains de matières en suspension entre ces deux stations dès le mois

de septembre et jusqu'au mois d'avril. Une étude sur cette zone a montré qu'il se produit à l'heure actuelle un ensablement intensif du cours du Niger dû à la combinaison des effets du vent dominant, l'Harmattan, provenant du nord-est et de la dégradation de la végétation (Rapport ISFRA, 1994). Ceci tend à souligner que les apports éoliens directs et l'érosion éolienne des particules des sols et des berges environnantes, sans ou avec peu de végétation, seraient suffisants pour expliquer l'augmentation de MES dans cette zone semi-désertique.

3.4. Peut on calculer des taux de sédimentation?

Pour estimer un taux de sédimentation contemporain dans le delta intérieur du Niger, il est possible de réaliser un calcul d'extrapolation à partir des pertes annuelles que nous avons calculées dans ce chapitre. Ce calcul sera obligatoirement approximatif du fait de la méconnaissance des surfaces inondées mais aussi de l'incertitude des mesures sur les MES dans la rivière. Pour la période d'étude des flux de MES (1992 à 1998), période contrastée d'un point de vue hydrologique, la surface maximum inondée est estimée à environ 20 000 km² selon les méthodes présentées dans le chapitre VII. Les pertes moyennes sur la même période sont estimées à 707 000 tonnes. Avec une densité des matériaux prise égale à 1,5 (matériau non consolidé) ou 2,5 (matériau plus consolidé), les taux de sédimentation respectifs sont de 0,02 mm.an⁻¹ et 0,01 mm.an⁻¹. Ce taux est très faible par rapport à des taux calculés sur d'autres plaines inondables (Tableau 68). Mais les méthodes de mesures sont très différentes et les superficies concernées dans les autres études ... beaucoup plus faibles.

Localisation (rivière, Pays)	Echelle temporelle	taux de sédimentation
Dry Creek, USA	33 ans	0,46 -0,55 cm an ⁻¹
Medecine Creek, USA	22 ans	8,3 cm an ⁻¹
Well Canyon, USA	41 ans	1,5-2 cm an ⁻¹
Watts Branch, USA	13 ans	1,17 cm an ⁻¹
Serven, GB	depuis 1963	≅ 1,5 cm an ⁻¹
Exe, GB	depuis 1963	≅ 0,9 cm an ⁻¹
Rewe, Culm, GB		Moyenne 0,3 ± 0,1 mm an ⁻¹
Paddleford, Culm, GB		Moyenne 0,28 ± 0,1 mm an ⁻¹
Kensham, Culm, GB		Moyenne 0,12 ± 0,06 mm an ⁻¹

Tableau 68. Quelques exemples de taux de sédimentation contemporains moyens dans des plaines d'inondations (d'après Simm, 1995).

En considérant très grossièrement que ce taux est constant sur la période d'existence du delta (moins de 10 000 ans, chapitre I), il se serait déposé, suivant les deux estimations, entre 10 et 20 cm! Cette façon de voir est très critiquable, elle donne d'une part une image évidemment statique de la sédimentation en ne tenant pas compte des périodes plus humides, d'autre part elle fait l'hypothèse

abusive d'un taux de sédimentation uniforme sur l'ensemble de la zone inondée. De nombreuses études ont effectivement mis en évidence une forte variabilité spatiale des taux de sédimentation dans les plaines alluviales (e.g. Brunet & Gazelle, 1995 ; Simm, 1995 ; Allison *et al.*, 1998 ; Dunne *et al.*, 1998).

Chapitre IX. Chimie des eaux du delta intérieur du Niger : cations et anions majeurs, éléments traces, MES

Le bilan hydrique du delta intérieur du Niger établi au chapitre VII a mis en évidence des pertes hydriques importantes lors de la traversée du delta intérieur du Niger. Celles-ci sont principalement liées aux phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration et sont plus importantes pour les années de bonne hydraulité. Le chapitre VIII a permis de mettre en évidence qu'il s'y produit également des pertes en sédiments. L'objectif de ce chapitre est d'identifier s'il se produit des changements dans la composition chimique des eaux et des particules lors de cette traversée et si l'hydraulité de l'année joue un rôle sur ces éventuels changements de composition chimique.

1 CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES DES EAUX DU DELTA INTERIEUR DU NIGER

L'objet de ce paragraphe est de caractériser la composition chimique moyenne des eaux du Niger (dans les phases dissoute et particulaire) aux différentes stations situées dans le DIN ainsi que l'évolution temporelle de cette composition chimique au cours d'un cycle hydrologique. Ceci nous permettra d'étudier l'évolution spatiale de cette composition entre l'amont et l'aval du delta. La systématique des éléments traces mesurées dans les eaux du Niger aux stations situées dans le delta intérieur sera rapidement évoquée, les mêmes comportements que ceux examinés aux stations amont (présentés au chapitre VI) étant observés.

1.1 Composition chimique de la phase dissoute (C_D)

La caractérisation géochimique moyenne de la phase dissoute des eaux du delta intérieur du Niger est basée pour les majeurs sur les observations bimensuelles réalisées dans le cadre du réseau ORSTOM de 1991 à 1997 (Chapitre II). Pour les éléments traces et le carbone organique, elle est basée sur 5 campagnes de prélèvements qui ont été effectuées pendant les différentes étapes du cycle

hydrologique (de 1996 à 1997). Ces prélèvements sont situés sur les stations d'Akka à l'aval du lac Débo, et de Diré à la sortie du delta (chapitre II).

1.1.1 Les éléments majeurs et le COD

Les concentrations moyennes interannuelles (concentrations pondérées par les débits) des différents éléments majeurs des eaux du Niger pour les 4 années d'observations disponibles sont reportées dans le Tableau 69 pour les différentes stations du delta. Les concentrations mentionnées pour le COD ne concernent que l'année 1996/97. Le nombre d'années et d'analyses retenues est aussi mentionné. La totalité des résultats moyens se trouve en annexe 5.

Comme les eaux du bassin du Niger amont, les eaux des deux stations principales du delta intérieur du Niger sont faiblement minéralisées par rapport à la moyenne des rivières non polluées du globe (Meybeck *et al.*, 1996a). Avec des pH proches de 7, elles sont relativement neutres. Par ailleurs, il est remarquable que les concentrations moyennes ne sont que légèrement plus élevées sur ces stations que sur les deux stations à l'entrée du DIN.

	Niger (amont)			Bani			Niger (Delta)					
	Ké-Macina	+/-	σ	Douna	+/-	σ	Akka	+/-	σ	Diré	+/-	σ
Nbre Année	6			6			4			3		
Nbre Analyses	114			112			69			52		
Débit (m ³ .s-1)	907	+/-	287	224	+/-	120	+/-			+/-		
pH*	7.1	+/-	0.2	7.0	+/-	0.2	7.0	+/-	0.4	6.9	+/-	0.02
Cond 20° (μS.cm ⁻¹)	39.0	+/-	3.9	44.8	+/-	9.2	43.3	+/-	3.3	43.5	+/-	0.7
Ca (mg.l-1)	2.4	+/-	0.4	2.7	+/-	0.3	2.7	+/-	0.5	2.6	+/-	0.6
Mg (mg.l-1)	1.1	+/-	0.3	1.2	+/-	0.2	1.3	+/-	0.3	1.3	+/-	0.1
K (mg.l-1)	1.5	+/-	1.3	2.1	+/-	0.2	2.0	+/-	0.2	2.2	+/-	0.2
Na (mg.l-1)	3.0	+/-	0.4	2.6	+/-	0.6	3.2	+/-	0.4	3.3	+/-	0.3
HCO ₃ (mg.l-1)	22.1	+/-	4.6	23.5	+/-	2.1	25.2	+/-	2.1	24.4	+/-	2.2
Cl (mg.l-1)	0.7	+/-	1.0	0.7	+/-	0.3	0.6	+/-	0.2	0.9	+/-	0.4
NO ₃ ** (mg.l-1)	0.2	+/-	0.2	0.6	+/-	0.1	0.2	+/-		0.03	+/-	
SO ₄ ** (mg.l-1)	0.3	+/-	0.1	0.4	+/-	0.1	0.2	+/-	0.2	0.5	+/-	
SiO ₂ (mg.l-1)	13.3	+/-	1.7	12.6	+/-	3.1	13.6	+/-	1.8	12.3	+/-	1.5
TDS (mg.l-1)	44.4	+/-	3.5	46.1	+/-	5.9	48.9	+/-	1.5	48.0	+/-	1.9
Σ+ μeq.l-1	373	+/-	21	409	+/-	44	431	+/-	34	433	+/-	26
Σ- μeq.l-1	390	+/-	25	423	+/-	40	433	+/-	32	440	+/-	39
BI %	-5			-3			-1			-1		
COD***	1.6			1.7			5.2			1.8		

* pH mesuré au laboratoire.

** de nombreuses valeurs sont inférieures à la limite de détection

*** quelques valeurs réparties sur l'année 1996/97

Tableau 69. Evolution de la composition chimique moyenne des eaux du Niger et du Bani dans sa traversée du delta intérieur.

La silice dissoute et les bicarbonates, représentent l'essentiel de la minéralisation des eaux (entre 75 et 80% de la charge dissoute totale). Ces proportions sont toutefois un peu plus faibles que sur les stations à l'entrée du delta (Ké-Macina et Douna, chapitre VI). Les eaux du delta aux stations principales d'Akka et de Diré ont des concentrations en cations et surtout en bicarbonates (en mg.l^{-1}) plus fortes qu'aux entrées, des concentrations pour les autres anions plus faibles, et des concentrations en silice du même ordre de grandeur. A Akka, le rapport massique moyen silice/cations de 1,5, est plus faible qu'à Ké-Macina (1,7) mais identique à celui de Douna (1,5). Ce rapport, qui n'est plus que de 1,3 à Diré, met en évidence un appauvrissement en silice dissoute au cours de la traversée du delta par rapport aux cations.

Une autre remarque importante concerne les concentrations en **carbone organique dissous** (COD) qui sont assez élevées à la station d'Akka (Tableau 69) par rapport à l'ensemble des autres stations (Diré compris). La concentration moyenne à Akka est de $5,2 \text{ mg.l}^{-1}$ (avec des valeurs comprises entre $1,3$ et $7,3 \text{ mg.l}^{-1}$) alors qu'elle n'est que de $1,8 \text{ mg.l}^{-1}$ à Diré, $1,6$ et $1,7 \text{ mg.l}^{-1}$ respectivement à Ké-Macina et Douna. Ces fortes valeurs rencontrées en hautes eaux (novembre et février) à la sortie du lac Débo suggère qu'il s'agit de COD autochtone issu du phytoplancton et des dégradations bactériennes.

Les compositions ioniques des eaux des stations d'Akka et Diré sont pour les anions très semblables à celles observées sur les stations amont (Figure 150 et chapitre VI).

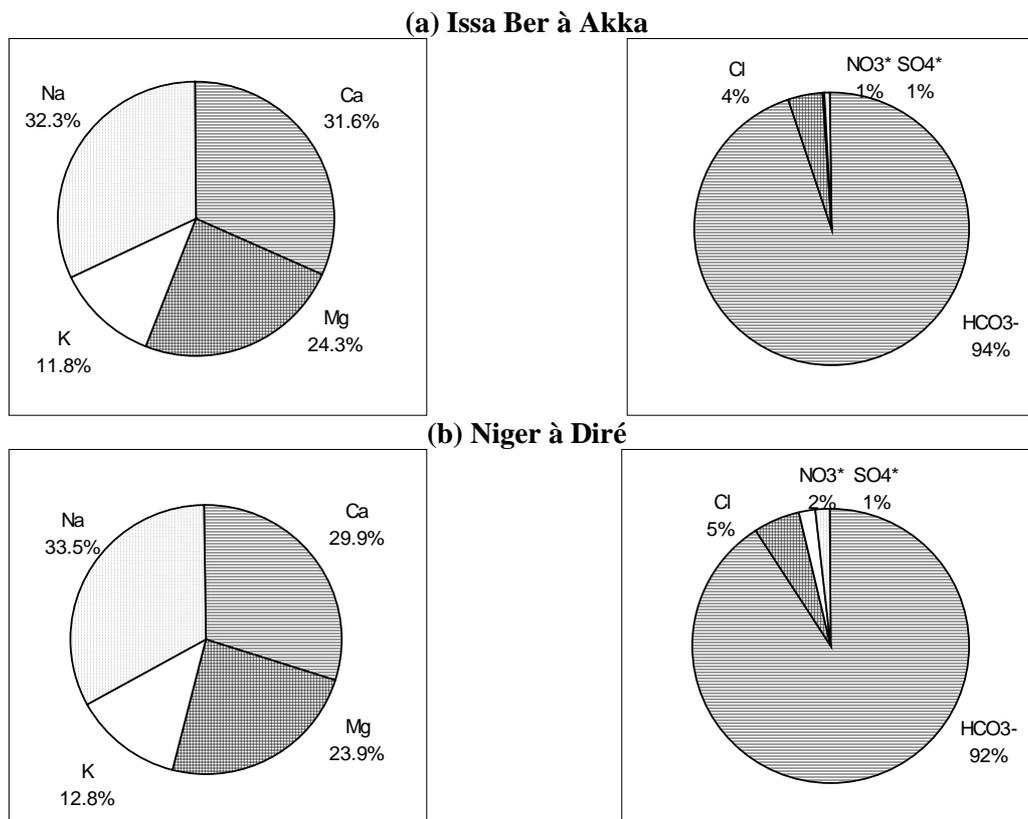


Figure 150. Diagramme circulaire représentant la proportion moyenne interannuelle de chaque cation et anion (en $\mu\text{eq.l}^{-1}$) pour les deux stations du delta intérieur du Niger, à Akka (a) et Diré (b).

L'abondance relative des anions suit toujours pour les deux stations l'ordre suivant : $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{NO}_3 > \text{SO}_4$. Pour les cations, le cation prédominant en moyenne est Na totalisant environ 33 % de la somme des cations (en $\mu\text{eq.l}^{-1}$) ce qui correspond à des proportions légèrement plus importantes qu'à l'amont, suivis de près par Ca dont l'abondance relative (respectivement 31,6 et 30 % sur les stations d'Akka et Diré) est plus faible que sur les stations amont. Cette différence suggère qu'il se produit dans le delta des processus tels que la précipitation de minéraux qui enrichissent relativement l'eau en sodium au détriment du calcium. Les proportions des autres cations sont assez identiques à celles rencontrées à l'amont : Mg représente environ 24 % des cations et K plus que 12 % environ. Cet ordre d'abondance, identique sur les deux stations du delta, se rapproche de celui des eaux du Bani à Douna où les ions Na et Ca sont d'importance égale.

On signalera au titre des variations interannuelles que l'ion sodium domine par rapport à l'ion calcium pour les années antérieures à 1994 (1992 et 1993) et que la situation inverse est observée depuis le fort épisode humide de 1994. Les pourcentages de ces deux cations restent cependant suffisamment proches pour que cela ne nécessite pas d'interprétation particulière d'autant que les procédures d'analyses ont été modifiées au cours de l'étude (modification des équipements du laboratoire pour l'analyse des cations, chapitre II).

Etant donné, la faiblesse des **balances ioniques moyennes** ($\text{BI} = 200 * (\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)$; avec, Σ^+ somme des cations et Σ^- somme des anions) qui sont inférieures à 7 %, on peut considérer que les ions non mesurés tels que les anions organiques ne sont pas des composants importants des eaux du fleuve Niger dans le delta.

1.1.2 Les éléments traces

Le Tableau 70 reprend, pour les stations du delta intérieur du Niger étudiées (Sensé - à l'aval de Mopti - Akka et Diré) et les entrées du delta, les valeurs des concentrations moyennes en éléments traces pondérées par les débits. L'ensemble des résultats ainsi que quelques statistiques élémentaires (coefficient de variation, médiane, minimum et maximum, quartiles inférieur et supérieur) se trouve en 4 et 5. Les concentrations moyennes pondérées par les débits calculés sur les stations du delta ne sont pas vraiment significatives de la moyenne annuelle faute d'un nombre suffisant d'échantillons sur ces stations très inaccessibles (chapitre II). Elles nous permettront cependant de comparer la répartition entre les différents éléments traces aux stations étudiées.

De manière générale, les **abondances absolues des éléments traces dans la phase dissoute** sont du même ordre de grandeur que celles observées aux stations du bassin amont (chapitre V). Les concentrations moyennes en métaux traces (Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) sont, comme à l'amont, très faibles. Ceci est a priori normal puisque presque aucune industrie n'est recensée sur la zone du bassin étudiée. Les teneurs en TRs sont généralement au dessus du seuil de détection, ce qui n'est pas le cas des eaux amont.

	Entrées DIN		Delta intérieur du Niger		
	Ké-Macina	Douna	Sensé	Akka	Diré
N	8	8	7	4	5
Sc			1.45	1.38	1.20
Ti	3.01	2.43	3.52	2.43	6.39
V	0.59	0.71	0.82	0.46	0.58
Cr*	0.45	0.35	0.46		0.50
Mn	0.50	0.62	0.6	1.3	0.4
Fe	105.1	98.1	100.5	128.6	113.7
Co	0.04	0.04	0.049	0.048	0.048
Cu	0.63	0.76	0.82	0.72	0.88
Zn*		0.73	0.74	0.48	0.86
Rb	3.86	4.4	4.16	3.72	3.49
Sr	26.4	23.68	30.2	30.4	30.7
Y	0.05	0.086	0.073	0.064	0.068
Zr	0.12	0.099	0.15	0.10	0.15
Cs	0.01	0.017	0.014	0.007	0.009
Ba	30.2	21.9	34.2	35.5	36.9
La	0.091	0.121	0.116	0.102	0.111
Ce	0.171	0.244	0.216	0.204	0.211
Pr	0.022	0.038	0.032	0.029	0.032
Nd	0.085	0.170	0.123	0.111	0.115
Sm		0.031	0.020	0.023	0.023
Eu		0.008		0.006	0.005
Gd	0.013	0.029	0.020	0.020	0.022
Tb		0.003	0.003		
Dy	0.009	0.017	0.015	0.013	0.015
Ho		0.003		0.002	0.003
Yb				0.005	0.007
Hf			0.004		
Ta			0.006	0.019	0.011
Pb*	0.039	0.035	0.038	0.109	0.058
Th	0.013	0.013	0.005	0.009	0.013
U	0.020	0.036	0.018	0.022	0.026

Tableau 70. Concentration moyennes pondérées par les débits (ppb) des éléments traces dans la phase dissoute pour 3 stations du delta intérieur du Niger : Sensé (Niger), Akka (Issa Ber), et Diré (Niger)- statistiques élémentaires.

Les spectres des concentrations moyennes normalisées dans la phase dissoute pour les stations du delta ont la même forme que ceux observés à l'amont (Figure 151) : l'ensemble des éléments est toujours très appauvri par rapport à la croûte continentale, mais pas de manière homogène. Les éléments connus comme solubles Sc, Rb, Ba, Sr, Ca, K et Na le sont systématiquement davantage que leurs voisins (Th, Pb, Fe, Co, Ni et les terres rares...). On retrouve également les mêmes "anomalies", déjà reportées sur le bassin amont, pour les terres rares (Figure 152) : enrichissement en Eu, et léger appauvrissement en TRs lourdes par rapport au TRs légères. Il est intéressant de remarquer que les spectres en TRs sur les 3 stations du delta se rapprochent plus de la forme de celui observé sur la station de Douna sur le Bani que de ceux reportés sur le Niger : on retrouve l'enrichissement croissant de La à Eu. Les terres rares pourraient être un marqueur du mélange des eaux du Bani et du Niger.

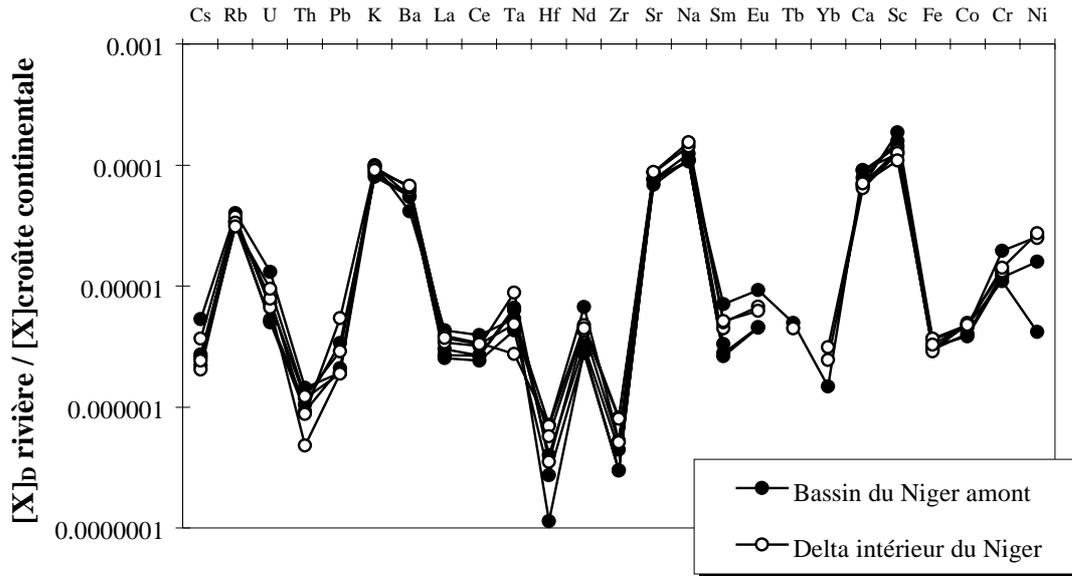


Figure 151. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase dissoute (pondérées par les débits) du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).

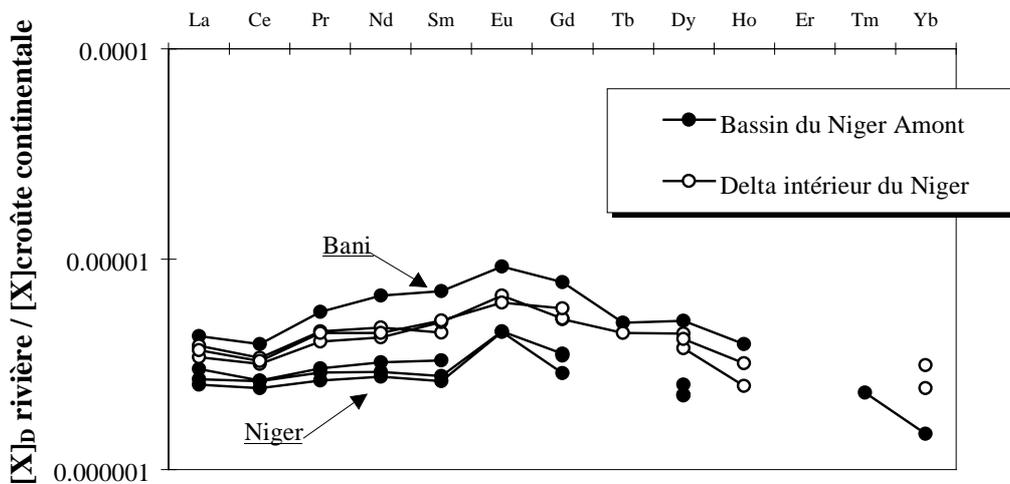


Figure 152. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes en terres rares dissoutes du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985). Les trois courbes inférieures correspondent aux trois stations du Niger amont.

Les éléments traces dans la phase dissoute des stations du delta intérieur du Niger suivent les mêmes comportements déjà observés sur les stations amont. Les différences de concentrations entre les stations aval et amont ne sont pas importantes.

1.1.3 Variabilité spatio-temporelle de la composition de la phase dissoute

Les différents résultats obtenus sur le bassin du Niger amont ont montré la variabilité temporelle importante des concentrations en éléments dissous au cours du cycle hydrologique. Cette variabilité est liée à la contribution de différentes masses d'eau au débit écoulé (chapitre VI). La propagation de la crue vers l'aval, et l'inondation du delta, où d'une part les apports en eaux (pluie et/ou tributaires) sont négligeables devant les apports du Niger et du Bani et où d'autre part les pertes en eau par évaporation sont significatives (chapitre VII), peuvent a priori influencer l'évolution des concentrations au cours de la crue entre les stations amont et aval du delta.

Cette variation spatio-temporelle est étudiée dans les paragraphes suivants aux stations d'Akka et de Diré, pour l'année sèche 1993-1994 et pour l'année 1994-1995 qui est de bonne hydraulicité. L'année 1994/95 est la seule année pour laquelle on dispose sur les stations du delta d'un nombre important d'échantillons analysés (concentrations bimensuelles). L'année 1993/94, intéressante car d'hydraulicité moins importante, est présentée à titre de comparaison. Par ailleurs, les mesures disponibles pour les autres années ne montrent pas d'évolution temporelle des concentrations significativement différentes. La Figure 153 présente à titre d'exemple l'évolution temporelle des concentrations instantanées en éléments dissous et des débits journaliers pour l'ensemble des années à la station d'Akka.

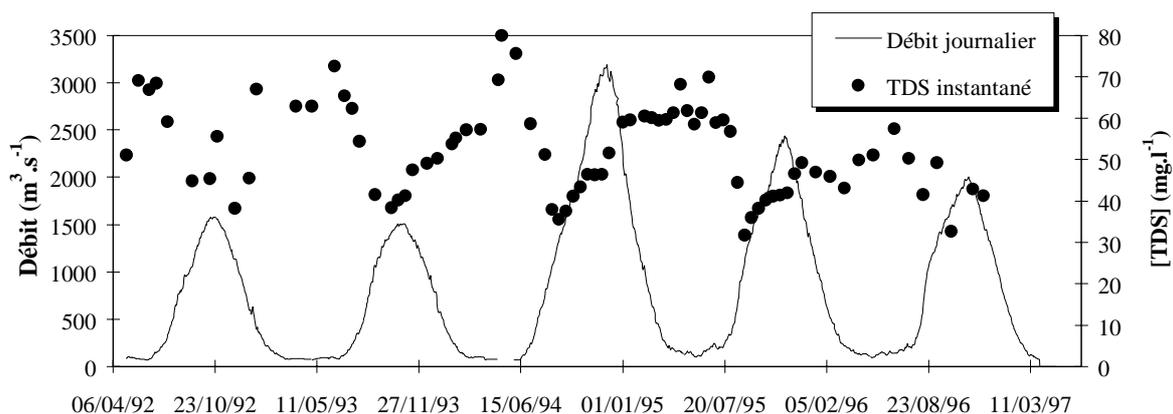


Figure 153. Exemple d'évolution conjointe des concentrations en TDS et du débit pour la station d'Akka.

1.1.3.1 Variabilité saisonnière de la minéralisation des eaux de surface

(a) *évolution temporelle générale.*

La Figure 154 représente l'évolution temporelle des concentrations totales en éléments dissous (TDS) et du débit pour les deux années hydrologiques 1993/94 et 1994/95. On retrouve pour les stations principales du delta intérieur du Niger (Akka et Diré) les mêmes types de variations qu'à l'amont et ceci pour toutes les années :

- à la fin de l'étiage, les concentrations en TDS atteignent leur maximum annuel qui avoisine 80 mg.l^{-1} .
- en début de crue (juin sur les stations du delta), lorsque les débits commencent à augmenter, on observe une diminution importante et rapide des concentrations ; elles atteignent leur minimum annuel au mois d'août avant le maximum de débit. La Figure 154 montre que celui-ci est légèrement plus faible pour l'année 1994/95. L'écart temporel entre le minimum de TDS et le maximum de crue est beaucoup moins important pour l'année 1993/94 que pour l'année humide 1994/95.
- lors de l'étale de la crue (qui est plus longue mais moins intense qu'à l'amont du fait de la traversée du delta) puis lors de la décrue, les concentrations augmentent progressivement pour atteindre à nouveau leur maximum en fin d'étiage.

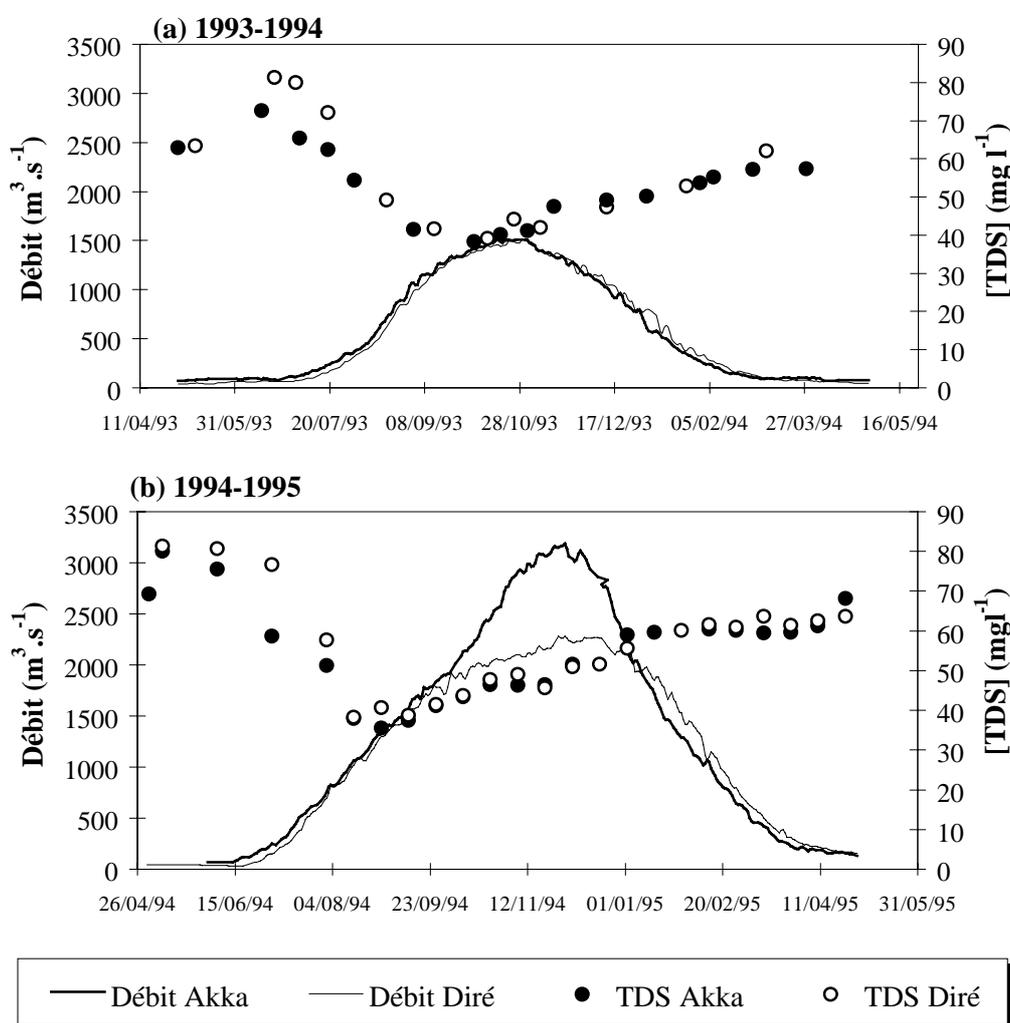


Figure 154. Evolution des concentrations totales en élément dissous (TDS) et du débit sur les deux stations principales du delta intérieur du Niger (stations d'Akka et de Diré), au cours de l'année hydrologique 1993-1994 (a) et 1994-95 (b).

Entre les deux stations principales du delta, les différences d'évolution de concentrations se limitent, quelle que soit l'année, au début de la crue : la diminution des concentrations est légèrement plus tardive à la sortie du delta intérieur du Niger (Diré) qu'à la sortie du lac Débo (Akka).

(b) Evolution des boucles d'hystérésis relatives aux relations C/Q

Les relations entre concentrations en TDS et débits forment des boucles d'hystérésis "anti horlogiques". Elles sont beaucoup moins marquées pour l'année 1993/94 que pour l'année 1994/95 (Figure 155a et b). Par ailleurs, pour l'année 1994/95, cette boucle est de même beaucoup plus marquée que celles observée aux stations situées à l'amont du delta (Figure 155c et d).

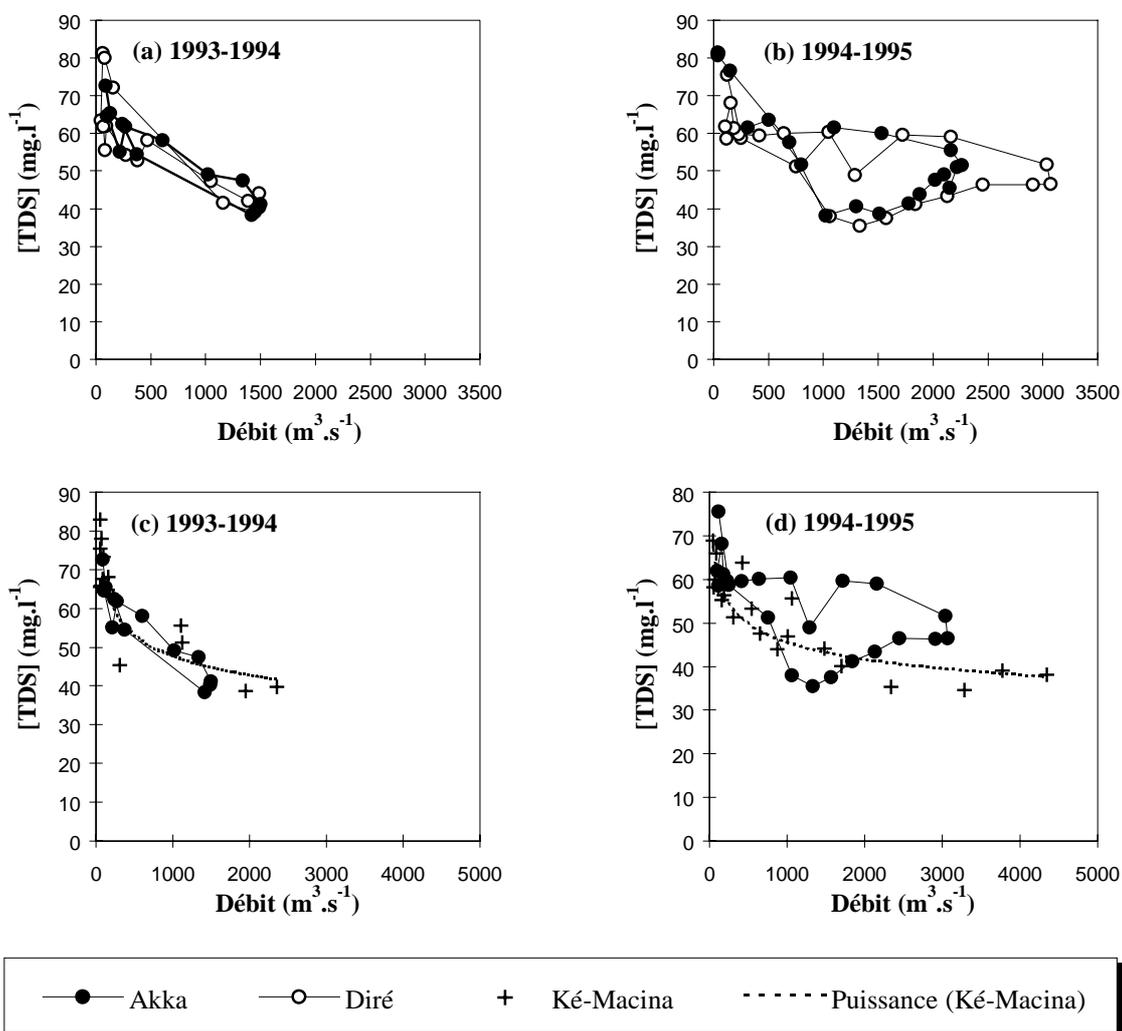


Figure 155. Exemple de relation entre la concentration totale en élément dissous (TDS) et le débit aux stations d'Akka et de Diré sur le delta intérieur du Niger pour l'année hydrologique 1993-1994 (a) et 1994-1995 (b), aux stations d'Akka et de Ké-Macina pour l'année hydrologique 1993-1994 (c) et 1994-1995 (d). La décroissance de type $C=aQ^b$ observée à Ké-Macina est figurée en pointillé.

On a vu au chapitre VIII que de manière générale, les auteurs s'accordent à noter une déformation progressive de la boucle d'hystérésis C/Q d'amont en aval des cours d'eau correspondant aux différences entre célérité de l'onde de crue et vitesse de l'eau (et des matériaux transportés). Par ailleurs, comme la célérité de l'onde de crue augmente généralement avec l'intensité de la crue et qu'elle est en première approximation proportionnelle à la vitesse de l'écoulement, le retard enregistré à une station donnée est d'autant plus faible que la crue est forte (toutes choses égales par ailleurs) (Walling & Webb 1980).

La **déformation de la boucle d'hystérésis** observée entre stations amont et aval du DIN et entre crues de faible ou de bonne hydraulicité suit la **logique inverse** de celle exposée ci dessus :

- l'évolution du décalage temporel entre le minimum de concentration et le maximum de crue se traduit par une augmentation vers l'aval de l'avance du minimum de concentration par rapport au maximum de crue (Figure 155c et d)
- et l'avance du minimum de concentration sur le débit de pointe est beaucoup plus grande lors de la crue de forte intensité (Figure 154b et Figure 155d).

Comme pour les MES, une des explications de cette apparente anomalie tient à la présence du delta intérieur et des plaines inondables et du fort amortissement annuel de la crue en année humide (chapitre VIII, §1.1.2.2).

(c) Evolution des concentrations moyennes lors de la décrue

Afin de mieux cerner les différences d'évolution des concentrations entre amont et aval, nous avons comparé l'évolution temporelle du TDS à Ké-Macina (qui est l'entrée principale du delta et correspond donc à 80% des volumes) et à la station de Diré pour les années 1993/94 et 1994/95 (Figure 156). Un décalage de 15 jours a été appliqué sur les données à la station de Diré pour tenir compte du temps de transfert des eaux entre Ké-Macina et Diré (i.e. des vitesses dans le réseau principal).

Pour les deux années, les concentrations sont plus importantes lors des basses eaux à la sortie du delta. L'effet de l'évaporation est sans doute plus important en temps et en intensité sur cette station. Avec l'arrivée de la crue les concentrations diminuent mais légèrement plus qu'à l'amont : il est possible que les eaux de pluie tombant sur les surfaces en eau aient un effet supplémentaire de dilution. Ensuite, il semble que ces deux types d'année suivent des comportements légèrement différents relativement à l'évolution des concentrations amont :

- Pour l'année "sèche" 1993-1994, l'évolution des concentrations à Diré est assez semblable, aux erreurs de mesures près, à celle observée à Ké-Macina.
- Pour l'année "humide" 1994-1995, les concentrations sont plus importantes à la sortie du delta. Cette écart se creuse lors de la période de stockage entre les concentrations à l'amont et à l'aval. Avec la fin de la décrue et la période de restitution, les différences de concentrations deviennent de moins en moins importantes.

On a vu que le DIN peut être considéré comme un système a deux compartiments : un chenal principal, d'une part, (qui a une fonction de transport, de distribution des eaux en début de crue et de collecte en décrue) et des zones d'inondation, d'autre part, qui peuvent faire évoluer, pendant le stockage, la composition chimique de l'eau. Les différences lors de la décrue suggèrent qu'il existe des différences dans l'évolution de la composition des eaux au cours du temps, suivant les crues de fortes inondations et celles qui restent limitées aux lits mineurs.

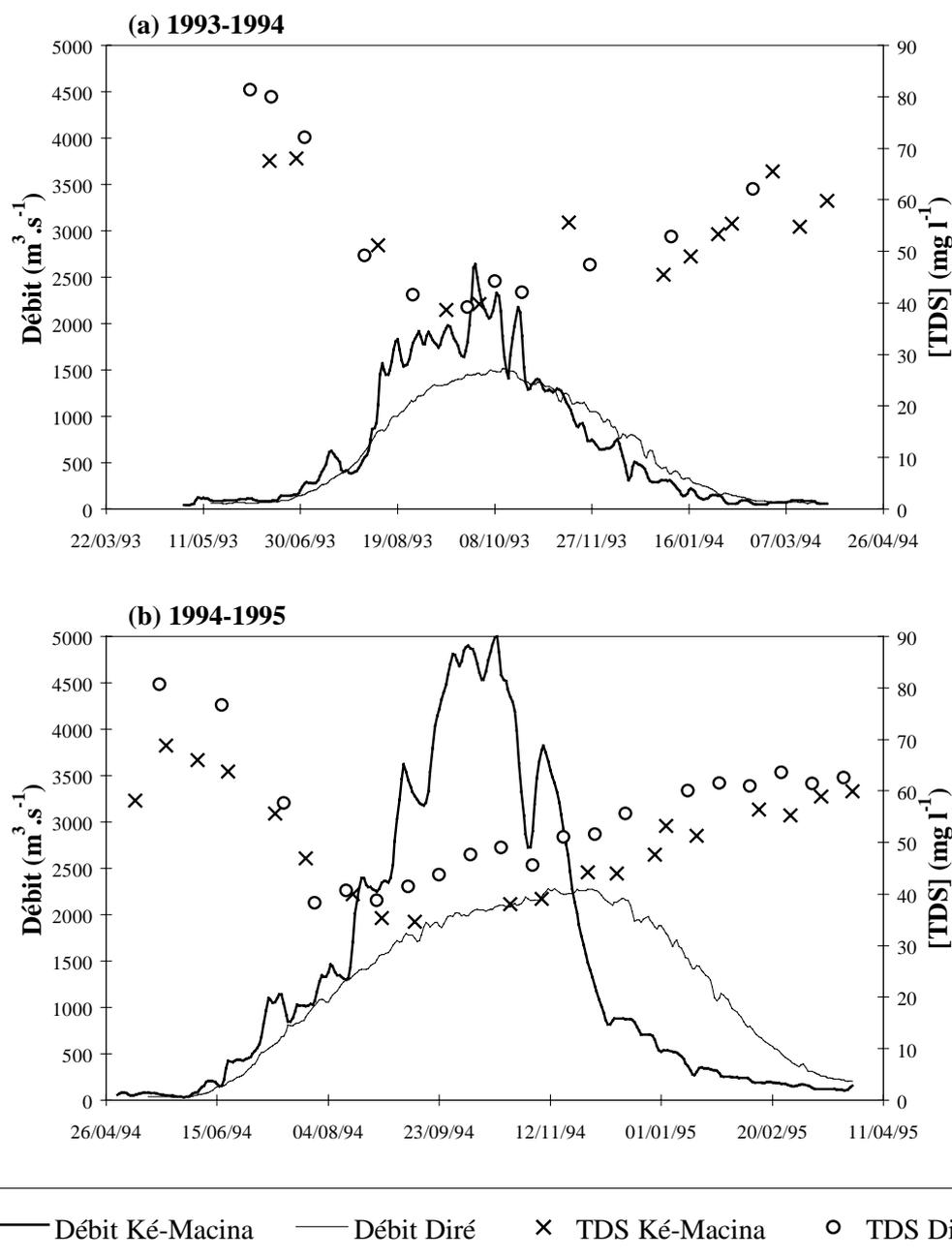


Figure 156. Comparaison des évolutions des concentrations totales en élément dissous (TDS) et des débits au cours des années hydrologiques 1993-1994 (a) et 1994-1995 (b) pour le Niger à Ké-Macina (entrée du delta) et à Diré (sortie du delta). Temps de transfert de 15 jours.

1.1.3.2 Evolution comparée des différents éléments majeurs dans la phase dissoute

Pour chaque élément et quelle que soit l'année, les évolutions temporelles des concentrations au cours des deux cycles hydrologiques 1993/1994 et 1994/95 entre Akka et Diré ne sont pas significativement différentes de l'évolution du TDS (Figure 157 et Figure 158). L'étude des variations saisonnières sur les stations amont (chapitre VI) a montré des différences de comportement entre éléments majeurs au début de la crue avec certains éléments plus enrichis dans les eaux de ruissellement (e.g. K), ou lors de la décrue, avec des éléments plus enrichis dans les eaux souterraines (e.g. Na).

Sur les deux stations du delta, l'étude des relations entre les concentrations et les débits permet également de distinguer plusieurs groupes d'éléments qui suivent plus ou moins les mêmes évolutions au cours de la crue et qui sont bien corrélés entre eux. Ces relations montrent également qu'il existe des différences d'évolution des concentrations suivant l'hydraulicité de l'année. Pour tous les éléments, les boucles d'hystérésis observés en 1994-1995 confirment l'analyse faite à partir de l'évolution du TDS : les minimums de concentrations se produisent très en avance sur le maximum de crue et les concentrations lors de l'étale de la crue sont plus importantes par rapport à l'année "sèche".

- **Les éléments HCO_3 et Mg et dans une moindre mesure Na**, sont très bien corrélés entre eux, et suivent le même type de relation entre les concentrations et les débits que le TDS (hystérésis anti-horlogique). Les rapports (X)/(Na) (avec X= Mg et HCO_3) sont presque constants.
- **Le calcium** a un comportement un peu particulier par rapport aux éléments précédents, essentiellement pendant l'étale de la décrue 1994/95 : alors que les concentrations de Mg, Na augmentent lors de la décrue, les concentrations en Ca restent d'abord assez constantes, pour diminuer sensiblement de janvier à fin avril, pour ensuite augmenter à nouveau en mars. Cette diminution se produit également pour l'année 1995/96 de décembre à mi avril. Le rapport (Ca)/(Na) diminue.

Ces périodes de diminution des concentrations en Ca correspondant à la **période de restitution des eaux** (mise en évidence au chapitre VII), nos observations suggèrent qu'une eau appauvrie en calcium par rapport au sodium se mélange avec l'eau du chenal. Cette eau serait relativement appauvrie en Ca par rapport à Na du fait de **précipitations de calcite**¹, favorisées par la longueur de la période d'inondation pour l'année 1994/95. La faiblesse de la restitution en années sèches (chapitre VII) expliquerait que les changements qui se produisent dans le delta sont moins perceptibles dans le chenal de sortie du delta pour ces années.

¹ Dans les zones inondées, l'ensemble des concentrations peuvent augmenter par évaporation des eaux. Cependant, les concentrations de certains éléments peuvent être limitées par des équilibres de réactions avec les phases solides du sédiment (argiles et produit de précipitation) comme c'est le cas de Ca qui peut précipiter sous forme de calcite : la solution s'enrichit ainsi relativement en sodium, qui n'intervient dans aucune précipitation, par rapport au calcium.

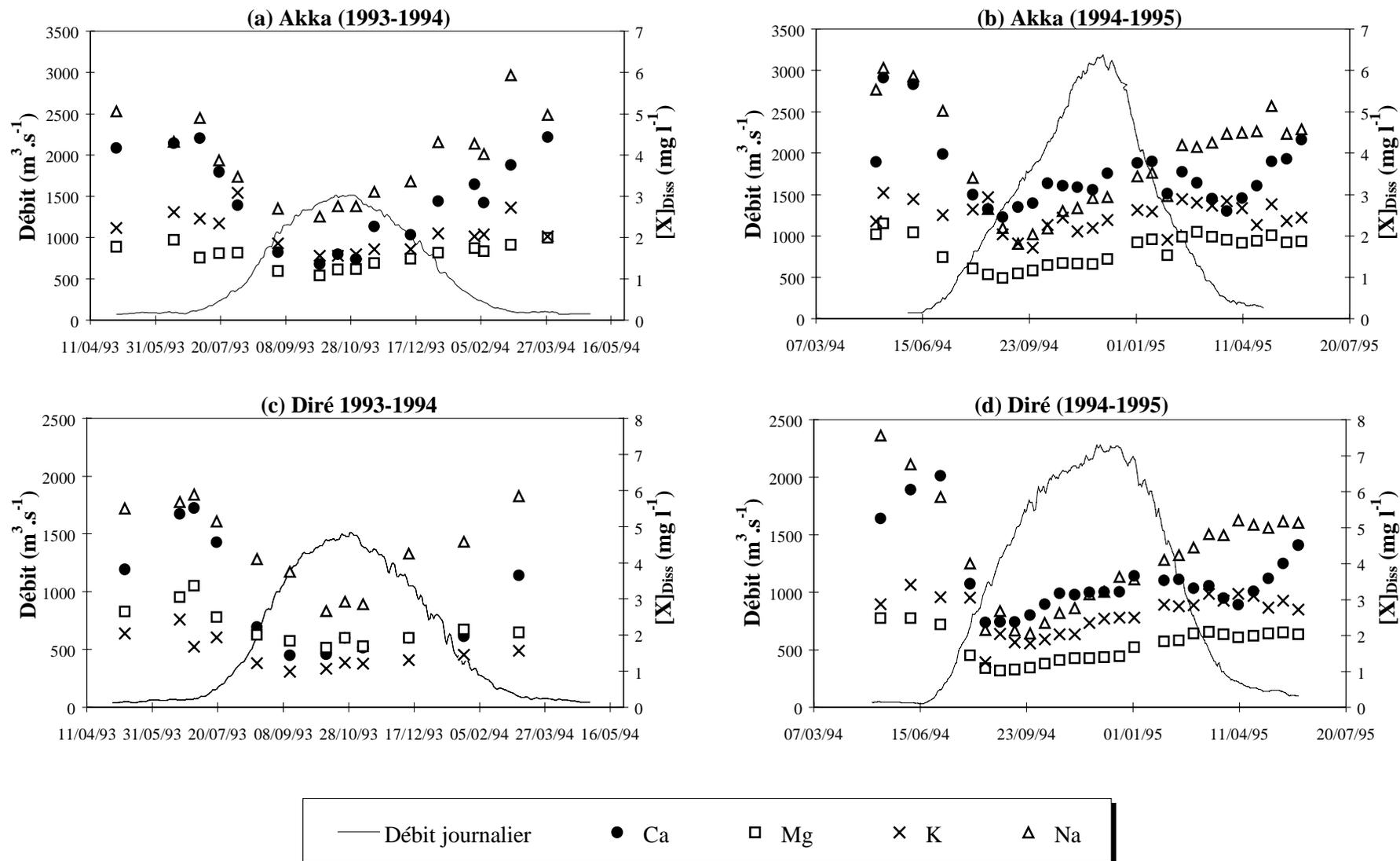


Figure 157. Evolution des concentrations en cations majeurs et du débit au cours du temps aux stations d'Akka et Diré pour les années 1993-1994 et 1994-1995.

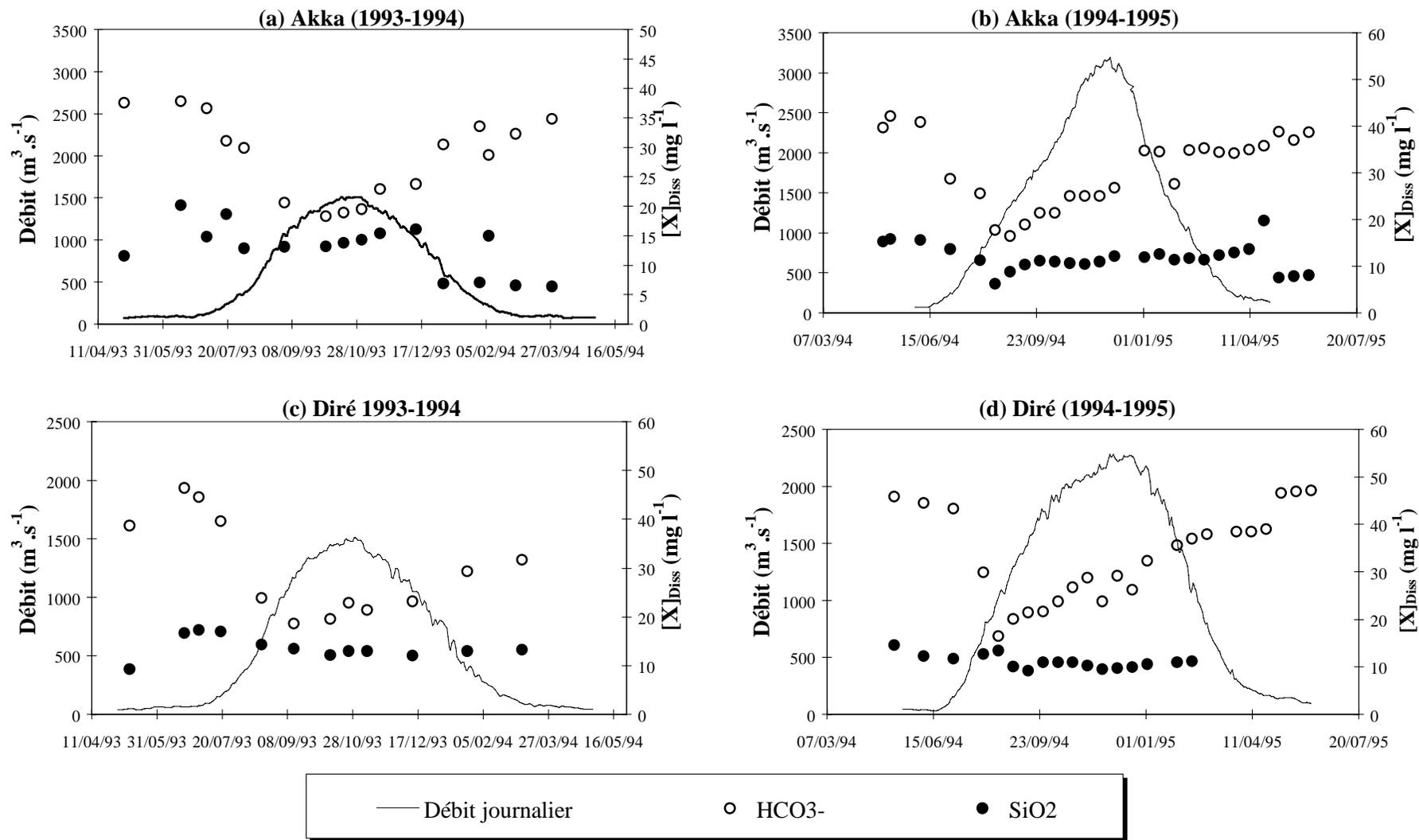


Figure 158. Evolution des concentrations bicarbonate, silice dissoute et du débit au cours du temps aux stations d'Akka et Diré pour les années 1993-1994 et 1994-1995.

- Le **potassium**, contrairement à l'amont, montre des concentrations qui ne continuent pas à diminuer avec la décrue ; au contraire, elles commencent à augmenter en phase avec le TDS et les autres éléments avant le maximum de crue. Il en résulte que les cycles d'hystérésis sont inverses de ceux observés à l'amont (chapitre VI). Ce phénomène est très marqué pour l'année humide (Figure 159). De ces différentes remarques, on peut donc conclure que l'augmentation des concentrations en potassium observées sur le delta ne provient pas que des apports amont (à l'augmentation des concentrations par évaporation près). Des apports supplémentaires de K lors de la traversée du delta seront évoqués par la suite dans les bilans de matières. Par rapport à Na, les concentrations en K sont relativement moins importantes lors de la décrue : le rapport (K)/(Na) diminue de septembre à mars alors que les concentrations absolues augmentent. Cette augmentation des concentrations peut être limitée par l'assimilation "préférentielle" de potassium par les macrophytes.

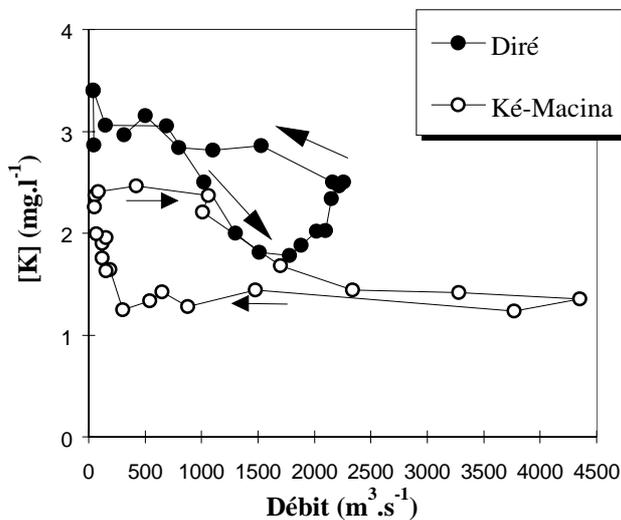


Figure 159. Comparaison des relations [K]/Débits pour l'année hydrologique 1994/95 sur le Niger à Ké-Macina (entrée du delta) et à Diré (sortie du delta).

- La **silice dissoute** n'est corrélée avec aucun élément et **varie très peu au cours de la crue** (Figure 158). C'est le seul élément qui ne montre pas la même évolution sur les stations d'Akka et de Diré. L'évolution générale des concentrations est de la même forme mais avec des "à-coups successifs". A partir d'une certaine concentration, les précipitations des différentes formes de silice sont possibles, ce qui explique la stabilité de la silice. On peut remarquer qu'il peut y avoir au mois de mai (basses eaux) ou en hautes eaux à Akka, une chute des concentrations en SiO₂ qui pourrait s'expliquer par un bloom de diatomées.
- Les **variations de Cl** d'un prélèvement à un autre peuvent être, comme à l'amont, importantes mais les concentrations suivent la tendance générale des variations observées pour les éléments HCO₃, Mg et Na.

Les évolutions des concentrations en éléments majeurs au cours de la crue annuelle ne sont pas significativement différentes (excepté pour la silice) entre la sortie du lac Débo (Akka) et la sortie du delta (Diré). Elles varient en revanche légèrement par rapport aux entrées, essentiellement au moment de la décrue. En effet pendant cette période le retour des eaux des plaines inondées peut amener une eau de composition différente sous l'effet conjugué de l'évaporation, de la présence de macrophytes, de la re-dissolution ou la précipitation de minéraux... Ce fonctionnement est bien mis en évidence par les contrastes entre année sèche (1993/94) et humide (1994/95).

1.2 Composition chimique de la phase en suspension (C_P)

Les caractéristiques géochimiques (pour les éléments traces) de la phase en suspension (ou particulaire) des eaux du delta intérieur du Niger ont été étudiées à partir des 5 campagnes de prélèvements de 1996 et 1997. Les teneurs en carbone organique particulaire (COP) de la phase particulaire ont également été suivies durant une année de façon ponctuelle (Voir chapitre II).

1.2.1 Minéralogie de la MES

La minéralogie des MES échantillonnées sur les stations du delta intérieur du Niger (Gourcy, 1994 ; Censier *et al.*, 1995) diffère peu de celle des MES de l'amont (chapitre V). Bien que les données soient certainement trop peu nombreuses (et non quantitatives !) pour réaliser une étude détaillée de la minéralogie des matériaux transportés par le fleuve dans le delta, on peut retenir que comme à l'amont, c'est le quartz qui domine sur les stations du delta. L'estimation de la part relative de chacune des argiles montre que le taux de kaolinite augmente vers la sortie du delta intérieur du Niger. Le feldspath est présent surtout sur les stations aval et en basses eaux ; il provient essentiellement des roches granitiques du bassin amont. Inversement, la goéthite, particule lourde, ne se retrouve pas aux stations aval et s'est donc rapidement déposée dans le delta intérieur du Niger.

	échantillon	date	Quartz	% kaolinite	% illite	feldspath	goéthite	rutile
Niger Amont								
	Ké-Macina	février 1992	++++	70	30	-	+	+
	Ké-Macina	octobre 1992	++	80	20	-	+	+
Bani								
	Douna	juin 1992	+	mauvaise	crystallisation	-	+	+
	Douna	octobre 1992	++	85	15	+	+	+
Sortie Débo								
	Akka	mars 1992	++	75	25	+	+	+
	Akka	octobre 1992	+	mauvaise	crystallisation	-	-	-
Sortie Delta								
	Diré	avril 1992	++	85	15	+	-	+
	Diré	décembre 1992	++	92	10	-	-	+

Tableau 71. Composition minéralogique semi-quantitative des sédiments en suspension (d'après Gourcy, 1994).

1.2.2 Carbone Organique Particulaire (COP) - Variation des apports organiques solides

Lors des campagnes de 1996 à 1997, des prélèvements ont été réalisés au niveau du chenal principal (sur les 2 stations d'Akka et Diré mais aussi sur la station de Sensé à l'aval de Mopti) ainsi que sur des stations plus ponctuelles dans des mares, lacs, défluent... Les teneurs relatives en COP (>0,45µm) relevées dans le chenal principal (Tableau 72) varient de 1,7 à 17,4 %, mais 75% des valeurs sont inférieures à 4,75 %. Les teneurs relatives les plus importantes à l'aval du lac Débo se rencontrent au début de la décrue (c'est à dire, au maximum des hautes-eaux en novembre), mise à part celle de 17,4% qui correspond à un échantillon du mois de mai. Pendant cette période de hautes-eaux, les valeurs sont légèrement plus importantes au niveau des marges et des lacs centraux, les valeurs les plus élevées (>10%) se rencontrant au niveau des mares (e.g. Batamani, Komina) ou des plaines inondées.

	CV	Médiane	Min.	-	Max.	Quartile 25%	-	Quartile 75%
Chenal principal								
Tout (18 valeurs)								
COP (%)	117%	3.2	1.7	-	17.4	2.3	-	4.75
TS * (mg.l ⁻¹)	113%	31.3	5.2	-	123	11.1	-	69
COP* (mg.l ⁻¹)	48%	0.92	0.3	-	17.8	0.411	-	1.38
Basses eaux (7 valeurs)								
%COP	100%	3.4	1.9	-	17.4	3	-	4.5
TS * (mg.l ⁻¹)	143%	34.5	15.3	-	102.3	25.65	-	55.25
COP* (mg.l ⁻¹)	55%	1.04	0.68	-	17.8	0.85	-	1.24875
Hautes eaux (11 valeurs)								
%COP	218%	2.7	1.7	-	6.3	2.2	-	4.4
TS * (mg.l ⁻¹)	103%	22.8	5.2	-	123	8.225	-	70.85
COP* (mg.l ⁻¹)	137%	0.63	0.3	-	2.09	0.339	-	1.545
Marges et chenaux secondaires								
Hautes eaux (59 valeurs)								
COP (%)	140%	4.4	1.3	-	16.9	2.5	-	6.6
TS * (mg.l ⁻¹)	75%	12.06	2.8	-	149	7.67	-	20.8
COP* (mg.l ⁻¹)	114%	0.5	0.24	-	4.03	0.43	-	0.72

*filtration à 0.45µm.

Tableau 72. Concentrations en COP et en particules en suspension (>0.45µm) sur l'ensemble des prélèvements réalisés sur le delta intérieur du Niger. Différence entre hautes eaux et basses eaux.

Les fortes valeurs relatives de COP correspondent à des teneurs en éléments solides en suspension (TS) très faibles. On retrouve la relation, déjà rencontrée sur le bassin amont, entre les teneurs en COP exprimées en % de matières sèches et la charge en MES. Comme les concentrations relatives de COP inférieures à 2% sont observées généralement en août (montée de la crue et phase de stockage), elles correspondent sans doute à des apports en COP d'origine allochtone dominante provenant des sols du bassin amont. Inversement, les teneurs relatives de COP importantes rencontrées en hautes eaux alors que les valeurs de TS sont très faibles (le chapitre VIII a montré que l'évolution des MES est différente sur les stations à l'aval du lac Débo et que les minimums de MES étaient

observés lors d'étales de la crue) suggèrent que le COP d'origine autochtone est dominant pendant cette période.

En général, les cycles de blooms phytoplanctoniques sont à la base des fortes variations de teneurs en COP observées dans ces situations. En effet, les faibles vitesses d'écoulement rencontrées dans les plaines inondées par rapport au fleuve en hautes eaux accentuent les dépôts de matières minérales et y permettent, a priori, un développement planctonique important. Pourtant, une étude récente semble indiquer que le DIN est en fait **un système très peu producteur de biomasse phytoplanctonique** ; les facteurs limitant la croissance du phytoplancton sont différents suivant qu'on se situe en étiage ou en hautes eaux (R. ARFI, 1998, Communication personnelle) : en basses eaux, les eaux sont riches en nutriments mais les taux de MES sont trop importants pour permettre le développement du phytoplancton ; en hautes eaux, les teneurs en suspension sont faibles mais il n'y a pas assez de nutriments pour permettre des blooms algals. En revanche, les macrophytes enracinées présentes sur le delta tirent la majeure partie de leurs nutriments des sédiments plutôt que de la colonne d'eau (Carigna & Halff, 1980 ; Ryding & Rast, 1994 ; Testard, 1995). Leur développement important dans le delta intérieur du Niger (chapitre I) peut participer au flux de matières, principalement sous forme de matières organique détritiques, lors de leur phase de décomposition (Testard, 1995) et pourrait expliquer les fortes concentrations observées en novembre d'une part, et dans les marges d'autres part. La faiblesse du développement phytoplanctonique dans le delta intérieur du Niger pourrait s'expliquer, comme dans d'autres milieux où le développement des macrophytes est important, par la concurrence de ces dernières vis à vis des nutriments (R. ARFI, 1998, Communication personnelle).

Les fortes teneurs en COP observées sur les deux stations principales du delta lors du début de la décrue (novembre) sont sans doute liées aux apports de débris végétaux apportés par la vidange de plaines d'inondations, mares, lacs... Cela souligne l'importance des macrophytes présentes sur de grandes superficies du delta, qui pourraient en partie expliquer l'augmentation des teneurs en MES lors de la décrue aux stations aval du lac Débo, observées dans le chapitre VII.

1.2.3 Les éléments traces dans la phase particulaire et totale

Rappelons succinctement que les concentrations en éléments traces dans la phase particulaire ($> 0,2 \mu\text{m}$) sont obtenues de manière indirecte à partir de leurs concentrations totales (chapitre II, chapitre VI). Étant donné le nombre limité de valeurs sur les stations du delta, les valeurs absolues ne sont pas réellement exploitables ; en revanche, **les différences relatives entre éléments** peuvent mettre en évidence des changements de composition chimique des particules en suspension entre l'amont et l'aval du delta intérieur du Niger.

Les résultats bruts ainsi que quelques données statistiques élémentaires sur l'ensemble des échantillons dans la phase totale se trouvent en annexe 4 et 5. Les concentrations moyennes pondérées par les débits dans la phase particulaire pour 3 stations du delta intérieur du Niger (années 1996 et

1997) ainsi que les valeurs calculées sur les stations amont sont reportées dans le Tableau 73. Les moyennes n'ont été calculées que pour les éléments pour lesquels au moins 70 % des valeurs étaient supérieures à la limite de détection.

	Entrée DIN		Delta intérieur du Niger		
	Ké-Macina	Douna	Sensé	Akka	Diré
Nbre	8	8	8	4	5
Cs	3.8	9.6	13.5	5.8	5.9
Rb	64.4	102.2	181.7	77.0	83.8
U	2.5	4.0	7.1	3.3	3.4
Th	13.3	18.1	36.4	14.3	15.4
Pb	25.0	29.0	59.8	20.0	35.8
Ba	595	420	1019	470	516
La	46.6	62.9	121.4	50.3	53.9
Ce	97.3	117.6	248.3	96.0	98.6
Ta	0.8	2.8	1.8	1.8	15.4
Hf	1.7	3.4	6.2	3.0	2.5
Nd	37.2	52.0	100.9	40.5	44.7
Zr	81.9	139.5	216.9	89.7	101.8
Sr	117	101	161	112	131
Sm	6.9	9.3	17.7	8.1	7.5
Eu	1.7	2.1	4.1	1.9	1.9
Tb	0.7	1.2	2.1	0.9	0.9
Yb	1.6	2.8	4.6	1.9	2.0
Co	23.5	24.7	51.6	23.4	23.2
Cr	164	158	326	137	173
Ni	81.6	79.2	169.0	105.1	99.7

Tableau 73. Comparaison des concentrations moyennes pondérées par les débits (ppm) des éléments traces dans la phase particulaire du bassin amont et du delta intérieur du Niger.

La variabilité de composition chimique des particules entre les stations du bassin du Niger amont et les différentes stations du delta est étudiée à partir d'un diagramme des concentrations moyennes dans la phase particulaire normalisées par les concentrations de chaque élément observées à une station de référence. Pour chaque bief du delta, nous comparons ainsi le rapport Sortie/Entrée. Cette approche, déjà utilisée dans les paragraphes précédents, permet d'avoir une vue d'ensemble sur les différentes proportions de chaque élément pour chacune des stations. Ces différents diagrammes, sont représentés dans la Figure 160.

Les différences inter-stations les plus importantes s'observent entre la station de Sensé et les stations aux entrées du delta. Le matériel particulaire échantillonné à la station de Sensé, située à l'aval de la confluence entre le Niger et le Bani, montre que les proportions en Ba et Sr et Ta, Co, Cr, et Ni, sont plus faibles par rapport aux autres éléments qu'à Ké-Macina. Inversement, les proportions relatives de Cs et Hf y sont plus importantes. Par rapport à Douna sur le Bani, on remarque que les

proportions de Cs, Ta, Zr, Sr et Yb sont plus faibles à Sensé que sur Douna, et seul Ba y est relativement plus important qu'à Douna.

Le diagramme correspondant aux rapports entre les stations d'Akka à la sortie du lac Débo et Sensé est presque plat, ce qui signifie qu'il n'y a pas de changement de composition notable des particules fines sur cette partie du delta amont. Les particules à Akka sont toutefois fortement enrichies en Ta, et Ni, et inversement, elles sont appauvries en Pb, par rapport la station de Sensé.

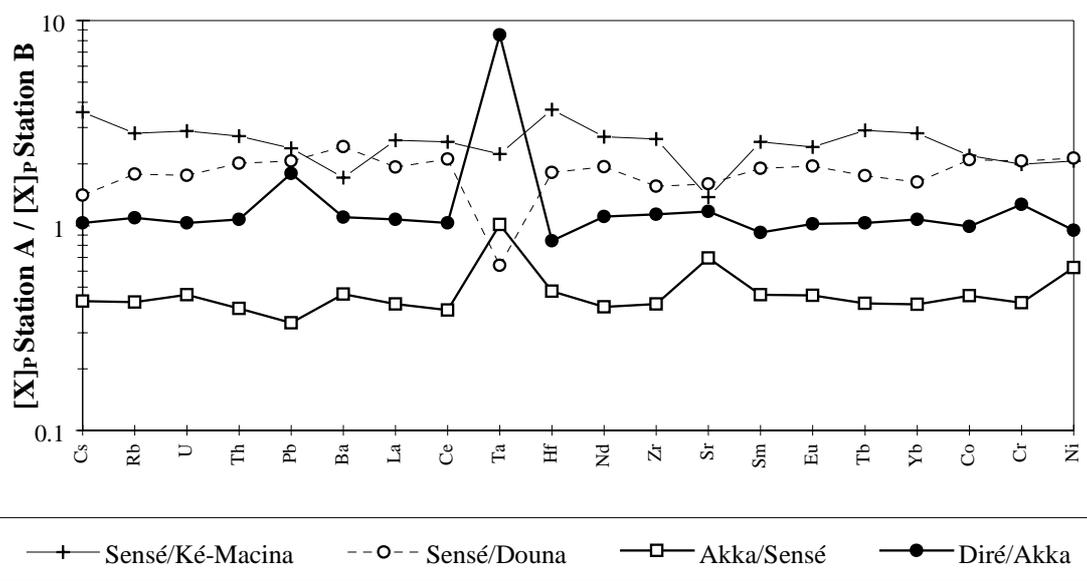


Figure 160. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire des stations A (du delta intérieur du Niger) aux concentrations des stations B.

Les MES recueillies sur les stations Akka, et Diré, ont des compositions moyennes très semblables. Seules les proportions de Ta, Pb, et dans une bien moindre mesure de Cr sont relativement plus importantes à Diré qu'à Akka.

2 BILAN DES FLUX D'ÉLÉMENTS LORS DE LA TRAVERSEE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER

La connaissance des concentrations en éléments majeurs dans la phase dissoute et des débits écoulés permet de calculer les flux en éléments majeurs aux différentes stations du delta. La méthode utilisée détaillée au chapitre II, se base sur l'interpolation entre deux concentrations mesurées. A partir de ces flux et de ceux calculés aux entrées du delta (chapitre VI, annexe 7), il est possible de faire, comme pour les MES, des bilans annuels et mensuels entre les flux entrants et sortants sur les deux zones du delta intérieur du Niger. Ces calculs permettent d'établir le devenir temporel et spatial (pertes, stockage, destockage...) des quantités de matières dissoutes lors de la traversée du delta intérieur du Niger.

2.1 Résultats des flux de TDS et d'éléments majeurs

Les flux annuels des éléments majeurs transportés dans la phase dissoute aux deux stations principales du delta intérieur du Niger sont représentés dans le Tableau 74. Comme sur le bassin amont, il convient de relativiser les différences entre les valeurs de flux obtenues étant donné les lacunes d'échantillonnage pour certains mois et les problèmes de conservation des échantillons liés notamment à la faiblesse des concentrations rencontrées. **L'erreur sur le calcul de flux a été estimée dans le pire des cas à 20%.**

	Vol. km ³	Ca 10 ³ . t	Mg 10 ³ . t	K 10 ³ . t	Na 10 ³ . t	Tac 10 ³ . t	Cl 10 ³ . t	SiO ₂ 10 ³ . t	TDS 10 ³ . t
Akka									
1992-1993	18.3	46	15	34	69	438	15	278	905
1993-1994	18.1	38	25	33	57	421	8	241	829
1994-1995	38.2	126	56	90	114	1027	25	432	1906
1995-1996	28.2	88	43	58	89	792	14	144	1236
Diré									
1992-1993	18.2	49	21	41	63	428	22	242	879
1993-1994	17.8	35	22	34	66	418	11	231	829
1994-1995	34.2	109	50	80	111	974	25	353	1734
1995-1996	27.4								Année incomplète

Tableau 74. Flux annuels de matières dissoutes sur le delta intérieur du Niger (mai à avril)

A l'échelle annuelle, la Figure 161 montre que, comme pour le bassin amont, les flux en éléments dissous sont bien corrélés aux volumes écoulés. Ce qui est également remarquable, c'est que la relation (flux de TDS en fonction du débit) est identique quelle que soit la station : il n'y a donc pas d'évolution spatiale de la relation.

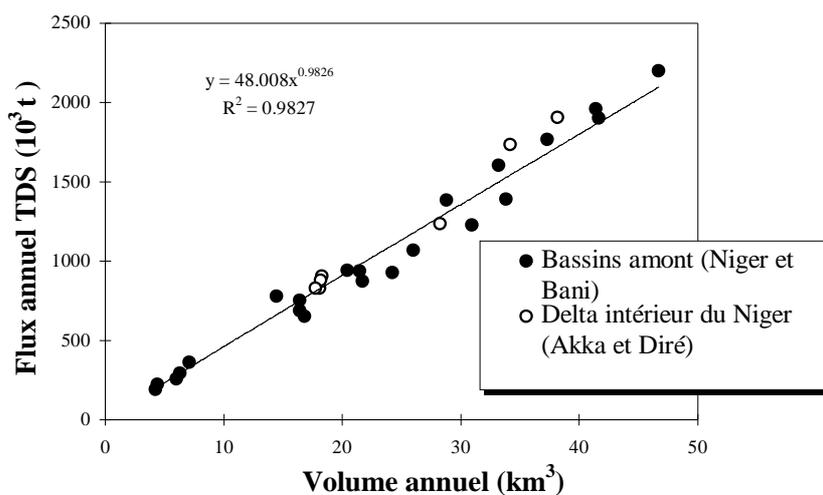


Figure 161. Relation entre les flux annuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur le delta intérieur du Niger, de 1991 à 1997.

Ces deux observations sont à relier à **la faiblesse relative des variations annuelles de concentrations devant celles des débits à une station donnée mais aussi entre stations**. La variable débit (ou volumes écoulés) étant implicitement contenue dans la variable "flux de matières" il faut évidemment, comme nous l'avons déjà vu, relativiser ce type de relation.

A l'échelle mensuelle et pour cette même raison, il apparaît également que le transport de matières dissoutes est bien corrélé au transport hydrique (les coefficients de corrélations et les équations pour chaque station se trouvent sur la Figure 162). Ainsi, environ 80% des exportations de matières dissoutes a lieu pendant les 5 mois de hautes eaux (contre 90% pour les stations amont ce qui s'explique uniquement par le laminage opéré sur la crue par le delta).

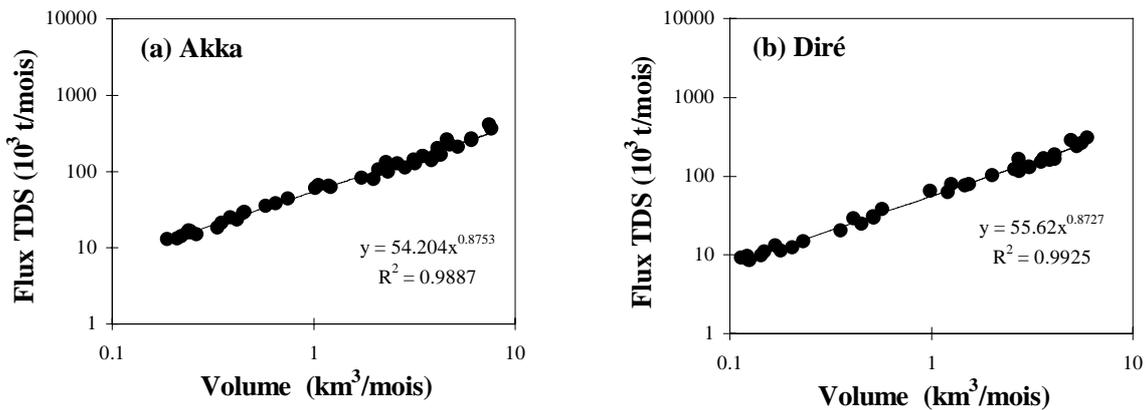


Figure 162. Relation entre les flux mensuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 2 stations principales du delta intérieur du Niger, de 1992 à 1995.

Il apparaît toutefois une très légère hystérésis pour les années de bonne hydraullicité (Figure 163b). **Les transports en éléments dissous sont à débit égal plus importants en décrue que lors de la crue.**

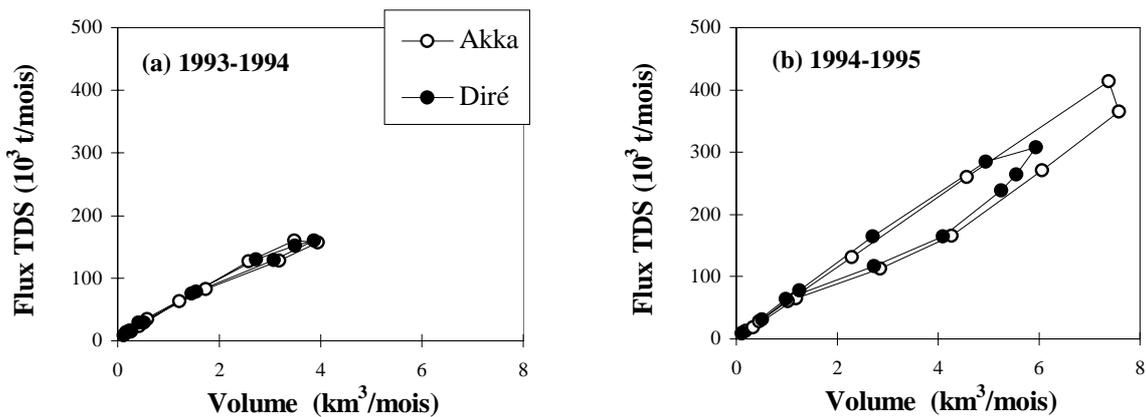


Figure 163. Exemple de relation entre les flux mensuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 2 stations principales du delta intérieur du Niger pour une année "sèche" (a) et une année "humide" (b).

Enfin, au vu des résultats présentés dans le Tableau 74, il existe peu de différences entre les proportions du flux dissous total relatives aux différents éléments observées sur les stations du delta et celles observées sur les stations amont (chapitre VI et annexe 7). Les flux de bicarbonates constituent toujours la part la plus élevée du flux total (entre 48 et 63% du flux de TDS suivant les stations) ; la part relative des flux de silice est toujours en deuxième position (de 21 à 31%). Les proportions relatives des autres éléments majeurs suivent l'ordre décroissant : Ca (4-7%), Na (6-8%), K (4-5%), Mg (2-3%) et Cl (1-2,2%).

2.2 Bilan des flux de TDS dans le DIN

2.2.1 Bilan annuel de TDS

Le bilan annuel des flux entrants et sortants sur les deux grandes parties du delta (delta amont et delta aval) a été réalisé pour les deux années hydrologiques contrastées de 1993/94 et 1994/95, étudiées dans les paragraphes précédents, pour lesquelles les données sont les plus nombreuses (Tableau 75). A la sortie du lac Débo (3 émissaires), les flux en TDS et éléments majeurs ont seulement été calculés à la station d'Akka située sur l'émissaire principal, la composition chimique des eaux évacuées par les deux autres émissaires n'ayant été que très partiellement étudiée. Comme les flux hydriques transitant par Akka représentent entre 80 et 85% des flux sortant du lac Débo, il est légitime, comme pour les MES (chapitre VIII), de calculer les flux sortant du lac Débo à partir de la concentration moyenne des eaux à Akka extrapolée à toutes les sorties du lac Débo (Akka+Awoye+Korientze). Les mêmes cycles hydrologiques que précédemment (§1.1.3) sont utilisés à titre d'exemple (année sèche, 1993/94 ; année humide, 1994/95).

	1993-1994		1994-1995	
	Volume (km ³ .an ⁻¹)	Flux TDS (10 ³ t.an ⁻¹)	Volume (km ³ .an ⁻¹)	Flux TDS (10 ³ t.an ⁻¹)
Entrées delta	24.7	1177	56.1	2367*
Sortie lac Débo	20.8	932	45.7	2295
<i>Perte delta Amont</i>	<i>-4.2</i>	<i>-245</i>	<i>-10.4</i>	<i>-73</i>
Sortie Diré	17.8	829	34.2	1734
<i>Perte delta Aval</i>	<i>-2.7</i>	<i>-103</i>	<i>-11.5</i>	<i>-560</i>
<i>Perte Totale</i>	<i>-6.9</i>	<i>-348</i>	<i>-21.9</i>	<i>-663</i>

*Quelques valeurs de TAC sont obtenues à partir de la charge cationique ($\Sigma+$).

Tableau 75. Bilan des flux hydriques et de matières dissoutes totales dans le delta intérieur du Niger.

Les flux annuels totaux d'éléments dissous apportés au delta par le Niger et le Bani varient d'environ 1,18 à 2,37 millions de tonnes suivant les années alors que le flux annuel sortant du delta à Diré varie entre 0,83 et 1,7 millions de tonnes (Tableau 70). Le delta intérieur du Niger retient donc entre 0,3 et plus de 0,6 millions de tonnes de matières dissoutes par an étant donnée la relation forte

entre flux de matières et flux hydriques. Ces pertes de matières dissoutes sont d'autant plus importantes (en masse) que les pertes en eau le sont aussi et donc que l'année est humide (chapitre VI). Mais des différences significatives entre les deux années d'hydraulicité contrastée s'observent conformément aux observations faites sur l'évolution des concentrations (§1.1.3.) :

- **Pour l'année sèche 1993-1994**, la diminution des flux de matières (30 % des entrées) sur l'ensemble du delta suit en première approximation les pertes hydriques (28 % des entrées). Il en résulte des concentrations moyennes annuelles à la sortie du delta presque équivalentes à la concentration représentative des entrées (concentration moyenne entre Douna et Ké-Macina).
- **Pour l'année humide 1994-1995**, les pertes de matières (27% des entrées) sont proportionnellement moins importantes que les pertes en eaux (38% des entrées). Les concentrations moyennes annuelles à la sortie du delta sont ainsi légèrement plus importantes qu'en entrée.

Les mesures intermédiaires effectuées aux sorties du lac Débo (Tableau 75) montrent par ailleurs que la répartition des pertes entre amont et aval diffère énormément entre les deux types d'années étudiées :

- **Pour l'année sèche**, les pertes sur le delta amont sont le double de celles observées sur le delta aval. Elles sont, sur les deux zones étudiées, respectivement de 0,24 et de près de 0,1 millions de tonnes (soit 70 et 30 % des pertes totales). Avec des pertes hydriques représentant respectivement 56 et 44 % des pertes totales, l'estimation des concentrations moyennes montre qu'elles diminuent sensiblement à la sortie du delta amont puis augmentent à la sortie du delta aval.
- **Pour l'année humide**, les pertes sur le delta amont sont très faibles devant celles observées sur le delta aval. Elles sont à peine 0,07 millions de tonnes (soit seulement 11% des pertes totales) alors que les pertes en eau sont importantes (47% des pertes totales). Les pertes aval atteignent 0,56 millions de tonnes pour des pertes hydriques annuelles importantes qui représentent 53 % des pertes totales. La concentration moyenne annuelle augmente après la traversée du delta amont, puis reste stable à la sortie du delta à Diré.

La Figure 164 et la Figure 165 présentent l'évolution spatiale des flux hydriques et de TDS pour ces deux années.

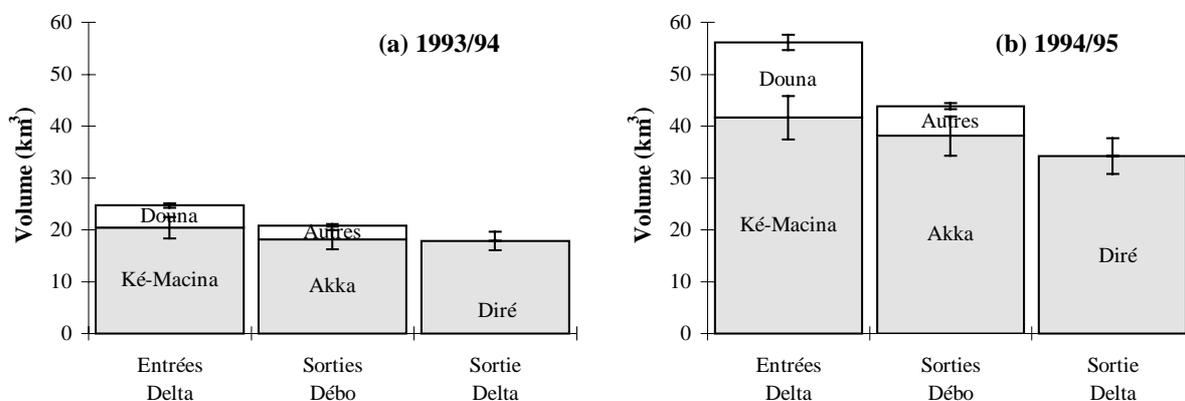


Figure 164. Evolution spatiale des flux hydriques pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).

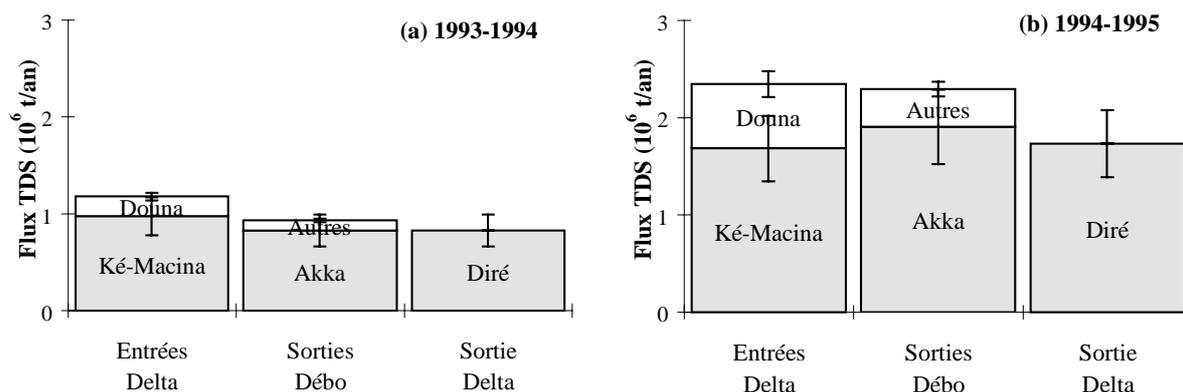


Figure 165. Evolution spatiale des flux de TDS pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).

2.2.2 Bilan mensuel de TDS

L'analyse des bilans mensuels peut permettre d'expliquer le **déséquilibre entre les deux zones du delta** observé, qui diffère suivant l'hydraulicité de l'année et de confirmer les hypothèses émises en début de chapitre.

La Figure 166 présente les variations mensuelles du bilan (sorties - entrées) du transport dissous dans le delta intérieur du Niger de 1992 à 1995². Comme pour les MES, le bilan mensuel est représenté par la différence entre les sorties et les entrées. Ces bilans permettent de mieux préciser les différences de fonctionnement entre les deux années sèches et l'année humide observées :

- **Pour les deux années sèches**, les pertes de matières sont observées pour l'essentiel lors des 3 mois ou 4 mois de l'étale de la crue (les différences observées entre années sont sans doute en relation avec les caractéristiques de chaque crue mises en évidence au chapitre VII : les pertes en eau sont bien réparties sur les 3 mois de hautes-eaux pour l'année 1993-1994 et au contraire concentrées sur le mois de septembre en 1992-1993). Pour les autres mois, les pertes ou gains sont négligeables, même si on peut distinguer une légère reprise au mois de juin et juillet lorsque les eaux commencent à monter dans le delta.

² La silice n'ayant pas été dosée sur l'année 1995-1996 à la station de Diré, cette année n'a pas été représentée pour les bilans de TDS.

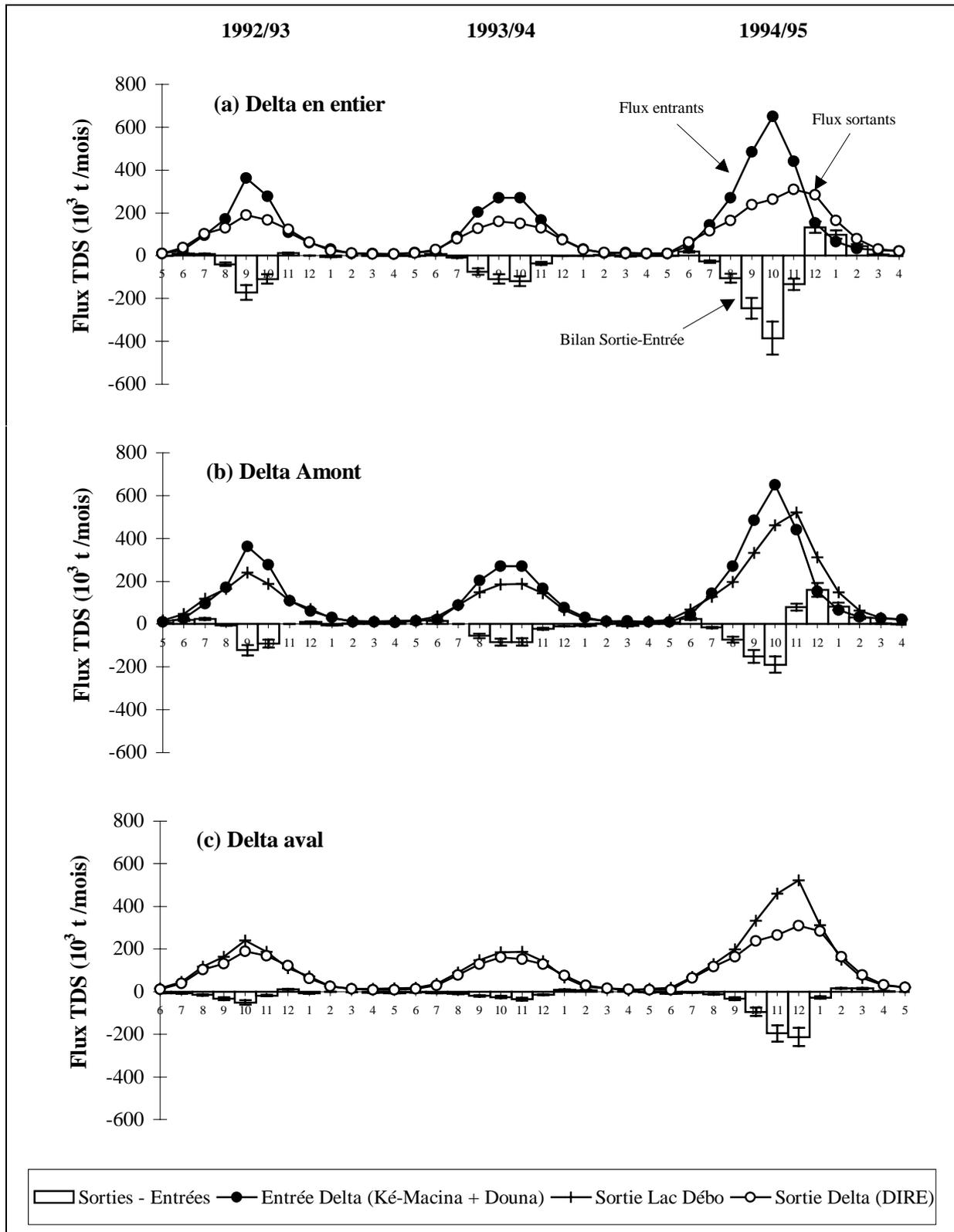


Figure 166. Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport dissous dans le delta intérieur du Niger de 1992 à 1996.

- **L'année humide** se distingue fortement des deux précédentes par la reprise importante de matières dissoutes à partir de décembre, après les quatre premiers mois des hautes eaux (qui sont caractérisés par des pertes importantes aussi bien pour les années sèches que humide). En fait, cette **reprise a lieu uniquement sur le delta amont, compensant une partie des pertes observées lors des mois précédent de stockage**, beaucoup plus importantes que pour les deux années sèches précédentes ; cette reprise explique la faiblesse relative des pertes annuelles pour la bilan amont pour cette année humide. Le delta aval est également caractérisé par des pertes très importantes en hautes-eaux pour cette année par rapport aux autres années. Les fortes pertes en eau sur le delta aval (53% des pertes totales), dues au piégeage de volumes conséquents lors du remplissage des lacs qui caractérisent cette région (chapitre VII), peut expliquer que les pertes en éléments dissous sont aussi importantes d'octobre à décembre sur cette deuxième partie du delta. L'eau de ces lacs ne sera pour l'essentiel pas restituée au système fluvial et la charge dissoute conduit à des dépôts salins (observations de croûtes) qui ne sont pas lessivés chaque année comme dans le delta amont.

La comparaison des flux annuels aux entrées du delta (stations de Ké-Macina et de Douna) et de ceux à la sortie du delta intérieur du Niger (station de Diré), ont montré qu'en plus des pertes en eaux et des pertes en sédiments, il existe des pertes en matières dissoutes importantes lors de la traversée du delta.

Ces bilans ont également mis en évidence des différences importantes entre les années sèches (1992-1993, 1993-1994) et l'année humide (1994-1995) et entre delta amont et delta aval. Si les pertes annuelles augmentent sur les deux parties du delta avec l'hydraulicité de l'année, on observe néanmoins pour l'année humide de fortes reprises sur le delta amont. ~~fortes~~ Ces reprises ~~sur le delta amont en année humide~~ sont ~~sans doute~~ liées aux volumes restitués lors de la période qui correspond à la vidange des plaines inondées (alors qu'en années sèches, cette restitution est plus faible). L'extension de l'inondation pour les années de fortes hydraulicités, comme l'année 1994/95, a pu ainsi amener une remise en solution d'anciens dépôts salins restés exondés lors des années plus sèches. Ce rinçage des marges de l'inondation pourrait être alors seulement conjoncturel et n'apparaître que dans ce type de scénario d'une reprise de l'hydraulicité après une longue sécheresse.

Les pertes très importantes en année humide par rapport aux années sèches sur le delta aval, sont à relier aux pertes hydriques importantes liées aux volumes stockés et non restitués sur cette partie du delta cette année de bonne hydraulicité.

2.3 Bilan des flux dissous élément par élément dans le DIN

Les résultats des bilans annuels élément par élément ³ sont présentés dans le Tableau 76 pour les années complètes 93/94 et 94/95. Les bilans mensuels sur la totalité du delta, le delta amont et le delta

³ Pour les deux années 1994-1995 et 1995-1996, les valeurs de l'alcalinité ne sont pas connues avec certitude pour les entrées (problème analytique), les valeurs manquantes sont obtenues à partir de la charge cationique (et sont sans doute légèrement sous-estimés) par rétablissement de la balance ionique (chapitre II).

aval sont représentés dans la Figure 167 à la Figure 169 pour les années 1992/93, 1993/94, 1994/95, 1995/96 (cf. pages suivantes). Ces résultats mettent en évidence que :

- tous les éléments subissent des pertes annuelles lors de la traversée du delta, quelle que soit l'année considérée,
- ces pertes annuelles (en masse) sont bien entendu d'autant plus importantes que l'élément considéré représente une forte proportion de la charge dissoute totale. Elles sont donc très importantes pour HCO_3 , SiO_2 ; et dans une moindre mesure pour Ca et Mg. Elles sont de l'ordre de l'erreur de mesure pour les autres éléments (Na, K, Cl).
- les différences de répartition des pertes entre delta amont et delta aval observées pour le TDS entre années humides et années sèches, se retrouvent pour les bilans des éléments majeurs : reprises quasi inexistantes sur le delta amont pour les années sèches (1992/93 et 1993/94) ; reprises significatives pour les années humides (1994/95 et 1995/96) équilibrant de fait, plus ou moins, le bilan annuel suivant les éléments ; aucune reprise sur le delta aval ; et pertes annuelles d'autant plus importantes que l'hydraulicité est bonne.

(10 ³ t.an ⁻¹)	Ca		Mg		K		Na		Tac		Cl		SiO ₂	
	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95
Entrées	56	157	34	68	43	94	84	133	570	1312**	25	30	357	518
Sorties Débo*	42	152	28	68	37	109	64	137	472	1236	9	30	274	521
<i>Bilan amont</i>	-14	-5	-6	0	-6	14	-20	4	-98	-76	-15	0	-84	3
Dire	35	109	22	50	34	80	66	111	418	974	11	25	231	353
<i>Bilan aval</i>	-7	-43	-5	-18	-4	-29	2	-25	-54	-262	2	-5	-43	-167
Bilan delta	-21	-48	-11	-18	-9	-14	-18	-21	-152	-338	-14	-5	-126	-165

* Sorties Débo = Akka+ % des flux à Akka (% des volumes écoulés par rapport à Akka).

** Quelques valeurs de HCO_3^- ont été obtenues à Douna et à Ké-Macina pour l'année 1994-1995 à partir de la balance ionique.

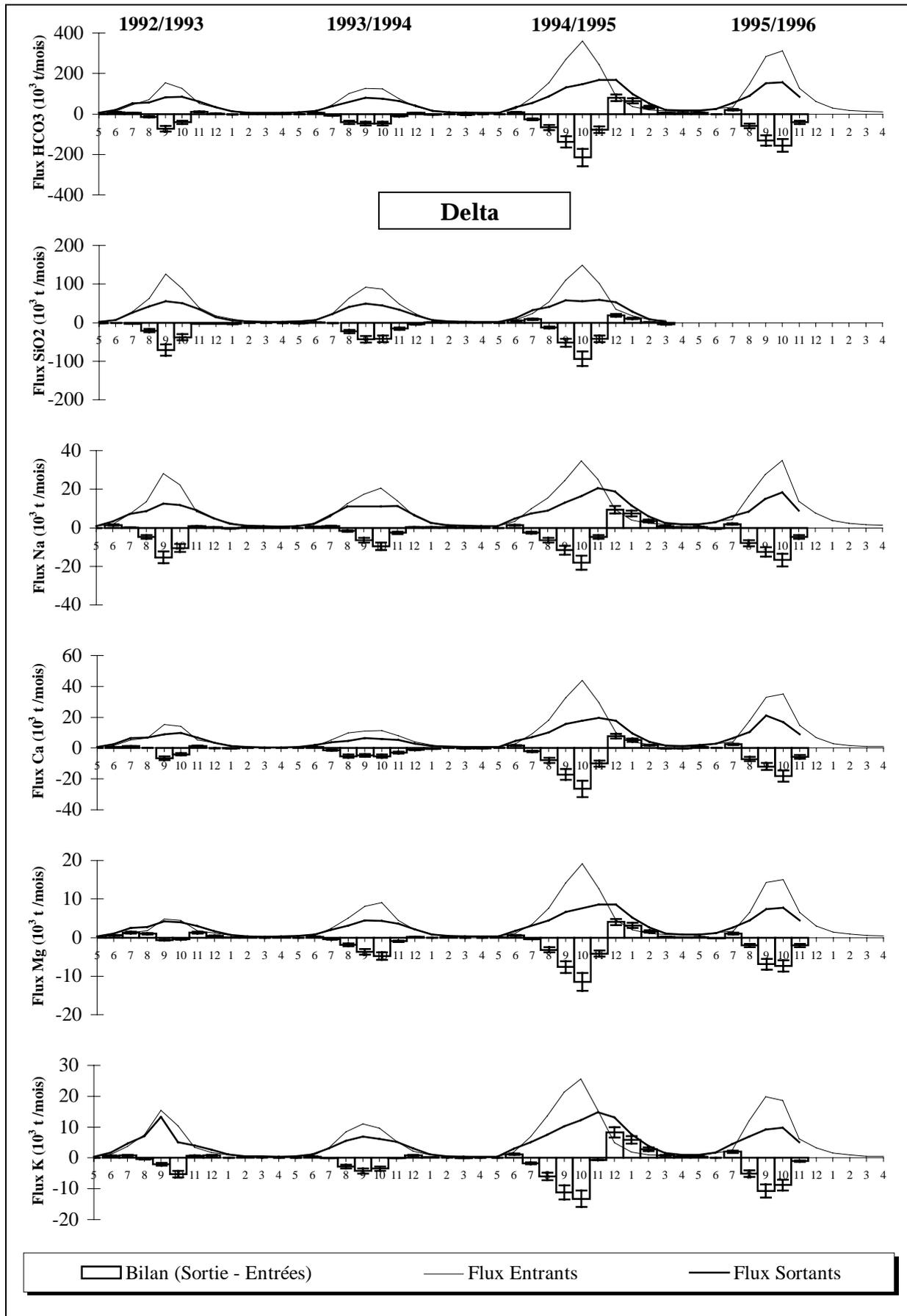
Tableau 76. Bilan des flux de matières dissoutes élément par élément dans le delta intérieur du Niger en milliers de tonnes par an.

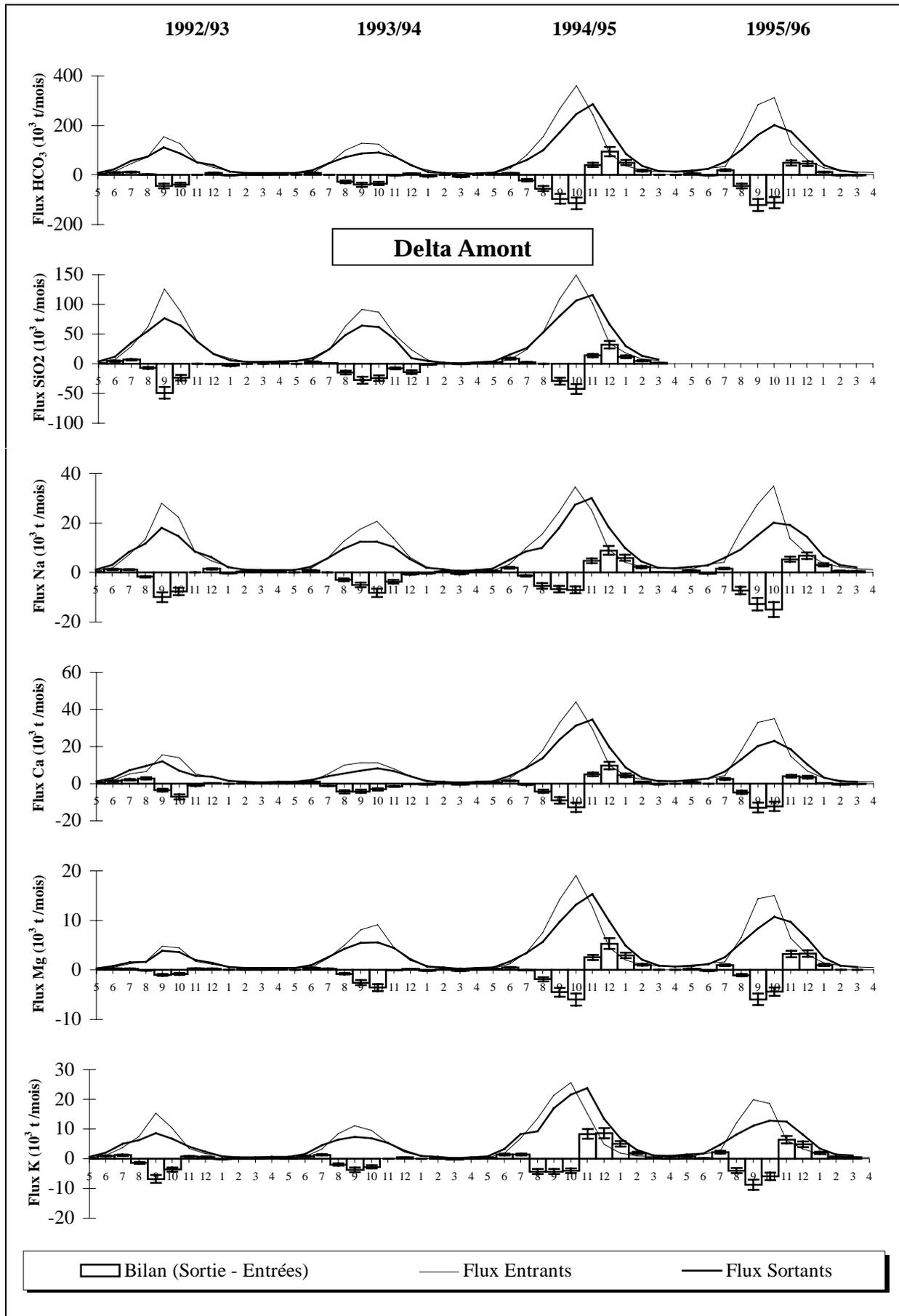
Pages suivantes :

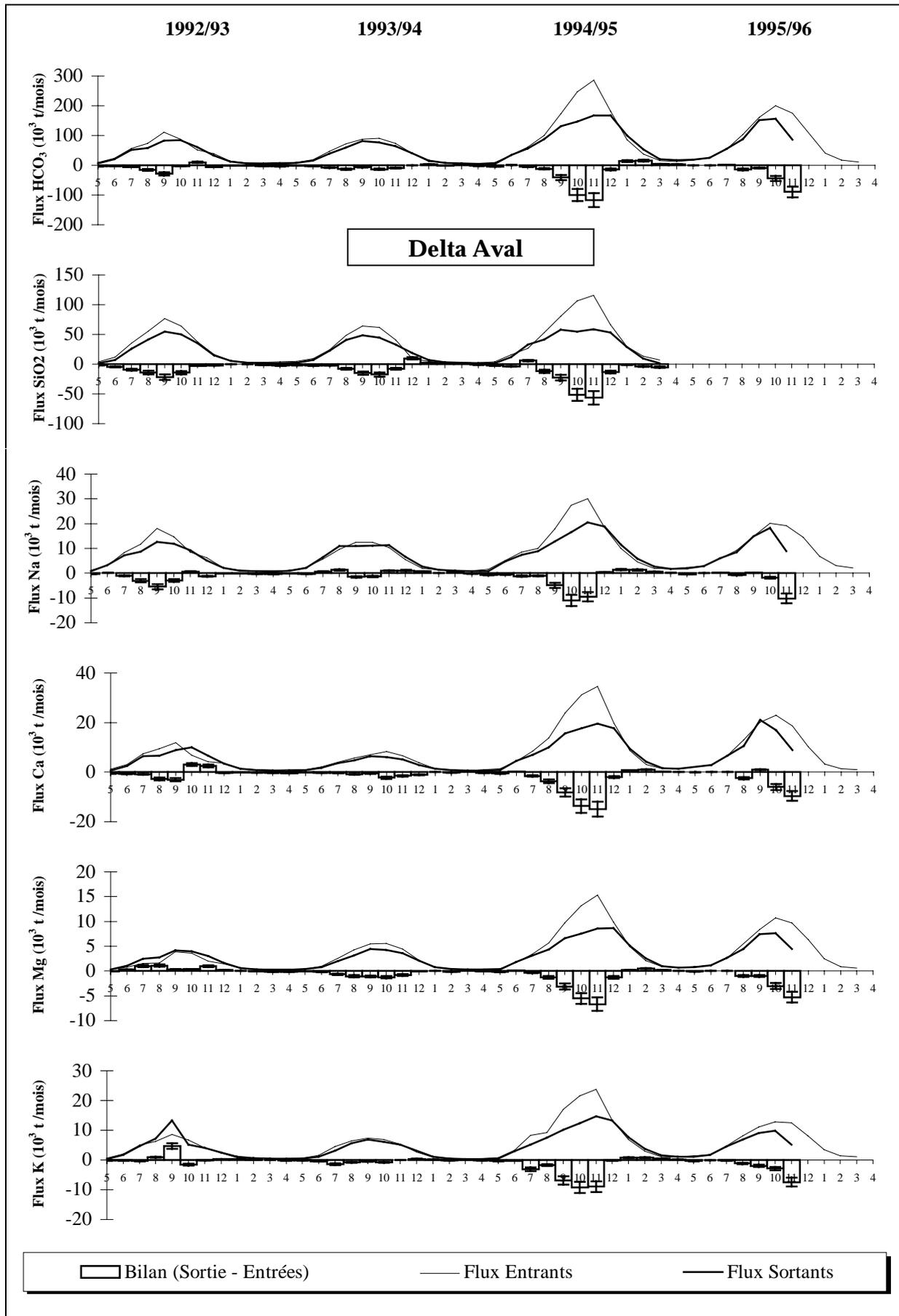
Figure 167 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO_3 , Na, Ca, Mg, K) sur le delta intérieur du Niger de 1992 à 1996.

Figure 168 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO_3 , Na, Ca, Mg, K) sur le delta amont de 1992 à 1996.

Figure 169 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO_3 , Na, Ca, Mg, K) sur le delta aval de 1992 à 1996.







2.4 Pertes relatives entre éléments

Pour mettre en évidence les disparités entre éléments au niveau des pertes plus ou moins importantes dans le delta (et donc au niveau du fonctionnement biogéochimique), le même type de diagramme déjà utilisé dans les chapitres précédents peut être utilisé. Pour chaque partie du delta les rapports entre flux sortants et entrants dans le bief sont calculés, ce qui représente indirectement le % de pertes par rapport aux entrées pour l'élément considéré. **Si toutes les pertes en éléments se font dans les mêmes proportions, le rapport serait constant ; si au contraire, les processus d'apport ou de perte se font de manière sélective, les rapports ne devraient plus être égaux.** Seules les variations relatives nous intéressent.

Le diagramme représentant les rapports entre les flux sortant du delta (Diré) et les flux entrants (Ké-Macina+Douna) sont représentés dans la Figure 170a pour les années 1993-1994 et 1994-1995. Ils permettent de mettre en évidence que :

- les rapports sont peu variables d'un élément à un autre ($0,4 < R < 0,82$) et les diagrammes pour les éléments majeurs sont presque plats. Les variations observées sont donc peu marquées (excepté pour Cl).
- pour l'année sèche, il semble cependant, que les pertes en Ca, Mg, Cl et SiO₂ sont relativement plus importantes que celles observées en K, Na et HCO₃. Les pertes en Cl sont très importantes pour cette année par rapport aux autres éléments.
- pour l'année humide, les pertes en Ca, Cl et SiO₂ sont également relativement plus importantes que les autres éléments ; suivent les pertes en Mg et HCO₃ ; et enfin les pertes relativement faible en K et Na par rapport aux éléments ci-dessus.

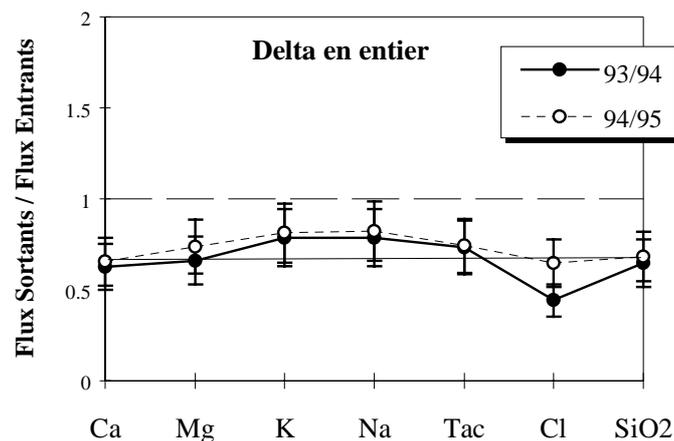


Figure 170. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le delta intérieur du Niger pour deux années contrastées entre les entrées (Ké-Macina +Douna) et la sortie du delta (Diré).

Les mêmes diagrammes réalisés sur le delta amont et le delta aval (Figure 171) montrent que le potassium est relativement moins appauvri que les autres éléments lors de la traversée du delta amont ; à contraire, les chlorures sont nettement appauvris par rapport aux autres éléments. Les différences entre flux entrants et sortants restent peu significatives pour les autres éléments. Sur le delta aval, le diagramme est plat pour l'année humide (excepté pour la silice). En revanche pour l'année sèche les variations sont importantes mais difficilement interprétables.

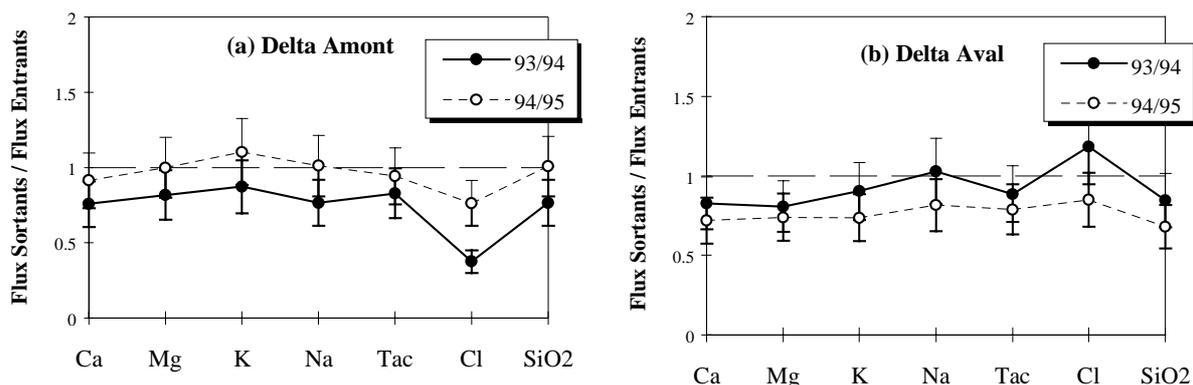


Figure 171. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le delta intérieur du Niger pour deux années contrastées ; delta amont (a) et delta aval (b).

Les pertes relativement plus importantes en Ca, SiO₂ et dans une moindre mesure Mg, lors de la traversée du delta, suggèrent qu'il existe des processus sélectifs au cours de ces pertes ; au contraire les faibles pertes relatives en potassium suggère qu'il existe des apports en cet élément. Le paragraphe suivant vise à faire la mise au point de l'ensemble des processus évoqués susceptibles de modifier la qualité de l'eau à la sortie du delta.

3 FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER

Les pertes importantes en eau dans le delta correspondent à des pertes par évaporation et évapotranspiration (surface mise en eau importante et aridité du climat - rôle de l'infiltration minime pour les crues observées). Si les pertes en eau ne s'accompagnaient pas de pertes de matière dissoute, les eaux seraient très concentrées à la sortie du delta ; inversement, si les pertes de flux dissous étaient très importantes devant les pertes en eau, la chute des concentrations entre amont et aval serait importante. Or, sur l'ensemble des données, les concentrations annuelles (rapport entre le flux annuel et le volume annuel) ne varient pas de façon significative entre les entrées (Ké-Macina + Douna) et la sortie du delta à Diré. Pour l'année 1993-1994 et en tenant compte de l'erreur de mesure, les concentrations annuelles en TDS restent par exemple du même ordre de grandeur ; elles varient de

47,7±4,3 mg l⁻¹ pour les entrées à 46,7 ± 4,2 mg l⁻¹ pour la sortie du delta. Pour l'année 1994-1995, ces concentrations augmentent légèrement de 42,2 ± 4,8 mg l⁻¹ à 50,6 ± 4,6 mg l⁻¹.

Cette faiblesse de salinisation de l'eau de surface lors de la traversée du delta tient en premier lieu au fait que le delta intérieur du Niger n'est pas un bassin fermé, et que, malgré une forte évaporation, les flux hydriques à la sortie du delta restent importants : ils permettent ainsi l'évacuation d'une partie des sels dissous ("qui ne font que passer" par le chenal de transit). Les pertes en matières dissoutes sont ainsi finalement modérées et ne représentent jamais plus de 40% des entrées de matières. En fait, la mise en place de "lacs salés" sur de longues périodes nécessite absolument plusieurs conditions qui ne sont pas réunies sur le delta intérieur du Niger (Risacher, 1992 ; Meybeck, 1995)⁴.

Par ailleurs, la salinisation des eaux sous l'effet de l'évaporation, peut être compensée par des phénomènes contribuant à l'élimination des substances dissoutes. C'est le cas du lac Tchad dont les eaux montrent un caractère d'eau douce bien qu'il constitue un système endoréique en milieu aride. Sa régulation saline s'opère essentiellement par néoformation argileuse et infiltrations de bordures de rivages sablonneux (Roche, 1973 ; Carmouze, 1976). Dans le cas du DIN, **les pertes de matières** vont principalement se produire, du fait de sa morphologie, en dehors du chenal principal, dans les plaines inondées, les mares... et peuvent alors correspondre à différents processus :

- **l'évacuation souterraine des sels dissous par infiltration** dans les cordons interdunaires ou les marges sableuses, pourrait assurer une part de la régulation saline des eaux. C'est ce qui est observé sur le lac Tchad. Pour le delta intérieur du Niger, pour lequel les volumes infiltrés par le fond des zones inondées semblent négligeables, ce processus doit être minime (chapitre VI). Pour les crues de bonne hydraulité (celles qui permettent notamment la recharge...), comme l'année 1994-1995, ce processus peut être plus important mais ne concerne que le delta aval.
- **la néoformation de minéraux** pourrait également se produire dans les zones où l'augmentation des concentrations (par **évaporation et/ou évapotranspiration**), amène à saturation les eaux vis à vis de certains minéraux (chapitre I). Pour les **eaux à l'entrée du delta**, bien qu'elles soient faiblement minéralisées, le fait qu'elles présentent une **alcalinité résiduelle positive** ($\text{Alcalinité} > 2[\text{Ca}^{2+}]$) permet de prévoir que ces eaux peuvent **évoluer vers la voie alcaline** sous l'effet de l'évaporation : lorsque les eaux arrivent à saturation par rapport à la **calcite**, ce minéral précipite et la solution s'enrichit de manière relative en bicarbonates et en sodium et s'appauvrit en calcium. Cette précipitation de calcite dans le delta est sans doute possible, et les fortes pertes en Ca par rapport aux autres éléments tendent à le montrer. Comme, en plus l'alcalinité est inférieure à $2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}]$ dans l'eau initiale, la précipitation des **silicates magnésiens** (e.g. sépiolite, montmorillonite magnésienne) fera évoluer la solution vers la voie saline neutre. Les fortes pertes en silice lors de la traversée du delta corroborent cette hypothèse. Une simulation géochimique réalisée sur les eaux du Niger (eau de départ) à l'aide du Modèle AQUA (Valles *et*

⁴ Brièvement, la condition fondamentale mais non suffisante est que l'évaporation potentielle soit supérieure aux apports en eau, une seconde condition nécessaire est que les pertes par infiltration soient très réduites.

al., 1986) montre que ces hypothèses d'évolution sont envisageables. Mais ce type de processus est complexe et les modèles cités ci-dessus ne tiennent pas compte de la végétation, ni de la nature des sols... C'est comme si on avait une verre d'eau du Niger que l'on faisait évaporer.

- Pour le delta intérieur du Niger, on peut supposer que, comme sur le delta de l'Okavango au Botswana (McCarthy & Metcalf, 1991, McCarthy, 1993), le processus d'évaporation de l'eau libre est moindre par rapport aux **processus d'évapotranspiration liés à la végétation**. McCarthy & Ellery (1994) ont montré sur le delta de l'Okavango, que les zones exondées et la végétation qui s'y développe (notamment les arbres qui agissent comme de véritables pompes à transpiration) semblent jouer un rôle prédominant dans les pertes en éléments dissous lorsque les pertes par évapotranspiration sont intenses dans les plaines inondées adjacentes. Il s'agit d'un processus connu des zones de cultures irriguées en milieu aride (e.g. Hoorn & Van Alphen, 1994, cité par Tabet, 1999) : lorsque il y a des zones non submergées, entourées de zones inondées, on peut observer un gradient hydraulique ascendant sous les terres immergées. Cette remontée capillaire peut alors s'accompagner d'une accumulation d'eau et de précipitation de sels dans ces zones. **L'augmentation de la salinité ne se produit alors que dans les eaux souterraines, plutôt que dans les eaux de surface, et les précipitations de minéraux n'ont lieu que dans les sols.** Ces précipitations peuvent aboutir à des **sols alcalins**, et même sodiques (résultat de l'accumulation de sodium) et finalement aboutir à des problèmes de toxicité pour les plantes, comme cela a été observé sur certaines zones de **l'Office du Niger** (Bertrand *et al.*, 1994, Barral & Dicko, 1996 ; Barral, 1997). En fait, les processus de salinisation sont dépendants de nombreux facteurs d'ordre pédologique, morphologique, hydrogéologique, géochimique, ...et peuvent donc prendre des formes variées dans des endroits variés.
- **L'assimilation des éléments majeurs SiO₂, K, Mg, Na par la biomasse végétale** peut aussi expliquer une partie des pertes en éléments dissous. En effet, les macrophytes, mais également les algues et le phytoplancton utilisent la silice sous sa forme dissoute pour la fabrication de leur structure interne (Meybeck, 1984). La prolifération de diatomées, abondantes dans le fleuve Niger (Zoska, 1985), peut ainsi provoquer une diminution de la silice en solution. Les macrophytes ont en plus de cet effet de filtre chimique un effet de filtre physique (dépôts des particules) et un rôle sur l'équilibre carbonates...

Les processus de pertes en éléments évoqués ci-dessus sont toutefois limités dans le temps par le **fonctionnement par pulsation** du delta intérieur du Niger (lié à l'arrivée de la crue annuelle) qui commande la période d'inondation et ainsi les cycles des végétaux aquatiques. L'arrivée de la crue annuelle et le débordement des eaux dans la plaine d'inondation va induire des processus plus ou moins simultanés qui auront des effets plus ou moins opposés sur la charge dissoute. L'infiltration et les précipitations de minéraux ainsi que l'assimilation par les plantes (cités ci-dessus) sont des processus qui vont réduire plus ou moins préférentiellement les concentrations en éléments dissous. En revanche, **des apports** sont également possibles et peuvent induire une augmentation des concentrations (hormis l'évaporation et l'évapotranspiration) :

- **Les apports directs par les pluies**, concernent toutes les surfaces mises en eau, et peuvent enrichir les eaux en éléments majeurs. Il n'existe pas de données chimiques sur le delta mais au vu

de la qualité des eaux de pluies étudiés à Katibougou (chapitre IV) les apports atmosphériques humides doivent être très faibles devant les apports par les deux tributaires.

- **La dissolution des minéraux et/ou des poussières atmosphériques déposées** peut contribuer à une augmentation de la charge dissoute des eaux du delta.
 - ◇ Dans un premier temps, **les pluies et le ruissellement** qui en découle (même s'il est faible) peuvent s'enrichir en éléments dissous par **le lessivage de matériaux anciens déposés sur les sols** (minéraux produits par les précipitations et/ou dépôts de poussières atmosphériques, qui ont pu avoir lieu l'année ou les années précédentes). Ces eaux, même si elles ne rejoignent pas le Niger, peuvent contribuer au pré-remplissage des mares et être très concentrées. Dans les zones perméables, les pluies peuvent au contraire favoriser le **lessivage vers les eaux souterraines**.
 - ◇ Dans un deuxième temps, **les eaux** provenant de la crue se propagent à l'intérieur du delta et peuvent à leur tour permettre la dissolution des sels. Elles peuvent surtout les évacuer lors de la décrue. Si la crue est de forte intensité et qu'elle se propage assez loin dans le réseau hydrographique, on peut imaginer qu'avec les surfaces inondées plus étendues, les reprises de dépôts de sels anciens en périphérie (par exemple accumulés lors des années sèches précédentes) pourront être repris. Cet **effet de chasse lors des années humides** est une hypothèse permettant d'expliquer en partie les fortes reprises observées lors de l'année humide étudiée. Ce processus va en revanche être contrebalancé par le fait que pour une crue forte, les eaux peuvent atteindre des zones sableuses perméables où l'infiltration est possible (et ainsi l'évacuation de sels dans l'eau du sol) et peuvent atteindre les lacs de périphérie où eau et matières sont piégées. Ces deux processus ont donc des effets opposés sur la charge dissoute des eaux.
- **L'intervention des macrophytes** qui après avoir stocké des éléments inorganiques extraits des sédiments et de l'eau, peuvent redistribuer ces éléments lors de leur décomposition (chapitre I). Eux-mêmes ne sont que des **bioaccumulateurs temporaires** dès lors qu'il s'agit en grande majorité de plantes annuelles (Ryding & Rast, 1994). Les macrophytes peuvent ne pas participer aux gains de matières si elles sont déracinées et enlevées, soit par la population pour nourrir les troupeaux, soit par les troupeaux eux-mêmes. Sur le delta, les bovins au pâturage se nourrissent directement des macrophytes submergées.

La Figure 173 tente de synthétiser de façon schématique les processus pouvant affecter la composition chimique de l'eau lors du débordement dans le lit majeur.

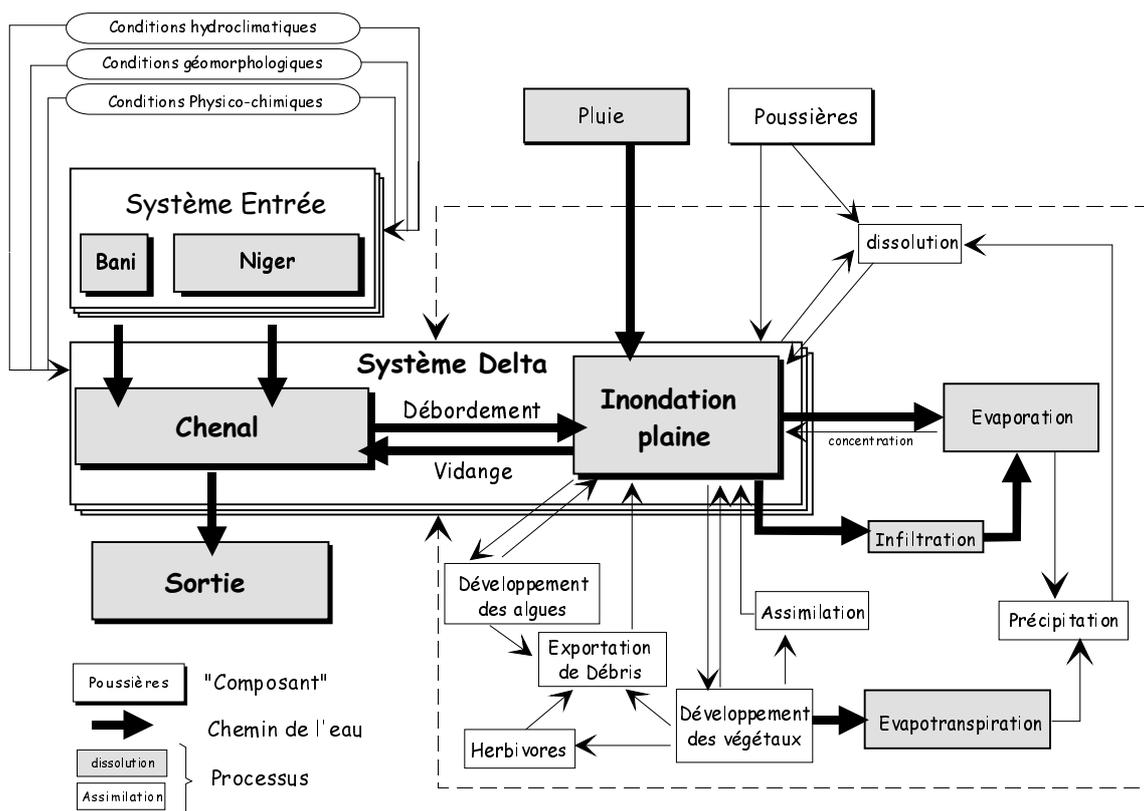


Figure 172. Schématisation des processus pouvant affecter les eaux transitant par le delta intérieur du Niger (conséquences du débordement dans le lit majeur).

Les changements de composition chimique des eaux du delta induits par l'ensemble des processus décrits ci-dessus dépendent en grande partie de l'hydrologie de l'année puis de la période de l'année, de la zone du delta, de l'éloignement plus ou moins grand par rapport aux chenaux principaux, et du temps de séjour au sein des zones inondées ; ces deux dernières caractéristiques dépendant de l'intensité de la crue de l'année.

Conclusions

Ce travail s'inscrit dans le cadre des problématiques liées à l'étude des grands fleuves du globe, et notamment à celle des fleuves tropicaux unimodaux. Dans un hydrosystème aussi complexe que celui du delta intérieur du Niger, il est nécessaire de séparer l'étude du bassin versant amont, de l'étude du delta lui-même. Ces deux entités répondent en effet à deux problématiques différentes : l'une est davantage axée sur les taux d'érosion et de transport, ainsi que sur les différentes formes sous lesquelles les éléments sont transportés ; la seconde est davantage liée à l'estimation des taux de sédimentation dans les plaines inondables, et leur rôle dans les bilans de matières terrigènes apportées par les rivières aux océans.

Dans tous les cas, le point de départ de toute étude sur le transport de matière est **l'acquisition de données fiables de débits et de concentrations, nécessaires pour calculer les quantités de matières transportées**. Cette étude sur la géodynamique actuelle du bassin amont et du delta intérieur du Niger se base ainsi essentiellement sur une base de données correspondant à un suivi journalier des débits et un échantillonnage régulier des eaux du Niger pour l'analyse des éléments majeurs et des matières en suspension. Réalisé dans le cadre d'un réseau mis en place par l'IRD (ex-ORSTOM) de 1991 à 1998, l'échantillonnage regroupe 8 stations principales représentatives des différents biefs du bassin versant au Mali : amont du bassin versant (Banankoro et Koulikoro), le Sankarani (Sélingué) ; entrées du delta (Ké-Macina sur le Niger et Douna sur le Bani) ; confluence du Bani et du Niger (Sensé) ; sortie du lac Débo situé au milieu du delta (Akka) ; et enfin sortie du Delta (Diré). Des prélèvements d'eau de pluie et de nombreux échantillons d'eau de surface ont été réalisés entre 1996 et 1997 pour permettre l'analyse des éléments majeurs et traces dans la phase totale et dissoute et celle du carbone organique (particulaire et dissout). Ces données sont venues enrichir cette base de données déjà très importante. Pour éviter les contaminations de ces échantillons ponctuels du fait de l'utilisation de matériel et/ou de "l'environnement" de la filtration, des protocoles analytiques spécifiques à l'étude ont été mis au point. Ils ont permis d'obtenir avec un minimum de matériel des résultats de qualité.

◆ La caractérisation des apports liés au bassin amont du Niger

Une partie importante de cette étude est consacrée à la caractérisation des apports du bassin amont au delta intérieur du Niger. L'ensemble des données de débits (sur au moins 30 années) et de concentrations (sur 8 années d'études) ont permis de mieux appréhender la variabilité spatiale et temporelle des paramètres étudiés.

L'étude des apports hydriques a ainsi montré que **la période d'étude était contrastée** et représentative des fluctuations hydroclimatiques de ces 25 dernières années déficitaires. Ce contraste hydrologique entre années sèches (1991/92, 1992/93, 1993/94), humides (1994/95, 1995/96) et moyennes (1996/97, 1997/98), présente un des intérêts majeurs de ce travail. Il a permis de comparer les différentes réponses du milieu, du point de vue du transport particulaire et dissous, à cette variabilité hydroclimatique. Cette étude hydrologique a également permis de mettre en évidence les principales différences entre les bassins du Niger et du Bani. Celles-ci ont été attribuées en premier lieu aux différentes zones climatiques dans lesquelles ils se trouvent puis aux différentes propriétés des aquifères : le Bani ne représente ainsi en moyenne que 20% des apports en eau au delta.

L'étude des flux de matières en suspension exportés vers le delta intérieur du Niger a permis dans un premier temps de mettre en évidence la **variabilité temporelle des concentrations en MES** en fonction du débit au cours de la crue. Sur l'ensemble de stations les relations entre concentrations en MES et débits forment des cycles d'hystérésis horlogiques : le maximum de MES arrive avant le maximum de débit, et les concentrations sont plus importantes en crue qu'en décrue. Ces relations mettent en évidence la variabilité des sources de MES à l'échelle du bassin versant : on observe d'une part les apports de particules liés à l'érosion provoquée par la pluie et le ruissellement sur les versants et d'autre part les apports liés à l'érosion des dépôts anciens ou à l'érosion de berges et de fond du lit de l'ensemble du réseau hydrographique, des cours d'eau de tête à l'exutoire. Deux modélisations simples de cette évolution au cours du temps ont été proposées dans ce travail et ont permis de reproduire le schéma d'évolution des concentrations en MES au cours du temps.

L'étude des flux de matières en suspension a mis en évidence ensuite la **variabilité spatiale des flux annuels** d'une station à une autre et la faiblesse relative des tonnages exportés par le Bani, principal affluent du Niger : sur la période d'étude (1991/98) les apports du Bani ne représentent en moyenne que 20% des apports de MES au delta. Cette faiblesse des apports du Bani réside dans la **faiblesse des lames écoulées annuelles** qui est à l'échelle des bassins versants étudiés le principal facteur déterminant les taux de transport de MES. Il apparaît également que **la lithologie du bassin et les sols** qui en découlent sont aussi des facteurs explicatifs des taux d'érosion observés sur le Niger. L'étude des variations spatiales des flux de MES ont ainsi montré que malgré des bassins intermédiaires de faible superficie et malgré l'influence du barrage de Sélingué (qui agit comme un véritable décanteur pour les apports du Sankarani), l'érosion augmente d'amont en aval sur le bassin versant du Niger, du fait du changement des conditions climatiques et lithologiques. En effet, une des particularités du fleuve Niger au Mali est de se diriger vers des zones de plus en plus désertiques, dont l'érodabilité est de plus en plus importante. Le facteur limitant l'érosion est alors la faible quantité d'eau de pluie tombant sur ces régions. Si l'on compare le Niger aux autres grandes rivières du globe, la faiblesse des exportations de matière sur le bassin amont du Niger s'explique davantage par **le relief peu marqué** de la zone géographique étudiée...

Les derniers chapitres de cette partie ont été consacrés **à l'étude de la chimie des eaux du Niger amont**. Les nombreuses mesures réalisées, à partir du réseau ORSTOM ou des mesures ponctuelles, sur les eaux du bassin amont tant sur la phase dissoute que particulaire ont permis de donner un aperçu assez complet de la chimie du bassin amont du Niger (Niger +Bani). Ces **rivières sont très peu minéralisées et la charge solide est essentiellement inorganique**. La faiblesse de la

lame écoulée est le principal facteur expliquant les faibles taux de transport dissous observés sur le Bani qui ne représentent également que 15 à 28 % des apports totaux au delta. Les relations entre les différents éléments dans la phase dissoute et les débits forment suivant les années et les stations des cycles d'hystérésis anti-horlogiques (Na, Ca, Mg, HCO₃) ou horlogique (K, Rb). Ceux-ci ont permis de confirmer que différents écoulements, notamment retardés de type écoulement hypodermique, participent pour une bonne part à l'écoulement total.

L'étude de la chimie des eaux dans les phases dissoute et particulaire a également permis de confirmer la **différence de comportement entre les éléments dits solubles**, dont les concentrations dans la masse d'eau sont liées à la lithologie du bassin versant, et les autres éléments quasiment insolubles tels que les terres rares. Les concentrations de ces derniers dans la phase dissoute sont davantage liées à la chimie interne du fleuve et à l'existence d'une phase colloïdale. Ceci est notamment mis en évidence lors des très basses-eaux où les concentrations en matières organiques peuvent être importantes. Toutefois, pour tous ces éléments, la distribution des éléments entre les deux phases (dissoute et particulaire) est apparue dépendante de la quantité de MES observées dans l'échantillon. L'influence des activités humaines de type pollution métallique semble par ailleurs très limitée : les facteurs d'enrichissement n'ont pas montré de valeur importante excepté pour Sb. Ce résultat confirme donc la **faiblesse actuelle de la pollution chimique d'un grand fleuve africain comme le Niger**.

Il est finalement apparu que **la composition chimique des eaux du bassin du Niger amont reflète les lithologies de type silicaté des bassins traversés**. L'influence des apports atmosphériques sur la qualité des eaux du Niger, étudié à partir des apports océaniques, est faible. L'analyse des pluies échantillonnées sur le bassin amont a mis en évidence leur caractère continental important et a montré que la qualité de leur eaux était peu marquée par une influence anthropique quelconque. La connaissance des flux exportés nous a permis d'appréhender les phénomènes d'érosion chimique sur le bassin versant, malgré les nombreuses limites entrevues dans cette démarche.

Il ressort de ce travail sur les différents taux d'exportation de matière particulaire et dissous que le transport dissous est légèrement prédominant sur les deux stations les plus amont du Niger (Banankoro et Koulikoro), tandis que les deux types de transport s'équilibrent plus ou moins pour les deux stations à l'entrée du delta (Ké-Macina sur le Niger et Douna sur le Bani).

◆ **Les changements observés lors de la traversée du delta intérieur du Niger**

L'étude menée sur les variations spatiales et temporelles des concentrations et des flux hydriques, particuliers et dissous nous a permis de mieux appréhender le fonctionnement hydrochimique du delta intérieur du Niger.

La caractéristique principale du delta est que d'importantes **pertes en eaux** s'y produisent (de 30 à 45 % des entrées suivant l'hydraulicité de l'année). Elles correspondent essentiellement à des pertes par évaporation et évapotranspiration à partir des surfaces inondées. Ce travail a confirmé les fonctionnements hydrologiques très différents entre la partie amont, proprement deltaïque, et la partie aval, caractérisée par des zones inondées plus réduites et une morphologie différente. La partie amont

montre un comportement assimilable à un canal distribuant des eaux dans une multitude de zones inondables qui stockent puis restituent des volumes d'eau conséquents tandis que la partie aval ne montre que des périodes de stockage, ce stockage, important pour les années de bonne hydraulicité, correspondant au remplissage des lacs présents dans cette zone.

L'approche par le calcul des bilans entrées/sorties adoptée dans ce travail a permis de confirmer le rôle du delta intérieur du Niger dans **la capture de quantités de matières particulaires et dissoutes** qui sont ainsi soustraites aux apports aux océans, tout du moins de manière temporaire. Les pertes annuelles en MES observées lors de la traversée du delta correspondent de 26 à 54 % des entrées suivant les années, et les pertes en éléments dissous (TDS) représentent environ 30% des entrées. **Les pertes en MES** correspondent, quelle que soit la zone du delta considérée, à un **phénomène d'alluvionnement** favorisé par différents facteurs agissant sur les vitesses du courant : pentes faibles, topographie et morphologie particulières (lévées, méandres, zones mortes multiples), végétation aquatique abondante, caractéristiques de la crue (intensité et durée de l'inondation)... **Les pertes en éléments dissous** sont liées à 3 principaux **processus qui permettent la régulation saline des eaux** du delta malgré une forte évapotranspiration : la néoformation de minéraux a priori essentiellement dans les sols, l'assimilation par les végétaux, l'évacuation des sels dissous par infiltration.

Ce travail a permis de mettre en évidence que ces pertes **diffèrent suivant les deux parties du delta** et qu'elles sont d'autre part **liées à la variabilité spatio-temporelle de l'inondation annuelle** :

- **Sur la zone deltaïque du delta (delta amont)**, les bilans mensuels de MES et de TDS ont pu mettre en évidence une alternance de périodes de reprise et de dépôts de sédiments, **les périodes de dépôts étant largement prédominantes du point de vue des pertes de matières et concordant avec les périodes de pertes en eau**. Les crues importantes pour des années humides ont montré un comportement très particulier pour les éléments dissous. Si elles permettent des dépôts plus importants dans le delta amont, elles permettent aussi des reprises plus importantes. Il résulte de ces deux processus opposés que les pertes sont suivant les éléments plus ou moins équilibrées par les gains. Les crues de bonne hydraulicité permettent sans doute un lessivage des terrains les plus éloignés, et une reprise des dépôts fluviaux anciens (sédimentation chimique ou particulière, débris organiques résultant de la décomposition des organismes lacustres) remaniés par les vents (et donc non consolidés).
- Sur le **delta aval**, les bilans annuels et mensuels de MES et d'éléments dissous sont également instructifs. **Pour les éléments dissous**, on observe **uniquement des pertes**, et celles-ci sont **d'autant plus importantes que les pertes en eau le sont aussi**. Ces pertes sont toujours observées pour les années humides du fait des pertes hydriques très importantes qui se produisent dans les lacs du delta aval. **Les bilans de MES** ne sont pas reliés aux bilans hydriques : ils ont clairement mis en évidence que des **apports autres que fluviaux** devaient être pris en compte sur cette partie du delta. L'hypothèse la plus probable, en raison de la situation géographique de cette partie du delta dans une zone semi-désertique proche du Sahara, est la participation de poussières locales ou d'origine plus lointaine (transportées par l'Harmattan ou les vents précédents les lignes de grains). Le rôle mécanique de ces vents est sans doute également important du fait de la turbulence qu'il peuvent créer dans les eaux du lit.

Les résultats obtenus dans ce travail confirment le rôle des plaines d'inondation dans le transfert d'éléments aux océans. Ils mettent également en évidence que les apports entrant dans ce type de système, autres que ceux provenant du bassin amont, sont sans doute sous-évalués, et de toutes façons mal connus.

◆ Les perspectives

A la suite de ce travail de nombreuses interrogations subsistent. Il semble notamment nécessaire par la suite et afin d'améliorer les connaissances relatives aux entrées de matière dans le delta, de prendre en compte le caractère spatial des pluies, et d'améliorer la description du milieu du bassin amont. Ceci permettrait d'élaborer des modèles spatialisés plus performants pour prédire les taux de matières arrivant au delta intérieur du Niger. A l'échelle de ce dernier, une des perspectives majeures est **l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrologique** du delta dont les autres bilans (MES et Dissous) dépendent en partie. Il s'agirait notamment de mieux estimer les surfaces mises en eau, leur séquence d'inondation... Il semble que l'imagerie satellitale pourrait être un moyen d'investigation performant. Mais il est loin d'être évident à l'heure actuelle d'identifier les surfaces réellement mises en eau... Ces données pourraient toutefois servir à caler et améliorer un modèle hydrologique simple tel que celui que nous avons présenté. Une étude systématique des isotopes stables de l'eau dans le delta n'est encore qu'à ses débuts ; elle serait fort utile pour préciser le fonctionnement de cette *"formidable machine évaporatoire"*.

Pour estimer l'impact à long terme de ce type de milieu sur les apports de matières aux océans, il est évidemment nécessaire de poursuivre les observations aux entrées et aux sorties du delta sur une longue période. Ceci permettrait entre autres de tester la **reproductibilité des processus** dont nous avons discuté. Il existe cependant d'autres méthodes que nous avons évoquées dans ce travail pour estimer des taux de sédimentation actuels, comme des mesures au césium 137 dans des carottes de sédiments ou des pièges à sédiments. Il serait cependant nécessaire pour avoir un idée générale sur le delta en entier de multiplier les échantillons prélevés sur toutes les unités homogènes (représentant l'ensemble du paysage et l'occupation de sols) puis d'extrapoler les résultats obtenus sur l'ensemble du delta. Une telle démarche nécessiterait une bonne connaissance du milieu et des modalités de l'inondation ainsi que l'utilisation d'un système d'information géographique. Elle permettrait de définir les zones où la sédimentation est la plus importante. Un autre point essentiel pour l'étude du bilan de cet hydrosystème complexe, dont la principale particularité est d'être situé en zone semi-désertique, est une meilleure **caractérisation des apports autres que fluviaux** tels que les apports atmosphériques. Un suivi des apports de poussières atmosphériques (quantitatif et qualitatif) pourrait préciser leur contribution dans le bilan global sorties-entrées de matières qui est sans doute non négligeable à cause des forts vents de poussières régnant dans ce type d'environnement.

A une échelle plus fine, et afin de mieux cerner les processus de pertes ou d'apport possibles dans le delta intérieur du Niger, il semble indispensable de **suivre l'évolution de la qualité de l'eau des marges de l'hydrosystème** (comme les mares périphériques...) en lien avec le cycle annuel de l'inondation. Ceci permettrait de localiser et quantifier les phénomènes de sursaturation et de précipitation des minéraux néoformés qui s'y produisent et de préciser le rôle des macrophytes. Une étude de ce type est en cours sur la mare de Batamani mené par une équipe pluridisciplinaire de l'IRD

(hydrologues et hydrobiologistes). C'est d'ailleurs ce cadre pluridisciplinaire qui a été développé dans le projet de la zone atelier "Delta Intérieur du Niger" du GIP Hydrosystème. Ce projet fédère les recherches sur la connaissance du milieu physique (dont notre contribution) avec les recherches hydrobiologiques (des nutriments à la ressource halieutique) et les recherches sur l'exploitation et la gestion des ressources renouvelables par les sociétés de pêcheurs, d'agriculteur et d'éleveurs. Ces travaux sont menés de concert par le CNRST et l'Institut d'Economie Rurale du Mali, l'IRD, le CNRS et l'INSU. Ils devraient aboutir à un modèle de gestion intégrée propre à caractériser des scénarios de développement durable prenant en compte les contraintes hydrologiques et climatiques, démographiques, d'occupation de l'espace et d'aménagement du territoire.

A l'origine de ce travail, notre ambition était de contribuer à une meilleure connaissance de l'hydrosystème et de la géochimie du fleuve Niger et de son delta. Au terme de ces recherches, nous espérons avoir apporté notre pierre à l'édifice que construit une communauté scientifique pour aider au développement d'une région vitale pour le Mali. Nous espérons aussi que nos résultats sur le faible degré d'anthropisation, en terme de qualité chimique des eaux, pourront être utilisés comme référence dans la perspective d'un futur observatoire de l'environnement du fleuve Niger au Mali. Les données que nous avons recueillies sont des sources d'informations exceptionnelles dans cette région du monde où l'acquisition des données est rare et coûteuse.

TABLE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

BIBLIOGRAPHIE

Table des figures

PARTIE I : Milieu naturel et méthodes

CHAPITRE I. LE MILIEU NATUREL ET HUMAIN

Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude	6
Figure 2. Limites du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger	10
Figure 3. Carte schématique des principaux ensembles géologiques de l'Afrique de l'ouest et du nord (d'après Guiraud et al., 1987).	12
Figure 4. Carte géologique du bassin versant du Niger en amont du delta intérieur (d'après Brunet-Moret et al. (1986), modifié). Les stations limnimétriques de Ké-Macina et Douna représentent les limites amont du delta.....	14
Figure 5. Carte schématique des sols de l'Afrique de l'Ouest avec localisation du bassin supérieur du Niger et de son delta intérieur (d'après Banque Mondiale, 1986 ; et modifié).....	16
Figure 6. Répartition et types des aquifères rencontrés sur le bassin supérieur du Niger et dans le delta intérieur du Niger (d'après Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).....	22
Figure 7. Croquis hydrogéologiques des aquifères des formations granitiques (a) et de la tranche d'altération superficielle en région schisteuse (b) (d'après L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest, 1990).	24
Figure 8. Schéma général des masses d'air en Afrique de l'Ouest. (Leroux, 1996).....	27
Figure 9. Répartition géographique des différents types de climat (d'après l'Hôte et al., 1996)	29
Figure 10. Pluviométrie moyenne interannuelle de la zone d'étude sur la période 1971-1989.	30
Figure 11. Diagramme théorique des eaux soumises à l'évaporation (d'après Hardie & Eugster 1970, cité par Tanji, 1990).....	33
Figure 12. Schéma de la circulation des poussières sahariennes.....	34
Figure 13. Modes de transport des particules sous l'effet du vent (D'après Casenave & Valentin, 1989 et Stahr et al., 1994 et modifié).	34
Figure 14. Représentation schématique de la répartition des macrophytes dans une plaine inondée lors de l'étalement de la crue (d'après Wuillot , 1994)	37
Figure 15. Unités végétales et croquis morphologique d'un secteur du delta intérieur du Niger : la région de Nantaka- mayo Donguel (d'après Wuillot , 1994 ; et modifié).	38
Figure 16. Evolution de l'Indice NDVI sur le bassin du Niger. Dernière décennie de chaque mois indiquée. Plus la couleur tire vers le vert foncé est plus l'indice est fort (d'après site Internet de la FAO : http://193.43.36.7/waicent/faoinfo/economic/giews/french/basedocs/afouest.htm)	40
Figure 17. Schématisation des processus majeurs pouvant affecter la qualité de l'eau du système fluvial étudié (système versant + système cours d'eau) en lien avec le cycle hydrologique du bassin versant.	50

CHAPITRE II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION DES DONNÉES, MATÉRIEL ET MÉTHODES

Figure 18. Classification des différentes "couches" de transport solide (d'après Wen Shen, & Julien, 1992).....	53
Figure 19. Stations principales et secondaires du réseau de surveillance de la qualité des eaux du fleuve Niger et de son delta intérieur au Mali.....	56
Figure 20. Relation entre la conductivité électrique et la charge ionique des eaux du Niger (N= 559 échantillons).....	65
Figure 21. Evolution des coefficients de variations par rapport aux débits et aux concentrations moyennes obtenues lors des jaugeages (sur 209 jaugeages de 1990 à 1996) sur les stations principales (Banankoro, Koulikoro, Douna, Akka, Diré).....	67
Figure 22. Relation entre la moyenne des échantillons de surfaces et la moyenne du jaugeage.....	69
Figure 23. Distribution des concentrations journalières en hautes eaux à Banankoro (1990 et 1991)	70
Figure 24. Comparaison entre l'échantillonnage des concentration en MES journalière et un jeu de concentrations hebdomadaires (une concentration prise tous les 7 jours). pour la station de Banankoro, sur l'année 1991.....	70
Figure 25. Procédure des échantillonnage ponctuels des eaux du fleuve Niger au Mali du prélèvement au laboratoire d'analyse.....	74
Figure 26. Localisation de la station de Katibougou au Mali et autre stations du réseau IDAF dans la même zone géographique.....	78
Figure 27. Schéma de fonctionnement du préleveur à sac automatique (ESA).	79

PARTIE II : Les apports du bassin amont

CHAPITRE III. ELÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPÉRIEUR ET DU BANI

Figure 28.: Répartition de l'écoulement moyen mensuel (et ses valeurs extrêmes) au cours de l'année pour quelques stations du Niger supérieur et sur le Bani (période commune 1955-1997). Banankoro (a), Koulikoro (b), Ké-Macina (c) et Douna (d).....	93
Figure 29. Evolution des débits journaliers sortants du barrage de Sélingué (1994-1995).....	94
Figure 30. Evolution de d18O (‰) en fonction du débits (m ³ s ⁻¹) à Banankoro (a) et à Douna (b) pour les années 1990 et 1991 (d'après Gourcy, 1993).....	95
Figure 31. Variations de la composition isotopique moyenne des eaux pour le Niger à Banankoro (a) et pour le Bani à Douna (b) (d'après Gourcy, 1993).	96
Figure 32. Relation entre les modules de Banankoro et Koulikoro (a) et de Koulikoro et Ké-Macina (b).....	97
Figure 33. Evolution des modules du Niger supérieur à Koulikoro, du Bani à Douna, du Niger à Diré et moyennes interannuelles (1924-97).....	100
Figure 34. Evolution du coefficient de tarissement (d'après Bricquet et al., 1997).....	101
Figure 35. Schéma théorique de décomposition de l'hydrogramme de crue en décennie humides ou sèche (d'après Olivry et al., 1995a ; Olivry et al. 1998).....	102
Figure 36. Ecoulement annuel des six années d'observation des flux particuliers à la station de Banankoro (Niger supérieur) comparé à celui mesuré depuis 1970.....	104
Figure 37. Ecoulement annuel des six années d'observation des flux particuliers à la station de Douna (Bani) comparé à celui mesuré depuis 1970.	104
Figure 38. Exemple d'hydrogrammes annuels du fleuve Niger à Banankoro de 1990 à 1998.	108

Figure 39. Exemple d'hydrogrammes annuels de la rivière Bani à Douna de 1990 à 1998.	108
Figure 40. Evolution des volumes écoulés cumulés à Banankoro de 1990 à 1997.	109
 CHAPITRE IV. RÉGIME DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION SUR LE BASSIN AMONT DU FLEUVE NIGER	
Figure 41. Pages suivantes. Evolution des concentrations instantanées en MES et des débits journaliers au cours du temps sur les 4 stations du bassin du Niger amont (de mai 1991 à avril 1998)	115
Figure 42. Relations MES/Débits entre les débits mensuels et les concentrations mensuelles (flux mensuel/débit mensuel) pour chaque année et pour les 4 stations du Niger amont : Banankoro (a), Koulikoro (b), Ké-Macina (c) et Douna (d) pour la période d'observation des flux particuliers (1991 à 1997).	118
Figure 43. Exemple de relation MES/Débits au pas de temps mensuel à la station de Banankoro pour l'année 1991-1992.	119
Figure 44. Relation MES/Débits au pas de temps hebdomadaire sur la station de Banankoro et pour différents types d'année.	121
Figure 45. Principe de modélisation de la phase de crue du modèle empirique.	128
Figure 46. Courbe « enveloppe » $C_{env}(Q)$ déterminée à partir des valeurs hebdomadaires (C_{obs} , Q_{obs}) observées pour les 6 années hydrologiques 1991/92 à 1996/97 sur les deux premiers mois de l'année... ..	129
Figure 47. Ajustement logarithmique entre le volume écoulé depuis le début de la crue $V_e(Q)$ et l'écart $DC = C_{env}(Q) - C_{obs}(Q)$	130
Figure 48. Pages suivantes - Comparaison de l'évolution au cours du temps des concentrations observées et calculées avec le modèle empirique sur les 4 stations étudiées.	131
Figure 49. Principe de modélisation de la charge en suspension du modèle conceptuel.	135
Figure 50. Détermination des paramètres k_{ec} et B_{ec} relatifs au flux de MES provenant de l'érosion continue : relation entre la concentration et le débit hebdomadaire en période de basses eaux pour les années de forte hydraulicité (Station de Douna).	136
Figure 51. Détermination du stock mobilisable initial pour l'année 1991/92 à Douna en calculant l'intégrale de l'équation (Eq. 10), i.e. l'aire de la surface comprise entre la courbe des flux hebdomadaires observés et la courbe des flux hebdomadaires provenant de l'érosion continue.	137
Figure 52. Exemple de reconstitution à l'aide du modèle conceptuel de l'évolution des concentrations observées au cours d'un cycle hydrologique. (Année 1995/96 - Station de Douna)	137
Figure 53. Pages suivantes - Comparaison de l'évolution au cours du temps des concentrations observées et calculées avec le modèle conceptuel, sur les 4 stations étudiées.	140
Figure 54. Relation entre débit et transport spécifique sur les 4 stations du bassin du Niger amont pour l'ensemble des années d'observation (de 1991 à 1998).	144
Figure 55 : Flux mensuel à la station de Banankoro ; évolution des flux mensuels interannuels (moyenne 1991-1998) en fonction du temps (a) ; relation Flux MES - Volume mensuel pour l'ensemble des années d'observation (b).....	145
Figure 56. Comparaison des valeurs obtenues pour les stations étudiées sur le bassin du Niger amont avec quelques valeurs sur des stations du Haut-Niger en Guinée (d'après Orange, 1992). (1) Milo à Kankan ; (2) Tinkisso à Dabola ; (3) Niger à Siguiri ; (4) Niger à Banankoro ; (5) Niger à Koulikoro ; (6) Niger à Ké-Macina ; (7) Bani à Douna.....	150
Figure 57. Evolution spatiale des flux moyens annuels (1991-1998) hydriques (a) et solide (b).	151
Figure 58. Relation Concentrations en MES - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Banankoro et Koulikoro (moyenne 1991-1998). (les numéros sont les mois correspondants).....	151

Figure 59. Evolution du bilan des flux en MES sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison avec les débits du Sankarani.	152
Figure 60. Relation Concentrations en MES - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Koulikoro et Ké-Macina (moyenne 1991-1998).	154
Figure 61. Evolution du bilan des flux en MES sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison avec les débits du Sankarani.	154
Figure 62. Relation Concentrations - Débits à l'échelle annuelle pour le Niger à Ké-Macina et le Bani à Douna (moyenne 1991-1998).	156
Figure 63. Evolution comparée des flux en MES à la station de Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani.	157

CHAPITRE V. CHIMIE DES PRÉCIPITATIONS EN ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE ÉLÉMENTS MAJEURS ET TRACES

Figure 64. Facteur d'enrichissement moyen ($[X]/[Fe]$) dans les eaux de pluies à la station de Katibougou au Mali, minimum et maximum ponctuels.	165
Figure 65. Facteur d'enrichissement individuel ($[X]/[Fe]$) dans les pluies à Katibougou au Mali.	165
Figure 66. Comparaison des Facteurs d'Enrichissement (FE) moyen dans les pluies à Katibougou ($[X]/[Fe]$) et à Lamto et Kollo ($[X]/[Al]$).	166
Figure 67. Exemple de relations entre les FE individuels de certains éléments et la quantité de fer total dans l'échantillon.	167
Figure 68. Evolution des facteurs d'enrichissement de Pb en fonction de la quantité de Fe totale présent dans les pluies.	168
Figure 69. Diagrammes des concentrations des TRs dans la phase totale normalisées à la croûte continentale (11 échantillons).	169
Figure 70. Représentation des axes de l'ACP (43 échantillons et 8 variables).	171
Figure 71. Quelques exemples de corrélations entre éléments dans la phase totale.	172
Figure 72. Relations entre les concentrations individuelles en Cl ⁻ et Na ⁺ à Katibougou.	174
Figure 73. Concentration de Na ⁺ en fonction de la distance à l'Océan Atlantique.	175
Figure 74. Relations entre les concentrations individuelles en Rb et K à Katibougou.	178
Figure 75. Facteur d'enrichissement de Rb et K en fonction du fer total.	178

CHAPITRE VI. CHIMIE DES EAUX DU NIGER AMONT : CATIONS ET ANIONS MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, SUSPENSIONS

Figure 76. Les compositions ioniques (proportion moyenne interannuelle de chaque cation et anion en $\mu\text{eq.l}^{-1}$) des eaux du Niger à Banankoro (a) et du Bani à Douna (b).	188
Figure 77. Exemples de relations entre les éléments Sr, et Rb et les éléments majeurs (Ca et K) pour les 5 stations du bassin du Niger amont.	192
Figure 78. Exemples de relations entre Co et Th pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).	192
Figure 79. Relations entre La, Ce et pH pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).	192
Figure 80. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase dissoute (pondérées par les débits) du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).	194

Figure 81. Diagrammes de normalisation des concentrations moyennes en terres rares dissoutes du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985). La station de Sélingué n'est représentée que par un seul échantillon (04/08/97).	194
Figure 82. Exemple d'évolution conjointe des concentrations totales en élément dissous (TDS) et du débit sur le Niger à la station de Banankoro (de 1994 à 1997).	195
Figure 83. Exemple de relation entre les concentrations en éléments dissous (Ca et K) et le débit pour l'année hydrologique 1995/96, aux stations de Banankoro sur le Niger (a) et de Douna sur le Bani (b)	196
Figure 84. Evolution du rapport des concentrations X/Na avec X = K, Ca, Mg, sur les stations de Banankoro sur le Niger (a) et de Douna sur le Bani (b).	198
Figure 85. Relation entre les teneurs relatives en COP et le débit (a) ; relation entre COP et la quantité de particules filtrées (TS>0,45µm) (b), pour les 5 stations du bassin du Niger amont.	201
Figure 86. Relations entre La et Ce et La et pH pour les différentes rivières.	202
Figure 87. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire (pondérées par les débits) du bassin du Niger aux concetrastion de la sation de Banankoro sur le Niger.	204
Figure 88. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire (pondérées par les débits) du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985) (a) ; diagramme de normalisation réduit (b).	206
Figure 89. Exemple de relations entre Co et Th pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison des moyennes avec les valeurs des bassins du Congo et de l'Amazone (b).	207
Figure 90. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes en Terres Rares dans la phase particulaire du bassin du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).	208
Figure 91. Distribution entre les phases particulières et dissoutes obtenues pour la station de Banankoro (Niger)210	
Figure 92. Distribution entre les phases particulières et dissoutes obtenues pour la station de Douna (Bani) ...	210
Figure 93. Relation entre %S individuels de quelques éléments et la quantité de MES (mg.l-1) pour les 5 stations du bassin du Niger amont.	212
Figure 94. Exemple de relation entre la proportion de l'élément X dans la phase soluble et la concentration en MES pour Rb et La.	213
Figure 95. Facteurs d'enrichissement moyens obtenus pour les 5 stations du bassin du Niger amont (Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina sur le Niger ; Sélingué sur le Sankarani ; Douna sur le Bani).	217
Figure 96. Exemple d'histogramme de la distribution des facteurs d'enrichissement (FE) du groupe "jamais enrichi" (a) et du groupe "toujours enrichi" (b), pour la station de Banankoro sur le Niger (n=9).	218
Figure 97. Exemple d'histogramme de la distribution des facteurs d'enrichissement (FE) du groupe "parfois enrichi", modérément (a) et fortement (b) pour la station de Banankoro sur le Niger (n=9).	219
Figure 98. Histogramme de la distribution du facteur d'enrichissement de Pb sur l'ensemble des 5 stations (n=33).	220
Figure 99. Histogramme de la distribution du facteur d'enrichissement de Sb sur l'ensemble des 5 stations (n=27).	221
Figure 100. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Cr (n=33) et Ni (n=14) sur l'ensemble des 5 stations.	222
Figure 101. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Mn et Co l'ensemble des 5 stations.223	
Figure 102. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Cu et Zn sur l'ensemble des 5 stations.	224
Figure 103. Histogrammes des distributions du facteur d'enrichissement de Sr, sans les échantillons de très basses eaux (février, mars, avril) sur l'ensemble des 5 stations (n=28).	224
Figure 104. Relation entre les concentrations en Ca (ppm) et Sr (ppb) dans la phase dissoute sur les différents tributaires du bassin du Niger amont. Comparaison avec les rapports obtenus sur des terrains silicatés et sur la croûte continentale moyenne.	225

Figure 105. Relation entre la concentration totale en Th et la quantité de MES pour l'ensemble des 5 station amont.....	226
Figure 106. Exemple des relations entre la concentration totale en La et la quantité de MES (a), et entre le FE de La et la quantité de MES (b) sur l'ensemble des stations amont.....	226
Figure 107. Exemple des relations entre la concentration totale en Sr et la quantité de MES (a), et entre le FE de Sr et la quantité de MES (b) sur l'ensemble des stations amont.	227
Figure 108. Comparaison des facteurs d'enrichissement moyens obtenus pour les 2 stations du bassin du Niger amont proche de Katibougou (Banankoro, Koulikoro) et pour les eaux de pluies à la station de Katibougou (1km de Koulikoro).....	228
Figure 109. Diagramme ternaire des eaux du bassin du Niger amont (moyennes annuelles).....	229
Figure 110. Evolution des concentrations en Cl ⁻ avec la distance à l'océan pour les 5 stations du bassin du Niger amont (a) ; comparaison avec les bassins de l'Amazone et du Congo (b).	231
Figure 111. Diagramme de mélange avec les rapports molaires normalisés à Na individuels dans la phase dissoute (corrigé des apports atmosphériques océaniques) des 5 stations du bassin du Niger supérieur (années 1994 à 1997).	234
Figure 112. Diagramme de mélange avec les rapports molaires normalisés à Na moyens dans la phase dissoute (corrigé des apports atmosphériques océaniques) des 5 stations du bassin du Niger supérieur. Comparaison avec d'autres fleuves du globe.	234
Figure 113. Schématisation du bilan de masse de la silice à la base du profil d'altération.....	239
Figure 114. Relation entre le flux en éléments dissous dérivés des silicates (FTDS) et le flux des cations dérivés des silicates	241

CONCLUSION PARTIE II COMPARAISON DES TAUX D'EXPORTATION CHIMIQUE ET MÉCANIQUE SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER

Figure 115. Bilan global du transport sur le bassin amont du Niger. Répartition des exportations de matières dissoutes et particulaires vers le delta intérieur du Niger (moyenne interannuelle de 1992 à 1997).....	245
Figure 116. Schématisation des processus de formation du sol, lien avec la charge observée dans les fleuves.	246
Figure 117. Relation entre TDS sil et le transport spécifique de MES sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont de 1991 à 1997.	247
Figure 118. Bilan actuel de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur les bassins du Niger (a) et du Bani (b).	249

PARTIE III : LE delta intérieur du Niger

CHAPITRE VI. ELÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER

Figure 119. Le delta intérieur du Niger et ses axes d'écoulement principaux.	254
Figure 120. Données disponibles sur la capacité de piégeage des lacs de rives droite (d'après Brunet-Moret et al., 1986).	256
Figure 121. Schématisation d'une portion du delta amont - chenal principal, chenaux secondaires, berges, plaines d'inondation, mare,.....	257
Figure 122. Modèle graphique et éléments du réseau hydrographique du delta intérieur du Niger (d'après Poncet & Maïga, 1997- Communication personnelle).	258
Figure 123. Amortissement des hydrogrammes de l'amont vers l'aval pour l'année hydrologique 1992-93	262

Figure 124. Amortissement des hydrogrammes de l'amont vers l'aval pour l'année hydrologique 1994-95	262
Figure 125. Exemple d'application du modèle de propagation sur le bief Koulikoro-Ké-Macina - Temps de propagation en fonction de l'échelle à Koulikoro (d'après Lamagat et al., 1991).....	263
Figure 126. Relation entre les débits aval et amont sur le Bief Akka-Diré pour deux années à d'hydraulicité contrastées (période de crue).	265
Figure 127. Chronique des pertes en eau dans le delta intérieur du Niger sur la période 1951-1997.....	265
Figure 128. Relation entre les entrées et les pertes dans le delta intérieur du Niger (de 1955 à 1997).....	267
Figure 129. Pertes de volume en m3 entre les entrées (Ké-Macina+Douna) et Diré au pas de temps mensuel pour les années 1991 à 1997.	269
Figure 130. Moyennes interannuelles des pertes de volume en m3 dans le delta intérieur du Niger au pas de temps mensuel pour des années représentatives des périodes sèche et humide (d'après Olivry, 1995).	269
Figure 131. Cumul des pertes dans le delta intérieur du Niger au pas de temps mensuel pour les années 1991 à 1997 : phase de stockage et de destockage.	270
Figure 132. Comparaison des pertes mensuelles sur le delta amont (a) , sur le delta aval (b) et sur l'intégralité du delta (c) pour une année sèche (1991/92) et une année humide (1994/95).	271
Figure 133. Evolution mensuelle des pertes en eau (année 1994/95), des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le delta intérieur du Niger (d'après Olivry, 1995).	273
Figure 134. Exemple d'application du modèle Pertes / Evaporation dans le delta intérieur du Niger avec détermination du volume mensuel évaporé au maximum de l'inondation (tmax) (d'après Olivry, 1995).	277
Figure 135. Comparaison des hydrogrammes d'entrée (Ké-Macina+Douna) et de sortie (Diré) du delta intérieur du Niger pour deux années hydrologiques contrastées (1994/95 et 1992/93).....	279

CHAPITRE VIII. TRANSPORT ET DÉPÔTS DE SÉDIMENTS DANS LE DELTA INTÉRIEUR

Figure 136. Evolution spatiale des concentrations en MES au cours de deux missions de terrains réalisés en suivant la même masse d'eau. Mission du 5 au 13 novembre 1996 (a), Mission du 8 au 20 août 1997 (b).	284
Figure 137. Page suivante. Variation des concentrations en MES et des débits journaliers au cours du temps pour les années 1992/1993 à 1996/1997 aux stations principales à écoulements permanents du delta intérieur du Niger. (a) sortie du lac Débo à Akka sur l'Issa Ber (b) sortie du delta à Diré. (Page suivante).	285
Figure 138. Relation MES-débit à l'échelle mensuelle pour les stations principales du Niger dans le delta - Nantaka (a), Akka (b) et Diré (c) - et secondaires, Kara sur le Diaka (d), Awoye sur le Barra Issa (e) et Korientze sur le Koli-Koli (f).....	288
Figure 139. Exemple d'évolution de la relation MES/Débits vers l'aval sur quelques stations du Niger pour l'année 1994/95.	289
Figure 140. Relation MES/Débits au pas de temps hebdomadaires pour différents types d'années sur les stations à l'aval du lac Débo. (a) Akka, (b)Diré.	290
Figure 141. Relations entre les flux de MES et les volumes écoulés mensuels sur les deux stations principales à l'aval du lac Débo : Akka (a) et Diré (b).	293
Figure 142. Evolution des flux cumulés à Ké-Macina principale station à l'entrée du delta (a) et à Diré à la sortie du delta (b).	293
Figure 143. Evolution spatiale des flux de MES pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).	295
Figure 144. Evolution annuelle des pertes en sédiments dans l'ensemble du delta versus les flux de MES entrants (a); les pertes hydriques (b).....	296
Figure 145. Relations entre les pertes en eaux et en sédiments dans le delta amont (a) ; et dans le delta aval (b).	297
Figure 146. Variations mensuelles du bilan sorties-entrées des transports particuliers dans le delta central du Niger de 1992 à 1994.....	298

Figure 147. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta intérieur du Niger de 1992-1993 à 1996-1997.....	299
Figure 148. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta amont de 1992-1993 à 1996-1997.....	300
Figure 149. Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire dans le delta aval de 1992-1993 à 1996-1997.....	301

CHAPITRE IX. CHIMIE DES EAUX DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER : CATIONS ET ANIONS MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, MES

Figure 150. Diagramme circulaire représentant la proportion moyenne interannuelle de chaque cation et anion (en $\mu\text{eq.l}^{-1}$) pour les deux stations du delta intérieur du Niger, à Akka (a) et Diré (b).....	309
Figure 151. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase dissoute (pondérées par les débits) du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985).....	312
Figure 152. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes en terres rares dissoutes du bassin du Niger amont et du delta intérieur du Niger à la croûte continentale de Taylor et McLennan (1985). Les trois courbes inférieures correspondent aux trois stations du Niger amont.....	312
Figure 153. Exemple d'évolution conjointe des concentrations en TDS et du débit pour la station de Akka.	313
Figure 154. Evolution des concentrations totales en élément dissous (TDS) et du débit sur les deux stations principales du delta intérieur du Niger (stations d'Akka et de Diré), au cours de l'année hydrologique 1993-1994 (a) et 1994-95 (b).....	314
Figure 155. Exemple de relation entre la concentration totale en élément dissous (TDS) et le débit aux stations d'Akka et de Diré sur le delta intérieur du Niger pour l'année hydrologique 1993-1994 (a) et 1994-1995 (b), aux stations d'Akka et de Ké-Macina pour l'année hydrologique 1993-1994 (c) et 1994-1995 (d). La décroissance de type $C=aQb$ observée à Ké-Macina est figurée en pointillé.	315
Figure 156. Comparaison des évolutions des concentrations totales en élément dissous (TDS) et des débits au cours des années hydrologiques 1993-1994 (a) et 1994-1995 (b) pour le Niger à Ké-Macina (entrée du delta) et à Diré (sortie du delta). Temps de transfert de 15 jours.	317
Figure 157. Evolution des concentrations en cations majeurs et du débit au cours du temps aux stations d'Akka et Diré pour les années 1993-1994 et 1994-1995.	319
Figure 158. Evolution des concentrations bicarbonate, silice dissoute et du débit au cours du temps aux stations d'Akka et Diré pour les années 1993-1994 et 1994-1995.	320
Figure 159. Comparaison des relations $[K]/\text{Débits}$ pour l'année hydrologique 1994/95 sur le Niger à Ké-Macina (entrée du delta) et à Diré (sortie du delta).	321
Figure 160. Diagramme de normalisation des concentrations moyennes de la phase particulaire des stations A (du delta intérieur du Niger) aux concentrations des stations B.....	326
Figure 161. Relation entre les flux annuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur le delta intérieur du Niger, de 1991 à 1997.....	327
Figure 162. Relation entre les flux mensuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 2 stations principales du delta intérieur du Niger, de 1992 à 1995.	328
Figure 163. Exemple de relation entre les flux mensuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 2 stations principales du delta intérieur du Niger pour une année "sèche" (a) et une année "humide" (b). .	328
Figure 164. Evolution spatiale des flux hydriques pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).....	330
Figure 165. Evolution spatiale des flux de MES pour l'année 1993/94 (a) et l'année 1994/95 (b).	331
Figure 166. Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport dissous dans le delta intérieur du Niger de 1992 à 1996.....	332

Figure 167 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO ₃ , Na, Ca, Mg, K) sur le delta intérieur du Niger de 1992 à 1996.	334
Figure 168 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO ₃ , Na, Ca, Mg, K) sur le delta amont de 1992 à 1996.....	334
Figure 169 : Variations mensuelles du bilan sorties-entrées du transport des éléments majeurs (HCO ₃ , Na, Ca, Mg, K) sur le delta aval de 1992 à 1996.	334
Figure 170. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le delta intérieur du Niger pour deux années contrastées entre les entrées (Ké-Macina +Douna) et la sortie du delta (Diré).	338
Figure 171. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le delta intérieur du Niger pour deux années contrastées ; delta amont (a) et delta aval (b).	339
Figure 172. Schématisation des processus pouvant affecter les eaux transitant par le delta intérieur du Niger (conséquences du débordement dans le lit majeur).	343
Figure 173. Schématisation des processus pouvant affecter les eaux transitant par le delta intérieur du Niger (conséquences du débordement dans le lit majeur).	346

Table des Tableaux

PARTIE I : Milieu naturel et méthodes

CHAPITRE I. LE MILIEU NATUREL ET HUMAIN

Tableau 1. Répartition des altitudes pour le bassin du Niger à Koulikoro et celui du Bani à Sofara (d'après Brunet-Moret et al., 1986 et modifié).....	8
Tableau 2. Ordre de solubilité des roches et des minéraux principaux (d'après Stallard, 1988 ; Meybeck, 1986, dans Meybeck et al., 1996b).....	19
Tableau 3. Répartition des classes lithologiques par bassin versant (en %), delta intérieur du Niger non compris.	20
Tableau 4. Exemple de caractéristiques hydrochimiques moyennes de différents aquifères rencontrés au Mali (d'après Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).....	25
Tableau 5. La succession des types de climat du sud au nord (d'après Maley, 1982 ; l'Hôte & Mahé, 1996; et modifié).....	28
Tableau 6. Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger (d'après Olivry et al., 1995).	29
Tableau 7. Industries susceptibles de créer des pollutions sur Bamako (IWACO, 1996).....	48

CHAPITRE II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, ACQUISITION DES DONNÉES, MATÉRIEL ET MÉTHODES

Tableau 8. Positionnement des sites d'observations représentatifs des principaux biefs observés.	55
Tableau 9. Distance partielle entre stations (km).	59
Tableau 10. Caractéristiques des principales stations du Réseau de surveillance périodique des MES et des matières dissoutes (1990-1998). (Nombre de jaugeages de débit solides (Jaug) et nombre d'échantillons analysés (Dissous : analyses chimiques ; MES : Matières en Suspension)).	61
Tableau 11. Analyse des résultats analytiques obtenus pour les échantillons du réseau d'observation des éléments majeurs dissous.	64
Tableau 12. Distributions des Coefficients de variation des concentrations en MES dans la section de jaugeage pour les différentes stations du réseau d'observation de 1990 à 1997.	67
Tableau 13. Séries d'analyses effectuées pour traiter l'ensemble des échantillons.....	81
Tableau 14. Blanc d'attaque, moyenne des concentrations et valeurs certifiées de SLRS-3 (Résultats en ppb sur l'ensemble de séries d'analyses).	82

PARTIE II : Les apports du bassin amont

CHAPITRE III. ELÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPÉRIEUR ET DU BANI

Tableau 15. Analyse fréquentielle de quelques paramètres hydrologiques observés sur le bassin du Niger (modules et maximums) (d'après Olivry et al., 1995a)	91
Tableau 16. Baisse continue de la pluviométrie et des écoulements depuis les quatre dernières décennies à Koulikoro sur le Niger (a) et à Douna sur le Bani (b) (Q : Débit ; P : Pluie ; Le : Lambe écoulée ; Ke : Coefficient d'écoulement ; Ie : Indice d'écoulement ; Ip : Indice pluviométrique ; DE : Déficit d'écoulement)	100
Tableau 17. Comparaison de la saison 199-1995 avec la moyenne des années de pluviométrie équivalente (d'après Olivry et al., 1998).....	102
Tableau 18. Caractéristiques des stations étudiées pour la période 1991-1998	105
Tableau 19. Quelques caractéristiques des hydrogrammes de crue aux stations de Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina et Douna pour la période 1991-98: débit annuel, débit de pointe (journalier), minimum journalier, V3mois=pourcentage du volume mensuel écoulé sur les 3 mois d'étales (Août, Septembre et Octobre). Quelques données sur l'année 1998-1999 sont également données.....	107
Tableau 20. Minimum, Maximum et Nombre de jours où le débit dépasse la hauteur de 5 et 7 mètres.	109

CHAPITRE IV. RÉGIME DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION SUR LE BASSIN AMONT DU FLEUVE NIGER

Tableau 21. Quelques variables statistiques de distribution des valeurs ponctuelles de MES sur les stations du bassin amont du Niger. (nombre d'échantillons analysés (N) ; concentration médiane ; coefficient de variation (CV) ; concentrations minimum et maximum ; quartiles ; date d'observation du maximum et du minimum de concentration)	113
Tableau 22 : Valeurs des paramètres des différents ajustements du modèle empirique. (les paramètres a1 , b1 , a2 et b2 correspondent à des ajustements dans lesquels les concentrations, les débits et les volumes ruisselés sont respectivement exprimés en mg.l ⁻¹ , en m ³ s ⁻¹ et en 10 ⁹ m ³).....	130
Tableau 23. Qualité des résultats obtenus avec le modèle empirique C(Q) pour les 4 stations situées sur le bassin du Niger Amont et du Bani. Critère de Nash moyen obtenu pour l'échantillon constitué des 6 années ayant servi au calage du modèle. Critère de Nash obtenu pour chacune des autres années utilisées pour la validation du modèle.....	130
Tableau 24 : Valeurs des paramètres des différents ajustements du modèle empirique. (les valeurs de ces différents paramètres correspondent à un modèle dans lequel les unités du débit hebdomadaire moyen, des concentrations et des flux hebdomadaires sont respectivement exprimés en m ³ /s, en mg/l et en tonnes).137	137
Tableau 25. Qualité des résultats obtenus avec le modèle conceptuel C(Q) pour les 4 stations situées sur le bassin du Niger Amont et du Bani. Critère de Nash moyen obtenu pour l'échantillon constitué des 6 années ayant servi au calage du modèle. Critère de Nash obtenu pour chacune des autres années utilisée pour la validation du modèle.....	138
Tableau 26. Flux annuels de matières en suspension sur le Niger amont (Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina) et le Bani (Douna). (Ts : Transport spécifique).....	143
Tableau 27, Ecart entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Banankoro.	146

Tableau 28. Ecart entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Koulikoro.....	146
Tableau 29. Ecart entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Ké-Macina.....	147
Tableau 30. Ecart entre les flux annuels observés et les flux annuels calculés (résultats issus de 3 « modèles ») pour la station de Douna (Bani).....	147
Tableau 31. Valeurs moyennes interannuelles (1991-1998) des débits, des concentrations et des flux sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont.....	149

CHAPITRE V. CHIMIE DES PRÉCIPITATIONS EN ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE ÉLÉMENTS MAJEURS ET TRACES

Tableau 32. Concentrations moyennes en $\mu\text{g.l}^{-1}$ des eaux de pluies recueillies à Katibougou (Mali) de juin à octobre 1997.....	160
Tableau 33. Concentrations moyennes en éléments (en $\mu\text{g.l}^{-1}$) majeurs dans la phase dissoute des pluies recueillies à Katibougou (Mali). Comparaison avec deux autres sites de l'Afrique de l'Ouest.....	161
Tableau 34. Concentrations moyennes en éléments traces dans la phase totale des pluies (en $\mu\text{g.l}^{-1}$). Comparaison avec deux autres sites de l'Afrique de l'Ouest.....	162
Tableau 35. Facteur d'enrichissement ($(X)/[\text{Fe}]$) dans les pluies à Katibougou au Mali (N=19 et H = 390.3 mm).164	
Tableau 36. Matrice de corrélation entre les éléments majeurs dans la phase dissoute (N=43).....	170
Tableau 37. Matrice de corrélation entre éléments majeurs et traces dans la phase totale (N=19).....	173
Tableau 38. Contribution de la source marine aux concentrations moyennes pondérées par les hauteurs d'eau en % dans la phase dissoute des pluies recueillies à Katibougou (n=43).....	176
Tableau 39. Coefficients de corrélation supérieurs à 0.5 pour Cr, Zn et Pb.....	179
Tableau 40. Flux moyens d'éléments majeurs ($\text{mg.m}^{-2}\text{.an}^{-1}$) dans la phase dissoute des eaux de pluies recueillies à la station de Katibougou (Mali). Estimations des retombées totales sur le bassin versant du Niger (en 10^3t.an^{-1}).....	180
Tableau 41. Flux (en $\text{mg.m}^{-2}\text{.an}^{-1}$) dans la phase totale (N=19 et H = 390.3 mm) et estimation des taux de Dépôts à partir des stations de Lamto et Kollo.....	182

CHAPITRE VI. CHIMIE DES EAUX DU NIGER AMONT : CATIONS ET ANIONS MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, SUSPENSIONS

Tableau 42. Composition chimique moyenne des eaux du Niger et de ses deux affluents principaux au Mali. 186	
Tableau 43. concentrations moyennes annuelles en TDS sur d'autres rivières de l'Afrique de l'Ouest.	187
Tableau 44. Comparaison des concentrations en éléments traces (ppb) dans la phase dissoute du bassin du Niger avec d'autre hydrosystèmes tropicaux (Congo et Amazone).	190
Tableau 45. Composition minéralogique semi-quantitative des sédiments en suspension (d'après Gourcy, 1994).199	
Tableau 46. Concentrations en COP et en particule en suspensions ($>0.45\mu\text{m}$) sur l'ensemble des 5 stations du bassin du Niger amont. Différence entre hautes eaux et basses eaux.....	200
Tableau 47. Comparaison des concentrations en éléments traces (ppm) dans la phase particulaire du bassin du Niger avec d'autre hydrosystèmes tropicaux (Congo et Amazone).	203
Tableau 48. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Banankoro (Niger).	215
Tableau 49. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Koulikoro (Niger)	215

Tableau 50. Facteurs d'enrichissement moyens et paramètres à la station de Ké-Macina (Niger)	216
Tableau 51. Facteurs d'enrichissement moyens à la station de Sélingué (Sankarani)	216
Tableau 52. Facteurs d'enrichissement moyens et paramètres statistiques à la station de Douna (Bani)	217
Tableau 53. Classification des éléments en groupes "enrichis", "non enrichis" et "parfois enrichis" pour les 5 stations du bassin amont.	219
Tableau 54. Classement des éléments métalliques par ordre d'enrichissement croissant dans les eaux des 5 stations du bassin amont du Niger. (Nombre d'analyse).....	223
Tableau 55. Résultats du rapport Re pour 4 stations du bassin du Niger Amont.....	237
Tableau 56. Composition chimique de la roche moyenne par bassin versant (en % d'oxydes).	238
Tableau 57. Estimations des vitesses de progression du front d'altération pour l'ensemble des stations du bassin amont du Niger et des années d'observations.	240
Tableau 58. Flux de TDS et de cations dérivés des silicates pour l'ensemble des stations du bassin amont du Niger et des années d'observations (corrégés des apports océaniques).....	241

CONCLUSION PARTIE II. COMPARAISON DES TAUX D'EXPORTATION CHIMIQUE ET MÉCANIQUE SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER

Tableau 59. Résultats du calcul des vitesses de dénudation en mm pour 1000 ans.....	248
---	-----

PARTIE III : LE delta intérieur du Niger

CHAPITRE VI. ELÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER

Tableau 60. Dates d'apparition et décalage des maximums de crue entre différentes stations du delta pour la période d'étude.	261
Tableau 61. Variation des volumes et des pertes en eau de Ké-Macina à Diré, sur la période d'étude des flux de matières (1991 à 1997)	266
Tableau 62. Modules interannuels (1992-1997) aux principales stations du delta intérieur du Niger.....	268
Tableau 63. Précipitations et évaporation sur nappe d'eau libre dans le Delta Central du Niger en période humide (H) et sèche (S) (d'après Olivry, 1995).	273
Tableau 64. Détermination des superficies maximales d'inondation calculées suivant le modèle graphique des pertes mensuelles (1), et les modèles statistiques (2 et 3) pour les années de 1991 à 1997.....	278

CHAPITRE VIII. TRANSPORT ET DÉPÔTS DE SÉDIMENTS DANS LE DELTA INTÉRIEUR

Tableau 65. Quelques variables statistiques de distribution des valeurs ponctuelles de MES (médiane, minimum, maximum,...) sur les stations du delta.....	283
Tableau 66. Flux de matières en suspension, concentrations et débit moyens annuels sur les stations principales du delta intérieur du Niger (Akka et Diré).	292

Tableau 67. Bilan des flux de matières particulaires dans le delta intérieur du Niger du Niger en milliers de tonnes. (1) Somme des flux des deux entrées (Ké-Macina et Douna) ; (2) Somme des flux des trois émissaires sortant du lac Débo (Akka, Awoye et Korientze) ; (3) Flux à la sortie unique du delta (Diré).294

Tableau 68. Quelques exemples de taux de sédimentation contemporains moyens dans des plaines d'inondations (d'après Simm, 1995). 305

CHAPITRE IX. CHIMIE DES EAUX DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER : CATIONS ET ANIONS MAJEURS, ÉLÉMENTS TRACES, MES

Tableau 69. Evolution de la composition chimique moyenne des eaux du Niger et du Bani dans sa traversée du delta intérieur. 308

Tableau 70. Concentration moyennes pondérées par les débits (ppb) des éléments traces dans la phase dissoute pour 3 stations du delta intérieur du Niger : Sensé (Niger), Akka (Issa Ber), et Diré (Niger)- statistiques élémentaires. 311

Tableau 71. Composition minéralogique semi-quantitative des sédiments en suspension (d'après Gourcy, 1994).322

Tableau 72. Concentrations en COP et en particules en suspension (>0.45µm) sur l'ensemble des prélèvements réalisés sur le delta intérieur du Niger. Différence entre hautes eaux et basses eaux..... 323

Tableau 73. Comparaison des concentrations moyennes pondérées par les débits (ppm) des éléments traces dans la phase particulaire du bassin amont et du delta intérieur du Niger. 325

Tableau 74. Flux annuels de matières dissoutes sur le delta intérieur du Niger (mai à avril)..... 327

Tableau 75. Bilan des flux hydriques et de matières dissoutes totales dans le delta intérieur du Niger. 329

Tableau 76. Bilan des flux de matières dissoutes élément par élément dans le delta intérieur du Niger en milliers de tonnes par an. 334

Bibliographie

- AL DROUBI, A. (1976) : Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse No.146, Université Louis Pasteur, Strasbourg - France.
- ALBERGEL, J., CASENAVE, J., VALENTIN, C. (1986) : Modélisation du ruissellement en zone soudano-sahélienne : simulation de pluie et cartographie des états de surface. In : *Journées hydrologiques de l'ORSTOM 17-19 septembre 1985*, Colloques et séminaires, Montpellier, pp. 24-35.
- ALLISON M. A., KUEHL S. A., MARTIN T. C., HASSAN A. (1998) : Importance of flood-plain sedimentation for river sediment budgets and terrigenous input to the oceans : Insights from the Brahmaputra-Jamuna River. *Geology*, Vol. 26 , No 2, pp. 175 - 178.
- AMIOTTE-SUCHET P., PROBST J. L. (1995) : A global model for present-day atmospheric soil CO consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO). *Tellus. Series B, Chemical and physical meteorology*, Vol. 47, No. 1-2, pp. 273 - 280.
- AMOROS, C., GIBERT, J., GREENWOOD, M. (1993) : Interactions entre unités de l'hydrosystème fluvial. in *Hydrosystèmes fluviaux*, Chap. 9. Amoros, C., Petts, G.E., Collection d'écologie, No.24, Ed. Masson, Paris, pp. 169-199.
- ANDREA, M.O., ATLAS, E., CACHIER, H., COFER III, W.R., HARRIS, G.W., HEALS, G., KOPPMANN, R., LACAUX, J.P., WARD, D.E. (1996) : Trace gas and aerosol emissions from savanna fires. In : *Global biomass burning*, edited by J.S. Levine, MIT Press, Cambridge, pp. 278-295.
- APPELO C. A. J., POSTMA D. (1993) : Geochemistry, Groundwater & pollution. A.A. Balkema ed., 536p.
- ARTAXO, P., STORMS, H., BRUYNSEELS, F., VAN GRIEKEN, R., MAENHAUT, W. (1988) : Composition and sources of aerosols from the Amazon bassin. *Journal of. geophysical. Research.* 93, pp. 1605-1615.
- ASHBRIDGE, D. (1995) : Processes of River Bank erosion and their contribution to the suspended sediment load of the river Culm, Devon. *Sediment and water quality in river catchments*, Ed. by Foster, Gurnell et Webb. Wiley and sons éd., pp. 229-245.
- ATTEIA, O. (1994) : Major and trace elements in precipitation on western Switzerland. *Atmospheric Environment*, Vol. 28, No. 22, pp. 3617-3624.
- AUJOUS, D. (1993) : La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. Ed. Lavoisier (Technique & documentation), Paris. 212p.
- BALLAND, P. (1983) : Méthodologie de quantification des flux de nutriments en rivière. In : *Dissolved Loads of Rivers and Surface Quantity/Quality Relationships, Proceedings of the Hamburg Symposium*, August 1983, IAHS, No.141, pp.333-345.
- BAMBA, F., DIABATE M., MAHE G. & DIARRA M. (1996a). Rainfall and runoff decrease of five river bassins of the tropical upstream part of the Niger river over the period 1951-1989. In : *Global hydrological change*, EGS XXIth Roald L.A. (Ed.) : Gen. Ass., La Haye Pays Bas, 6-10 mai 1996, 16 p.
- BAMBA, F., MAHE, G., BRICQUET, J.P. et OLIVRY, J.C. (1996b) : Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. In : *Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique* . XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM (Montpellier, 10-11 octobre 1996), 21p.

- BANQUE MONDIALE (1986) : Sols et eaux, acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. Acte du Séminaire tenu à la banque mondiale (15 et 16 mai 1986). 184 p.
- BARRAL, J.P. (1997) : Evolution des sols sous irrigation à l'Office du Niger. La gestion de l'eau sur les périmètres irrigués à l'Office du Niger. Rapport d'activités 96-97. Institut d'économie rurale. Pôle systèmes irrigués. CORAF. FAC 93014800. Mali, 76p.
- BARRAL, J.P., DICKO, M.K. (1996) : La dégradation des sols à l'Office du Niger. Rapport d'activités 96-97. Institut d'économie rurale. Pôle systèmes irrigués. CORAF. FAC 93014800. Mali, 33p.+annexes.
- BAZILE, D. (1998) : La gestion des espèces ligneuses pour l'approvisionnement en énergie des populations. Cas de la zone soudanienne du Mali. Doctorat de Géographie-Aménagement, Université de Toulouse le Mirail, 2 volumes, 452p.
- BENECH, V., QUENSIERE, J., VIDY, G. (1982) : Hydrologie et physico-chimie des eaux de la plaine d'inondation du Nord-Cameroun. *Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie*, Vol. 19, No 1, pp. 15-35.
- BERNER, E., BERNER, R. (1987) : The global water cycle : geochemistry and environment. Prentice-Hall, Englewood Cliffs (USA), 397 p.
- BERTRAND R., KABIROU M., N'DIAYE BASSIROU K. (1994) : L'alcalinisation/ sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. *Sécheresse*, Vol.5, pp. 161-171.
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L. (1993). - Modélisation du transport solide en réseau d'assainissement unitaire : le modèle HYPOCRAS. *La Houille Blanche*. No.4, pp. 243-255.
- BESSELES, B. (1977) : Géologie de l'Afrique. Le craton ouest-africain. mémoire BRGM, 88, 402p.
- BILLON B. (1968) : Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologique*, Vol.V, No.2, pp.3-14.
- BINEY, C., AMUZU, A.T., CALAMARI, D., KABA, N., MBOME, I.L., NAEVE, H., OCHUMBA, P.B.P., OSIBANJO, O., RADEGONDE, V., SAAD, M.A.H. (1994) : Review of heavy metals in the african aquatic environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, Vol. 28, pp. 134-159.
- BLANCHOT, A. (1958) : Bulletin du service de géologie et de prospection minière, Dakar, Vol. 27., 280p.
- BLANCK J.P, TRICART J.L.F. (1990) : Some effects of neotectonics on the landforms in the region of the Central Delta of River Niger (Mali). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, Vol. 310, Série II, pp. 309-313.
- BLANCK, J.P., LUTZ, G. (1990) : Rapport de mission au Mali : évaluation des ressources en terres et en eaux du delta central du Niger, du 26 novembre au 14 décembre 1989. In : ULP, Strasbourg, multigr., ill., tabl., graph. 66 p.
- BLEICH, K.E., HERRMANN, L., PAPENFUSS, K.H., STAHR, K. (1994) : Dust influx into the soils of the sahélian zone in Niger : its composition and identification. Proc. of intern. Symposium 'Wind erosion in West Africa: the problems and its control's. Ed. Buerkert, Allison, von Oppen. Univ. of Hohenheim, Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, pp. 311-317.
- BLUTH G. J. S., KUMP L. R. (1994) : Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 58, No.10, pp. 2341-2359.
- BOBROVITSKAYA, N.N., ZUBKOVA, K.M. (1998) : Improved methodology for the computation of normal annual yield of suspended sediments from rivers. In : Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basins as related to natural and man-made changes. IHP-V/Technical Documents in Hydrology/No.10. pp. 92-103.
- BOCQUIER, G. (1973) : Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad : interprétation biogéodynamique. Mémoires ORSTOM No. 62, 362 p.
- BOEGLIN, J.-L., PROBST, J.L. (1996) : Transports fluviaux de matières dissoutes et particulaires sur un bassin versant en région tropicale : le bassin amont du Niger au cours de la période 1990-1993. *Sciences Géologiques Bulletin*, Vol. 49, No 1-4, pp. 25-45.

- BOEGLIN, J.-L., MORTATTI, J., TARDY, Y. (1997) : Erosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali) : bilan géochimique de l'altération en milieu tropical. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*. Série 2a : Sciences de la Terre et des Planètes, Vol. 325, No 3, pp. 185-191.
- BOEGLIN, J.L., TARDY, Y. (1997) : Erosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali) : découpage d'hydrogramme en quatre écoulements. *comptes-rendus de l'Académie des Sciences*. Série 2a : Sciences de la Terre et des Planètes, Vol. 325, No 2, pp.125-131.
- BOEGLIN J.-L., PROBST J.-L. (1998) : Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption in a tropical lateritic environment : the upper Niger basin. *Chemical geology*, Vol. 148, No. 3-4, pp. 137-156.
- BONNEFOY, A. (1998) : Impact des intrants agricoles sur la qualité des eaux en zone cotonnière du sud Mali. Institut Universitaire Professionnalisé 'Environnement, technologie et Société', 25p.+annexes.
- BRAVARD, J.P., PETIT, F. (1997) : Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Ed. Armand Colin, 222p.
- BREWER, P.G. (1975) : Minor element in sea water. *Chemical oceanography*, Vol.1, 2nd ed., Edited by J.P. Riley and G. Skirrow, Academic, Orlando, pp. 415-496.
- BRICQUET J.P., MAHE G., BAMBA F. et OLIVRY J.C. (1995) : Changements climatiques récents et modifications du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In : *L'Hydrologie Tropicale. Géoscience et outil pour le développement* (Colloque J. Rodier. 2-3 mai 1995), AISH, Publ. 238, pp.157-166.
- BRICQUET J.P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M. & OLIVRY J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'eau*, Vol.3, pp.321-337.
- BRUNET - MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P. et MOLINIER M. (1986) : Monographie hydrologique du fleuve Niger. *Coll. Monog. Hydrol.* No. 8, ORSTOM, Paris. Tome I : Niger supérieur 396 p., Tome II Cuvette Lacustre et Niger moyen 506 p.
- BRUNET R.C., GAZELLE F. (1995) : Alternance des phénomènes d'érosion et de rétention de la matière dans la zone inondable de l'Adour au cours d'une saison hydrologique. *Acta Oecologica*, Vol. 16, n.3, pp. 331-349.
- BUJON, B. (1988) : Prédiction des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie. Le modèle FLUPOL. *La Houille Blanche*. No.1, pp. 11-23.
- BULL, L.J. (1997) : Relative velocities of discharge and sediment waves for River Severn, UK. *Hydrological Science*. Vol.42, No.5, pp. 649-661.
- BURMAN, R., POCHOP, L.O. (1994) : Evaporation, evapotranspiration and climatic data. *Developments in Atmospheric Science*, Vol. 22, Ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-10.
- CARBONNEL, J.P., HUBERT, P. (1992) : Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne : remise en cause de la stationnarité des séries. IN : *L'aridité : une contrainte développement : caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés* Source. Le Floch, E. (ed.), Grouzis, Michel (ed.), Cornet, Antoine (ed.), Bille, Jean-Claude (ed.), ORSTOM, Paris, pp. 37-51.
- CARIGNAN, R., KALFF, J. (1980) : Phosphorus sources for aquatic weeds : water or sediments ?. *Science*, No. 207, pp. 987-989.
- CARMOUZE, J.P. (1976) : La régulation hydrogéochimique du lac Tchad : Contribution à l'analyse biogéodynamique d'un système lacustre endoreïque en milieu continental cristallin. ORSTOM, *Travaux et Documents*, No 58, 42p.
- CARRE, P. (1972) : Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie*, Vol. 9, No 1, pp.19-45.
- CASENAVE A, VALENTIN C. (1989) : Les états de surface dans la zone sahéenne - influence sur l'infiltration. *Collection Didactique*, ORSTOM éd., 229p.
- CENSIER, C., OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P. : (1995) : Les apports détritiques terrigènes dans la cuvette lacustre du Niger entre Mopti et Kona (Mali). In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J.

- Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp. 305-315.
- CHAMARD, P., COUREL, M.F., ADESIR-SCHILLING, M. (1997) : L'inondation des plaines du delta intérieur du Niger (Mali). Tentatives de contrôle : la réalité et les risques. *Sécheresse*, Vol. 8, No.3, pp.151-156.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D., MAYS, L. (1988) : Applied Hydrology. Ed. McGRAW-HILL. 571p.
- CIEH-BRGM (1976) : Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau souterraine de l'Afrique soudano-sahélienne. 76AGE009. Comité Interafricain d'Etudes Hydraulique. Ouagadougou. Burkina Faso & BRGM - Agence d'études de Géologie appliquée à l'étranger. Orléans. France, pp. 49-62.
- CLARK, I., ABDOURAHAMANE, I., BERTRAND, J.J. (1997) : Caractérisation des zones potentielles de déflation dans onze stations en Afrique au Sud du Sahara. *Sécheresse*, No.4, Vol.8, pp. 227-239.
- COLLIGNON, B. (1994) : Impact des activités humaines sur les ressources en eau souterraine en Afrique sahélienne et soudanienne. In : Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale. Presses Universitaires de Bordeaux, Talence No 13, pp.11-26.
- COLOMBANI, J. (1967) : Contribution a la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. *Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie*, Vol. 4, No 2, pp. 27-36.
- COUDE-GAUSSSEN G., ROGNON P. (1983) : Les poussières sahariennes. *La Recherche*, Vol. 14, No.147, pp.1050-1061.
- COULIBALY, A., DERLON, J.P. (1995) : Pollution des eaux du fleuve Banifing par les intrants agricoles chimiques. Rapport Principal. CMDT (Compagnie Malienne pour les Développement des Textiles), 15p.+annexes.
- CROZAT, G. (1979) : Sur l'émission d'un aérosol riche en potassium par la forêt tropicale. *Tellus* 31, pp. 52-57.
- CUNGE, J.A., HOLLY, F.M., VERWEY, A. (1980) : Practicle aspects of computational River Hydraulics. Monographs and surveys in Water Ressources Engineering, Vol. 3, 420 p.
- DANTE, Y.N.T. (1994) : Etude des problèmes d'environnement dans le district de Bamako (Mali). Service de la Coopération canadienne. CST-94-15. Projet 608-14342.
- DANTE, Y.N.T. (1995) : Description des acteurs concernés par le devenir du fleuve Niger au Mali sur les problèmes d'environnement. Projet RAF/95/G45/GEF/PDF. Assistance Préparatoire sur le fleuve Niger ONU-DADSG- PNUD, 39p.
- DAVIS, J., KELLER, H. (1983) : Dissolved load in streams and rivers : discharge and seasonally related variations. In : *Dissolved loads of rivers and surface water quantity/quality relationships (Proceedings of the Hamburg Symposium)*. IASH Publ. No.141, pp.79-89.
- DE VRIES, A., KLAVERS, H.C. (1994) : Riverine fluxes of pollutants : monitoring strategy first, calculation methods second. *European water pollution control*. Vol. 4, No.2, pp. 12-17.
- DEDKOV, A.P., MOZZHERIN, V.T. (1992) : Erosion and sediment yield in mountain areas of the world. In : *Erosion, debris and flows and environment in mountain regions. Proc. Chengdu Symp.*, July 1992. Ed. by Walling, Davies & Hasholt. IAHS Publ. No.209, pp. 29-36.
- DEDKOV, A.P., MOZZHERIN, V.T. (1996) : Erosion and sediment yield on the earth. in : *Erosion and sediment Yield : global and regional perspectives. Proc. of the Exeter Symposium*, July 1996. IAHS Publ. No.236, pp. 29-33.
- DEJOUX, C. (1988) : La pollution des eaux continentales africaines : expérience acquise, situation actuelle et perspectives. *Travaux et Documents*, No 213, Ed. ORSTOM, Paris 513p
- DERRUEAU M. (1996) : Les formes du relief terrestre. Notions de géomorphologie. Septième édition. Armand Colin/Masson, Paris, 1969, 1996. 118 p.

- DESCONNETS, J.C., TAUPIN, J.D., LABEL, T., LEDUC, C. (1997) : Hydrology of the HAPEX-Sahel central super-site : surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. *Journal of Hydrology*, Vol. 188/189, pp.155-178.
- DIARRA, A., SOUMAGUEL, A. (1997) : Influence du barrage de Sélingué sur le régime hydrologique du fleuve Niger. In : Sustainability of water Resources under increasing Uncertainty (Proceeding of the Rabat Symposium, April 1997), AISG No 240, pp.277-286.
- DICKINSON W.T. (1981) : Accuracy and precision of suspended sediment load. In : *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Florence, june 1981. IAHS Publ. 133, pp. 195-202.
- DREES L. R., MANU A., WILDING L. P. (1993) : Characteristics of aeolian dusts in Niger, West Africa. *Geoderma*, Vol. 59 , No.1-4 , pp. 213 - 233.
- DREVER, J.I. (1982) : The chemistry of natural waters. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-hall, 388pp.
- DROUX, J.P. (1999) : Hydrologie et flux de matières particulaires et dissoutes sur petits bassins versants du bassin du fleuve Niger au Mali" . Bassins du Dounfing, de Djitiko et de Belekoni. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur- STRASBOURG I- Mention géographie, soutenance le 1/07/1999.
- DROUX, J.P., MIETTON, M., OLIVRY, J.C. (1997) Transport de matières en suspension sur petits bassins versants au Mali : influences des surfaces cultivées. In: *Human Impact on Erosion and sedimentation*, IAHS Publ., No. 245.pp.57-64.
- DUCE, R.A., HOFFMAN, G.L., ZOLLER, W.H. (1975) : Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites-pollution or natural ?. *Science* 187, pp. 339-342.
- DUNNE, T., MERTES, L. A. K., MEADE, R. H., RICHEY, J. E., FORSBERG, B. R. (1998) : Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil. Geological Society of America bulletin, Vol. 110 , No 4 , pp.450 - 467.
- DUPRE, B., GAILLARDET, J., ROUSSEAU, D., ALLEGRE, J.C. (1996) : Major and trace elements of river-borne material : The Congo Basin. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 60, No. 8, pp. 1301-1321.
- DURAND, P., NEAL, C., LELONG, F. (1992) : Anthropogenic and natural contributions to the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes national park (Mont Lozère, Southern France). *Journal of Hydrology*, Vol. 130, No 1-4, pp.71 - 85.
- EINSTEIN, H.A. (1943) : Formulas for the transportation of bedload. *J. of Hydraul. Div. ASCE* 107, pp. 561-597.
- EVANS, C. & DAVIES, T. D. (1998) : Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research*, Vol. 34 , No 1, pp. 129 - 137.
- FERGUSON, R.I. (1986) : River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*. 22, pp. 74-76.
- FONTES J.Ch., ANDREWS J.N., EDMUNDS W.M., GUERRE A., TRAVI Y. (1991) : Paleorecharge by the Niger River (Mali) Deduced From Groundwater Geochemistry. *Water Resources Research*, Vol.27, No.2, pp.199-214.
- FOUCAULT, A., RAOULT, J.F. (1995) : Dictionnaire de géologie. 4^{ème} édition, MASSON. 321p.
- FOURNIER, A. (1990) : Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest : variation selon un gradient de sécheresse. Th. Sci. Nat., Université de Paris 6, 496 p.
- FREYDIER (1997) : Chimie des précipitations en Afrique intertropicale : cations et anions majeurs, éléments traces et acides organiques. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Soutenue le 19 Décembre 1997. 233p.
- GAC, J.Y. (1980) : Géochimie du bassin du lac Tchad : Bilan de l'altération de l'érosion et de la sédimentation. Travaux et Documents ORSTOM, No 123, 252 p.

- GAC J.Y. (1986) : Le fleuve Sénégal - I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulières à l'embouchure. *Sciences Géologique Bulletin*, Vol.39, No.1, pp.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 l'Ouham (Republique Centrafricaine). *Cahiers ORSTOM. Série Pedologie* , Vol. 5, No 1, pp. 83-96.
- GAC, J.Y., KANE, A. (1986). - Le fleuve Sénégal : II. Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sciences Géologique Bulletin.*, Vol. 39, No.2, pp. 151-172.
- GAC J.Y., ORANGE D. (1990) :Cadre naturel du haut bassin-versant du fleuve Sénégal. Rapp. ORSTOM Dakar. Projet CEE/EQUESEN No.TS-2-0-198-F-EDB, 150 p.
- GAILLARDET J. (1995) : Géochimie comparée de deux grands systèmes fluviaux tropicaux : le Congo et l'Amazonie. Géochimie du Bore dans les coraux. Erosion des continents et pH de l'Océan. Thèse de l'Université de Paris XII Soutenue le 7 Juillet 1995, 427p.
- GAILLARDET, J., DUPRE, B., ALLEGRE, J.C. (1995) : A global geochemical mass budget applied to the Congo Basin rivers : Erosion rates and continental crust composition. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 17, pp. 3469-3485.
- GAILLARDET, J., DUPRE, B., ALLEGRE, C. J., NEGREL, P. (1997) : Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical geology*, Vol. 142, No.3-4, pp. 141-173.
- GAILLARDET J., DUPRE B., LOUVAT P., ALLEGRE C. J. (1998) : Global silicate weathering and CO₂ consumption deduced from chemistry of large rivers (soumis à. *Chemical geology*).
- GALLAIS J. (1967) : Le delta intérieur du Niger et ses bordures. Etude morphologique. Mémoires et documents. Centre de recherches et documentation cartographiques et géographiques. Paris, CNRS, 153p.
- GALLAIS, (1979) : Etude morphologique au niveau du lac Débo. In : *Détermination des causes des anomalies de la crue du Niger*. Rapport ORSTOM, Paris 79 p. pp38-46.
- GALY, C., LACAUX, C., MODI, A.I. (1998) : Precipitation chemistry in the Sahelian savanna of Niger, Africa. *Journal of atmospheric chemistry*, Vol. 30, pp. 319-343.
- GARRELS, R.M., MACKENZIE, F.T. (1971) : Evolution of sedimentary rocks. W.W. Nortonand, New York, 397p.
- GAUDICHET, A., ECHALAR, F., CHATENET, B., QUISEFIT, JP, MALINGRE, G., CACHIER, H., BUAT-MENARD, P., ARTAXO, P., MAENHAUT, W. (1995) : Trace elements in tropical african savanna biomass burning aerosol. *Journal. Of Atmospheric Chemistry*. Vol. 22, pp. 19-39.
- GIBBS, R. (1970) : Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170, pp. 1088-1090.
- GILVEAR, D.J., BRAVARD, J.P. (1993) : Dynamique fluviale. in Hydrosystèmes fluviaux, Chap. 4. Amoros, C., Petts, G.E., Collection d'écologie, No.24, Ed. Masson, Paris, pp. 61-82.
- GOURCY, L. (1993) : Note sur les mesures isotopiques du Niger à Banankoro et du Bani dans la région de Douna-San. IAEA TECDOC.
- GOURCY, L. (1994) : Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali). Thèse Doct. Sciences, Univ. Paris XI, Orsay, 271 p.
- GOURCY, L. et SONDAG F. (1995) : Premiers résultats sur la distribution et le bilan des éléments majeurs dissous dans la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) (année 1990-1991). In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. Col. Colloques et Séminaires ORSTOM, pp. 293-304.
- GROUZIS, M. (1992) : Germination et établissement des plantes annuelles sahéliennes. In : *L'aridité : une contrainte au développement : caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*. Ed. ORSTOM (Collection Didactiques), pp. 267-282.

- GUERRE, A et ARANYOSSY, J.F. (1990) : Synthèse des ressources en eau du Mali. Résultats et interprétation des analyses isotopiques. II. : Les aquifères fracturés. Rapport du Projet Régional Africain RAF/8/012. 49p.
- GUERRE, A., ARANYOSSY, J.F. (1989) : Synthèse des ressources en eau du Mali. Résultats et interprétation des analyses isotopiques. Rapport du projet régional africain RAF/8/012, 82p.
- GUERZONI, S., MOLINAROLI, E. (1998) : Les poussières sahariennes. *Pour la science*. No. 247, pp.72 - 77.
- GUIGUEN N. (1985) : Etudes hydrologiques complémentaires de la cuvette lacustre du Niger. Projet HYDRONIGER. ORSTOM Bamako. 88 p.
- GUIRAUD, R., BELLION, Y., BENKHELIL, J., MOREAU, C. (1987) : Post-Hercynian tectonics in Northern and Western Africa. *Geological Journal*, Vol. 22, pp. 433-466.
- GUIRAUD, R., TRAVI, Y. (1990) : Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Ministère de la Coopération et du Développement, Paris. 147 p.
- GUYOT, J.L. (1993) : Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Collection Etudes et Thèses ORSTOM. 261 p.
- HAIADA, S., SNOUSSI, M., LATOUCHE, C., PROBST, J.L. (1996) : Géodynamique actuelle du bassin versant de l'oued Tensift (Maroc) : érosion mécanique et bilan des transports solides fluviaux. *Sciences Géologique Bulletin.*, Vol.49, n.1-4, Strasbourg, pp. 7-23.
- HASNAIN, S.I. (1996). Factors controlling suspended sediment transport in Himalayan glacier meltwaters. *Journal. of Hydrology*, No.181, pp. 49-62.
- HENDRY, C.D., BERISH, C.W., EDGERTON, E.S. (1984) : Precipitation chemistry at Turrialba. Costa Rica. *Water Ressource Research*, Vol.20, No.11, pp. 1677-1684.
- HERMANN, L., BLEICH, K.E., STERK, G., et STAHR, K. (1997) : Dépôts des poussières sur les sols en Afrique de l'Ouest: Propriétés et sources des poussières et influence sur les propriétés des sols et sites. In: *Bulletin Erosion*, No. 19, Réseau EROSION, pp.93-98.
- HOROWITZ, A.J., ELRICK, K.A., VON GUERARD, P.B., YOUNG, N.O., BUELL, G.R., MILLER, T.L. (1992) : The use of automatically collected point samples to estimate suspended sediment and associated trace element concentrations for determining annual mass transport. In : *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. Proceedings of the Oslo Symposium*, August 1992. IAHS Publ., No.210, pp.209-218.
- HUBERT, P, CARBONNEL, J.P. (1987) : Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, Vol. 95, pp.165-183.
- HUBERT, P., ADAMSKI, M., MEYBECK, M. (1988) : Simulation de stratégies d'échantillonnage : application à la Loire et à la Noé sèche. In : *IV Journée Hydrologiques de l'ORSTOM*, 14 -15 septembre 1988, Montpellier, pp.177-195.
- HYDROCONSULT (1995) : Hydrologie pour la réhabilitation du barrage de Sélingué (Mali). Contrat Opérateur Hydro-Consult International/ORSTOM No. 9512.
- INSTITUT DES AMENAGEMENTS REGIONAUX ET DE L'ENVIRONNEMENT - ISFRA (1994) : Etude de l'ensablement de la vallée du fleuve dans la boucle du Niger au Mali. Rapport du Ministère de l'environnement. Ministère du développement rural et de l'environnement Direction nationale des eaux et forêts. 81p.
- IWACO B.V., Delft hydraulics (1996) : Projet pilote Guinée-Mali de création d'un système intégré de suivi hydro-écologique du bassin de Niger supérieur. Rapport final. Ministère de l'énergie et de l'environnement. Ministère de l'agriculture de l'élevage et des forêts. Conakry. Guinée. Ministère du développement rural et de l'environnement. Ministère de l'énergie et de l'hydraulique. Bamako. Mali, 2 volumes.
- JOIGNEREZ, A., GUIGUEN, NOËL (1992) : Evaluation des ressources en eau non pérennes du Mali. Rapport final ORSTOM Montpellier, 107 p.

- KATTAN, Z., PROBST, J.L. (1986) : Transport en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crues. In : *Journées d'hydrologie de Stasbourg, Crues et inondations*, Oct. 86, pp. 191-215.
- KATTAN Z., GAC J.Y., PROBST J.L. (1987) : Suspended load and mechanical erosion in Senegal basin - Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *Journal of hydrology*, Vol.92, pp.59-76.
- KAZIMIERZ, B. (1995) : A conceptual model of the Instantaneous Unit SedimentoGraph. *Sediment and Water Quality in River Catchments*. Ed. John Wiley and Sons Ltd., pp. 97-106.
- LABERGE, C., CLUIS, D., SAULNIER, G.-M. (1994) : Analyses directionnelles multivariées de la qualité des précipitations sur la région de Québec. *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 7, No. 3, pp. 269 - 284.
- LACAUX, J.P., DELMAS, R., CROS, B., ANDREA, M.O. (1991) : Influence of biomass burning emissions on precipitation chemistry in the equatorial forests of Africa. in : *Global Biomass Burning*, ed. by Levine, MIT Press. Cambridge., pp. 167-173.
- LAMAGAT J.P. (1987) : Modèle de propagation des crues du Niger entre Koulikoro et Niamey. ORSTOM-CEE-ABN, Paris, 93p.
- LAMAGAT, J.P. et MOLINIER, M : (1983). Etude des anomalies des crues du Niger. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, No.161., Paris, 112p.
- LAMAGAT, J.P., MOREL-SEYTOUX, HJ, ALBERGEL, J (1993) : Analyse de la propagation des ondes de crues. *Hydrologie continentale*, Vol. 8, No.2, pp.113-137.
- LAMAGAT, J.P., SAMBOU, S., ALBERGEL, J. (1996) : Analyse statistique de l'écoulement d'un fleuve dans une plaine d'inondation : application aux cotes maximales du fleuve Niger dans la cuvette lacustre. In : *L'Hydrologie Tropicale. Géoscience et outil pour le développement* (Paris 3-4 mai 1995). AISH, Publ. 238. pp. 367-379.
- LANGMUR, D. (1997) : Aqueous environmental geochemistry. Ed. Prentice-Hall. 600p.
- LARAQUE, A., PANDI, A., BERTHELOT, M., MIETTON, M. (1994) : Ecoulement et transports de matière dans le bassin versant du Djoue, affluent du fleuve Congo-Zaire. *Hydrologie Continentale*, Vol. 9, No 2, pp. 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'observation). In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp. 133-145.
- LASAGA, A.C. (1984) : Chemical kinetics of water-rock interactions. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, pp. 4009-4025.
- LE BARBE, L., TAPSOBA, D. (1996) : Une méthode de caractérisation des fluctuations pluviométriques interannuelles du Sahel : l'exemple du Burkina-Faso. IN : *Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel* - 10. Journées Hydrologiques 13-14 septembre 1994, Montpellier, pp. 383-399.
- LEBEL, T., AMANI, A., CAZENAVE, F., LECOCQ, J., TAUPIN, J.-D., ELGUERO, E., GREARD, M., LE BARBE, L., LAURENT, H., D'AMATO, N., ROBIN, J. (1996) : La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel : apports de l'expérience EPSAT-Niger. IN : *L'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement* (Conférence de Paris, 02-04 mai 1995), AISH No 238, pp. 77-98.
- LEISINGER, K.M. (ED.), SCHMITT, K. (1995) : Survival in the Sahel : an ecological and development challenge. ISNAR, La Haye, 211 p.
- LELONG, F., ROOSE, E., AUBERT, G., FAUCK, R., PEDRO, G. (1984). - Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivés d'Afrique de l'Ouest. *Catena and interdisciplinary Journal of Soil Science, Hydrology, Geomorphology*, Vol. 11, No 4, pp. 343-376.
- LEROUX, M. (1996) : *La dynamique du temps et du climat*. Masson, Paris, 310 p.

- L'HOTE, Y., DUBREUIL, P., LERIQUE, J. (1995) : Carte des types de climats "en Afrique noire à l'ouest du Congo" : rappels et extension aux régimes hydrologiques. In : *L'hydrologie tropicale géosciences et outil pour le développement* (Conférence de Paris, 02-05 mai 1995), AISH No 238, pp.55-65.
- LOYE-PILOT, M.D., MARTIN, J.-M., MORELLI, J. (1986) : Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, No. 321, pp.427-428.
- LUDWIG, W., PROBST, J.L. (1996) : A global modelling of the climatic, morphological, and lithological control of river sediment discharges to the oceans. in : *Erosion and sediment Yield : global and regional perspectives. Proc. of the Exeter Symposium*, July 1996. IAHS Publ. No.236, pp. 21-28.
- MAHE G. (1993) : Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etudes des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Coll. Etudes et Thèses*. ORSTOM, Paris, 438 p.
- MAHE G. et OLIVRY J.C. (1991) : Les changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interrannuel. In : *Hydrology for the Water Management of Large Rivers Basins. Proceeding of the Vienna symposium*, August 1991. IAHS Publ, No.201, pp.163-172.
- MAHE G., OLIVRY J.C. (1995) : Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* No.1, Vol. 6, pp.109-117.
- MAHE, G., BRICQUET, J.P., SOUMAGUEL, A., BAMBA, F., DIABATE, M., HENRY DES TUREAUX, T., KONDE, C., LEROUX, J.F., MAHIEUX, A., OLIVRY, J.C., ORANGE, D., PICOUET, C. (1997) : Bilan hydrologique du Niger à Koulikoro depuis le début du siècle. In: *FRIEND'97. Proceedings of Ljubljana 15-18 1997*. pp. 191-200.
- MAHE, G., DESSOUASSI, R., CISSOKO, B., OLIVRY, J.C. (1998) : Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et de débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. In : *Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century. Proc. Abidjan*, Nov. 1998. Côte d'Ivoire. IAHS Publ. No.252, pp. 289-296.
- MAIRE, R., POMEL, S. (1994) : Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale. Concept et méthodologie. In : *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*. Presses Universitaires de Bordeaux, Talence ; No 13, pp.11-26.
- MALEY, J. (1982) : Dust, clouds, rain types, and climatic variations in tropical North Africa. In : *Quaternary Research*, Vol. 18, No 1, pp. 1-16.
- MARIEU, B., BAMBA, F., BRICQUET, J.P., CISSE, N., GREARD, M., MAHE, G., MAHIEUX, A., OLIVRY, J.C., ORANGE, D., PICOUET, C. (1997) : Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali. *Rapport interne ORSTOM* (programme PEGI/GBF/EQUANIS - Volet Hydrologie), Bamako, décembre 1997, 81p.
- MARK, O. LARSSON, J., LARSEN, T. (1993). - A sediment transport model for sewers. In : *6th International Conference on Urban Storm Drainage, Sept 93., Niagara Falls, Ontario, Canada*, pp. 638-643.
- MCCARTHY, T.S. (1993) : The great inland deltas of Africa. *Journal of African Earth Sciences*, Vol.19, No.3, pp.275-291.
- MCCARTHY, T.S., METCALF, J. (1990) : Chemical sedimentation in the semi-arid environment of the Okavango delta, Botswana. *Chemical Geology*, Vol. 89, pp. 157-178.
- MCCARTHY, T.S., ELLERY, W.N. (1994) : The effect of vegetation on soil and ground water chemistry and hydrology of islands in the seasonal swamps of the Okavango Fan, Botswana. *Journal of Hydrology*. Vol. 154, pp.169-193.
- MEADE, R.H., DUNNE, T., RICHEY, J.E., DE M.SANTOS, U., SALATI, E. (1985) : Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science*, 228, pp. 488-490.
- MEYBECK, M. (1982) : Carbon, Nitrogen, and Phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, Vol. 282, pp.401-450.

- MEYBECK, M. (1983) : Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. In : *Dissolved loads of rivers and surface water quantity/quality relationships (Proceedings of the Hamburg Symposium)*. IASH Publ. No.141, pp.173-192.
- MEYBECK, M. (1984) : Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse Doct. Etat. Sciences, Univ. P. et M. Curie, Paris XI, 554 p.
- MEYBECK, M. (1987) : Global chemical weathering of surficial rocks estimates from river dissolved loads. *American Journal of Science*. Vol. 287, pp. 401-428.
- MEYBECK, M. (1992) : La qualité des eaux à l'échelle globale et sa surveillance. Un outil pour le développement. Recherche Etudes Environnement Développement (Ministère de l'Environnement), No 38-39, pp. 9-12.
- MEYBECK M. (1993) : Riverine transport of atmospheric carbon : Sources, Global Typology and Budget. *Water, Air an Pollution*, Vol. 70, pp. 443-463.
- MEYBECK, M. (1995) : Les lacs et leur bassin. In : *Limnologie générale*. Collection D'Ecologie No.25 (sous la direction de R.POURRIOT et M. MEYBECK). Ed. Masson, 1995, pp.6-59.
- MEYBECK, M., LO, H.M., CAUWET, G., GAC, J.Y. (1987) : Geochemistry of the sahelian Gambia river during the 1983 high-water stage. In : *Mitteilung en Geologisches Palaontologisches Institut Universiteit Hamburg*, Vol. 64, pp. 461-473.
- MEYBECK, M. FRIEDRICH, G., THOMAS, R., CHAPMAN, D. (1996a) : Rivres. In : *Water quality assesments, a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Ed. Deborah Chapman, second edition, UNESCO/WHO, UNEP. pp.243-318.
- MEYBECK, M., PASCO, A., RAGU, A. (1996b) : Evaluation des flux polluants dans les eaux superficielles. Etude inter-Agence de l'eau, Ministère de l'Environnement, 3 tomes.
- MEYBECK, M., IDLAFKIH, Z., RAGU, A. (1996c) : Les réseaux de flux. In: *Mesurer l'eau, Colloque de Montbard*. Agence de l'eau Seine-Normandie, 27 et 28 juin 1996, pp. 196-205.
- MILLIMAN, J.D., MEADE, R.H. (1983) : World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, Vol.91, No.1, pp. 1-21.
- MILLIMAN, J.D., SYVITSKI, J.P.M. (1992) : Geomorphic/tectonic Control of sediment discharge to the ocean : the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, Vol. 100, pp. 525-544.
- MODI, A.I., LACAUX, J.P., LABROUE, L., BAUDET, J.G. (1995) : Chimie des aérosols et des pluies dans la savane semi-aride du Niger pendant la saison humide 1989. *Sécheresse*. No.4, Vol.6, pp.331-335.
- MOLINIER, M. (1979) : Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo a Brazzaville. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, Vol. 16, No 1, pp. 55-66.
- MÖLLER, D. (1990) : The Na/Cl ratio in rainwater and the seasalt chloride cycle. *Tellus* 42B, pp. 254-262.
- MOUKOLO, N., BRICQUET, J.P., BIYEDI, J. (1990) : Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville. De janvier 1987 à décembre 1988. *Hydrologie Continentale*, Vol.5, No.1, pp.41-52.
- MOUKOLO, N., LARAQUE, A., OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P. (1993) : Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaire) et ses principaux affluents de la rive droite. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 38, No 2, p. 133-145.
- MUDRY, J., TRAVI, Y. (1994) : Sécheresse sahélienne et action anthropique, deux facteurs conjugués de dégradation des ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest. In : *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*. Presses Universitaires de Bordeaux, Talence, No.13, pp.11-26.
- NASH, L. (1993) : Water quality and Health. In : *Water in crisis : a guide to the world's fresh water ressources*. Oxford University Press, New York, Chap. 3, pp.25-39.

- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. (1970). - River flow forecasting through conceptual models. Part I, a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol.10, No.3, pp. 282-290.
- NATIV, R., MAZOR, E. (1987) : Rain events in arid environment, their contribution and ionic and isotopic composition pattern : Makhtesh Ramon Basin, Israel. *Journal of Hydrology*, No.89, pp.205-237.
- NEGEV, M.A. (1967). - Sediment model on digital computer. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, California, Technical Report No.76.
- NEGREL, P. (1992) : Utilisation des isotopes du Strontium, des alcalins et alcalino-terreux pour la détermination des bilans des éléments chimiques dans les fleuves : Apports Atmosphériques, Altération des roches. Exemple du Bassin du Congo. Thèse de l'Université de Paris XII Soutenue le 26 février 1992. 250p. + annexes.
- NEGREL, P., ALLEGRE, J.C., DUPRE, B., LEWIN, E., (1993) : Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water : The Congo Basin case. *Earth and Planetary Sciences Letters*, Vol. 120, pp.59-76
- NICKLING, W.G., GILLIES, J.A. (1993) : Dust emission and transport in Mali, west Africa. *Sedimentology*, Vol.40, pp.859-869.
- NOUVELOT, J.F. (1969) : Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, Vol. 6, No 4, pp. 43-85.
- NOUVELOT, J.F. (1993) : Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. Rapport CIEH-ORSTOM, mars 1993, 539p.
- NOVIKOFF, A., TARDY, Y. (1990) : Les cuirasses ferrugineuses de Banankoro (Sud-Mali). Problème de l'épigénie de la kaolinite par les oxyhydroxydes de fer. In : *Organisation et fonctionnement des alterites et des sols*. ORSTOM (Colloques et Séminaires), Bondy, pp. 201-214.
- NRIAGU, J.O. & PACYNA, J. (1988) : Quantitative assesment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*. No.333, pp.134-139.
- OLIVE, L.J., RIEGER, W.A. (1992) : Stream suspended sediment transport monitoring - why, how and what is being measured ? In : *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. Proceedings of the Oslo Symposium*, August 1992. IAHS Publ., No.210, pp.245-253.
- OLIVRY J.C. (1978) : Transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers de l'ONAREST*, Vol.1, n.1, pp.47-60.
- 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*. (09-22 août 1987, Vancouver) AISH No. 168, pp. 501-512.
- OLIVRY, J.C. (1995) : Fonctionnement hydrologique de la Cuvette Lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du Delta intérieur. In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp 267-280.
- OLIVRY, J.C. (1998) : Hydrologie et géochimie du bassin soudano-sahélien du fleuve Niger. In : Hydrologie et géochimie isotopique. *Colloques et Séminaires, Ed ORSTOM*. pp.73-95.
- OLIVRY, J.C., BRICQUET J.P., THIEBAUX, J.P., et NKAMDJOU S. (1988) : Transport de matière sur les grands fleuves des régions intertropicales : les premiers résultats des mesures de flux particulières sur le bassin du fleuve Congo. In : *Sediment Budgets* (Proceeding of the Porto Alegre Symposium, December 1988). IAHS Publ. No.174, pp.509-521.
- OLIVRY, J.-C., BRICQUET, J.-P., THIEBAUX, J.-P. (1989) : Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo a Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. *La Houille Blanche*, No 3-4, p. 311-315.

- OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P. & MAHE, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In : *Hydrology of warm humid regions* (Proceeding of Yokohama Symposium, July 1993), IAHS Publ. No. 216. pp. 67-78..
- OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., BAMBA, F. & DIARRA M. (1995a). Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp 251-266.
- OLIVRY, J.C., GOURCY, L. et TOURE, M. (1995b) : Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp. 281-292
- OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., LARAQUE, A., GUYOT, J.L., BOURGES, J., ROCHE, M.A. (1995c) : Flux liquides, dissous et particulaires de deux grands bassins intertropicaux : le Congo à Brazzaville et le Rio Madeira à Villabella In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp. 345-355.
- OLIVRY, J.C., PICOUET, C., ORANGE, D., DROUX, J.P., BRICQUET, J.P., LARAQUE, A., FRITSCH, J.M. (1996) : Transport particulaire dans le delta central du Niger (Bilan de 4 années d'observations). Communication, Colloque Gip-Hydrosystème, Toulouse, mars 1996.
- OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., MAHE G. (1998) : Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux derniers décennies. In : *Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century. Proc. Abidjan*, Nov. 1998. Côte d'Ivoire. IAHS Publ. No.252, pp. 189-197.
- ONGLEY, E.D. (1992) : Environmental quality : changing times for sediment programs. In : *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. Proceedings of the Oslo Symposium*, August 1992. IAHS Publ., No.210, pp.379-390.
- ORANGE, D. (1992) : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. *Sciences Géologiques*, Mémoire No.93, Strasbourg, 198 p.
- ORANGE, D., GAC, J.Y. (1990a) : Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaine sahélien et soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest. *Géodynamique* Vol.1, No.5 , pp.51-65.
- ORANGE, D., GAC, J.Y. (1990b) : Reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djallon (Guinée). Flux de matières dissoutes et en suspension en Haute-Gambie. *Géodynamique*, Vol.5, No.1, pp. 35-49.
- ORANGE, D., GAC, J.Y., DIALLO, M.I. (1993) : Constituent composition of Harmattan dust and geochemical balance of atmospheric depositions in continental West Africa. In: *Tracers in Hydrology (Proceedings of Yokohama)*, IAHS Publ., No. 215, pp.303-312.
- ORANGE, D., OLIVRY, J.C., CENSIER, C. (1995) : Variations et bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui (de 1987 à 1992). In "*Grands Bassins Fluviaux*" (J.C. Olivry et J. Boulègue Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. *Colloques et Séminaires ORSTOM*, pp. 147-158.
- ORANGE, D., WESSELINK, A., MAHE, G., FEIZOURE, C. (1997). The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. *Proc. of Rabat Symp.*, 5th IAHS Assembly, Publ. No. 240, *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*, pp. 113-123.
- ORANGE, D., GAC, J.Y., DIALLO, M.I. (1998) : Erosion éolienne et apports géochimiques au sol par les poussières atmosphériques en Afrique de l'Ouest et Centrale. *ORTOM Actualités* No.56. pp.11-12.
- ORSTOM (1998) : Banque de données sur les concentrations en MES. Rapport interne ORSTOM Bamako. 8 Tomes.
- PALANGIE, A. (1998) : Origines et caractéristiques de la pollution des eaux de Bamako : une première approche pour la gestion et l'épuration. Mém. DEA., Université d'Orléans, 100p.

- PATUREL, J.E., SERVAT, E., KOUAME, B., LUBES-NIEL, H., FRITSCH, J.M., MASSON, J.M. (1997) : Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IASH* No. 240, pp. 21-30.
- PEDRO, G. (1968) : Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, X, pp. 457-470.
- PETIT-MAIRE, N., FABRE, J., CARBONEL, P., SCHULZ, E., AUCOUR, A.M. (1987) : La dépression de Taoudenni (Sahara malien) à l'Holocène. *Geodynamique*, Vol. 2, No 2, p. 154-160.
- PETTS, G.E., BRAVARD, J.P. (1993) : Le réseau hydrographique dans le bassin versant. in : Hydrosystèmes fluviaux, Chap. 2. Amoros, C., Petts, G.E., *Collection d'écologie*, No.24, (sous la direction de C.AMOROS et G.E. PETTS) Ed. Masson, Paris, pp. 22-41.
- PICOUET, C., ORANGE, D., BRICQUET, J.P., OLIVRY, J.C. (1998) : Conséquence de la variabilité hydrologique du Niger supérieur au Mali sur le transport particulaire : cycle annuel et variabilité Interannuelle. In : *Water Resources Variability in Africa During the XXTH Century (International Conference Abidjan '98*, November 16 - 19, 1998, Abidjan - Côte d'Ivoire), Recueil des Posters, pp. 143-149.
- PIERSON, D. C., TAYLOR, C. H. (1994) : The role of surface and sub-surface runoff processes in controlling cation export from a wetland watershed. *Aquatic sciences*, Vol. 56 , No.1 , pp. 80 - 96
- PINET, P., SOURIAU, M. (1988) : Continental erosion and large scale relief. *Tectonics*, Vol. 7, pp. 563-582.
- PINHEIRO, A., CAUSSADE, B. (1996) : Modélisation de la pollution diffuse agricole : cas des matières en suspension et du phosphore. *Revue de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*, No.67, pp. 12-18.
- PIRL (Projet d'Inventaire des Ressources Ligneuses). (1990) : Cartes des formations végétales, 1/200 000, Projet d'inventaire par télédétection des ressources ligneuses et de l'occupation agricole des terres au Mali. Ministère de l'environnement et de l'élevage, SYSAME, BDPA, SCET-AGRI, Bamako, Mali, 44 coupures couleur + notice.
- PIRT (Projet d'Inventaire des Ressources Terrestres). (1983) : Les ressources terrestres au Mali, 1/500 000. Ministère de l'Elevage et des Eaux et des Forêts. Bamako. Mali, 33 cartes à 1/500 000+annexes.
- PIZZUTO, J. (1987) : Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, Vol. 34, pp. 301-317.
- PONCET, Y. (1994) : Le milieu du delta central. in : *La pêche dans le delta central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. J. QUENSIERE, IER-ORSTOM-Karthala éd. pp.66-70.
- POUYAUD, B. (1986) : Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. *Coll. Etude et Thèses*, ORSTOM, 254 p.
- POUYAUD, B. (1987) : Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques. (*Symposium août 1987, Vancouver*). AISH No 168, pp. 447-461.
- PROBST, J.L. (1990) : Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. Volume II. Thèse Doct. Etat. Science, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 393 p.
- PROBST, J.L. (1992) : Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Magrheb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, Vol.37, No.6, pp.621-637.
- PROBST, J.L., NKOUNKOU R.R., KREMPP G., BRICQUET J.P., THIEBAUX 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*, No.135, pp. 237-257.
- PUECH, C., GADELLE, F. (1993) : Cartographie à l'aide de l'imagerie satellitaire des cultures de décrue au Sahel. Exemple du lac Kabara au Mali. *Bulletin du CIEH*, No.93, pp. 34-46.

- QUENSIERE, J. (1994) : Aperçu géologique. in : *La pêche dans le delta central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. J. QUENSIERE, IRE-ORSTOM-Karthala éd. pp.29-39.
- RAJOT, J.L. (1998) : Erosion éolienne au Niger. *ORSTOM Actualités* No.56. pp.11-12.
- RIBOLZI, O. (1992) : Etude des mécanismes de genèse des crues par le traçage naturel (chimique et isotopique) sur un bassin versant méditerranéen cultivé (Roujan, Hérault, France). Thèse, Univ. Aix-Marseille III, 191p.
- RIMSTIDT, J.D., BARNES, H.L. (1980) : The kinetics of silica-water reactions. *Geochimica Cosmochimica Acta*, No.44, pp. 1683-1699.
- RIOU, G. (1990) : L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Systèmes d'érosion hydrique. Ed. Masson. *Collection géographie*, 232p.
- RISACHER, F. (1992) : Géochimie des lacs salés et croûtes de sol de l'altiplano bolivien. *Sci. Géol., Bull.*, Vol. 45, No.3-4, Strasbourg, pp. 140-213.
- ROCHE, M.F. (1963) : Hydrologie de surface. Ed. Gauthiers-Villais, Paris. 403 p.
- ROCHE, M.A. (1973) : Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse de Doctorat, Univ. Paris VI, 398 p.
- RODA, F., AVILA, A., BONILLA, D. (1990) : Precipitation, throughfall, soil solution and stream-water chemistry in a holm-oak (*Q. ilex*) forest. *Journal of Hydrology*, No.116, pp.167-183.
- RODIER, J.A. (1967) : Caractères généraux des régimes hydrologiques des grands fleuves d'Afrique tropicale dans l'hémisphère nord. *Bulletin de la Section de Géographie du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques*, Vol. 80, p.515-542.
- RODIER, J. (1996) : Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie. Dunod, Paris - 6. ed. 1365 p.
- ROGNON, P. (1989) : Biographie d'un désert. Ed. Plon, Paris (Collection Scientifique)
- ROOSE, E. (1977) : Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en parcelles expérimentales. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* No 78, 108 p.
- ROOSE, E. (1981) : Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale : étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, Paris. 569 p.
- ROOSE, E. (1984) : Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. In : L'érosion en zone tropicale. *Machinisme Agricole Tropical*, No 87, p. 24-36.
- ROOSE, E.J., LELONG, F. (1981). - Factors of the chemical composition of seepage and groundwaters in the intertropical zone (West Africa). *Journal of Hydrology*, No.54, pp. 1-22.
- ROOSE, E., DE NONI, G., LAMACHERE, J.M. (1998) : L'érosion : 40 ans de recherches multidisciplinaires. In *Orstom Actualités*. 'Spécial érosion'. No.56, pp. 2-7.
- ROY, S. (1996) : Utilisation des isotopes du Pb et du Sr comme traceurs des apports anthropiques et naturels dans les précipitations et les rivières du bassin de Paris. Thèse de l'Université de Paris XII.
- ROY-BARMAN, M., CHEN, J.H., WASSERBURG, G.J. (1996) : ^{230}Th - ^{232}Th systematics in the central Pacific Ocean : the sources and the fates of Thorium. *Earth Planet Sciences Letter*, No. 139, pp. 351-363.
- RYDING, S.O., RAST, W. (1994) : Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Sciences de l'environnement. 9. Ed. Masson & UNESCO, 294p.
- SERVAT, E., PATUREL, J.E., KOUAME, B., TRAVAGLIO, M., OUEDRAOGO, M., BOYER, J.F., LUBES-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 XXth Century. Proc. Abidjan*, Nov. 1998. Côte d'Ivoire. IAHS Publ. No.252, pp. 323-337.
- SEYLER, P., ETCHEBER, H., ORANGE, D., LARAQUE, A., SIGHA-NKAMDJOU, L., OLIVRY, J.C. (1995) : Concentrations, fluctuations saisonnières et flux de carbone dans le bassin du Congo. In : *Grands Bassins Fluviaux Peri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone*, 22-24 novembre 1993, Paris, FRA Colloques et Séminaires (FRA p. 217-228
- SEYLER, P., ELBAZ-POULICHET, F. (1996) : Biogeochemical control on the temporal variability of trace element concentrations in the Oubangui river (Central African Republic). *Journal of Hydrology*, Vol. 180, pp.319-332.
- SHARKEY, T.D., HOLLAND, E.A., MOONEY, H.A. (1991) : Trace gas emissions by plants. Academic Press. San Diego.
- SHARMA, K.D., DHIR, R.P. (1992) : Modelling suspended sediment flow in arid upland basins. *Hydrological Sciences Journal*. Vol.37,No.5-10, pp.481-490.
- SHOLKOVITZ, E.R., CHURCH, T.M., ARIMOTO, R. (1993) : Rare earth element composition of precipitation particles, and aerosols. *Journal of geophysical Research*, No.98, pp.20587-20599.
- SIDORO, M., GUERRE, A., ARANYOSSY, J.F. (1993) : Apport des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères fissurés au Mali. IAEA, teccdoc.
- SIGG, L., STUMM, W., BEHRA, P. (1994) : Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Ed. Masson. 2ème éd., 391p.
- SIMM, D.J. (1995) : The rates and patterns of overbank deposition on a lowland floodplain. Chap. 14. in *Sediment and water quality in river catchments*. Ed. by Foster, Gurnell & Webb. Wiley Ed., pp. 247-264.
- SIMM, D. J., WALLING, D. E., BATES, P. D., ANDERSON, M. G. (1997) : The potential application of finite element modelling of flood plain inundation to predict patterns of overbank deposition. *Hydrological sciences journal*., Vol. 42, No. 6 , pp. 859 - 875.
- SIMM, D. J., WALLING, D. E.(1998) : Lateral variability of overbank sedimentation on a Devon flood. *Hydrological sciences journal*, Vol. 43 , No. 5 , pp. 715 - 732.
- SINGH, V.P. (1989). - Sediment Yield - Chap.XI. Hydrologic Systems. Vol.II. watershed Modeling. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 201-236.
- SONDAG, F., LARAQUE, A., RIANDEY, C. (1995). - Chimie des eaux du fleuve Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui (Années 1988 à 1992). *Grands Bassins Fluviaux*, Paris, 22-24 Nov. 1993, pp. 121-131.
- STAHR, K., HERRMANN, L., JAHN, R. (1994) : Long distance dust transport in the soudano-sahélien zone and the consequences for soil properties. *Proc. of intern. Symposium 'Wind erosion in West Africa: the problems and its control'*. Ed. Buerkert, Allison, von Oppen. Univ. of Hohenheim, Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, pp. 23-33.
- STALLARD, R.F. (1988) : Weathering and erosion in the humid tropics. in *Geochemical Cycles*, ed. by Lerman & Meybeck, Kluwer, pp. 225-246.
- STALLARD, R.F., EDMOND, J.M. (1981) : Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of the peak discharge. *Journal of geophysical Research*, Vol.86 (C10), pp. 9844-9858.
- STALLARD, R.F., EDMOND, J.M. (1983) : Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of geophysical Research*, Vol. 88, pp. 9671-9688.
- STALLARD, R.F., EDMOND, J.M. (1987) : Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Journal of geophysical Research*. Vol. 92, No.C8, pp. 8293-8302.

- STUMM, W. (1994) : Acquisition of solutes and regulation of the composition of natural waters. pp. 1-31 in. *Chemistry of Aquatic Systems : Local and Global Perspectives*, ed. G. Bidoglio and W. Stumm, 534 p.
- SUMMERFIELD, M. A., HULTON, N. J. (1994) : Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *Journal of geophysical research*, Vol. 99, No B7, pp. 13871-13883.
- SUTCLIFFE, J.V., PARKS, Y.P. (1989) : Comparative water balances of selected African Wetlands. *Hydrological Science J.*, Vol. 34, pp. 49-62.
- TABET, D. (1999) : Suivi de la salinité des sols par télédétection et systèmes d'information géographique. Thèse. Ecole du Génie Rural des Eaux et des Forêts. Montpellier. 500p. + 200p annexes.
- TANJI, K.K. (1990) : Nature and extent of agricultural salinity. In : *Agricultural salinity assessment and management*, A.S.C.E. manuals and reports on engineering practise No.71, pp. 1-17.
- TARDY, Y. (1968) : Une méthode de détermination des types d'altération actuels par l'étude des eaux en pays granitiques et gneissiques. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 278, série D, pp. 1999-2002.
- TARDY, Y. (1969) : Géochimie des altérations. Etudes des arènes et de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, Strasbourg, 31, 199p.
- TARDY, Y. (1986) : Le cycle de l'eau : climats, paléoclimats et géochimie globale. Masson, Paris, 338p.
- TARDY, Y. (1998) : L'érosion. CD-ROM, Encyclopédia Universalis.
- TAUPIN, J.D., AMANI, A., LEBEL, T. (1998) : Variabilité spatiale des pluies au Sahel, une question d'échelle. 1. Approche expérimentale. In : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan '98 Conference, 16-19 novembre 1998, Abidjan - Côte d'Ivoire)*. IASH Publ. No.252, pp. 143-151.
- TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M. (1985) : The continental crust : its composition and evolution. Blackwell, Oxford., 312p.
- TECSULT (1994) : Plan directeur d'assainissement de Bamako (1993-2003). Rapport principal Vol.1.
- TESTARD, P. (1995) : Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres. In : *Limnologie générale*, Masson (Collection d'Ecologie No 25), Paris, Chap. 8, pp.296-326.
- TESTER, J.W., WORLEY, W.G., ROBINSON, B.A., GRIGSBY, C.O., FEERER, J.L. (1994) : Correlation quartz dissolution kinetics in pure water from 25 to 625°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, No.58, pp.2407-2420.
- THEBE, B. (1987) : Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun : bassins versants de Mouda : contribution à l'étude des transferts d'échelles. PhD, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 307 p.
- TOMA, A., HUBERT, P., MEYBECK, M. (1996) : Traitement statistique des données journalières de qualité des fleuves. Application aux flux polluants. In : *Evaluation des flux polluants dans les eaux superficielles*, tome 3-1, Etude inter-Agence de l'eau, Ministère de l'Environnement, pp.1-31.
- TONDESKI, A., GRIMVALL, A., DOJLIDO, J.R., VAN DIJK, G.D. (1995) : Monitoring nutrient transport in large rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.34, pp.245-269.
- TRAORE, L. (1996) : Qualité des eaux, impacts liés à l'utilisation des eaux usées non contrôlées et moyens d'assainissement. Association malienne d'hydrologie. Session spéciale de sensibilisation des communicateurs aux problèmes d'eau et d'environnement, 12p.
- TRAVI, Y., GAC, J.Y., SYLLA, M. (1986) : Qualité chimique des eaux souterraines du Mali. *Bull. Liaison CIEH*, No.66, pp. 13-25.
- VALLES, V., BERTRAND, R., BOURGEAT, F., N'DIAYE, M. (1989) : Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. *L'Agronomie Tropicale*, Vol. 44, No. 3, pp. 157-163.

- VAN HOORN, J.W., VAN ALPHEN, J.G. (1994) : Salinity control. Chap. 15. In : *Drainage principles and applications. International Institute for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen, NDL, Publication 16, 2ème ed., pp. 533-600.
- VIERS, J. (1998) : Altération chimique et transport des éléments (majeurs et en trace) en milieu tropical humide (Cameroun), Etude du fonctionnement géochimique d'une couverture latéritique à partir de profils de sol et de solutions (nappes, rivières). thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 157p.
- WALLING, DE. (1977) : Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resources Research*, Vol. 13, No 3, pp. 531-538.
- WALLING, D.E. (1983) : The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, Vol.65, pp. 209-237.
- WALLING, D.E., FOSTER, I.D.L. (1975). - Variations in the natural chemical concentration of water during floods flows, and the lag effect : some further comments. *Journal of Hydrology*, Vol.26, pp. 237-244.
- WALLING, D.E., WEBB, B.W. (1980). - The spatial dimension in the interpretation of stream solute behaviour. *Journal of Hydrology*, 47, pp 129-149.
- WALLING, D.E., WEBB, B.W. (1981) : The reliability of suspended sediment load data. In : *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Florence, june 1981. IAHS Publ. 133, pp. 177-194.
- WALLING, D.E, WEBB, D.W., WOODWARD, J.C. (1992) : Some sampling considerations in the design of effective strategies for monitoring sediment-associated transport. In : *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. Proceedings of the Oslo Symposium*, August 1992. IAHS Publ., No.210, pp.279-288.
- WALLING, D.E., WEBB, B.W. (1996) : Erosion and sediment yield : a global overview. in : *Erosion and sediment Yield : global and regional perspectives. Proc. of the Exeter Symposium*, July 1996. IAHS Publ. No.236, pp. 3-19.
- WASSON, J. G., GUYOT, J. L., SANEJOUAND, H. (1991) : Premières données concernant le carbone organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano Bolivien). *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 4, No 3, pp. 363 - 379.
- WEN SHEN, H., JULIEN, P (1993) : Erosion and sediment transport. In : *Handbook of Hydrology*, Ed by David R. Maidment, McGRAW-HILL, INC, pp.12.1-12.61.
- WICHEREK, S. (1994) : L'érosion des grandes plaines agricoles. *La Recherche*, No.268, Vol.25.
- WICKS, J.M., BATHURST, J.C. (1996). - SHESED : a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology*. No.175, pp. 213-238.
- WILBY, R., GIBERT, J. (1993) : Dynamiques hydrologiques et hydrochimiques. In : *Hydrosystèmes fluviaux*. Collection D'Ecologie No.24 (sous la direction de C.AMOROS et G.E. PETTS). Ed. Masson, 1993, pp.43-60.
- WILLIAMS, J.R. (1978) : A sediment graph model based on an Instantaneous Unit Sediment Graph. *Water Resources Bulletin*. Vol.14, No.4, pp.659-64.
- WISCHEMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978). - Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning,. *Agricultural Handbook*, No.537. US Department of Agriculture, Washington DC.
- WOLLAST, R., VANDERBORGHT, J.P. (1994) : Aquatic carbonate systems : chemical processes in natural waters and global cycles. pp. 47-71 in. *Chemistry of Aquatic Systems : Local and Global Perspectives*, ed. G. Bidoglio and W. Stumm, 534 p.
- WONG, S.L., MCCUEN, R.H. (1981) : Design of vegetative buffer strips for runoff and sediment control. University of Maryland, Depart. of Civil Engineering, College Park, MD.
- WUILLOT, J. (1994) : Les phytocénoses aquatiques. In : *La pêche dans le delta central du Niger : approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. ORSTOM, Karthala:, Paris. p. 66-70.
- YAIR, A., KARNIELI, A., ISSAR, A. (1991) : The chemical composition of precipitation and runoff water on an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Journal of Hydrology*, No.129, pp. 371-388.

ZHANG, J., HUANG, W.W., SHI, M.C. (1990) : Huanghe (Yellow River) and its estuary : sediment origin, transport and deposition. *Journal of Hydrology*, No.120, pp. 203-223.

ZHANG, J., HUANG, W.W., WANG, J.H. (1994). - Trace-metal chemistry of the Huanghe (Yellow River), China - examination of the data from in situ measurements and laboratory approach. *Chemical Geology*, No.114, pp. 83-94.

ZOSKA, J.R. (1985) : The water quality and hydrobiology of the Niger. In : *The Niger and its neighbours*. A.T. Grove, A. Balkema. Rotterdam. Boston, 331p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE FILTRATION POUR L'ANALYSE DES ÉLÉMENTS EN TRACES DANS LA PHASE DISSOUTE DES EAUX DU FLEUVE NIGER	3
LES DIFFÉRENTS TYPE DE BLANCS	3
ANALYSE DES FILTRATIONS	5
COMPARAISON C_T/C_D ET C_B/C_D	7
ANNEXE 2 : DÉBITS MENSUELS ET ANNUELS (EN M³ S⁻¹) DU FLEUVE NIGER AU MALI (BANQUE DE DONNÉES ORSTOM-DNHE)	9
ANNEXE 3 : LE CRITÈRE DE NASH	11
CRITÈRE DE NASH POUR UNE CRUE DONNÉE :	11
CRITÈRE DE NASH MOYEN DÉTERMINÉ POUR UN ÉCHANTILLON DE N CRUES :	11
ANNEXE 4 : RÉSULTATS BRUTS DES ANALYSES DES PRÉLÈVEMENTS PONCTUELS DES EAUX DU FLEUVE NIGER AU MALI	12
(1) CONCENTRATIONS DANS LA PHASE DISSOUTE	12
(2) CONCENTRATIONS DANS LA PHASE TOTALE.....	20
ANNEXE 5 : RÉSULTATS DES CALCULS SUR LA CHIMIE DES EAUX ET DES PARTICULES DU FLEUVE NIGER AU MALI	24
1. RÉSULTATS DES CONCENTRATIONS MOYENNES OBTENUES DANS LE CADRE DU RÉSEAU D'OBSERVATION DES EAUX DU NIGER AU MALI.....	24
2. DONNÉES ANALYTIQUES COMPLÉMENTAIRES.....	27
ANNEXE 6 : VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA COMPOSITION DE LA PHASE DISSOUTE SUR LE BASSIN DU NIGER AMONT	44
VARIABILITÉ SAISONNIÈRE DU pH, DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA MINÉRALISATION DES EAUX DE SURFACE.....	ERREUR! SIGNET NON DÉFINI.
EVOLUTION COMPARÉE DES ÉLÉMENTS DANS LA PHASE DISSOUTE SUR LE NIGER ET LE BANI	ERREUR! SIGNET NON DÉFINI.
CONCLUSIONS	ERREUR! SIGNET NON DÉFINI.
ANNEXE 7 : BILAN DES EXPORTATIONS DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES SUR LE BASSIN AMONT - VARIABILITÉ SPATIALE ET INTER ANNUELLE	59
PRINCIPAUX RÉSULTATS.....	59
EVOLUTION SPATIALE DES FLUX DISSOUS TRANSPORTÉS SUR LE COURS DU NIGER	62
BILAN DES APPORTS AU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER.....	68

Annexe 1

Protocole de filtration pour l'analyse des éléments en traces dans la phase dissoute des eaux du fleuve Niger

Les prélèvements d'eau brute sont réalisés au milieu du fleuve et à environ 40 cm de profondeur à partir d'une pinasse en bois. Les deux prélèvements (total et dissous) se font dans des bouteilles en polypropylène de 250 ml préalablement lavées à l'acide ultra pure (5%) et rincées à l'eau milliQ et enfin rincées 3 fois avec l'échantillon lors du prélèvement. Pour limiter l'évolution de l'échantillon du prélèvement à l'analyse, pour les dosages dans la phase dissoute, la filtration des échantillons est réalisée sur la rive, immédiatement après le prélèvement. Des précautions lors de la filtration, liées à la très faible concentration des éléments dans les eaux et aux contaminations extérieures, doivent être prises. Ceci est d'autant plus vrai que la filtration s'effectue dans des conditions limites : pas de production d'eau milliQ sur place, pas de hotte à flux laminaire de terrain, temps de la filtration important (deux à quatre heures suivant la période de l'année)... et conditions météorologiques parfois inconfortables.

Une première mesure pour éviter la pollution des échantillons est d'utiliser un matériel très propre, préalablement lavé au laboratoire avec de l'acide chlorhydrique ultrapur puis rincé au moins 3 fois avec de l'eau milliQ (bouteilles, filtres, système de filtration...). Il est conservé et protégé de la poussière dans des sacs en polyéthylène. Ensuite, il s'agit de manipuler dans les meilleures conditions possibles (loin de sources éventuelles de pollution comme les feux de bois, les pots d'échappement...). Plusieurs contrôles de la qualité de la filtration ont été possibles. D'une part avec les blancs de filtration réalisés dans les mêmes conditions de terrain que la filtration de l'échantillon (sur la rive du fleuve) et d'autre part avec la comparaison entre les résultats totaux (échantillon total à priori non contaminé car n'ayant subi aucune manipulation) et les résultats dissous (échantillon filtré).

La détermination de ces "blancs" nous a permis de mettre au point et d'améliorer le protocole de filtration au cours de l'étude (le protocole de filtration pour les lavages sur le terrain a subi trois transformations qui ont permis d'améliorer la qualité des blancs) en tenant compte de toutes les contraintes logistiques (la principale contrainte étant de s'adapter au manque d'eau milliQ).

Les différents type de blancs

Les blancs d'eau milliQ (laboratoire et terrain)

Deux blancs de laboratoire (ou de pilulier), sont réalisés par séries (l'échantillon est remplacé par de l'eau milliQ pour toutes les manipulations en "salle blanche" et lors de l'analyse). Ils montrent des concentrations en général inférieures aux limites de détection

L'eau milliQ n'existant pas au Mali, elle a été amenée dans les bouteilles de 250 ml qui sont réutilisées une fois vidées. L'eau milliQ apportée sur le terrain puis ramenée au laboratoire en France, en général 1 an plus tard (5 échantillons au total), n'a pas montré d'évolution des quantités en éléments dissous.

Les blancs de filtration - Protocoles

Un blanc de filtration a été réalisé au laboratoire de Toulouse. Ce blanc de filtration, fait dans de bonnes conditions (salle blanche, quantité d'eau milliQ suffisante...), permet d'observer les contaminations apportées par la filtration à travers une membrane en nitrate de cellulose de 0,2 µm.

Sur les 9 campagnes, des blancs de filtration ont été réalisés : en début, au milieu et en fin de mission lors des 5 premières missions sur le terrain, ; puis à chaque manipulation, pour les 4 dernières.

Juin, Juillet, Août 96

Le protocole de filtration suivi pendant ces 3 campagnes était le suivant (un sac de congélation était maintenu sur le système lors de la filtration) :

Protocole "échantillon filtré" - Missions juin, juillet et août 96
La solution adoptée, étant donné le manque d'eau milliQ à notre disposition est d'utiliser trois bouteilles de 250 ml en « TURN OVER ».
Pour chaque station on a besoin de 3 bouteilles : 1 avec de l'eau milliQ (flacon n°1) et les bouteilles « turn over » avec l'échantillon d'eau du fleuve (flacon n°2 et n°3).
Une fois sur la rive , dans un endroit "propre" (pas de vent, loin d'une ville et de toute pollution éventuelle...) se préparer à filtrer l'échantillon
<ul style="list-style-type: none">• Rincer l'appareil de filtration avec 250 ml de l'eau milliQ avec la bouteille n°1 et garder cette bouteille vide de côté• Mettre un filtre avec une pince en plastique et/ou prendre des nouveaux gants en latex et rincer le haut et le bas (avec le filtrat) du système avec 100 ml d'eau prélevée de la bouteille n°2• Passer 250 ml restant d'échantillon du flacon n°3 que l'on récupère dans le flacon propre n°1• Rincer la vaisselle et l'appareil de filtration avant chaque nouvelle filtration• Utiliser un nouveau filtre pour chaque nouvel échantillon
Blancs
Faire 3 blancs de mission (avant, au milieu, et à la fin de la campagne). Procéder comme ci dessus mais remplacer la bouteille n°3 par de l'eau milliQ. Garder les bouteilles propres pour les « Bulk ».

Parmi les 3 premiers blancs réalisés en juin, juillet 1996, un seul (Banankoro le 1/07/96) présentait des concentrations en Mg, Al, Mn, FE, Zn, Rb, Ba très élevées (sans doute en raison d'une erreur de manipulation). En août les 3 blancs sont très mauvais, car il y a eu un problème de protocole pour ces derniers, mais cela n'a pas influencé a priori la filtration, qui s'est déroulée comme prévu.

Octobre/Novembre, Décembre 96

Quelques améliorations du protocole ont été faites :

- La première amélioration a été de réaliser la filtration dans une boîte à gants démontable en Plexiglas qui permet de limiter l'influence du vent et des poussières (principe de la hotte). La boîte à gant en Plexiglas est lavée après chaque mission (avec de l'acide et abondamment rincée mais seulement avec de l'eau distillée) et rangée dans des pochettes en tissu à l'intérieur d'une boîte en bois,
- Ensuite, davantage d'eau milliQ a été utilisée pour le rinçage avant le blanc de filtration. Ces derniers étaient toujours réalisés après la filtration du fleuve et seulement 3 fois par campagne.

Les résultats des blancs de filtration ainsi obtenus étaient corrects. Ils ont été comparés à deux types de blancs : un blanc de filtration réalisé dans la salle blanche au laboratoire de Toulouse ainsi que deux blancs de laboratoire (blanc de "pillulier").

Mai, Août et Novembre 97

La procédure de filtration des missions de Mai, Août et Novembre 97, fût la procédure finalement adoptée. Elle se déroule en 3 étapes à l'aide d'un nouveau système de filtration sous pression et à travers une membrane en nitrate de cellulose de 0,2 µm de taille de pore. La grande nouveauté et **de réaliser un blanc de filtration avant chaque nouvelle manipulation** avec de l'eau milliQ. La filtration s'effectue toujours sous une boîte à gant en Plexiglas.

La réalisation du blanc de filtration avant chaque filtration permet de s'assurer d'un rinçage abondant du matériel de filtration et du filtre avant la filtration de l'échantillon du fleuve, même si en contrepartie, les blancs ne sont pas toujours excellents...

Le protocole exact est décrit dans le cadre suivant :

Procédure de filtration - Missions de Mai, Août et Novembre 97

La procédure de filtration se déroule en 3 étapes qui nécessitent 3 bouteilles de 250 ml: 2 bouteilles avec de l'eau milliQ pour le blanc et le rinçage (flacon n°1 et 2) et une bouteille de l'eau du fleuve (flacon n°3). Elle s'effectue dans une boîte à gants en Plexiglas démontable (photo). Une fois sur la rive, dans un endroit "propre" se préparer à filtrer l'échantillon :

1. Rinçage du système de filtration :

Le haut de l'appareil de filtration est nettoyé avec environ 150 ml d'eau milliQ en séparant bien le haut du bas. Puis on met un filtre et on rince le bas de l'appareil de filtration avec les 100 ml restant. Rincer encore une fois avec 100 ml d'eau milliQ de la bouteille n°2.

2. Blanc de filtration :

Passer 150 ml d'eau milliQ restant de la bouteille n°2 Récupérer l'eau filtrée dans cette même bouteille.

3. Filtration de l'échantillon :

Rincer avec 50 ml d'eau du fleuve (de la bouteille n°3) pour chasser les dernières gouttes d'eau milliQ pouvant rester dans le système. Puis, passer 200 ml restant d'échantillon du flacon n°3 que l'on récupère dans le flacon propre n°1.

Analyse des filtrations

Comparaison des blancs de filtration avec les autres blancs de laboratoire

L'analyse des blancs de filtration et leurs comparaison avec le blanc de filtration réalisé en salle blanche (bonnes conditions), ont permis de distinguer les éléments susceptibles d'être apportés par la filtration elle-même et/ou par "l'environnement" de la filtration.

Le Tableau 1 montre que sur les 34 blancs réalisés, Zn et Ba sont toujours supérieurs à la limite de détection (avec une moyenne respectivement de 12 et 9 fois supérieure à la limite de détection). Mg, Cr, Mn, Rb et Sr sont détectés dans 95% des cas, Ce et Pb dans 50 % des cas, les autres éléments n'étant jamais supérieurs à la limite de détection, ou seulement dans 25% des cas. Mais la variabilité d'un blanc à un autre est importante. Le détail des campagnes montre que certaines missions et/ou stations sont plus ou moins concernées par ces problèmes de contamination.

Juin, Juillet 96

Comme déjà cité ci-dessus, deux des 3 blancs réalisés pour cette campagne sont bons. Les résultats sont donc a priori corrects, si l'analyse est bonne.

Octobre, Novembre, Décembre 96

L'étude des 5 blancs réalisés lors de ces campagnes a permis de mettre en évidence un groupe d'éléments détecté dans le blanc de filtration de terrain alors qu'ils ne le sont pas dans les blancs milliQ de laboratoire ou présentant une augmentation significative entre ces derniers : ce sont respectivement Mg, Ca, Mn, Zn, Rb, Sr, Pb, et Si, Ba, Al. La comparaison des Blancs de filtration terrain et du blanc de filtration laboratoire montre aussi une augmentation des concentrations en Mg, Al, Sr, tandis que Si et Rb sont plus ou moins constants. Dans l'ensemble, les blancs de cette campagne sont bons.

Limite de détection	Moyenne des blancs de filtration (n=34)	CV	Nombre de valeur ≠ LD	Max	Moyenne des blancs de filtration (n=29)
---------------------	---	----	-----------------------	-----	---

Mg	0.114	6.250	± 6.722	108%	32	27.888	5.205	± 5.506
Al	0.052	2.244	± 7.125	317%	33	41.496	1.069	± 1.110
Sc	0.028	0.060	± 0.024	40%	10	0.091		
Ti	0.06	<DL						
V	0.013	<DL						
Cr*	0.025	0.723	± 0.050	175%	23	4.143	0.115	± 0.050
Mn	0.01	0.134	± 0.229	170%	29	1.262	0.097	± 0.077
Fe	1.18	6.46	± 4.16	0.64	9	16.45		
Co	0.004	0.012	± 0.016	126%	10	0.048	0.010	± 0.016
Cu	0.01	0.313	± 0.690	220%	26	3.553	0.190	± 0.204
Zn	0.139	1.685	± 4.324	257%	34	25.717	0.769	± 0.579
As	0.04	0.072	± 0.033	45%	6			
Rb	0.003	0.025	± 0.033	132%	33	0.149	0.017	± 0.012
Sr	0.007	0.092	± 0.141	153%	32	0.808	0.062	± 0.036
Y	0.001	<DL						
Zr	0.01	<DL						
Cs	0.001	<DL						
Ba	0.017	0.551	± 1.368	248%	34	6.673	0.158	± 0.152
La	0.001	0.005	± 0.005		8	0.014		
Ce	0.001	0.006	± 0.010	161%	16	0.035	0.005	± 0.007
Pr	0.001	<DL						
Nd	0.011	<DL						
Sm	0.011	<DL						
Eu	0.003	<DL						
Gd	0.005	<DL						
Tb	0.001	<DL						
Dy	0.004	<DL						
Ho	0.001	<DL						
Er	0.006	<DL						
Tm	0.001	<DL						
Yb	0.003	<DL						
Lu	0.001	<DL						
Pb	0.013	0.299	± 0.823	269%	21	2.874	0.205	± 0.668
Th	0.002	<DL						
U	0.002	<DL						

Tableau 1. Résultats des mesures sur les "blancs" de filtration.

Mai, Août et Novembre 97

La campagne de Mai est caractérisée par des valeurs de Zn et de Pb dans les blancs de filtration assez élevées, essentiellement pour deux échantillons, dont l'un (Banankoro 17-04-97) présente une valeur de Zn qui atteint 25.5 ppb (et le Pb, 2.5ppb). Ces fortes valeurs sont associées à des fortes concentrations de Mg, Ca et, a priori, à une contamination par des particules terrigènes (le joint du système de filtration est tombé ce jour là, je l'ai rincé avec de l'eau distillée car je n'avais plus que ça....).

Sans les valeurs à Banankoro du 17-04-97, la moyenne des concentrations sur les 34 blancs passe de 1.6 à 0.9 ppb pour le Zn, et de 0.313 à 0.196. ppb pour le Pb. L'autre blanc de terrain qui pose problème est celui réalisé à Sélingué avec une concentration de 2.546 ppb en Pb (mais le Zn est à 1.992 ppb). La moyenne de Pb tombe à 0.047 sans les deux blancs cités ci-dessus.

Ensuite, seul un échantillon de la mission de novembre 1997 montre une concentration en Zn élevée (>2 ppb)

Conclusion

L'analyse de ces données permet d'identifier et de quantifier les contaminations dues à la filtration elle-même et/ou à la manipulation lors de la filtration. Ainsi on distingue des éléments apportés par la filtration : Mg, Al, Si, Rb, Sr - ces éléments sont sans doute relargués par le filtre -, ou apportés par ce qu'on a appelé « l'environnement de la filtration » : on retrouve Mg, Al et un peu de Rb et Sr, et en plus Zn, Pb, Ba, Mn, et Cr. La présence de ces éléments s'explique sans doute par un rinçage insuffisant du système de filtration après la filtration avec l'eau du fleuve.

Mais les concentrations restent assez faibles pour des blancs de terrains exceptés pour le Zn et parfois le Pb pour lesquelles on peut aussi parler de « pollution » anthropique. Sur les 34 blancs de filtration, 9 blancs présentent une concentration en Zn supérieure à 1 (soit au mois 7 fois la limite de détection de 0.136 ppb) dont un échantillon avec des valeurs extrêmement élevées (Banankoro le 17-04-97). Pour le Pb, seuls 3 blancs sur 34 présentent des concentrations en Pb élevées, mais deux de ces blancs ont des concentrations en Pb presque 2000 fois plus grandes que la limite de détection (Banankoro le 17-04-97, Sélingué le 22-04-97).

Comparaison C_T/C_D et C_B/C_D

Le choix d'analyser les éléments en traces dans la phase totale (dissous + particulaire) a été conditionné par les très faibles taux de MES rencontrés dans le fleuve Niger pour les échantillons d'eau de surface. Les concentrations dans la phase particulaire (C_p) (en ppb) sont alors obtenues à partir des concentrations dans la phase totale (C_T) et dans la phase dissoute (C_D), selon l'équation :

$$C_p = C_T - C_D$$

On a donc été amené à comparer d'une part les résultats totaux (C_T) et les résultats dissous (C_D) et d'autre part, les résultats dissous (C_D) avec les concentrations dans les blancs de terrains (C_B).

Comparaison C_D/C_B

En comparant (sur 28 échantillons, de novembre 1996 à novembre 1997) les concentrations dissoutes (C_D) et les concentrations dans le blanc de filtration de terrain (C_B), on peut voir que certains éléments sont plus abondants dans le blanc de filtration que dans l'eau du fleuve filtrée!

C'est le cas pour Zn et Pb qui posent problème respectivement pour 60% et 35% échantillons. Evidemment, les différences les plus importantes sont rencontrées pour les blancs de filtration fortement contaminés détectés ci-dessus. On a du mal à rester correct avec Zn et Pb....

	Nov & Dec 96	Mai 97	Août 97	Nov 97	Total
N	5	7	8	8	28
Cr		7		(8)	7
Cu		2		1	3
Zn	3	5	4	5	17
Cs	5				5
Pb		7	1	2	10

Tableau 2 : Eléments pour lesquels C_D (Concentration Dissoute) < C_B (Concentration dans le Blanc filtré).

Comparaison C_T/C_D

La comparaison des concentrations totales (C_T) et des concentrations dissoutes (C_D), a montré pour presque tous les échantillons une anomalie en Sc. Etrangement, celle-ci n'est pas systématique pour les stations du delta intérieur du Niger. Les concentrations en Zn et Pb dans la phase dissoute sont quelquefois supérieures à la valeur dans l'échantillon total, mais assez rarement et uniquement sur les stations du bassin amont.

	Banankoro	Sélingué	Koulikoro	Ké-Macina	Douna	Sensé	Akka	Diré
N	9	4	7	8	9	6	4	5
Sc	9	4	7	8	7	5	2	2
Cr	1		1					
Zn	3							
Sr				1		1		
Pb	3	1						
U	1			1				

Tableau 3 : Eléments pour lesquelles CD (Concentration Dissoute) > CT (Concentration Totale).

Au terme de cette présentation, on peut dire que les valeurs de concentrations sur Zn sont à prendre avec beaucoup de précautions, étant donnée le nombre important de problèmes pour cet élément. Pb, Cr, sont aussi, bien que dans une moindre mesure à prendre avec précautions...

Annexe 2

Débits mensuels et annuels (en m³ s⁻¹) du fleuve Niger au Mali (Banque de données ORSTOM/DNHE)

Banankoro

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	5.3	65.3	415	1330	1900	1590	700	233	87.3	34	9.6	2.5	532
1992/93	4.9	105	543	1250	2040	1360	583	205	79	25.9	14.9	8.5	521
1993/94	12.9	69	297	1410	1770	1410	791	296	105	37.3	17.1	7.1	521
1994/95	9.5	217	704	1810	3630	3390	2110	549	225	97	42.3	38.1	1070
1995/96	56.9	141	421	2160	3840	3180	1170	417	181	99	40	24.6	978
1996/97	55.5	168	506	1680	3190	2740	971	329	136	62.9	22	10.5	823
1997/98	32.5	165	684	1450	2780	2120	949	339	137	58.4	28.2	10.7	730
1997/98	21.7	192	589	2080	3060	2580	890	286					

Koulikoro

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	113	215	642	1470	2510	2250	1020	383	186	137	132	139	767
1992/93	141	264	755	1430	2850	2000	870	383	186	118	125	142	775
1993/94	173	245	522	1550	2160	1980	1060	478	189	123	131	130	732
1994/95	133	409	1020	1940	4250	5080	3050	891	364	219	178	191	1480
1995/96	197	367	509	2320	4920	4320	1540	630	323	232	173	170	1310
1996/97	253	301	526	1820	3700	3660	1350	448	191	118	98.5	112	1050
1997/98	163	308	959	1800	3800	2910	1230	466	195	140	119	143	1020
1997/98	162	367	772	2190	4120	3910	1290	477					

Ké-Macina

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	30.7	140	494	1390	2240	2060	1020	394	160	120	85.5	86.6	686
1992/93	73.3	150	632	1320	2540	1790	818	416	190	78.8	65.9	62.7	681
1993/94	89.5	120	412	1400	1930	1820	1050	507	197	71.9	75.5	60.6	647
1994/95	61.6	253	954	1850	3640	4530	2790	851	385	205	138	131	1320
1995/96	117	264	376	2040	4280	4050	1530	698	328	218	127	109	1180
1996/97	164	176	368	1600	3170	3190	1330	515	235	110	54.5	56.6	914
1997/98	85.3	203	819	1660	3300	2620	1240	525	214	113	80.5	70	911
1998/99			(-)	-2180	3540	3400	1290						

Douna

jour	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	0.1	33.9	50.3	536	839	496	218	64.7	27.5	13.6	4.1	0.9	190
1992/93	0.4	24.9	51.7	228	682	450	152	48.7	20.3	8.6	1.9	0.1	139
1993/94	0	0	88	217	675	420	139	46.6	21.1	8.3	1.6	0.3	135
1994/95	0.1	20.3	115	881	1400	1540	1040	329	85.3	42.1	21.1	10.7	459
1995/96	10.7	33	42.8	442	854	793	345	98.8	40.1	17.3	6.2	1.7	224
1996/97	1.1	28.4	54.1	509	791	663	234	70	28.3	10	2.5	0.7	200
1997/98	6.1	41	74.4	504	948	543	202	65.9	26.5	9.9	3.4	0	202
1998/99	(-)	(-)	98	780	1490	1430	458						

Akka

Annexe 2

jour	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	40.2	68.1	224	829	1330	1590	1490	1030	443	206	115	85.1	621
1992/93	88.5	94.2	277	782	1210	1540	1340	873	395	160	82.2	81.2	577
1993/94	92.2	92.5	216	648	1230	1470	1340	965	453	172	98.1	80.4	571
1994/95	70	128	443	1060	1650	2260	2930	2760	1700	947	379	172	1208
1995/96	130	174	242	739	1480	1940	2330	1770	1070	491	206	130	892
1996/97	124	147	215	780	1400	1770	1900	1400	802	320	112	70	753
1997/98	75.05	127	380	950	1410	1780	1770	1280	722	232	81	66	739

Diré

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	30.2	28.9	176	757	1300	1560	1540	1170	516	246	107	72.3	625
1992/93	66.5	55	213	748	1180	1520	1390	960	449	186	76.3	47.7	574
1993/94	46.7	64.6	153	576	1190	1450	1350	1020	546	214	86.1	56.9	563
1994/95	42.4	47	366	1020	1580	1960	2140	2220	1850	1120	468	198	1084
1995/96	133	138	220	662	1420	1800	1980	1840	1230	575	254	134	866
1996/97	103	124	186	648	1360	1700	1750	1560	932	404	137	59.2	747
1997/98	51.7	93.2	301	847	1340	1674	1660	1442	808	315	118	93	729

Nantaka

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	50.9	99.1	306	1150	1880	1850	1080	426	191	139	96.7	82	613
1992/93	77.7	109	366	871	1680	1760	817	378	198	104	79	76.7	545
1993/94	81.7	96.3	280	869	1600	1620	934	442	206	100	93.2	76.1	536
1994/95	73.7	142	541	1450	2450	2870	2810	1780	604	282	175	147	1110
1995/96	126	209	290	1160	2240	2550	(-)	754	352	206	128	101	?
1996/97	119	140	237	1160	2030	2400	1580	580	257	163			?
1997/98		207	576	1260	2080	2310	1390	573	264				?

Awoye

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	0	0	3.2	76	147	188	172	103	28	1.3	0	0	60
1992/93	0	0	9.0	70	129	180	149	82	22	0	0	0	53
1993/94	0	0	2.3	53	132	169	149	94	29	0	0	0	52
1994/95	0	0	27.9	108	198	306	442	406	206	92	20.4	0	151
1995/96	0	0	5.2	64	171	248	320	218	109	33.5	1.3	0	97
1996/97	0	0	2.2	70	158	218	241	158	72	13.8	0	0	78

Korientze

	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	0	0	0	13.6	78	122	90	12	0.5	0.0	0	0	26
1992/93	0	0	0	9.7	57	113	59	9.3	0.0	0.0	0	0	21
1993/94	0	0	0	6.0	24	98	28	15.2	1.3	0.0	0	0	14
1994/95	0	0	0	20.8	144	247	307	266	81	7.2	0	0	89
1995/96	0	0	0	8.5	114	192	236	44	18.6	2.0	0	0	51
1996/97	0	0	0	72.1	164	227	251	164	74.9	0.0	0	0	79

Sélingué (sortant du barrage)

année	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Annuel
1991/92	162	189	241	202	542	445	174	124	92.8	108	126	145	213
1992/93	146	175	197	183	720	403	145	134	64	88.9	131	144	211
1993/94	151	168	194	182	383	396	163	121	68.1	91.2	132	151	183
1994/95	148	245	270	203	553	1116	677	179.2	88.8	118	153	164	326
1995/96	163	211	116	203	945								

Annexe 3

Le critère de Nash

Critère de Nash pour une crue donnée :

Il peut être utilisé pour déterminer l'écart quadratique moyen entre une courbe de référence ($Y_{réf}(x)$) et une courbe simulée ($Y_{mod}(x)$) qui se veut modéliser correctement la courbe de référence. Il est défini de la façon suivante lorsque les courbes sont définies en un nombre discrets de points n (Nash et al 1970).

$$Nash[Y(x)] = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y_{mod}(x_k) - Y_{réf}(x_k))^2}{\sum_{k=1}^n (Y_{réf}(x_k) - \overline{Y_{réf}})^2}$$

Le critère Nash calculé permet de comparer l'estimation que l'on fait de $Y_{réf}(x)$ par $Y_{mod}(x)$, à l'estimation la plus simple que l'on pourrait faire de $Y_{réf}(x)$ avec la moyenne $\overline{Y_{réf}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_{réf}(x_k)$.

- Si $Nash[Y(x)] = 1$ estimation de $Y_{réf}(x)$ parfaite avec $Y_{mod}(x)$
- si $0 < Nash[Y(x)] < 1$ estimation de $Y_{réf}(x)$ meilleure avec $Y_{mod}(x)$, qu'avec $\overline{Y_{réf}}$.
- $Nash[Y(x)] < 0$ estimation moins bonne.

Critère de Nash moyen déterminé pour un échantillon de N crues :

Si $Nash_i$ est le critère de Nash obtenu pour la $i^{ème}$ crue de l'échantillon de crues étudié, le critère de Nash moyen utilisé pour évaluer la qualité moyenne du modèle appliqué à l'ensemble de l'échantillon est le suivant :

$$Nash = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Nash_i$$

Annexe 4

Résultats bruts des analyses des prélèvements ponctuels des eaux du fleuve Niger au Mali.

- (a) **éléments traces analysés dans la phase dissoute et totale** au laboratoire de transferts en géologie (équipe de géochimie) de Toulouse, France (en ppb).
- (b) **éléments nutritifs** analysés au laboratoire au laboratoire du CRO d'Abidjan (ORSTOM), Côte d'Ivoire (en mg.l^{-1}).
- (c) **éléments majeurs (et pH, conductivité)** analysés au laboratoire des formations superficielles de l'ORSTOM à Bondy, France (en mg.l^{-1}).
- (d) **carbone organique dissous et particulaire** analysés au laboratoire de Géologie et Océanographie à Bordeaux, France (COP en % ; COD en mg.l^{-1}).
- (e) **MES** filtrées au laboratoire de l'ORSTOM à Bamako, Mali (MES en mg.l^{-1}) ; Données de **débits** (en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) base de données ORSTOM-DNHE.

(1) Concentrations dans la phase dissoute

(filtration à $0.2\mu\text{m}$, excepté pour le carbone organique où filtration à $0.47\mu\text{m}$)

Annexe 4

	Banankoro 31/05/96	Banankoro 01/07/96	Banankoro 12/08/96'	Banankoro 28/10/1996	Banankoro 02/12/1996	Banankoro 19/02/97	Banankoro 17/04/97	Banankoro 28/08/97	Banankoro 7/11/97
Al (a)	65.0	228.2	20.6	25.2	19.5	7.3	26.9	149.1	70.7
Sc	2.9	2.8	1.7	1.9	2.3	2.4	2.2	2.2	2.0
Ti	2.7	6.0	1.4	1.4	1.5	1.3	1.4	5.2	3.4
V	0.626	0.698	0.309	0.291	0.282	0.310	0.733	0.657	0.375
Cr	0.354	0.549	0.610	0.406	0.276	0.492		0.744	1.281
Mn	0.594	0.990	0.181	1.834	0.641	0.374	4.556	1.045	0.448
Fe	39.9	122.0	18.7	144.3	157.1	14.8	37.1	181.9	139.0
Co	0.023	0.056	0.044	0.047	0.036	0.012	0.051	0.053	0.035
Ni	0.535	0.533	0.518	0.610			0.446	0.579	0.441
Cu	0.472	0.636	0.776	0.816	0.367	0.323	0.850	0.655	0.514
Zn	0.415	2.589	1.969	5.271	0.174	1.107	3.054	0.572	1.210
Ga	1.123	1.016	0.818	0.926	1.141	1.306	1.490	0.883	0.658
As	0.214	0.197		0.142	0.162	0.140	0.256	0.142	0.123
Rb	5.8	5.1	3.4	3.1	3.0	4.0	5.6	4.0	3.3
Sr	38.4	33.4	21.1	28.5	37.3	39.6	50.8	24.6	27.2
Y	0.023	0.050	0.034	0.034	0.026	0.008	0.021	0.057	0.035
Zr	0.045	0.135	0.040				0.019	0.125	0.061
Nb	0.008	0.021		0.001	0.002				0.011
Mo	0.076	0.058	0.056	0.025	0.032	0.038	0.054	0.064	0.045
Cd	0.016	0.069	0.371			0.004	0.005		0.011
Sb	0.064	0.010	0.014	0.004		0.006	0.008	0.010	0.007
Cs	0.010	0.012	0.009	0.003	0.003	0.009	0.013	0.013	0.010
Ba	42.4	38.6	28.9	30.7	37.9	39.7	51.4	28.8	27.7
La	0.050	0.106	0.046	0.064	0.057	0.010	0.039	0.116	0.068
Ce	0.075	0.185	0.088	0.142	0.118	0.014	0.135	0.234	0.146
Pr	0.012	0.024	0.013	0.016	0.014	0.003	0.008	0.028	0.017
Nd	0.034	0.080	0.060	0.052	0.043		0.045	0.110	0.068
Sm	0.016	0.016	0.013					0.024	0.012
Eu		0.006	0.007			0.015	0.018	0.008	
Gd	0.008	0.022	0.012		0.010			0.021	0.008
Tb		0.002	0.002					0.003	
Dy	0.006	0.010		0.010	0.007			0.012	0.007
Ho				0.002				0.003	
Er	0.007	0.009						0.009	
Tm		0.002							
Yb		0.006	0.004						
Lu								0.002	
Hf					0.005	0.002		0.002	0.004
Ta	0.001						0.008	0.015	0.031
Pb	0.018	0.032		0.153		0.019	0.284	0.046	0.091
Th	0.013	0.023	0.007	0.005	0.003		0.006	0.020	0.011
U	0.016	0.023	0.019	0.006	0.008	0.012	0.024	0.021	0.012
NO2 (b)					0.77	0.19	0.23	0.32	0.03
NO3					6.6	4.4	8.7	74.5	36.8
NH4					6.7	10.5	23.0	45.6	19.6
PO4					1.3	1.2	3.1		
Ca (c)		2.5	1.8	2.2	2.5		3.9		2.3
Mg		1.3	1.0	1.3	1.3		2.4		1.3
K		1.8	1.4	0.9	1.0		2.0		1.0
Na		3.3	2.3	2.5	3.5		5.4		2.6
Tac		26.1	18.7	23	26.8		42.6		22.7
Cl		0.5	0.4	0.2	0.2		0.6		0.4
NO3			0.98						0.32
SO4		0.56	0.34	0.13	0.10		0.15		0.20
SiO2		7.5	5.9	6.5	8.2		8.1		7.1
Cond		22.8	23.5	28.4	35.3		60.9		35.1
pH		6.9	6.8	7	7.2		7.4		6.9
%COP (d)			2.85	6.7	12.6	11.75	12.5	4.5	5.65
COD				1.81	0.92		1.7	7.64	
MES (e)	8.6	18.1	57.6	11.6	7.5	6.6	85.4		13.8
Débit	80	233	1560	1950	485	49.9	10.7	2160	1340

Annexe 4

	Koulikoro 03/07/1996	Koulikoro 13/08/1996'	Koulikoro 01/11/1996	Koulikoro 06/12/1996	Koulikoro 28/02/97	Koulikoro 24/04/1997	Koulikoro 02/08/1997	Koulikoro 02/10/1997	Koulikoro 10/11/97
Al (a)	139.0	87.5	21.3	22.6	6.5	27.8	74.7	85.3	69.7
Sc	1.7	1.4	2.0	2.1	1.9	1.9	1.6	1.7	1.9
Ti	3.2	2.7	1.2	1.5	1.0	1.1	3.1	3.2	3.5
V	0.560	0.465	0.398	0.412	0.435	0.451	0.735	0.402	0.422
Cr	0.333	0.629	0.301	0.267	0.415		0.458	0.552	0.000
Mn	0.506	0.337	1.649	1.058	0.457	1.009	0.416	0.956	0.486
Fe	68.8	51.8	186.2	183.3	14.4	35.9	44.3	109.3	132.1
Co	0.048	0.043	0.036	0.037	0.023	0.029	0.029	0.043	0.031
Ni	0.594	0.460					0.415	0.437	0.330
Cu	0.640	0.805	0.525	0.469	0.368	0.458	0.635	0.573	0.479
Zn	1.186	1.116	0.375	0.204	0.163	1.010	0.387	0.628	0.334
Ga	0.997	0.766	0.987	1.049	1.086	1.279	0.685	0.915	0.659
As	0.306	0.055	0.194	0.195	0.212	0.285	0.173	0.156	0.150
Rb	5.7	3.6	3.7	3.3	4.1	4.7	4.1	3.9	3.5
Sr	34.2	21.9	30.6	34.5	35.8	34.2	20.2	23.9	28.2
Y	0.035	0.045	0.049	0.043	0.009	0.014	0.055	0.043	0.032
Zr	0.095	0.083				0.019	0.086	0.075	0.056
Nb	0.010		0.000	0.001					0.008
Mo	0.097	0.073	0.038	0.032	0.044	0.049	0.091	0.039	0.049
Cd	0.079	0.089			0.004			0.004	0.002
Sb	0.014	0.018		0.006	0.011	0.010	0.035	0.012	0.008
Cs	0.011	0.008	0.006	0.009	0.006	0.012	0.010	0.012	0.010
Ba	36.9	27.9	34.3	35.6	33.8	38.0	23.0	30.7	29.2
La	0.068	0.085	0.099	0.083	0.011	0.017	0.084	0.073	0.073
Ce	0.107	0.151	0.216	0.183	0.019	0.038	0.168	0.165	0.156
Pr	0.016	0.023	0.024	0.022	0.003	0.004	0.021	0.020	0.018
Nd	0.040	0.084	0.086	0.071	0.017		0.096	0.071	0.062
Sm		0.018		0.014			0.025	0.014	0.015
Eu		0.010			0.014	0.015	0.008	0.004	
Gd	0.015	0.018	0.010				0.019	0.016	0.008
Tb	0.000	0.003							
Dy	0.010	0.006	0.010	0.011			0.011	0.006	0.008
Ho							0.001	0.000	
Er	0.007						0.006	0.006	
Tm	0.002								
Yb		0.005						0.004	
Lu									
Hf		0.002							0.003
Ta				0	0.001	0.019	0.023	0.033	0.000
Pb	0.054	0.028	0.038	0.046			0.047	0.049	0.036
Th	0.016	0.012	0.004	0.005			0.011	0.012	0.010
U	0.014	0.017	0.011	0.009	0.015	0.008	0.019	0.014	0.014
NO2 (b)				0.61	0.36	0.49	0.46		0.03
NO3				7.1	4.1	11.7	182.1		20.0
NH4				8.5	22.5	17.8	34.7		21.6
PO4				0.7	2.0	0.3			
Ca (c)	2.8	1.9	2.2		3.1	2.9			2.3
Mg	1.3	1.0	1.1		1.5	1.4			1.2
K	2.0	1.4	1.0		1.5	1.5			1.1
Na	3.7	2.6	2.7		4.0	3.8			2.6
Tac	27.8	20.6	21.6		30.8	29.2			22.7
Cl	0.7	0.3	0.5		0.5	0.5			0.4
NO3									0.31
SO4	0.18	0.35	0.16		0.11	0.07			
SiO2	4.8	6.2	6.9		6.6	6.6			7.5
Cond	36.7	24.9	18.7		41.5	36.7			35.4
pH	6.9	6.8	6.9		7	7			7.1
%COP (d)		3.15	4.6	6.7	9.1	18.5			
COD		1.6	1.6	1.22	1.7	1.25		2.48	
MES (e)	12.4	51.7	17.2		85.5	7.0			13.1
Débit	424	1680	2460	574	92.1	99.6	1560	4340	1460

Annexe 4

	Ke-Macina 14/08/96	Ké-Macina 05/11/96	Ké-Macina 10/12/96	Ké-Macina 10/03/97	Ké-Macina 06/05/97	Ké-Macina 08/08/97	Ké-Macina 14/11/97	Ké-Macina 04/07/96
Al (a)	181.2	18.4	17.0	24.9	45.1	128.9	91.6	268.2
Sc	1.3	1.9	2.1	2.0	2.0	1.1	1.9	2.1
Ti	3.7	1.2	1.2	1.4	1.5	3.7	3.8	4.9
V	0.659	0.504	0.426	0.417	0.689	0.640	0.529	0.725
Cr	0.716	0.314	0.208	0.625		0.463	0.000	0.513
Mn	0.323	0.878	0.531	0.259	0.443	0.271	0.589	0.699
Fe	71.0	176.4	88.4	22.1	38.7	55.1	166.0	74.5
Co	0.052	0.031	0.028	0.019	0.030	0.039	0.030	0.060
Ni							0.292	0.674
Cu	0.783	0.587	0.439	0.406	0.458	0.614	0.435	0.678
Zn	0.895	0.472			0.209	0.283		0.447
Ga	0.803	0.979	1.046	1.207	1.382	0.786	0.682	1.162
As		0.193	0.151	0.221	0.200	0.158	0.166	0.308
Rb	3.9	3.6	3.4	3.7	5.0	4.1	3.6	5.5
Sr	22.8	30.7	35.2	36.6	41.3	20.9	29.2	33.4
Y	0.052	0.059	0.033	0.015	0.020	0.033	0.047	0.069
Zr	0.135			0.018	0.023	0.114	0.075	0.157
Nb		0.000	0.002				0.009	0.017
Mo	0.062	0.024	0.024	0.052	0.041	0.060	0.048	0.082
Cd	0.036			0.013			0.002	0.037
Sb	0.019	0.000	0.004	0.012	0.013	0.025	0.009	0.017
Cs	0.011	0.009	0.008	0.006	0.008	0.010	0.009	0.021
Ba	28.1	33.9	35.5	37.5	41.4	25.1	30.0	42.3
La	0.096	0.109	0.065	0.020	0.029	0.058	0.103	0.114
Ce	0.164	0.235	0.130	0.030	0.057	0.104	0.202	0.171
Pr	0.022	0.025	0.018	0.005	0.007	0.015	0.025	0.027
Nd	0.097	0.089	0.049	0.020	0.040	0.056	0.101	0.092
Sm	0.018	0.017	0.017				0.018	0.026
Eu	0.008			0.017	0.023	0.005		
Gd	0.017	0.013	0.008			0.010	0.010	0.022
Tb	0.003					0.002	0.002	0.002
Dy	0.007	0.012	0.013			0.006	0.009	0.017
Ho	0.002					0.001	0.002	
Er	0.007					0.004		0.009
Tm								0.001
Yb	0.007						0.005	
Lu								
Hf	0.001	0.006		0.001			0.003	0.003
Ta	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.067	0.020	0.002
Pb	0.028	0.044	0.017			0.054	0.052	0.027
Th	0.017	0.007	0.003	0.004	0.003	0.012	0.014	0.021
U	0.025	0.016	0.012	0.017	0.021	0.022	0.016	0.022
NO2 (b)			0.48	0.3	0.57	0.28	0	
NO3			3.8	8.4	13.6	92.0	34.9	
NH4			10.3	21.3	13.0	33.3	17.2	
PO4					0.6	2.7	0.2	
Ca (c)		2.3	2.5				2.4	
Mg		1.1	1.3				1.2	
K		1.1	0.9				1.1	
Na		2.7	3.3				2.6	
Tac		22.8	25.9				23.2	
Cl		0.3	0.2				0.4	
NO3								
SO4		0.14	0.15					
SiO2		7.4	7.6				7.1	
Cond		27.7	28.4				32.1	
pH		6.9	7				7	
%COP (d)	2.9	4.7	6.65	5.05	10.6	2.1	7.1	
COD	1.94	1.2	0.84	1.72	1.46	2	0.95	
MES (e)	68.7	15.0	5.7	7.5	7.4	75.7	9.9	
Débit	3170	1860	570	69	38.4	1430		

Annexe 4

	Douna 06/06/96	Douna 15/08/96	Douna 06/11/96	Douna 09/12/96	Douna 13/03/97	Douna 12/05/97	Douna 09/08/97	Douna 13/11/97
Al (a)	164.1	0.0	23.9	25.1	64.2	74.4	63.1	124.5
Sc	2.8	1.0	2.0	2.1	2.0	1.9	0.6	1.9
Ti	4.0	2.8	1.2	1.2	1.7	1.7	1.9	4.6
V	1.543	0.699	0.670	0.578	0.675	1.623	0.719	0.630
Cr	0.420	0.581	0.298	0.212	0.575	0.000	0.255	0.000
Mn	0.639	0.277	1.435	1.008	0.479	2.027	0.354	0.647
Fe	63.4	41.5	251.2	133.9	35.0	53.0	21.8	164.5
Co	0.099	0.054	0.039	0.038	0.035	0.068	0.026	0.040
Ni	0.611				0.425	0.548		0.314
Cu	0.976	0.931	0.724	0.653	0.540	0.721	0.640	0.588
Zn	0.633	1.258	0.746		0.329	0.160	0.283	0.195
Ga	1.603	0.555	0.811	0.901	1.177	1.492	0.392	0.621
As	0.610	0.096	0.227	0.242	0.265	0.382	0.136	0.257
Rb	9.9	4.0	5.2	5.1	5.1	7.7	3.2	5.2
Sr	69.7	17.4	35.9	37.2	42.2	57.9	9.9	35.1
Y	0.048	0.107	0.101	0.055	0.020	0.030	0.066	0.069
Zr	0.111	0.114			0.042	0.038	0.066	0.125
Nb	0.010		0.000	0.001		0.003		0.015
Mo	0.282	0.072	0.083	0.091	0.065	0.157	0.054	0.087
Cd	0.282	0.032			0.004			0.002
Sb	0.033	0.020	0.008	0.010	0.023	0.031	0.009	0.012
Cs	0.029	0.019	0.014	0.012	0.013	0.021	0.015	0.018
Ba	60.9	19.1	28.3	29.8	35.2	42.4	12.9	27.3
La	0.075	0.137	0.163	0.093	0.024	0.038	0.080	0.122
Ce	0.100	0.261	0.357	0.201	0.048	0.072	0.165	0.228
Pr	0.017	0.044	0.054	0.030	0.005	0.008	0.025	0.033
Nd	0.048	0.188	0.254	0.135	0.016	0.034	0.121	0.133
Sm	0.016	0.034	0.041	0.034		0.002	0.023	0.023
Eu	0.006	0.010	0.010		0.019	0.022	0.007	0.005
Gd	0.013	0.040	0.029	0.021	0.008	0.005	0.022	0.020
Tb	0.001	0.004	0.004			0.001	0.002	0.003
Dy	0.010	0.020	0.023	0.018	0.006	0.001	0.010	0.015
Ho		0.005	0.003	0.003		0.001	0.001	0.002
Er	0.007	0.016	0.015			0.003	0.008	0.008
Tm	0.002	0.002				0.000		
Yb		0.006				0.000		0.007
Lu						0.000		
Hf	0.000	0.007	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.004
Ta	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.011	0.034	0.024
Pb	0.032	0.021	0.078	0.023		0.027	0.017	0.047
Th	0.017	0.021	0.005	0.006	0.003	0.004	0.007	0.015
U	0.217	0.040	0.032	0.028	0.060	0.134	0.019	0.033
NO2 (b)				0.61	0.23	0.54	0.22	0.06
NO3				5.9	3.0	21.0	56.2	12.3
NH4				11.1	19.5	17.1	46.5	56.9
PO4						0.5	0.9	0.2
Ca (c)		3.7		3.0	3.1			3.9
Mg		2.4		1.4	1.6			2.0
K		4.2		1.6	1.6			1.8
Na		2.0		3.3	3.7			3.1
Tac		36.2		27.5	30			33.2
Cl		0.6		0.3	0.5			0.6
NO3				0.26				0.35
SO4		0.42		0.18	0.12			
SiO2		5.5		7.9	7.9			8.2
Cond		45.7		42.2	40.1			53.8
pH		7.2		7	7.1			7.4
%COP (d)	2.3	1.97	1.47	1.4	2.73	1.62	1.75	1.2
COD		1.7	4.75	4.95	3.95	6.65	1.3	4.6
MES (e)	16.9	106.4	18.7	9.2	19.8	9.9	221.7	9.7
Débit	42.2	572	325	83.2	2.2	1.5	427	210

Annexe 4

	Sensé 07/06/96	Sensé 05/07/96	Sensé 10/09/96	Sensé 08/11/96	Sensé 13.03.97	Sensé 11.05.97	Sensé 12.08.97	Sensé 17/11/97
Al (a)	235.2	83.4	409.3	20.6	16.1	87.8	75.8	116.2
Sc	2.4	2.1	1.3	1.7	1.7	1.8	0.7	1.7
Ti	5.5	2.3	7.5	0.7	1.2	2.1	1.6	4.1
V	1.654	1.283	1.349	0.499	0.724	1.324	0.689	0.503
Cr	0.526	0.381	1.049	0.289	0.562	0.042	0.351	0.000
Mn	0.396	0.148	0.547	1.007	0.110	0.574	0.129	0.597
Fe	73.1	29.3	122.6	146.1	15.0	56.8	28.1	93.3
Co	0.085	0.039	0.084	0.035	0.024	0.047	0.035	0.036
Ni	0.512		0.488		0.476	0.431		0.391
Cu	0.629	0.711	1.278	0.679	0.555	0.606	0.687	0.587
Zn	1.976	0.344	1.579	0.451		0.220	0.370	0.315
Ga	1.105	1.118	1.136	1.026	1.336	1.522	0.695	0.761
As	0.358	0.391	0.089	0.231	0.259	0.249	0.158	0.212
Rb	5.3	5.7	4.5	4.0	4.0	5.2	3.9	3.9
Sr	40.3	40.5	31.9	32.3	42.0	45.8	19.5	31.3
Y	0.045	0.018	0.097	0.092	0.006	0.036	0.042	0.056
Zr	0.154	0.058	0.276			0.052	0.059	0.094
Nb	0.024	0.008	0.040	0.000		0.006		0.012
Mo	0.078	0.115	0.149	0.045	0.069	0.060	0.087	0.064
Cd	0.084	0.211	0.031		0.008			0.005
Sb	0.022	0.041	0.024	0.010	0.021	0.024	0.020	0.012
Cs	0.015	0.009	0.024	0.007	0.006	0.012	0.011	0.013
Ba	41.5	42.1	38.4	36.8	40.5	44.8	22.4	33.1
La	0.083	0.029	0.160	0.140	0.009	0.050	0.066	0.095
Ce	0.148	0.042	0.284	0.272	0.013	0.104	0.124	0.179
Pr	0.019	0.005	0.042	0.043	0.002	0.012	0.018	0.025
Nd	0.062	0.014	0.164	0.145		0.051	0.078	0.099
Sm	0.030	0.016	0.033	0.017			0.005	0.020
Eu			0.016		0.018	0.022	0.006	
Gd	0.012	0.007	0.031	0.020		0.011	0.013	0.013
Tb	0.001	0.001	0.004	0.003			0.002	0.002
Dy	0.010		0.020	0.020		0.003	0.007	0.011
Ho			0.004	0.003		0.001	0.001	0.002
Er			0.015			0.002	0.004	
Tm	0.001	0.001	0.002					
Yb	0.008		0.013			0.003		0.004
Lu			0.003					
Hf	0.003		0.012					0.004
Ta				0.001		0.013	0.013	0.017
Pb	0.039			0.050		0.015	0.019	0.039
Th	0.023	0.007		0.005		0.005	0.006	0.011
U	0.044	0.036		0.023	0.043	0.048	0.023	0.025
NO2 (b)					0.2	0.34	0.24	0.08
NO3					1.7	16.6	55.0	21.4
NH4					34.5	20.8	31.0	17.3
PO4					1.8	1.1		
Ca (c)								
Mg								
K								
Na								
Tac								
Cl								
NO3								
SO4								
SiO2								
Cond								
pH								
%COP (d)								
COD		0.85	2.3		-	1.76	1.84	1.03
MES (e)								
Débit	97	208	1930	2010	102	73	1310	1350

Annexe 4

	Akka 10/11/96	Akka 08.05/97	Akka 14.08.97	Akka 19/11/97	Diré 01/09/96	Diré 15/11/96	Diré 10/05/97	Diré 20/08/97	Diré 23/11/97
Al (a)	22.0	39.7	103.0	126.9	327.8	25.3	81.6	66.5	141.7
Sc	1.6	1.7	0.5	1.6	0.9	1.7	1.2	0.3	1.4
Ti	0.9	1.5		4.2	7.2	1.0	1.7	18.6	4.4
V	0.470	1.462	0.540	0.404	0.811	0.566	0.984	0.515	0.469
Cr	0.295		0.408		0.823	0.325	0.054	0.411	
Mn	1.961	0.541	0.210	1.064	0.457	0.540	0.298	0.223	0.448
Fe	170.0	37.0	41.1	129.8	102.5	167.9	53.8	34.1	114.8
Co	0.046	0.050	0.047	0.051	0.067	0.033	0.054	0.053	0.045
Ni		0.463	0.532	0.476			0.631	0.628	0.494
Cu	0.677	0.905	0.868	0.695	1.065	0.832	1.235	1.103	0.661
Zn		1.682	0.224	0.614	2.686	0.232	0.697	0.817	0.233
Ga	1.131	1.213	0.885	0.786	0.821	1.326	1.379	0.959	0.874
As	0.191	0.292	0.190	0.226		0.255	0.342	0.205	0.240
Rb	3.5	5.2	4.2	3.7	3.4	3.3	5.0	4.2	3.2
Sr	32.0	41.0	24.2	31.9	23.1	35.0	42.1	27.8	33.2
Y	0.084	0.018	0.035	0.057	0.082	0.094	0.025	0.030	0.056
Zr		0.022	0.075	0.109	0.278		0.051	0.068	0.115
Nb	0.001			0.010	0.035	0.001			0.012
Mo	0.027	0.114	0.081	0.055	0.111	0.036	0.135	0.098	0.048
Cd				0.008	0.031		0.135	0.004	0.003
Sb		0.042	0.023	0.014	0.022	0.008	0.031	0.023	0.012
Cs	0.003	0.011	0.010	0.011	0.019	0.002	0.008	0.008	0.009
Ba	38.8	36.3	29.2	35.3	27.4	44.4	40.2	33.1	38.4
La	0.128	0.030	0.056	0.099	0.137	0.147	0.040	0.047	0.095
Ce	0.271	0.068	0.097	0.185	0.233	0.299	0.076	0.086	0.182
Pr	0.039	0.007	0.013	0.025	0.039	0.045	0.011	0.012	0.025
Nd	0.141	0.036	0.063	0.101	0.143	0.156	0.032	0.039	0.101
Sm	0.029		0.015	0.020	0.029	0.029		0.015	0.018
Eu	0.006	0.017	0.005		0.008	0.004	0.022	0.004	
Gd	0.028		0.014	0.013	0.028	0.032		0.011	0.015
Tb	0.004			0.002	0.004	0.004			0.002
Dy	0.018		0.006	0.012	0.021	0.018		0.006	0.011
Ho	0.003		0.000	0.002	0.004	0.003		0.001	0.002
Er	0.011		0.008		0.009	0.007		0.004	
Tm									
Yb	0.006		0.004	0.005	0.010	0.009		0.005	0.004
Lu						0.002			
Hf	0.002			0.004	0.010		0.001		0.004
Ta		0.014	0.020	0.019	0.003		0.026	0.023	0.019
Pb	0.051		0.036	0.216	0.084	0.069		0.032	0.043
Th	0.007	0.005	0.009	0.012	0.030	0.004	0.003	0.008	0.013
U	0.025	0.029	0.018	0.020	0.032	0.024	0.047	0.022	0.027
NO2 (b)		0.49	0.14	0.16			0.59	0.37	0.18
NO3		15.0	52.4	22.0			13.2	100.0	29.7
NH4		10.3	29.7	5.7			27.2	39.8	22.2
PO4		0.3					0.2		
Ca (c)						2.5			
Mg						1.0			
K						1.9			
Na						2.5			
Tac						22.6			
Cl						0.5			
NO3						0.71			
SO4						0.42			
SiO2						3.5			
Cond						30.4			
pH						6.9			
%COP (d)									
COD	6.72		1.66		2.42	1.12	2.35	2.15	
MES (e)									
Débit	2000	0.5	967	1740	1190	1650	48	941	1700

	Sélingué 29/10/96	Sélingué 22/04/97	Sélingué 04/08/97	Sélingué 8/11/97
Al (a)	28.2	6.0	171.0	16.7
Sc	2.3	1.9	1.8	2.0
Ti	1.5	1.0	6.1	2.0
V	0.396	0.200	0.744	0.180
Cr	0.281		0.462	0.000
Mn	1.593	0.473	0.554	0.821
Fe	279.1	26.4	111.1	81.7
Co	0.031	0.014	0.045	0.020
Ni			0.474	0.221
Cu	0.615	0.338	0.892	0.441
Zn		0.337	0.635	0.388
Ga	1.116	0.806	0.720	0.808
As	0.231	0.220	0.185	0.233
Rb	5.5	4.0	5.0	5.4
Sr	36.4	31.0	22.1	36.3
Y	0.057	0.008	0.051	0.019
Zr			0.124	0.021
Nb	0.000		0.022	0.002
Mo	0.032	0.024	0.070	0.051
Cd		0.004		0.003
Sb		0.008	0.013	0.009
Cs	0.016	0.013	0.021	0.021
Ba	38.6	24.2	23.1	36.3
La	0.107	0.007	0.084	0.029
Ce	0.214	0.015	0.172	0.051
Pr	0.028		0.018	0.008
Nd	0.095		0.077	0.030
Sm	0.024		0.016	
Eu		0.008	0.007	
Gd	0.024		0.016	
Tb				
Dy	0.014		0.013	
Ho			0.001	
Er			0.008	
Tm				
Yb				
Lu				
Hf				0.002
Ta		0.023	0.033	
Pb	0.028	0.085	0.050	0.064
Th	0.008		0.026	0.004
U	0.020	0.007	0.041	0.012
NO2 (b)		0.38	0.07	0.02
NO3		14.1	49.8	39.3
NH4		19.7	31.4	18.3
PO4		0.3		
Ca (c)	3.2	2.9		3.1
Mg	1.1	1.2		1.3
K	1.4	1.3		1.5
Na	2.8	3.6		2.6
Tac	26.6	28.4		25.9
Cl	0.3	0.2		0.4
NO3				0.39
SO4	0.06			
SiO2	8.7	6.7		7.7
Cond	33.2	33.9		39.9
pH	7.1	7.1		7.1
%COP (d)	15.5	20.45	5.3	2.75
COD	3.11	1.05	3.49	1.42
MES (e)	7.6	7.5	40.5	3.7
Débit				

(2) Concentrations dans la phase Totale

	Banankoro 31/05/96	Banankoro 1/07/96	Banankoro 12/08/96	Banankoro 28/10/96	Banankoro 02/12/96	Banankoro 19/02/97	Banankoro 17/04/97	Banankoro 29/08/97	Banankoro 7/11/97	Sélingué 29/10/96	Sélingué 22/04/97	Sélingué 04/08/97	Sélingué 8/11/97
Ti	30.3	48.2	245.5	20.8	20.5	1.7	3.9	57.9	62.9	15.5	3.8	67.7	8.2
V	1.4	1.4	6.3	1.4	1.1	0.4	1.1	4.5	2.1	1.1	0.5	5.6	0.4
Cr				1.484	1.115		0.319	6.000		0.733	0.237	4.664	1.939
Mn	10.9	15.9	62.5	12.9	15.3	1.3	15.5	41.0	21.1	23.9	52.0	44.3	42.5
Fe	449.8	571.4	3127.0			5.5	70.1		1450.1		88.8		306.0
Co	0.2	0.3	1.4	0.3	0.3	0.0	0.2	0.9	0.5	0.2	0.1	0.8	0.1
Ni	1.051	1.775	4.767	1.432	0.880		1.090	3.421	2.176	0.747	0.475	2.746	0.448
Cu	1.002	2.293	3.038	0.740	0.548	0.346	0.810	2.134	1.197	0.797	0.309	2.455	0.751
Zn	1.452	12.249	6.287	0.611	0.601	0.803	2.378	2.966	2.642	0.917	0.425	3.483	3.782
Ga	1.210	1.207	2.572	1.424	1.561	1.243	1.794	1.928	1.183	1.550	1.041	2.047	0.879
As	0.202	0.182	0.473			0.149	0.248	0.353	0.247		0.224	0.384	0.260
Rb	6.9	5.8	6.4	3.6	3.3	4.1	6.0	5.9	4.0	5.9	4.4	7.5	5.6
Sr	40.8	34.7	25.9	30.3	39.6	41.2	52.7	28.3	28.8	36.8	32.5	25.5	36.5
Y	0.2	0.2	1.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.7	0.3	0.2	0.1	0.7	0.1
Zr	2.0	2.0	6.9	0.5	0.4	0.1	0.2	2.0	1.3	0.4	0.1	2.3	0.2
Nb	0.117	0.171	0.930	0.081	0.066			0.240	0.226	0.063	0.033	0.349	0.038
Mo	0.099	0.149	0.105	0.044	0.012	0.051	0.065	0.105	0.061	0.080	0.123	0.136	0.063
Cd	0.073	0.104	0.053			0.031		0.027	0.005	0.009			0.004
Sb	0.027	0.277	0.032	0.021	0.018	0.011	0.021	1.932	0.090	0.013	0.018	0.003	0.013
Cs	0.037	0.042	0.183	0.047	0.030	0.010	0.030	0.133	0.051	0.054	0.027	0.208	0.031
Ba	46.6	43.2	53.2	36.7	45.9	40.6	52.7	52.2	36.8	43.7	31.4	44.4	38.8
La	0.4	0.5	2.6	0.5	0.4	0.0	0.2	1.9	0.8	0.4	0.1	1.9	0.1
Ce	0.746	0.950	5.347	0.967	0.929	0.040	0.345	3.803	1.590	0.640	0.276	3.622	0.197
Pr	0.086	0.097	0.549	0.113	0.098	0.005	0.032	0.393	0.166	0.081	0.029	0.398	0.024
Nd	0.318	0.357	2.017	0.433	0.333	0.028	0.175	1.517	0.604	0.342	0.094	1.547	0.090
Sm	0.057	0.063	0.350	0.035	0.052	0.018	0.026	0.258	0.102	0.051		0.293	0.016
Eu	0.011	0.013	0.077	0.022	0.022	0.019	0.029	0.060	0.023	0.014	0.022	0.064	
Gd	0.045	0.045	0.263	0.045	0.056	0.011	0.042	0.242	0.074	0.052	0.022	0.243	0.013
Tb	0.007	0.008	0.042	0.008	0.006		0.003	0.022	0.011	0.005		0.013	
Dy	0.036	0.036	0.202	0.045	0.038		0.020	0.149	0.057	0.027	0.010	0.143	0.010
Ho	0.007	0.007	0.040	0.007	0.005		0.006	0.026	0.011	0.007		0.028	0.002
Er	0.021	0.020	0.115		0.022			0.071	0.030	0.012	0.015	0.078	0.005
Tm	0.002	0.002	0.015	0.003	0.005	0.004		0.009	0.003			0.010	0.001
Yb	0.024	0.018	0.098	0.009	0.016			0.057	0.028	0.011	0.006	0.066	0.006
Lu	0.002	0.002	0.014	0.003				0.009	0.003	0.003		0.009	0.000
Hf	0.072	0.066	0.229			0.042	0.020	0.064	0.039		0.021	0.089	0.032
Ta	0.029	0.090	0.096	0.011	0.007	0.003	0.004	0.016	0.015	0.007	0.009	0.042	0.041
Pb	0.310	0.408	1.226	0.073	0.119		0.098	0.807	0.488	0.139	0.039	0.796	0.120
Th	0.151	0.147	0.750	0.110	0.090	0.010	0.033	0.508	0.205	0.096	0.023	0.690	0.036
U	0.042	0.037	0.185	0.029	0.030	0.011	0.030	0.100	0.051	0.043	0.015	0.143	0.019

Annexe 4

	Koulikoro 3/07/96	Koulikoro 13/08/96	Koulikoro 01/11/1996	Koulikoro 06/12/1996	Koulikoro 28/02/97	Koulikoro 24/04/97	Koulikoro 02/10/97	Koulikoro 10/11/97	Ké-Macina 4/07/96	Ké-Macina 14/08/96	Ké-Macina 05/11/96	Ké-Macina 10/12/96	Ké-Macina 10/03/97
Ti	37.8	153.6	68.2	14.0	1.8	1.9	29.3	56.8	138.5	153.1	69.5	29.1	20.8
V	1.4	4.3	3.0	1.0	0.5	0.6	2.9	2.1	4.4	5.0	2.8	1.4	1.3
Cr	3.834	6.159	3.495	0.951		0.317	3.282	3.814	7.791	6.951	3.317	1.359	1.003
Mn	34.7	42.7	41.7	14.3	5.4	14.5	30.3	24.0	23.3	29.7	39.0	21.5	9.1
Fe	548.5	1974.8			17.2	47.3		1333.3	1579.4	2185.8			150.9
Co	0.3	0.8	0.7	0.2	0.1	0.1	0.6	0.4	0.8	0.9	0.6	0.3	0.2
Ni	1.494	2.941	2.048	0.694	0.463	0.604	1.864	2.332	3.127	3.461	1.959	0.898	0.748
Cu	1.146	2.505	1.591	0.868	0.370	0.800	1.183	2.332	2.300	2.621	1.182	0.769	3.431
Zn	5.549	4.313	2.159	1.177	0.380	0.791	1.588	2.253	4.891	4.374	1.590	0.862	1.547
Ga	1.189	1.915	2.038	1.400	1.137	1.352	1.523	1.214	2.370	2.260	1.962	1.501	1.548
As	0.290	0.370			0.224	0.303		0.252	0.398	0.321			0.238
Rb	6.4	6.0	4.8	3.8	4.4	4.9	5.1	4.3	8.3	6.9	4.9	3.9	4.4
Sr	35.7	26.1	33.1	36.1	37.8	35.3	26.9	30.3	37.2	27.8	33.4	36.6	38.7
Y	0.2	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.4	0.3	0.8	0.8	0.5	0.2	0.2
Zr	1.0	3.4	2.2	0.4	0.1	0.1	1.0	1.2	3.6	4.2	1.7	0.8	0.6
Nb	0.158	0.606	0.252	0.050	0.013	0.016	0.130	0.214	0.595	0.613	0.266	0.119	0.105
Mo	0.127	0.097	0.030	0.029	0.051	0.092	0.060	0.067	0.139	0.112	0.055	0.042	0.048
Cd	0.153	0.091	0.011					0.014	0.094	0.053	0.019		0.022
Sb	0.038	0.031	0.033	0.007	0.019	0.040	0.010	0.034	0.045	0.046	0.010	0.014	0.028
Cs	0.050	0.144	0.087	0.038	0.015	0.017	0.086	0.057	0.189	0.190	0.074	0.036	0.043
Ba	43.4	43.7	48.7	40.9	36.0	39.7	42.4	38.8	56.9	49.4	47.3	43.5	42.2
La	0.5	1.7	1.2	0.3	0.0	0.1	1.1	0.8	2.0	2.0	1.2	0.5	0.4
Ce	0.998	3.668	2.514	0.644	0.100	0.169	2.272	1.667	3.697	3.918	2.501	1.123	0.809
Pr	0.100	0.362	0.261	0.068	0.010	0.015	0.233	0.175	0.439	0.431	0.280	0.112	0.094
Nd	0.372	1.323	0.968	0.286	0.045	0.061	0.882	0.675	1.590	1.606	0.978	0.387	0.315
Sm	0.067	0.234	0.146	0.059	0.018		0.143	0.111	0.294	0.278	0.208	0.066	0.058
Eu	0.012	0.050	0.046	0.010	0.018	0.021	0.037	0.024	0.061	0.059	0.048	0.016	0.033
Gd	0.048	0.181	0.163	0.045	0.013	0.022	0.168	0.082	0.217	0.210	0.194	0.077	0.082
Tb	0.008	0.029	0.016	0.009			0.013	0.013	0.034	0.035	0.018	0.005	0.010
Dy	0.037	0.143	0.104	0.031	0.011	0.008	0.087	0.064	0.171	0.167	0.107	0.024	0.033
Ho	0.007	0.027	0.018	0.007	0.002		0.017	0.013	0.033	0.032	0.016	0.008	0.006
Er	0.021	0.078	0.039	0.019	0.004	0.003	0.045	0.035	0.090	0.091	0.055	0.022	
Tm	0.002	0.010	0.009	0.004			0.005	0.004	0.011	0.011	0.007	Problème...	0.005
Yb	0.019	0.068	0.058	0.019	0.007		0.038	0.028	0.074	0.075	0.042		0.010
Lu	0.002	0.009	0.006				0.004	0.004	0.010	0.010	0.005		
Hf	0.034	0.111			0.021	0.023	0.032	0.040	0.114	0.130			0.044
Ta	0.238	0.044	0.021	0.007	0.004	0.014	0.009	0.030	0.075	0.047	0.022		0.011
Pb	0.749	1.302	0.601	0.142	0.046	0.068	0.509	0.723	1.095	1.363	0.491		0.168
Th	0.141	0.535	0.314	0.087	0.012	0.022	0.301	0.224	0.599	0.599	0.308		0.090
U	0.035	0.130	0.069	0.031	0.010	0.009	0.059	0.056	0.138	0.142	0.072		0.037

Annexe 4

	Ké-Macina 06/05/97	Ké-Macina 09/08/97	Ké-Macina 14/11/97	Douna 06/06/96	Douna 5/07/96	Douna 15/08/96	Douna 06/11/96	Douna 09/12/96	Douna 13/03/97	Douna 12/05/97	Douna 08/08/97	Douna 13/11/97
Ti	15.2	113.1	39.1	69.4	199.8	736.6	76.9	45.0	13.8	15.6	452.2	68.7
V	1.4	8.5	1.5	2.9	7.3	15.0	3.6	2.5	1.4	2.6	28.1	2.5
Cr	1.010	9.769	2.546	5.760	10.503	15.733	2.617	1.976	0.577	1.144	28.412	2.110
Mn	15.9	49.9	22.4	45.9	50.3	64.2	38.9	37.3	26.8	31.1	84.1	27.7
Fe	124.7		755.6	649.5	3396.9	5065.4			125.0	183.4		1227.4
Co	0.2	1.5	0.3	0.4	1.4	2.4	0.6	0.5	0.2	0.3	4.0	0.4
Ni	0.691	5.290	0.981	1.371	5.112	7.885	1.774	1.320	0.722	0.892	13.110	1.335
Cu	0.699	3.462	0.912	1.460	3.319	6.045	1.436	1.041	0.754	1.086	8.535	1.641
Zn	0.773	7.422	1.719	16.057	5.828	12.145	1.942	1.111	1.256	1.072	14.622	4.245
Ga	1.720	3.703	1.047	1.817	3.836	5.742	2.023	1.654	1.391	1.862	9.593	1.195
As	0.265	0.528	0.220	0.601	0.675	0.998			0.434	0.523	1.645	0.379
Rb	5.7	10.2	4.2	11.7	13.2	15.0	7.2	6.5	5.8	8.7	22.8	6.3
Sr	42.7	26.6	30.4	73.1	41.6	25.6	38.5	39.2	44.0	60.8	22.4	36.5
Y	0.2	1.4	0.2	0.4	1.3	2.8	0.7	0.4	0.2	0.3	5.3	0.5
Zr	0.5	6.0	0.9	1.8	7.2	17.4	2.4	1.5	0.5	0.7	23.6	1.9
Nb	0.070	0.584	0.146	0.328	0.949	3.266	0.326	0.204	0.073	0.077	2.567	0.311
Mo	0.081	0.150	0.059	0.357	0.233	0.244	0.073	0.092	0.111	0.194	0.297	0.104
Cd			0.005	0.034	0.066	0.136		0.023			0.031	0.013
Sb	0.026	0.054	0.015	0.067	0.065	0.120	0.022	0.023	0.027	0.043	0.079	0.024
Cs	0.032	0.412	0.044	0.120	0.591	1.119	0.201	0.134	0.057	0.091	1.946	0.116
Ba	45.8	60.8	36.9	65.1	69.0	52.3	38.1	37.7	37.6	48.0	82.5	34.0
La	0.3	3.4	0.6	0.8	2.7	6.2	1.5	0.9	0.3	0.4	11.8	1.0
Ce	0.663	7.266	1.153	1.600	4.454	11.168	2.808	1.791	0.688	1.064	23.992	1.806
Pr	0.076	0.776	0.120	0.172	0.586	1.387	0.343	0.239	0.074	0.111	2.693	0.239
Nd	0.278	2.802	0.441	0.645	2.185	5.082	1.317	0.797	0.264	0.426	9.974	0.918
Sm	0.060	0.492	0.079	0.119	0.399	0.924	0.211	0.167	0.056	0.090	1.823	0.166
Eu	0.026	0.122	0.015	0.022	0.079	0.200	0.056	0.029	0.029	0.036	0.406	0.034
Gd	0.043	0.504	0.057	0.088	0.298	0.697	0.251	0.152	0.066	0.103	1.925	0.126
Tb		0.041		0.015	0.049	0.114	0.030	0.022	0.005	0.006	0.219	0.019
Dy	0.014	0.300	0.044	0.073	0.252	0.582	0.155	0.086	0.038	0.048	1.109	0.097
Ho	0.005	0.051	0.009	0.014	0.047	0.111	0.025	0.014	0.005	0.011	0.192	0.018
Er	0.013	0.138	0.024	0.041	0.138	0.315	0.059	0.049	0.020	0.031	0.590	0.052
Tm	0.003	0.020	0.003	0.005	0.018	0.041	0.010	0.006	0.004	0.005	0.073	0.007
Yb	0.007	0.122	0.020	0.038	0.115	0.272	0.073	0.036	0.007	0.021	0.476	0.042
Lu		0.020	0.002	0.004	0.017	0.038	0.007	0.005			0.067	0.006
Hf	0.039	0.198	0.027	0.085	0.254	0.546			0.032	0.037	0.767	0.061
Ta	0.031	0.048	0.028	0.049	0.141	0.505	0.032	0.022	0.009	0.041	0.165	0.066
Pb		2.127	0.344	0.394	1.335	3.226	0.548	0.368	0.139	0.203	4.913	0.526
Th	0.085	1.188	0.147	0.224	0.753	1.889	0.386	0.237	0.077	0.122	3.493	0.233
U	0.039	0.184	0.045	0.271	0.208	0.554	0.104	0.084	0.064	0.156	0.602	0.083

Annexe 4

	Sensé 10/09/96	Sensé 08/11/96	Sensé 13/03/97	Sensé 11/05/97	Sensé 12/08/97	Sensé 17/11/97	Akka 10/11/96	Akka 08/05/97	Akka 14/08/97	Akka 19/11/97	Diré 1/09/96	Diré 15/11/96	Diré 10/05/97	Diré 20/08/97	Diré 23/11/97
Ti	279.8	93.8	78.9	34.7	281.7	142.4	28.2	456.3	129.7	41.1	374.4	33.3	121.3	114.4	53.6
V	7.6	3.9	3.5	3.1	16.3	3.7	1.8	17.0	10.5	1.4	12.7	2.0	8.6	9.4	1.8
Cr	9.745	3.856	3.442	2.525	19.789	3.867	1.495	20.484	12.903	1.260	17.346	1.955	12.013	12.393	2.220
Mn	36.4	34.5	32.9	23.2	69.0	31.6	11.4	105.9	41.6	8.6	31.0	10.1	25.9	29.2	10.0
Fe	2998.3		445.5	313.5		1572.2		2555.1		721.5	4896.9		1534.2		754.4
Co	1.3	0.7	0.7	0.5	3.0	0.7	0.3	3.5	1.9	0.2	2.1	0.3	1.7	1.7	0.3
Ni	4.291	2.481	2.119	1.403	9.765	2.171	1.465	9.368	6.882	1.138	10.523	1.553	5.985	6.454	1.352
Cu	3.407	1.679	1.586	1.258	5.464	1.739	1.270	5.598	4.007	1.387	7.405	1.324	3.514	3.695	1.233
Zn	8.106	2.077	2.219	2.365	9.831	3.487	1.411	10.725	9.034	2.423	56.744	1.459	6.350	6.409	3.483
Ga	2.943	2.386	2.358	2.178	6.370	1.721	1.718	6.759	4.562	1.109	5.107	1.913	4.502	4.110	1.327
As	0.410		0.361	0.414	0.705	0.354		0.757	0.502	0.297	0.627		0.629	0.486	0.323
Rb	7.8	5.8	5.9	6.4	15.3	5.7	4.3	14.3	11.5	4.3	11.8	4.3	10.2	10.2	4.1
Sr	26.9	35.3	45.7	48.9	29.1	33.9	33.5	51.4	30.1	32.7	32.3	36.5	49.1	34.7	35.1
Y	1.4	0.7	0.6	0.4	3.1	0.7	0.3	3.1	1.9	0.2	2.3	0.3	1.3	1.7	0.3
Zr	6.6	2.4	2.4	1.3	12.7	3.0	0.9	13.7	7.2	0.9	11.0	1.0	5.7	6.1	1.4
Nb	1.157	0.390	0.396	0.172	1.466	0.530	0.123	2.232	0.690	0.150	1.740	0.145	0.653	0.616	0.226
Mo	0.123	0.076	0.110	0.076	0.182	0.097	0.048	0.247	0.149	0.067	0.178	0.025	0.225	0.139	0.061
Cd	0.106	0.011		0.068	0.009	0.008	0.024		0.006	0.005	0.067				0.028
Sb	0.047	0.026	0.040	0.050	0.059	0.058	0.040	0.077	0.031	0.036	0.082	0.015	0.038	0.030	0.033
Cs	0.325	0.139	0.144	0.098	0.850	0.128	0.066	0.650	0.564	0.052	0.713	0.071	0.399	0.468	0.065
Ba	52.8	51.2	53.2	54.6	83.8	47.0	43.7	89.5	62.4	39.4	67.0	49.9	66.0	62.8	45.6
La	3.5	1.6	1.3	0.8	7.1	1.6	0.6	7.0	4.4	0.5	5.3	0.8	2.9	3.9	0.7
Ce	7.116	3.287	2.609	1.718	14.549	3.208	1.211	14.500	8.410	1.008	9.739	1.433	5.466	6.987	1.295
Pr	0.786	0.358	0.282	0.179	1.588	0.356	0.147	1.606	0.995	0.118	1.158	0.172	0.645	0.851	0.160
Nd	2.925	1.422	1.093	0.680	5.893	1.335	0.524	6.037	3.690	0.454	4.306	0.707	2.465	3.231	0.585
Sm	0.501	0.245	0.176	0.138	1.030	0.234	0.118	1.054	0.720	0.081	0.767	0.105	0.432	0.567	0.107
Eu	0.103	0.061	0.065	0.044	0.240	0.048	0.026	0.252	0.155	0.015	0.162	0.028	0.118	0.123	0.022
Gd	0.360	0.240	0.218	0.147	1.112	0.179	0.110	1.169	0.689	0.064	0.580	0.117	0.529	0.597	0.080
Tb	0.059	0.024	0.026	0.012	0.129	0.029	0.013	0.126	0.070	0.009	0.093	0.013	0.061	0.062	0.013
Dy	0.289	0.136	0.145	0.061	0.630	0.141	0.061	0.603	0.376	0.047	0.460	0.057	0.287	0.336	0.064
Ho	0.056	0.028	0.028	0.015	0.120	0.027	0.011	0.119	0.080	0.009	0.086	0.009	0.049	0.064	0.012
Er	0.154	0.091	0.073	0.047	0.318	0.071	0.030	0.320	0.197	0.026	0.242	0.023	0.153	0.173	0.033
Tm	0.020	0.012	0.012	0.009	0.041	0.009	0.006	0.036	0.024	0.003	0.032	0.003	0.019	0.025	0.004
Yb	0.132	0.062	0.061	0.044	0.262	0.062	0.025	0.293	0.180	0.020	0.201	0.028	0.137	0.154	0.030
Lu	0.018	0.007	0.006		0.036	0.009	0.005	0.033	0.022	0.003	0.029	0.004	0.020	0.023	0.004
Hf	0.209		0.152	0.053	0.412	0.095		0.582	0.232	0.029	0.359		0.203	0.208	0.044
Ta	0.118	0.032	0.070	0.031	0.078	0.076	0.014	0.272	0.043	0.044	0.135	0.016	0.101	0.038	0.463
Pb	1.822	0.725	0.552	0.388	3.461	1.012	0.276	2.960	1.901	0.356	2.699	0.287	1.260	1.501	0.710
Th	1.081	0.443	0.359	0.225	2.101	0.434	0.163	2.107	1.191	0.125	1.473	0.188	0.833	1.008	0.189

Annexe 5

Résultats des calculs sur la chimie des eaux et des particules du fleuve Niger au Mali.

Cette annexe présente les concentrations moyennes obtenues pour la chimie des eaux et des particules du fleuve Niger au Mali aux stations étudiées dans cette thèse à partir de la base de données ORSTOM-Mali (1) ou des données acquises ponctuellement présentées dans l'annexe 4 (2).

1. Résultats des concentrations moyennes obtenues dans le cadre du réseau d'observation des eaux du Niger au Mali

Concentrations moyennes annuelles et mensuelles en MES (en mg.l⁻¹)

Banankoro

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1991-1992	15.5	14.4	33.9	36.3	18.9	13.7	7.6	3.5	1.7	4.1	0.9	4.3	20.1
1992-1993	7.5	29.2	39.5	36.9	24.1	16.5	18.1	7.3	9.5	14.6	5.8	2.7	25.1
1993-1994	6.5	32.9	42.6	44.3	29.8	20.7	14.9	12.4	9.9	7.5	7.6	34.8	28.4
1994-1995	31.2	39.7	57.0	46.9	19.2	16.0	14.4	15.2	15.1	15.5	12.4	9.7	23.7
1995-1996	13.7	26.3	53.9	59.4	29.5	12.1	11.5	8.3	7.6	8.2	4.5	5.6	27.9
1996-1997	8.9	18.5	35.9	36.6	26.6	14.7	12.4	10.9	7.7	6.0	9.1	17.6	22.0
1997-1998	8.1	23.5	36.1	30.7	23.3	14.0	10.1	8.5	5.6	3.3	4.0	4.3	20.8

Koulikoro

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1991-1992	0.0	9.9	37.7	45.6	33.4	17.6	6.2	9.1	4.2	4.8	5.1	6.7	25.1
1992-1993	11.8	11.9	23.9	33.9	36.4	18.6	10.8	3.3	2.8	3.1	5.1	4.9	24.3
1993-1994	5.4	24.8	27.0	47.6	34.3	28.2	14.0	15.4	10.2	8.8	6.3	7.3	28.8
1994-1995	9.2	16.9	42.1	41.4	36.8	24.7	20.2	13.3	5.1	4.7	3.8	4.7	27.8
1995-1996	29.6	13.5	26.2	44.0	25.3	23.1	14.5	8.1	5.8	8.4	6.2	6.4	24.5
1996-1997	11.5	25.3	51.1	47.8	34.5	20.6	16.1	15.0	12.7	10.8	14.6	20.8	29.0
1997-1998	24.4	34.2	53.9	52.2	25.9	29.1	12.7	11.8	15.6	18.7	10.4	8.6	30.7

Ké-Macina

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1991-1992													
1992-1993	26.5	41.8	29.3	51.4	32.0	28.9	34.8	18.5	26.8	11.7	11.9	5.5	33.3
1993-1994	29.6	41.1	49.5	77.8	61.4	46.7	24.9	25.9	23.1	33.3	19.7	13.4	50.4
1994-1995	53.1	21.1	79.4	69.9	57.0	44.1	36.8	15.2	10.6	11.3	17.7	19.0	47.4
1995-1996	26.5	23.6	73.5	77.9	54.8	28.2	41.9	34.3	18.7	13.7	12.2	14.7	45.7
1996-1997	36.6	53.2	50.2	87.9	47.9	25.3	28.6	21.1	17.8	11.0	18.3	13.2	41.8
1997-1998	17.0	40.2	78.7	54.5	45.2	24.9	30.8	17.5	16.9	9.4	7.1		39.6

D

Douna

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1991-1992	2.6	37.7	76.9	91.7	37.3	16.3	10.3	13.8	4.8	5.4	5.0	4.6	42.8
1992-1993	9.4	60.4	63.7	82.0	68.7	31.3	12.7	12.0	8.2	6.1	4.6	5.7	52.3
1993-1994	0.0	0.0	190.6	139.4	79.5	33.6	26.2	15.8	13.8	18.1	9.3	16.9	74.1
1994-1995	26.6	68.8	110.4	105.8	60.8	32.1	23.1	22.4	15.8	13.9	15.6	21.0	50.3
1995-1996	26.9	25.4	62.8	131.6	67.1	25.8	15.9	13.3	14.8	16.1	15.7	11.7	55.1
1996-1997	15.9	51.8	93.0	131.6	76.1	30.7	17.9	13.5	10.4	11.4	11.1	11.1	66.9
1997-1998	18.3	71.0	123.5	168.0	51.2	35.8	15.4	10.1	9.8	13.1	1.6		70.3

Akka

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1992-1993	67.8	77.3	89.6	68.7	43.1	11.3	7.7	15.1	39.3	74.1	78.5	68.2	32.5
1993-1994	46.1	98.5	85.5	84.9	49.5	25.0	10.1	15.7	32.6	66.6	64.1	30.3	36.3
1994-1995	85.7	41.9	76.3	84.1	45.1	22.3	11.8	12.0	9.9	10.8	42.5	125.0	27.1
1995-1996	129.3	157.3	135.4	106.0	52.0	15.6	7.2	8.3	14.5	39.6	101.6	200.4	35.2
1996-1997	138.8	168.9	150.8	111.4	54.1	20.1	10.1	10.2	16.1	30.5	97.3	0.0	37.8
1997-1998	138.4	102.4	95.8	98.3	36.0	17.4	14.1	12.4	18.7	34.0	109.6	115.0	35.7

Diré

	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	janv	févr	mars	avr	Annuel
1992-1993	46.6	69.4	80.3	80.8	47.0	21.9	16.5	28.8	78.0	133.6	110.8	124.2	43.3
1993-1994	114.8	117.0	87.9	101.1	71.2	23.8	18.0	25.3	33.3	43.3	61.4	70.8	43.2
1994-1995	85.4	87.2	133.1	113.0	76.6	30.8	18.4	16.7	25.2	29.3	68.8	118.8	43.5
1995-1996	125.7	152.5	143.6	130.5	68.0	25.8	17.9	13.5	12.4	46.3	94.6	188.0	43.4
1996-1997	138.3	139.2	160.0	139.0	65.9	24.9	13.5	14.6	16.7	25.4	43.4	61.6	41.0
1997-1998	89.9	124.1	117.4	77.8	43.5	28.7	20.5	16.9	28.1	54.1	69.9	65.8	38.6

Concentrations moyennes annuelles en éléments majeurs

		1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Banankoro							
pH		6.7	7.2	7.2	6.3	6.3	6.8
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	36	45.1	37	34.4	31	31.1
Ca	(mg.l-1)	1.9	2.3	1.5	2.5	2.3	1.9
Mg	(mg.l-1)	1.1	0.7	1.2	1.3	1.3	1.2
K	(mg.l-1)	1.8	1.1	1.4	1.4	1.3	0.9
Na	(mg.l-1)	2.2	3.6	3.0	2.1	2.2	2.1
Tac	(mg.l-1)	19.8	21.7	21.0	20.8	20.4	19.4
Cl	(mg.l-1)	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6	0.4
NO3*	(mg.l-1)	0.01	0.35	0.01	0.53	0.04	0.05
SO4*	(mg.l-1)	0.16	0.18	0.05	0.31	0.03	0.18
SiO2	(mg.l-1)	13.2	16.6	14.2	11.7	12.5	12.6
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)	27.6	30.5	28.6	29.9	27.9	26.0
TDS	(mg.l-1)	40.7	47.1	42.7	41.6	40.5	38.6

		1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Koulikoro							
pH					6.7	7	incomplète
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)				37.5	38	
Ca	(mg.l-1)	2.0			2.5	2.5	2.3
Mg	(mg.l-1)	0.9			1.2	1.2	1.1
K	(mg.l-1)	2.5			1.6	1.5	1.3
Na	(mg.l-1)	2.8			2.9	2.8	3.0
Tac	(mg.l-1)	20.0			23.8	23.2	22.6
Cl	(mg.l-1)	1.1			1.1	0.7	0.7
NO3*	(mg.l-1)	0.34					
SO4*	(mg.l-1)	0.42					
SiO2	(mg.l-1)	8.4			11.4	13.7	14.5
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)	30.1			33.5	31.9	31.1
TDS	(mg.l-1)	38.4			44.4	45.5	45.5

		1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Ké-Macina							
pH		7.5	7.0	7.0	6.7	6.9	7.0
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	32.7	42.7	41.6	34.9	37.0	37.7
Ca	(mg.l-1)	2.0	1.9	2.2	2.6	2.7	2.7
Mg	(mg.l-1)	0.9	0.7	1.4	1.1	1.2	1.1
K	(mg.l-1)	1.2	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5
Na	(mg.l-1)	2.8	3.5	3.6	2.4	2.7	2.9
Tac	(mg.l-1)	19.1	19.5	22.7	22.5	24.3	24.4
Cl	(mg.l-1)	0.3	1.3	1.1	0.5	0.5	0.5
NO3*	(mg.l-1)						0.01
SO4*	(mg.l-1)						0.2
SiO2	(mg.l-1)	13.6	14.6	14.8	9.3	13.8	13.9
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)	26.8	29.0	33.0	31.2	33.9	33.3
TDS	(mg.l-1)	40.4	43.6	47.8	40.5	47.7	47.3

		1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Douna							
pH		7.3	7.3	7.3	6.5	6.7	7.0
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	57.7	48.5	40.2	51.2	37.2	33.7
Ca	(mg.l-1)	2.4	2.8	2.6	3.3	2.8	2.7
Mg	(mg.l-1)	1.2	0.9	1.4	1.4	1.3	1.3
K	(mg.l-1)	2.2	2.2	2.2	2.2	1.9	1.9
Na	(mg.l-1)	2.4	3.6	2.4	2.1	2.5	2.4
Tac	(mg.l-1)	21.9	23.7	24.4	25.9	23.8	22.9
Cl	(mg.l-1)	0.8	0.8	0.4	0.6	0.5	0.5
NO3*	(mg.l-1)	0.40		0.01	0.01		0.77
SO4*	(mg.l-1)	0.33		0.08	0.25	0.16	0.29
SiO2	(mg.l-1)	11.5	12.6	12.6	9.1	lacunes	13.4
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)	31.6	33.5	33.5	36.9	32.9	32.7
TDS	(mg.l-1)	43.2	46.7	46.1	44.8		46.1
Akka							
pH		7.3	7.2	7.4	6.6	6.7	6.7
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	49.0	48.3	41.9	41.5	41.7	41.7
Ca	(mg.l-1)	2.6	2.5	2.1	3.2	3.1	3.9
Mg	(mg.l-1)	1.3	0.8	1.4	1.4	1.5	1.5
K	(mg.l-1)	2.1	1.8	1.8	2.3	2.0	1.9
Na	(mg.l-1)	3.4	3.8	3.2	2.9	2.9	3.3
Tac	(mg.l-1)	26.4	23.8	23.1	26.3	27.5	30.5
Cl	(mg.l-1)	0.47	0.85	0.46	0.64	0.46	0.50
NO3*	(mg.l-1)	0.44	0.22				
SO4*	(mg.l-1)	0.3	0.4			0.1	
SiO2	(mg.l-1)	14.8	15.4	14.6	11.2	13.1	13.0
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)	37.1	34.1	32.3	37.7	33.9	6.1
TDS	(mg.l-1)	52	49.5	47	48.7	50.6	54.6
Diré							
pH				6.9	6.9		
Cond 20°	($\mu\text{S.cm}^{-1}$)			44.0	43.0		
Ca	(mg.l-1)		2.7	2.0	3.2	3.2	
Mg	(mg.l-1)		1.1	1.3	1.5	1.5	
K	(mg.l-1)		2.3	1.9	2.3	2.0	
Na	(mg.l-1)		3.4	3.5	3.3	3.2	
Tac	(mg.l-1)		23.1	23.1	28.5	29.3	
Cl	(mg.l-1)		1.3	0.6	0.7	0.6	
NO3*	(mg.l-1)			0.03			
SO4*	(mg.l-1)			0.5			
SiO2	(mg.l-1)		13.3	12.9	10.3	lacunes	
$\Sigma^+\Sigma^-$	(mg.l-1)		34.7	33.2	40.4	39.9	
TDS	(mg.l-1)		48.0	46.1	50.7		

*beaucoup de valeurs sont inférieures à la limite de détection!

2. Données analytiques complémentaires

Composition chimique de la phase dissoute (ppb)

Station de Banankoro (Niger) - n= 9

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Ti	9	2.93	66%	1.55	1.34 - 5.95	1.40 - 3.43
V	9	0.43	41%	0.37	0.28 - 0.73	0.31 - 0.66
Cr*	8	0.68	54%	0.52	<DL - 1.28	0.39 - 0.64
Mn	9	0.94	114%	0.64	0.18 - 4.56	0.45 - 1.04
Fe	9	126.9	70%	122.0	14.8 - 181.9	37.1 - 144.3
Co	9	0.05	37%	0.04	0.01 - 0.06	0.03 - 0.05
Ni	7	0.55	12%	0.53	<DL - 0.61	0.48 - 0.56
Cu	9	0.67	32%	0.64	0.32 - 0.85	0.47 - 0.78
Zn	9	2.16	89%	1.21	0.17 - 5.27	0.57 - 2.59
As	8	0.14	27%	0.15	0.12 - 0.26	0.14 - 0.20
Rb	9	3.55	26%	3.97	2.97 - 5.78	3.28 - 5.07
Sr	9	26.6	27%	33.4	21.1 - 50.8	27.2 - 38.4
Y	9	0.04	47%	0.034	0.01 - 0.06	0.02 - 0.03
Zr	6		68%	0.053	<DL - 0.14	0.04 - 0.11
Mo	9	0.05	33%	0.054	0.03 - 0.08	0.04 - 0.06
Cd	6		183%	0.013	0.00 - 0.37	0.01 - 0.06
Cs	9	0.01	43%	0.010	0.00 - 0.01	0.01 - 0.01
Ba	9	30.2	22%	37.9	27.7 - 51.4	28.9 - 39.7
La	9	0.076	53%	0.057	0.010 - 0.116	0.046 - 0.068
Ce	9	0.155	50%	0.135	0.014 - 0.234	0.088 - 0.146
Pr	9	0.019	52%	0.014	0.003 - 0.028	0.012 - 0.017
Nd	8	0.072	40%	0.056	<DL - 0.110	0.045 - 0.071
Sm	5		31%	0.016	<DL - 0.024	0.013 - 0.016
Eu	5		48%	0.008	<DL - 0.018	0.007 - 0.015
Gd	6		46%	0.011	<DL - 0.022	0.009 - 0.019
Dy	6		30%	0.009	<DL - 0.012	0.007 - 0.010
Pb	7	0.091	106%	0.046	<DL - 0.284	0.026 - 0.122
Th	8	0.011	64%	0.009	<DL - 0.023	0.006 - 0.015
U	9	0.015	41%	0.016	0.006 - 0.024	0.012 - 0.021

Station de Koulikoro (Niger) - n= 9

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Ti	9	2.64	47%	2.66	1.02 - 3.45	1.17 - 3.20
V	9	0.46	23%	0.43	0.40 - 0.73	0.41 - 0.47
Cr	8	0.42	53%	0.37	<DL - 0.63	0.29 - 0.48
Mn	9	0.87	57%	0.51	0.34 - 1.65	0.46 - 1.01
Fe	9	112.0	70%	68.8	14.4 - 186.2	44.3 - 132.1
Co	9	0.04	23%	0.04	0.02 - 0.05	0.03 - 0.04
Ni	5		21%	0.44	<DL - 0.59	0.41 - 0.46
Cu	9	0.59	24%	0.52	0.37 - 0.81	0.47 - 0.64
Zn	9	0.58	67%	0.39	0.16 - 1.19	0.33 - 1.01
As	9	0.16	39%	0.19	0.06 - 0.31	0.16 - 0.21
Rb	9	3.81	18%	3.85	3.26 - 5.67	3.63 - 4.15
Sr	9	26.0	20%	30.6	20.2 - 35.8	23.9 - 34.2
Y	9	0.044	43%	0.043	0.009 - 0.055	0.032 - 0.045
Zr	6		40%	0.079	<DL - 0.095	0.061 - 0.085
Mo	9	0.052	42%	0.049	0.032 - 0.097	0.039 - 0.073
Cd	5	0.016	185%	0.002	0 - 0.089	0 - 0.004
Cs	9	0.010	23%	0.010	0.006 - 0.012	0.008 - 0.011
Ba	9	30.4	15%	33.8	23.0 - 38.0	29.2 - 35.6
La	9	0.081	47%	0.073	0.011 - 0.099	0.068 - 0.084
Ce	9	0.169	50%	0.156	0.019 - 0.216	0.107 - 0.168
Pr	9	0.021	46%	0.020	0.003 - 0.024	0.016 - 0.022
Nd	8	0.076	40%	0.071	<DL - 0.096	0.057 - 0.085
Sm	5		27%	0.015	<DL - 0.025	0.014 - 0.018
Eu	5		44%	0.010	<DL - 0.015	0.008 - 0.014
Gd	6		30%	0.015	<DL - 0.019	0.011 - 0.017
Dy	7	0.008	26%	0.010	<DL - 0.011	0.007 - 0.011
Pb	7	0.042	21%	0.046	<DL - 0.054	0.037 - 0.048
Th	7	0.010	41%	0.011	<DL - 0.016	0.008 - 0.012
U	9	0.014	26%	0.014	0.008 - 0.019	0.011 - 0.015

Station de Ké-Macina (Niger) - n= 8

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Ti	8	3.01	56%	2.57	1.16 - 4.92	1.36 - 3.71
V	8	0.59	21%	0.58	0.42 - 0.73	0.48 - 0.67
Cr	7	0.45	61%	0.46	<DL - 0.72	0.26 - 0.57
Mn	8	0.50	44%	0.49	0.26 - 0.88	0.31 - 0.62
Fe	8	105.1	65%	72.7	22.1 - 176.4	51.0 - 107.8
Co	8	0.04	37%	0.03	0.02 - 0.06	0.03 - 0.04
Ni	2		56%	0.48	<DL - 0.67	0.39 - 0.58
Cu	8	0.63	25%	0.52	0.41 - 0.78	0.44 - 0.63
Zn	5		58%	0.45	<DL - 0.89	0.28 - 0.47
As	7	0.18	27%	0.19	0.15 - 0.31	0.16 - 0.21
Rb	8	3.86	18%	3.82	3.38 - 5.55	3.62 - 4.32
Sr	8	26.4	22%	32.1	20.9 - 41.3	27.6 - 35.6
Y	8	0.05	46%	0.04	0.02 - 0.07	0.03 - 0.05
Zr	6	0.12	67%	0.09	<DL - 0.16	0.04 - 0.13
Mo	8	0.05	40%	0.05	0.02 - 0.08	0.04 - 0.06
Cd	4	0.01	149%	0.00	0.00 - 0.04	0.00 - 0.02
Cs	8	0.01	44%	0.01	0.01 - 0.02	0.01 - 0.01
Ba	8	30.2	18%	34.7	25.1 - 42.3	29.5 - 38.4
La	8	0.091	49%	0.081	0.020 - 0.114	0.051 - 0.104
Ce	8	0.171	51%	0.147	0.030 - 0.235	0.093 - 0.179
Pr	8	0.022	47%	0.020	0.005 - 0.027	0.013 - 0.025
Nd	8	0.085	45%	0.073	0.020 - 0.101	0.047 - 0.093
Gd	6	0.013	38%	0.012	<DL - 0.022	0.010 - 0.016
Dy	6	0.009	38%	0.010	<DL - 0.017	0.008 - 0.013
Pb	6	0.039	41%	0.036	<DL - 0.054	0.027 - 0.050
Th	8	0.013	68%	0.010	0.003 - 0.021	0.004 - 0.015
U	8	0.020	23%	0.019	0.012 - 0.025	0.016 - 0.022

Station de Sélingué (Sankarani) - n= 4

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	4		88%	1.73	1.02 - 6.07	1.38	2.98
V	4		69%	0.30	0.18 - 0.74	0.19	0.48
Cr	3		94%	0.28	0.00 - 0.46	0.14	0.37
Mn	4		59%	0.69	0.47 - 1.59	0.53	1.01
Fe	4		87%	96.4	26.4 - 279.1	67.9	153.1
Co	4		49%	0.03	0.01 - 0.05	0.02	0.03
Ni	2		52%	0.35	<DL - 0.47	0.28	0.41
Cu	4		42%	0.53	0.34 - 0.89	0.42	0.68
Zn	3		35%	0.39	<DL - 0.64	0.36	0.51
As	4		10%	0.23	0.19 - 0.23	0.21	0.23
Rb	4		14%	5.2	4.0 - 5.5	4.7	5.4
Sr	4		21%	33.67	22.10 - 36.39	28.80	36.34
Y	4		71%	0.04	0.01 - 0.06	0.02	0.05
Zr	2		100%	0.07	<DL - 0.12	0.05	0.10
Mo	4		47%	0.04	0.02 - 0.07	0.03	0.06
Cd	2		118%	0.00	0.00 - 0.00	0.00	0.00
Cs	4		22%	0.0	0.0 - 0.0	0.0	0.0
Ba	4		26%	30.232	23.09 - 38.60 6 8	23.927	36.847
La	4		82%	0.056	0.007 - 0.107	0.023	0.089
Ce	4		84%	0.112	0.015 - 0.214	0.042	0.182
Pr	3		54%	0.018	0.008 - 0.028	0.013	0.023
Nd	3		49%	0.077	0.030 - 0.095	0.054	0.086
Sm	2		27%	0.020	<DL - 0.024	0.018	0.022
Eu	2		11%	0.008	<DL - 0.008	0.007	0.008
Gd	2		28%	0.020	<DL - 0.024	0.018	0.022
Dy	2		5%	0.013	<DL - 0.014	0.013	0.013
Pb	4		42%	0.057	0.028 - 0.085	0.044	0.069
Th	3		90%	0.008	0.004 - 0.026	0.006	0.017
U	4		73%	0.016204	0.007 - 0.041	0.011129	0.0251949

Station de Douna (Bani) - n= 8

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Mediane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Ti	8	2.43	54%	1.82	1.19 - 4.63	1.58 - 3.07
V	8	0.71	48%	0.69	0.58 - 1.62	0.66 - 0.93
Cr	8	0.35	77%	0.28	0.00 - 0.58	0.16 - 0.46
Mn	8	0.62	70%	0.64	0.28 - 2.03	0.45 - 1.11
Fe	8	98.1	84%	58.2	21.8 - 251.2	39.9 - 141.5
Co	8	0.04	48%	0.04	0.03 - 0.10	0.04 - 0.06
Ni	4		28%	0.49	<DL - 0.61	0.40 - 0.56
Cu	8	0.76	22%	0.69	0.54 - 0.98	0.63 - 0.78
Zn	7	0.73	77%	0.33	<DL - 1.26	0.24 - 0.69
As	8	0.17	58%	0.25	0.10 - 0.61	0.20 - 0.29
Rb	8	4.4	38%	5.1	3.2 - 9.9	4.8 - 5.8
Sr	8	23.68	51%	36.52	9.86 - 69.75	30.66 - 46.12
Y	8	0.086	50%	0.06	0.02 - 0.11	0.044 - 0.08
Zr	6	0.099	47%	0.088	<DL - 0.13	0.048 - 0.11
Mo	8	0.078	68%	0.085	0.05 - 0.28	0.07 - 0.11
Cd	4	0.018	169%	0.018	0.00 - 0.28	0.004 - 0.09
Cs	8	0.017	31%	0.016	0.012 - 0.029	0.014 - 0.019
Ba	8	21.9	0.5	29.0	12.9 - 60.9	25.2 - 37.0
La	8	0.121	52%	0.086	0.024 - 0.163	0.066 - 0.126
Ce	8	0.244	58%	0.183	0.048 - 0.357	0.093 - 0.236
Pr	8	0.038	63%	0.028	0.005 - 0.054	0.014 - 0.035
Nd	8	0.170	70%	0.127	0.016 - 0.254	0.044 - 0.148
Sm	7	0.031	53%	0.023	<DL - 0.041	0.020 - 0.034
Eu	7	0.008	59%	0.010	<DL - 0.022	0.007 - 0.014
Gd	8	0.029	57%	0.020	0.005 - 0.040	0.012 - 0.023
Tb	6	0.003	53%	0.003	<DL - 0.004	0.002 - 0.004
Dy	8	0.017	57%	0.013	0.001 - 0.023	0.009 - 0.018
Ho	6	0.003	64%	0.002	<DL - 0.005	0.001 - 0.003
Er	6	0.012	51%	0.008	<DL - 0.016	0.007 - 0.013
Pb	7	0.035	61%	0.027	<DL - 0.078	0.022 - 0.040
Th	8	0.013	70%	0.007	0.003 - 0.021	0.005 - 0.015
U	8	0.036	98%	0.037	0.019 - 0.217	0.031 - 0.079

Station de Sensé (Niger) - n=8

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Sc	8	1.45	30%	1.74	0.75 - 2.43	1.57 - 1.92
Ti	8	3.52	75%	2.22	0.72 - 7.51	1.50 - 4.46
V	8	0.82	45%	1.00	0.50 - 1.65	0.64 - 1.33
Cr	8	0.46	83%	0.37	0.000 - 1.05	0.23 - 0.54
Mn	8	0.6	70%	0.5	0.1 - 1.0	0.1 - 0.6
Fe	8	100.5	67%	65.0	15.0 - 146.1	29.0 - 100.6
Co	8	0.049	49%	0.037	0.024 - 0.085	0.035 - 0.057
Ni	5		11%	0.48	<DL - 0.51	0.43 - 0.49
Cu	8	0.82	33%	0.65	0.56 - 1.28	0.60 - 0.69
Zn	7	0.74	95%	0.37	<DL - 1.98	0.33 - 1.02
As	8	0.18	40%	0.24	0.09 - 0.39	0.20 - 0.28
Rb	8	4.16	17%	4.23	3.87 - 5.75	3.94 - 5.22
Sr	8	30.2	24%	36.3	19.5 - 45.8	31.8 - 40.8
Y	8	0.073	65%	0.044	0.006 - 0.097	0.032 - 0.065
Zr	6	0.15	76%	0.08	<DL - 0.28	0.06 - 0.14
Mo	8	0.088	40%	0.074	0.045 - 0.149	0.063 - 0.09
Cd	5	0.017	127%	0.031	0.0 - 0.211	0.008 - 0.084
Cs	8	0.014	47%	0.011	0.006 - 0.024	0.008 - 0.013
Ba	8	34.2	19%	39.5	22.4 - 44.8	35.8 - 41.6
La	8	0.116	66%	0.074	0.009 - 0.160	0.044 - 0.106
Ce	8	0.216	67%	0.136	0.013 - 0.284	0.089 - 0.202
Pr	8	0.032	73%	0.018	0.002 - 0.043	0.010 - 0.029
Nd	7	0.123	60%	0.078	<DL - 0.164	0.056 - 0.122
Sm	6	0.020	49%	0.019	<DL - 0.033	0.016 - 0.027
Eu	4		45%	0.017	<DL - 0.022	0.013 - 0.019
Gd	7	0.020	51%	0.013	<DL - 0.031	0.012 - 0.017
Tb	6	0.003	59%	0.002	<DL - 0.004	0.001 - 0.003
Dy	6	0.015	58%	0.011	<DL - 0.020	0.008 - 0.018
Ho	5		58%	0.002	<DL - 0.004	0.001 - 0.003
Yb	4		64%	0.006	<DL - 0.013	0.004 - 0.009
Hf	3	0.004	82%	0.004	0.003 - 0.012	0.003 - 0.008
Ta	4	0.006	64%	0.013	0.001 - 0.017	0.010 - 0.014
Pb	5	0.038	46%	0.039	<DL - 0.050	0.019 - 0.039
Th	6	0.005	76%	0.006	<DL - 0.023	0.005 - 0.010
U	7	0.018	31%	0.036	0.023 - 0.048	0.024 - 0.043

Station de Akka (Issa Ber) - n=4

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%) - Quartile (75%)
Sc	4	1.38	41%	1.60	0.52 - 1.72	1.32 - 1.64
Ti	3	2.43	81%	1.49	<DL - 4.21	1.18 - 2.85
V	4	0.46	69%	0.50	0.40 - 1.46	0.45 - 0.77
Cr	2		90%	0.29	<DL - 0.41	0.15 - 0.35
Mn	4	1.3	81%	0.8	0.2 - 2.0	0.5 - 1.3
Fe	4	128.6	70%	85.4	37.0 - 170.0	40.1 - 139.8
Co	4	0.048	5%	0.048	0.046 - 0.051	0.046 - 0.050
Ni	3	0.50	7%	0.48	<DL - 0.53	0.47 - 0.50
Cu	4	0.72	15%	0.78	0.68 - 0.91	0.69 - 0.88
Zn	3	0.48	90%	0.61	0.22 - 1.68	0.42 - 1.15
As	4	0.20	21%	0.21	0.19 - 0.29	0.19 - 0.24
Rb	4	3.72	18%	3.97	3.49 - 5.20	3.65 - 4.47
Sr	4	30.4	21%	32.0	24.2 - 41.0	30.0 - 34.3
Y	4	0.064	58%	0.046	0.018 - 0.084	0.031 - 0.064
Zr	3	0.10	64%	0.07	<DL - 0.11	0.05 - 0.09
Mo	4	0.049	53%	0.068	0.027 - 0.114	0.048 - 0.09
Cd	1				<DL - 0.008	
Cs	4	0.007	44%	0.011	0.003 - 0.011	0.008 - 0.011
Ba	4	35.5	12%	35.8	29.2 - 38.8	33.8 - 36.9
La	4	0.102	56%	0.078	0.030 - 0.128	0.050 - 0.106
Ce	4	0.204	59%	0.141	0.068 - 0.271	0.090 - 0.207
Pr	4	0.029	68%	0.019	0.007 - 0.039	0.012 - 0.029
Nd	4	0.111	54%	0.082	0.036 - 0.141	0.056 - 0.111
Sm	3	0.023	34%	0.020	<DL - 0.029	0.017 - 0.024
Eu	3	0.006	70%	0.006	<DL - 0.017	0.006 - 0.012
Gd	3	0.020	45%	0.014	<DL - 0.028	0.014 - 0.021
Dy	3	0.013	52%	0.012	<DL - 0.018	0.009 - 0.015
Ho	3	0.002	91%	0.002	<DL - 0.003	0.001 - 0.002
Yb	3	0.005	24%	0.005	<DL - 0.006	0.005 - 0.006
Ta	3	0.019	68%	0.016	<DL - 0.020	0.011 - 0.019
Pb	3	0.109	99%	0.051	<DL - 0.216	0.044 - 0.134
Th	4	0.009	40%	0.008	0.005 - 0.012	0.006 - 0.010
U	4	0.022	21%	0.023	0.018 - 0.029	0.020 - 0.026

Station de Diré (Niger) - n= 5

	Nbval	Moyenne pond. Q	CV	Médiane	Min. - Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Sc	5	1.20	48%	1.22	0.32 - 1.74	0.90	1.37
Ti	5	6.39	109%	4.40	1.00 - 18.65	1.71	7.18
V	5	0.58	33%	0.57	0.47 - 0.98	0.52	0.81
Cr	4	0.50	79%	0.37	0.054 - 0.82	0.26	0.51
Mn	5	0.4	33%	0.4	0.2 - 0.5	0.3	0.5
Fe	5	113.7	56%	102.5	34.1 - 167.9	53.8	114.8
Co	5	0.048	25%	0.053	0.033 - 0.067	0.045	0.054
Ni	3	0.54	13%	0.63	0.494 - 0.63	0.56	0.63
Cu	5	0.88	23%	1.06	0.66 - 1.24	0.83	1.10
Zn	5	0.86	109%	0.70	0.23 - 2.69	0.23	0.82
As	4	0.24	22%	0.25	0.21 - 0.34	0.23	0.28
Rb	5	3.49	20%	3.43	3.21 - 4.98	3.35	4.24
Sr	5	30.7	22%	33.2	23.1 - 42.1	27.8	35.0
Y	5	0.068	53%	0.056	0.025 - 0.094	0.030	0.082
Zr	4	0.15	81%	0.09	<DL - 0.28	0.06	0.16
Mo	5	0.067	49%	0.098	0.036 - 0.135	0.048	0.11
Cd	5	0.008	178%	0.003	0.0 - 0.031	0.000	0.004
Cs	5	0.009	67%	0.008	0.002 - 0.019	0.008	0.009
Ba	5	36.9	18%	38.4	27.4 - 44.4	33.1	40.2
La	5	0.111	53%	0.095	0.040 - 0.147	0.047	0.137
Ce	5	0.211	54%	0.182	0.076 - 0.299	0.086	0.233
Pr	5	0.032	58%	0.025	0.011 - 0.045	0.012	0.039
Nd	5	0.115	61%	0.101	0.032 - 0.156	0.039	0.143
Sm	4	0.023	34%	0.023	<DL - 0.029	0.017	0.029
Eu	4	0.005	91%	0.006	<DL - 0.022	0.004	0.012
Gd	4	0.022	48%	0.021	<DL - 0.032	0.014	0.029
Tb	3		39%	0.004	<DL - 0.004	0.003	0.004
Dy	4	0.015	50%	0.015	<DL - 0.021	0.010	0.019
Ho	4	0.003	58%	0.003	<DL - 0.004	0.002	0.003
Er	3		42%	0.007	<DL - 0.009	0.005	0.008
Yb	4	0.007	40%	0.007	<DL - 0.010	0.005	0.009
Hf	3		135%	0.001	<DL - 0.010	0.000	0.004
Ta	4	0.011	83%	0.019	<DL - 0.026	0.003	0.023
Pb	4	0.058	42%	0.056	<DL - 0.084	0.040	0.073
Th	5	0.013	93%	0.008	0.003 - 0.030	0.004	0.013
U	5	0.026	33%	0.027	0.022 - 0.047	0.024	0.032

Composition chimique de la phase en suspension (ppb)

Station de Banankoro (Niger) - n= 9

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	9	2924	66%	2332	48.4	- 4309	1673	- 3205
V	9	103.4	49%	94.6	11.5	- 130.2	47.6	- 105.6
Cr	8	172.0	100%	169.7	42.6	- 753.5	107.2	- 212.1
Mn	9	1205	44%	1197	138	- 1961	956	- 1458
Co	9	25.8	44%	23.2	5.5	- 36.3	18.0	- 29.6
Ni	8	87.5	27%	79.8	<DL	- 125.7	70.3	- 101.8
Cu*	7	34.3	61%	49.5	3.5	- 91.5	31.7	- 55.8
Zn*	6	87.9	113%	92.6	56.9	- 533.7	76.6	- 116.0
Rb	9	51.2	52%	50.4	20.7	- 125.3	41.6	- 54.6
Sr	9	137.3	48%	154.8	74.6	- 297.7	118.9	- 251.0
Y	9	16.1	50%	17.3	1.7	- 20.8	7.6	- 18.7
Zr	9	83.1	81%	62.9	9.4	- 229.0	42.6	- 104.1
Nb	7	11.3	35%	8.6	6.9	- 16.1	8.2	- 14.1
Mo*	8	1.5	65%	1.6	0.9	- 5.0	1.3	- 2.2
Cd*	6	0.48	117%	1.410	0.00	- 6.62	0.23	- 3.48
Cs	9	3.3	44%	3.0	0.2	- 4.1	2.4	- 3.5
Ba	9	574.9	60%	484.5	144.5	- 1069.5	251.0	- 654.8
La	9	44.5	53%	39.8	3.1	- 61.1	20.3	- 51.7
Ce	9	89.2	55%	77.8	3.9	- 121.4	42.3	- 104.6
Pr	9	9.4	54%	8.6	0.4	- 12.4	4.0	- 10.8
Nd	9	35.3	48%	32.9	4.2	- 47.9	17.3	- 38.6
Sm	9	5.3	42%	4.7	2.6	- 7.9	3.0	- 6.5
Eu	9	1.62	51%	1.52	0.37	- 2.88	1.22	- 1.78
Gd	9	4.63	46%	4.35	1.26	- 7.50	3.88	- 5.56
Tb	8	0.699	30%	0.697	<DL	- 0.841	0.586	- 0.759
Dy	8	3.45	30%	3.52	<DL	- 4.64	2.89	- 3.79
Ho	8	0.65	25%	0.75	<DL	- 0.83	0.60	- 0.81
Er	6	2.03	41%	2.06	<DL	- 2.98	1.68	- 2.19
Tm	8	0.27	64%	0.27	<DL	- 0.65	0.25	- 0.38
Yb	7	1.53	44%	1.94	<DL	- 2.72	1.20	- 2.10
Lu	6		29%	0.25	<DL	- 0.27	0.23	- 0.26
Hf*	7	2.39	70%	3.13	<DL	- 8.34	2.44	- 4.46
Ta*	7	1.12	103%	0.92	<DL	- 4.93	0.60	- 2.45
Pb*	6	24.12	26%	23.59	<DL	- 33.88	20.90	- 28.03
Th	9	12.07	53%	11.58	1.451	- 16.58	6.87	- 14.01
U	8	2.44	42%	2.74	<DL	- 2.95	1.64	- 2.87

* problème avec Cfiltré> C total

Station de Koulikoro (Niger) - n= 9

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	8	2611	72%	2291	114.9	- 4070	1135	- 3164
V	8	123.1	60%	75.4	13.5	- 149.2	57.7	- 129.9
Cr	8	150.6	72%	130.6	0.0	- 291.1	84.6	- 209.9
Mn	8	1531	40%	1841	712	- 2761	1448	- 2029
Co	8	24.8	49%	21.0	5.8	- 36.8	14.3	- 29.8
Ni	8	82.7	36%	83.4	48.0	- 152.8	71.0	- 104.2
Cu	8	48.8	78%	44.9	0.2	- 141.4	34.1	- 58.2
Zn*	7	94.3	85%	103.7	31.1	- 351.9	58.0	- 142.8
Rb	8	56.4	31%	59.8	25.0	- 74.4	44.3	- 67.6
Sr	8	132.8	38%	157.0	82.1	- 285.3	139.9	- 181.7
Y	8	17.1	57%	12.6	2.9	- 23.0	10.0	- 21.7
Zr	8	66.6	65%	59.2	9.6	- 125.9	40.8	- 74.6
Nb	8	9.5	58%	9.5	1.9	- 15.8	5.9	- 12.6
Mo*	6	1.2	99%	1.3	0.5	- 6.2	1.1	- 2.2
Cd*	5		166%	0.625	<DL	- 5.95	0.05	- 0.92
Cs	8	3.4	46%	3.4	0.8	- 4.7	2.3	- 4.1
Ba	8	569.3	42%	592.9	241.9	- 838.0	320.0	- 738.2
La	8	44.9	61%	32.6	5.3	- 62.1	25.6	- 56.7
Ce	8	94.5	60%	69.9	11.6	- 133.6	54.1	- 116.2
Pr	8	9.6	63%	6.7	1.0	- 13.8	5.3	- 12.1
Nd	8	36.5	59%	28.7	4.0	- 51.3	20.1	- 46.0
Sm	8	6.0	54%	5.9	<DL	- 8.5	3.8	- 7.3
Eu	8	1.58	54%	1.19	0.53	- 2.69	0.79	- 1.82
Gd	8	6.15	54%	4.39	1.90	- 8.91	2.98	- 6.98
Tb	6	0.801	33%	0.825	<DL	- 1.308	0.684	- 0.993
Dy	8	3.69	50%	2.72	1.09	- 5.44	2.05	- 4.36
Ho	7	0.88	36%	0.93	<DL	- 1.02	0.56	- 0.95
Er	8	1.86	54%	1.85	0.413	- 2.75	0.98	- 2.35
Tm	6	0.34	60%	0.32	<DL	- 0.54	0.22	- 0.46
Yb	7	2.21	43%	1.97	0.981	- 3.39	1.36	- 2.44
Lu	5		29%	0.24	<DL	- 0.32	0.17	- 0.28
Hf	6	2.15	22%	2.79	1.827	- 3.34	2.25	- 2.94
Ta*	6	1.48	178%	1.09	0.426	- 19.17	0.88	- 1.96
Pb	8	27.16	67%	25.34	6.553	- 56.04	12.76	- 37.64
Th	8	13.19	55%	10.85	1.755	- 18.03	8.32	- 16.29
U*	7	2.75	47%	2.57	0.226	- 3.38	1.96	- 3.17

* problème avec Cfiltré> C total

Station de Ké-Macina (Niger) - n= 8

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	8	2977	41%	2901	1445	- 4901	2097	- 3812
V	8	103.3	32%	103.3	63.7	- 179.0	97.6	- 127.0
Cr	8	153.0	43%	155.7	50.4	- 257.2	114.9	- 200.7
Mn	8	1403	69%	1632	427	- 3677	628	- 2291
Co	8	23.5	41%	25.6	11.7	- 44.9	18.8	- 30.1
Ni	8	81.6	41%	81.6	50.4	- 157.6	66.9	- 107.5
Cu	8	39.8	150%	39.3	26.7	- 403.3	36.3	- 50.6
Zn	8	90.1	47%	100.6	50.6	- 206.2	75.8	- 156.8
Rb	8	64.4	24%	81.5	42.9	- 99.5	64.1	- 86.7
Sr	8	117.1	51%	148.7	73.8	- 282.7	87.2	- 201.3
Y	8	18.7	30%	18.4	11.4	- 29.6	17.7	- 23.4
Zr	8	81.9	29%	79.9	58.6	- 131.9	70.3	- 89.4
Nb	8	12.3	33%	13.9	7.7	- 20.5	9.4	- 14.9
Mo*	7	1.3	77%	1.4	0.7	- 5.5	1.2	- 2.5
Cd	8	0.47	113%	0.278	0.00	- 1.37	0.00	- 1.24
Cs	8	3.8	23%	4.2	2.6	- 5.3	3.4	- 5.0
Ba	8	594.9	53%	615.9	310.0	- 1409	442.1	- 749.1
La	8	46.6	31%	46.6	27.3	- 75.1	43.6	- 55.6
Ce	8	97.3	37%	95.3	54.7	- 174.2	84.0	- 115.7
Pr	8	10.4	33%	10.0	6.0	- 17.0	9.5	- 13.0
Nd	8	37.2	33%	36.1	22.0	- 59.2	33.8	- 44.3
Sm	8	6.9	34%	7.1	3.8	- 12.7	6.4	- 8.2
Eu	8	1.68	54%	1.55	0.47	- 3.17	1.28	- 2.24
Gd	8	6.44	50%	6.19	2.82	- 12.10	4.68	- 11.24
Tb*	6	0.725	40%	0.866	<DL	- 1.277	0.580	- 1.160
Dy	8	3.65	42%	3.60	1.93	- 6.34	2.24	- 4.01
Ho	8	0.72	33%	0.74	0.433	- 1.32	0.68	- 0.88
Er	7	2.23	43%	1.97	<DL	- 3.86	1.76	- 3.06
Tm	7	0.27	43%	0.29	0.164	- 0.61	0.26	- 0.42
Yb	7	1.63	40%	1.58	0.942	- 2.78	1.14	- 1.70
Lu	5	0.23	27%	0.24	<DL	- 0.33	0.23	- 0.27
Hf*	6	1.70	48%	2.64	1.869	- 5.73	2.44	- 4.58
Ta	6	0.80	35%	1.46	0.689	- 1.76	0.93	- 1.48
Pb	6	25.01	16%	26.52	<DL	- 29.78	23.25	- 28.96
Th	7	13.32	28%	13.45	8.478	- 20.05	11.27	- 14.71
U	7	2.46	24%	2.71	1.702	- 3.69	2.29	- 2.86

Station de Sélingué (Sankarani) - n= 4

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne arithm.	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	4	1362	48%	1605	402.8	- 1836	1243	- 1724
V	4	79.9	43%	80.1	38.5	- 120.8	62.8	- 97.2
Cr	4	180.3	128%	81.6	33.9	- 524.1	53.1	- 208.8
Mn	4	5665	81%	5151	1080	- 11277	2475	- 8341
Co	4	19.1	12%	19.6	16.1	- 21.1	18.0	- 20.6
Ni	4	70.9	27%	64.6	56.1	- 98.3	60.1	- 75.5
Cu*	3	48.8	64%	38.6	23.9	- 84.0	31.2	- 61.3
Zn	4	280.2	152%	95.5	12.6	- 917.2	55.9	- 319.7
Rb	4	53.8	12%	51.6	49.0	- 63.2	49.7	- 55.7
Sr	4	100.4	75%	70.6	49.2	- 211.2	54.7	- 116.3
Y	4	11.3	32%	11.5	6.8	- 15.4	9.7	- 13.1
Zr	4	41.7	43%	48.4	15.2	- 54.7	39.9	- 50.1
Nb	4	7.7	28%	8.2	4.7	- 9.8	7.2	- 8.7
Mo	4	6.3	89%	4.7	1.6	- 14.3	2.7	- 8.3
Cd*	2		92%	0.750	0.26	- 1.24	0.51	- 0.99
Cs	4	3.6	42%	3.7	1.9	- 5.0	2.5	- 4.7
Ba	4	726.7	29%	677.2	525.4	- 1027	636.3	- 767.6
La	4	28.5	48%	27.0	14.7	- 45.4	18.8	- 36.8
Ce	4	54.5	41%	47.7	37.3	- 85.2	38.8	- 63.4
Pr	4	6.1	41%	5.5	4.1	- 9.4	4.1	- 7.5
Nd	4	24.6	47%	24.4	13.5	- 36.3	15.5	- 33.5
Sm	3	5.0	34%	4.4	<DL	- 6.8	4.0	- 5.6
Eu	3	1.72	16%	1.83	<DL	- 1.92	1.62	- 1.87
Gd	4	4.03	26%	3.66	3.21	- 5.60	3.53	- 4.16
Tb	2		46%	0.488	<DL	- 0.647	0.408	- 0.567
Dy	4	2.29	36%	2.24	1.45	- 3.23	1.69	- 2.84
Ho	3	0.73	20%	0.68	<DL	- 0.89	0.64	- 0.78
Er	4	1.75	19%	1.68	1.418	- 2.20	1.59	- 1.84
Tm	2		23%	0.21	<DL	- 0.24	0.19	- 0.23
Yb	4	1.36	29%	1.52	0.787	- 1.62	1.28	- 1.61
Lu	3	0.22	82%	0.23	<DL	- 0.40	0.13	- 0.31
Hf	3	4.48	74%	2.97	<DL	- 8.28	2.58	- 5.63
Ta*	3	4.04	149%	0.93	0.211	- 10.98	0.57	- 5.96
Pb*	3	16.04	13%	15.02	14.66	- 18.43	14.84	- 16.72
Th	4	9.96	55%	10.08	3.287	- 16.40	7.32	- 12.72
U	4	2.13	40%	2.18	1.106	- 3.05	1.65	- 2.66

Station de Douna (Bani) - n= 8

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	8	4757	61%	3960	607.7	6897	1874	5221
V	8	142.1	44%	129.0	35.9	209.2	95.5	164.5
Cr	8	147.9	59%	134.7	0.1	316.0	121.9	198.2
Mn	8	1290	59%	2342	378	3947	1146	2826
Co	8	24.7	45%	22.3	10.0	46.0	18.6	30.9
Ni	8	79.2	59%	66.6	15.0	143.5	42.4	97.5
Cu	8	48.7	65%	37.5	10.8	108.6	33.9	43.7
Zn	8	143.3	133%	97.2	46.8	912.6	64.5	194.9
Rb	8	102.2	32%	105.6	36.4	154.7	99.3	110.8
Sr	8	101.0	54%	142.9	56.5	300.3	85.6	204.5
Y	8	28.4	44%	24.7	7.3	42.7	22.0	33.9
Zr	8	139.5	47%	116.2	22.9	186.5	92.3	163.8
Nb	8	21.9	56%	18.1	3.7	30.7	10.6	24.2
Mo*	7	1.5	70%	1.7	0.1	4.5	1.4	3.0
Cd*	4	0.62	83%	1.036	0.14	2.51	0.77	1.44
Cs	8	9.6	41%	9.4	2.2	13.3	6.6	10.1
Ba	8	419.8	55%	420.1	121.5	865	295.8	596.5
La	8	62.9	46%	55.1	14.8	91.7	40.1	75.8
Ce	8	117.6	40%	105.0	32.3	172.9	97.3	139.0
Pr	8	14.2	47%	12.3	3.5	22.6	10.1	16.9
Nd	8	52.0	44%	45.2	12.5	81.0	38.5	60.6
Sm	8	9.3	44%	8.6	2.8	14.8	7.6	10.4
Eu	8	2.09	50%	1.80	0.51	3.14	1.28	2.64
Gd	8	8.68	45%	9.22	2.93	14.26	5.74	11.17
Tb	8	1.211	61%	1.010	0.251	2.370	0.708	1.482
Dy	8	5.88	41%	5.12	1.58	8.42	4.47	7.12
Ho	8	1.07	39%	1.00	0.263	1.64	0.86	1.23
Er	8	2.94	47%	2.70	0.998	5.30	2.27	3.26
Tm	8	0.43	44%	0.44	0.176	0.72	0.30	0.55
Yb	8	2.83	46%	2.36	0.356	3.89	2.13	3.71
Lu	6	0.39	34%	0.38	<DL	0.62	0.32	0.52
Hf	8	3.43	75%	3.61	0.000	5.85	1.17	5.03
Ta	8	2.79	63%	2.62	0.386	4.74	1.42	3.33
Pb	8	29.01	49%	23.61	7.020	49.34	20.50	31.99
Th	8	18.09	42%	16.64	3.739	25.06	12.17	20.90
U	8	4.04	53%	3.53	0.189	6.00	2.52	4.91

Station de Sensé (Niger) - n= 8

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	-	Quartile (75%)
Ti	6	5903	130%	3422	6.0	18071	1420	-	4286
V	6	265.6	163%	105.3	6.0	1007.7	55.5	-	144.4
Cr	6	326.5	166%	131.1	6.0	1254.0	75.6	-	159.6
Mn	6	1456	109%	1231	6	4442	360	-	1650
Co	6	51.6	151%	24.8	4.3	194.3	11.7	-	32.2
Ni	6	169.0	163%	57.8	6.0	630.0	33.3	-	94.5
Cu	6	82.1	153%	36.8	6.0	308.2	19.2	-	50.1
Zn	6	170.2	139%	94.6	6.0	610.4	40.2	-	129.9
Rb	6	181.7	172%	69.1	6.0	737.6	30.0	-	93.7
Sr	5	161.5	118%	146.8	5.0	620.8	40.3	-	211.0
Y	6	51.8	158%	21.3	4.1	197.3	12.7	-	28.0
Zr	6	216.9	162%	87.4	6.0	816.9	45.4	-	118.3
Mo	5	2.3	91%	1.8	0.2	6.2	1.0	-	4.4
Cd	5	0.604	113%	0.85	0.02	5.00	0.46	-	3.31
Cs	6	13.50	157%	5.146	0.75	54.17	4.63	-	7.09
Ba	6	1019.3	158%	529.7	6.0	3967.1	149.5	-	669.4
La	6	121.4	161%	48.7	6.0	456	27.4	-	64.1
Ce	6	248.3	161%	99.0	6.0	930.7	57.9	-	132.7
Pr	6	26.9	155%	10.8	2.1	101.2	8.0	-	14.1
Nd	6	100.9	158%	40.0	6.0	375.1	22.8	-	56.0
Sm	6	17.7	147%	8.2	1.4	66.1	6.4	-	9.4
Eu	6	4.1	125%	2.2	0.3	15.1	1.3	-	4.4
Gd	6	17.97	153%	8.09	1.08	70.93	5.39	-	10.53
Tb	6	2.11	122%	0.79	0.18	8.23	0.74	-	3.77
Dy	6	10.48	142%	4.29	0.84	40.17	3.68	-	7.31
Ho	6	2.03	116%	0.90	0.16	7.65	0.80	-	3.83
Er	6	5.67	120%	3.36	0.462	20.23	2.35	-	5.19
Tm	6	0.74	143%	0.53	0.056	6.00	0.35	-	1.65
Yb	6	4.60	118%	2.44	0.375	16.94	2.00	-	4.83
Lu	5	0.61	144%	0.31	<DL	5.00	0.24	-	1.82
Hf	5	6.24	122%	4.07	0.596	26.56	2.92	-	8.05
Ta	6	1.78	79%	1.70	0.384	6.00	1.11	-	4.15
Pb	6	59.82	158%	24.82	6.000	222.05	14.28	-	29.63
Th	6	36.39	156%	15.66	2.754	135.18	9.55	-	18.74
U	6	7.12	134%	3.61	0.633	24.91	2.49	-	4.83

Station de Akka (Issa Ber) - n= 4

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	Quartile (75%)
Ti	4	3151	74%	2603	4.0	- 4731	1442	- 3512
V	4	123.8	54%	120.2	4.0	- 128.9	110.5	- 125.7
Cr	4	136.8	56%	139.0	4.0	- 161.5	114.3	- 158.2
Mn	4	832	64%	813	4	- 967	460	- 895
Co	4	23.4	46%	23.4	4.0	- 26.8	21.1	- 24.5
Ni	4	105.1	66%	70.6	4.0	- 139.5	68.8	- 84.9
Cu	4	64.0	71%	36.2	4.0	- 88.6	34.9	- 56.5
Zn	4	163.0	78%	98.0	4.0	- 231.9	69.8	- 134.4
Rb	4	77.0	53%	71.6	4.0	- 80.4	70.3	- 79.9
Sr	4	112.1	64%	80.1	4.0	- 140.9	65.4	- 105.1
Y	4	21.0	45%	21.1	4.0	- 23.5	18.8	- 23.4
Zr	4	89.7	55%	82.8	4.0	- 105.8	79.6	- 103.1
Mo	4	1.5	71%	1.5	0.7	- 4.0	1.0	- 1.9
Cd	2		83%	2.00	0.07	- 2.27	1.04	- 2.13
Cs	4	5.77	17%	5.257	4.00	- 6.16	4.94	- 6.04
Ba	4	469.8	58%	411.0	4.0	- 531.1	369.2	- 465.0
La	4	50.3	51%	48.4	4.0	- 54	48.0	- 53.7
Ce	4	96.0	54%	92.5	4.0	- 111.4	89.5	- 105.5
Pr	4	11.0	34%	10.9	4.0	- 12.3	10.3	- 11.9
Nd	4	40.5	51%	40.3	4.0	- 46.3	36.4	- 45.3
Sm	4	8.1	25%	7.8	4.0	- 8.5	7.8	- 8.1
Eu	4	1.9	43%	1.8	1.7	- 4.0	1.8	- 2.0
Gd	4	7.25	27%	7.51	4.00	- 9.03	6.45	- 7.81
Tb	4	0.88	92%	0.92	0.78	- 4.00	0.90	- 0.97
Dy	4	4.28	7%	4.12	4.00	- 4.65	4.10	- 4.59
Ho	4	0.82	95%	0.90	0.76	- 4.00	0.84	- 0.92
Er	4	2.41	33%	2.47	1.791	- 4.00	2.10	- 3.31
Tm	4	0.43	149%	0.36	0.262	- 4.00	0.27	- 0.57
Yb	4	1.89	38%	1.95	1.808	- 4.00	1.95	- 2.26
Lu	4	0.36	156%	0.33	0.248	- 4.00	0.26	- 0.44
Hf	3	2.97	25%	3.10	2.582	- 4.49	2.90	- 3.52
Ta	4	1.80	69%	1.99	0.248	- 4.00	1.36	- 3.18
Pb	4	20.00	44%	20.74	4.000	- 22.86	17.89	- 21.49
Th	4	14.34	39%	14.41	4.000	- 16.23	13.14	- 14.86
U	4	3.27	17%	3.31	2.705	- 4.00	2.73	- 3.51

Station de Diré (Niger) - n= 5

$\mu\text{g/g}$	Nb	Moyenne pond Q	CV	Médiane	Min.	Max.	Quartile (25%)	-	Quartile (75%)
Ti	5	3335	77%	2184	5.0	- 5289	1404	-	3083
V	5	122.7	49%	113.7	5.0	- 144.9	106.6	-	118.3
Cr	5	172.9	54%	153.3	5.0	- 238.7	135.1	-	172.6
Mn	5	675	78%	384	5	- 1031	297	-	677
Co	5	23.2	40%	22.5	5.0	- 27.7	19.2	-	23.9
Ni	5	99.7	51%	85.6	5.0	- 125.2	78.3	-	92.8
Cu	5	49.0	52%	37.2	5.0	- 61.5	33.9	-	51.9
Zn	5	253.2	103%	91.3	5.0	- 477.5	77.1	-	286.8
Rb	5	83.8	47%	78.5	5.0	- 97.1	74.7	-	80.0
Sr	5	131.4	62%	96.8	5.0	- 197.7	84.1	-	117.5
Y	5	22.4	41%	19.4	5.0	- 28.1	18.7	-	21.8
Zr	5	101.8	53%	83.5	5.0	- 136.5	81.9	-	91.9
Mo	4	0.9	90%	1.3	0.5	- 4.0	0.6	-	1.4
Cd	2		74%	2.00	0.32	- 2.76	1.16	-	2.38
Cs	5	5.94	8%	5.903	5.00	- 6.16	5.64	-	6.10
Ba	5	516.0	63%	390.0	5.0	- 774.8	357.1	-	430.1
La	5	53.9	47%	47.3	5.0	- 66	43.4	-	50.6
Ce	5	98.6	49%	87.7	5.0	- 119.7	80.7	-	92.3
Pr	5	11.7	31%	10.1	5.0	- 14.6	9.5	-	11.0
Nd	5	44.7	45%	39.8	5.0	- 52.0	36.2	-	44.0
Sm	5	7.5	23%	6.4	5.0	- 9.6	6.2	-	7.2
Eu	5	1.9	61%	1.8	1.4	- 5.0	1.5	-	2.3
Gd	5	6.67	20%	6.95	4.87	- 7.85	5.46	-	7.62
Tb	5	0.90	107%	0.86	0.74	- 5.00	0.79	-	1.12
Dy	5	4.30	20%	4.33	3.11	- 5.69	3.97	-	4.86
Ho	5	0.77	118%	0.79	0.49	- 5.00	0.73	-	0.98
Er	5	2.31	48%	2.27	1.295	- 5.00	2.11	-	3.19
Tm	5	0.34	173%	0.31	0.279	- 5.00	0.28	-	0.42
Yb	5	2.02	52%	2.01	1.524	- 5.00	1.77	-	2.57
Lu	5	0.28	181%	0.30	0.118	- 5.00	0.27	-	0.40
Hf	5	2.50	57%	3.03	0.000	- 5.00	2.83	-	4.03
Ta	5	15.37	200%	1.21	0.203	- 47.79	1.12	-	4.06
Pb	5	35.80	90%	19.15	5.000	- 71.79	17.83	-	22.24
Th	5	15.38	35%	13.07	5.000	- 18.92	12.38	-	14.49
U	5	3.36	33%	3.25	1.960	- 5.00	2.65	-	3.87

ANNEXE 6.

VARIABILITE TEMPORELLE DE LA COMPOSITION DE LA PHASE DISSOUTE SUR LE BASSIN DU NIGER AMONT

L'ensemble des résultats obtenus station par station et année par année (tableaux) montre la variabilité importante des concentrations en éléments dissous au cours du cycle hydrologique, bien que celle-ci soit beaucoup plus faible que celle des MES et encore moins que celle des débits. Seul le pH et dans une moindre mesure la silice dissoute montrent des variations de concentrations plus faibles. On verra que ces variations dépendent du régime hydrologique du fleuve et notamment des différentes origines de l'eau participant à l'écoulement à l'exutoire de la station étudiée (Ruissellement, Ruissellement hypodermique, écoulement souterrain...). L'hypothèse d'un mélange d'eaux de différentes origines est la plus probable.

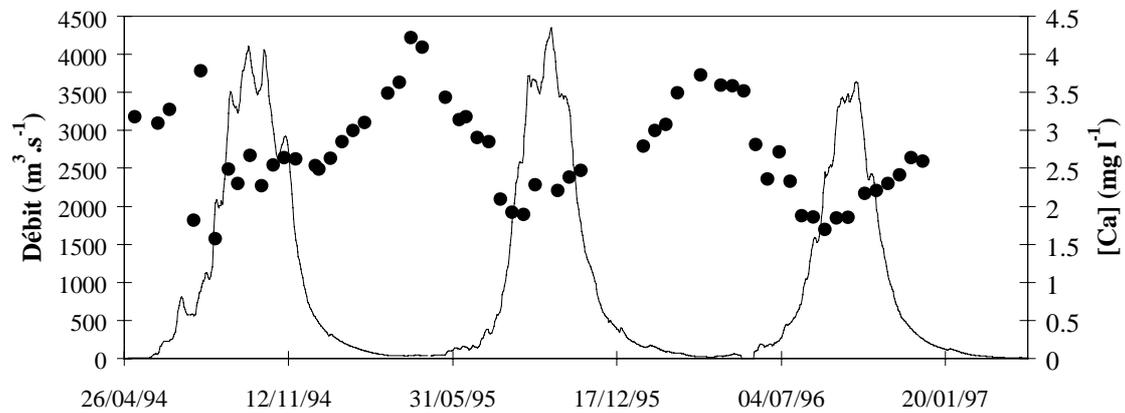
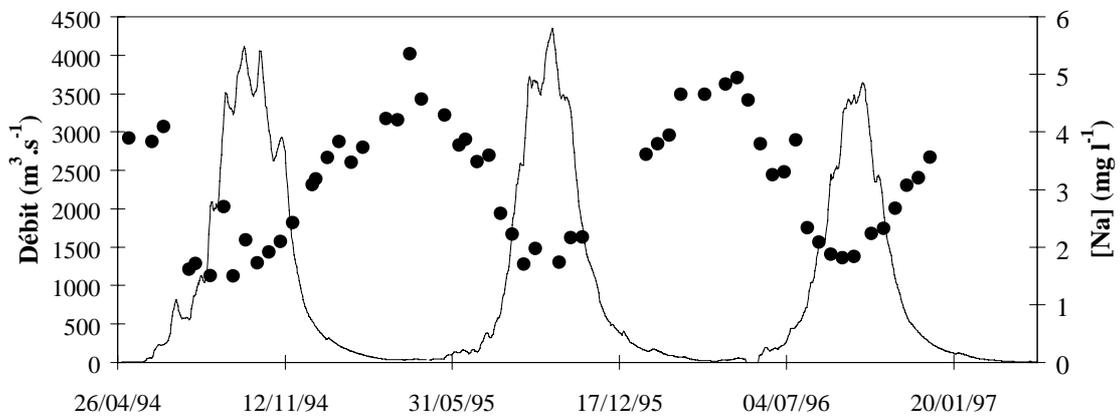
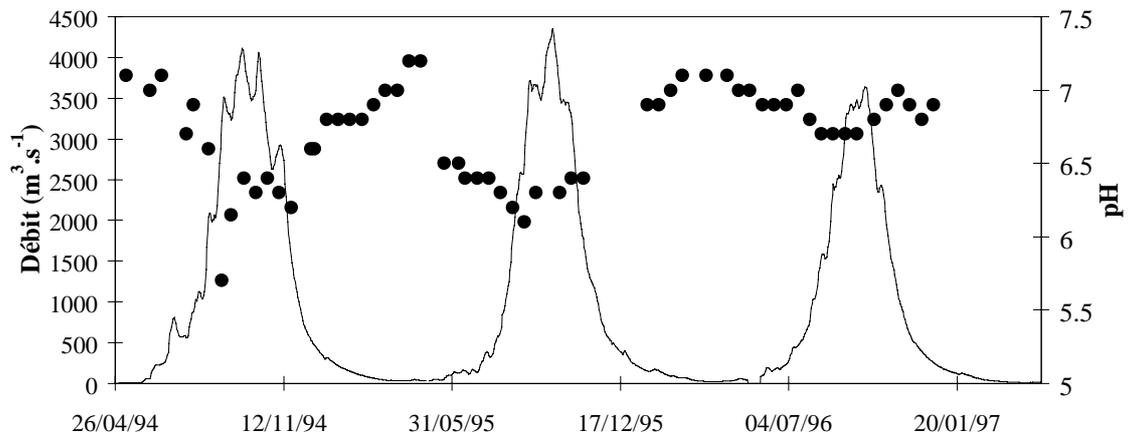
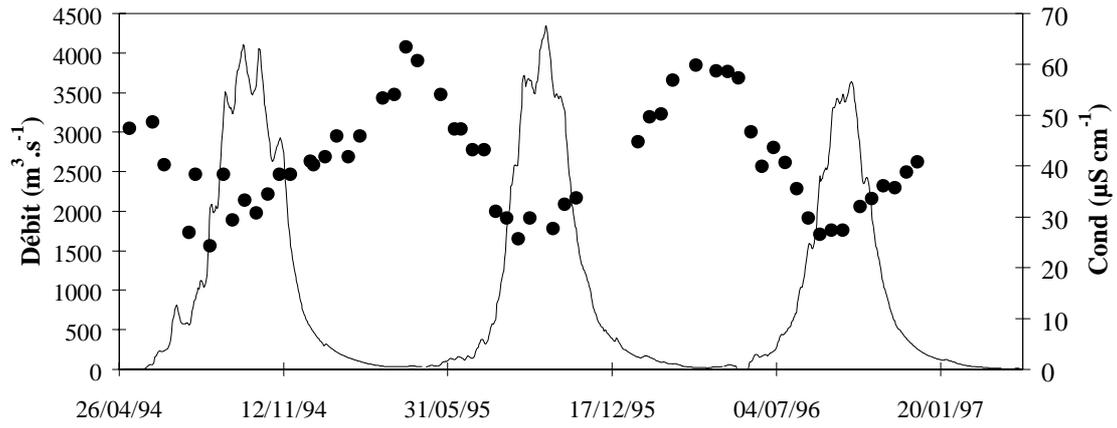
Les variations de la conductivité, des concentrations en Na, K, Mg, Ca et HCO₃, Cl, SiO₂ et le pH entre le mois de mai 1994 et mai 1997 sont uniquement reportées pour la station de Banankoro sur le Niger. Quelques autres illustrations seront présentées pour illustrer notre propos.

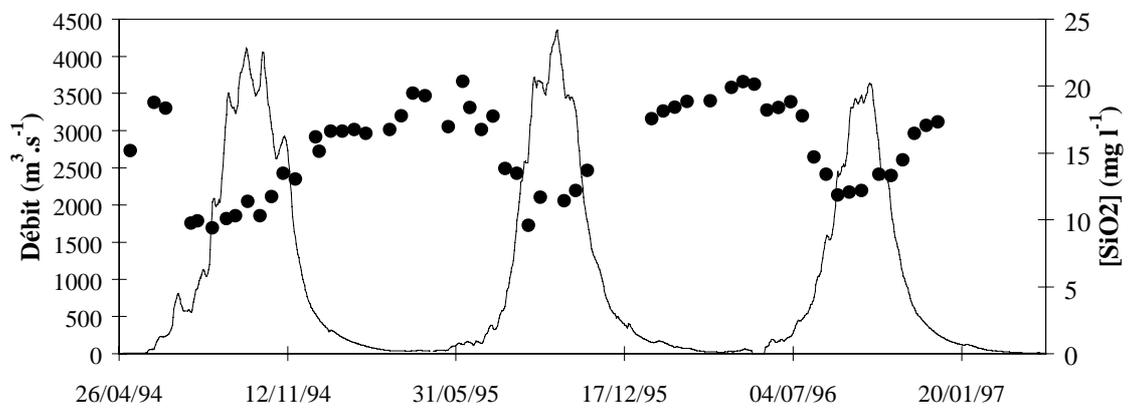
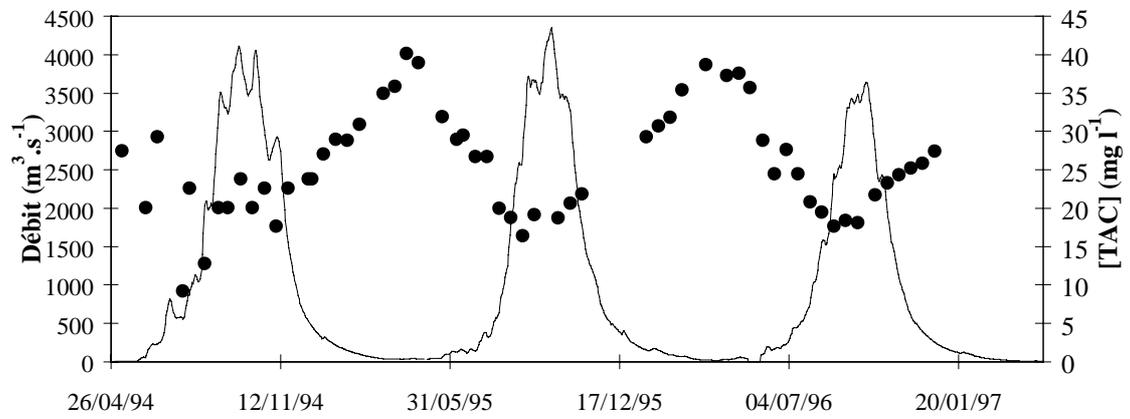
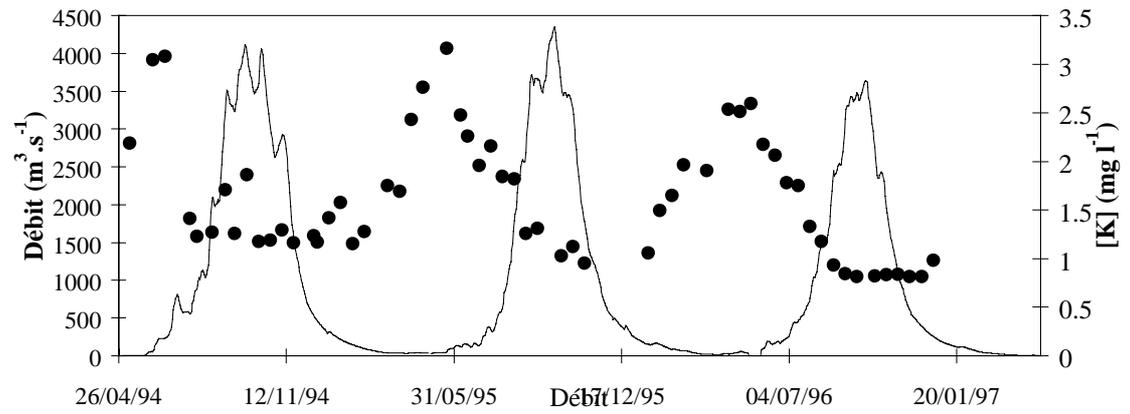
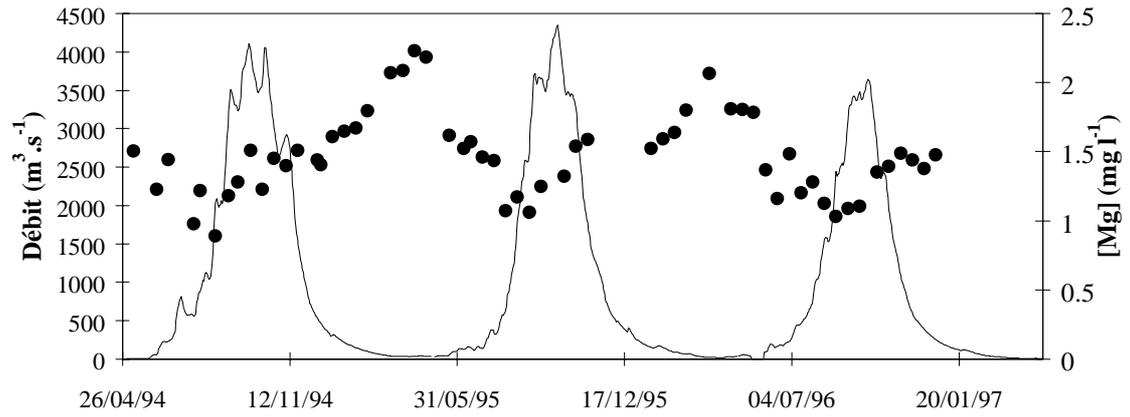
Variabilité saisonnière du pH, de la température et de la minéralisation des eaux de surface

Le pH et la température

On a déjà évoqué que le pH (mesuré au laboratoire) était peu variable sur les eaux des différentes stations du bassin amont. Cependant, l'évolution du pH dans le temps montre des variations plus ou moins en rapport avec les variations de débit. Il apparaît que les valeurs extrêmes de pH varient de façon inverse avec le débit, i.e., les pH maximums qui tournent autour de 7.5 se rencontrent en basses eaux (alors que l'activité photosynthétique est intense), et inversement les pH minimums, aux alentours de 6-7, s'observent en hautes eaux. Cette variation de pH est très bien illustrée pour l'année 1995/96 aux stations de Banankoro sur le Niger et de Douna sur le Bani (Figure 1). Les pH à la station de Banankoro sont légèrement basiques lors des basses-eaux (environ 7,5) puis diminuent avec l'arrivée de la crue jusqu'à des valeurs plus proches de la neutralité ou plus acides (7 en année sèche et environ 6 pour l'année humide).

Figure 1. (2 pages suivantes) **Evolution de Na, K, Mg, Ca et HCO₃, Cl, SiO₂ et du pH entre le mois de mai 1994 et mai 1997 pour la station de Banankoro.**





A Douna sur le Bani, les pH sont légèrement plus basiques en basses eaux, allant de 7.4 à 7.9, alors qu'en crue les valeurs diminuent à 6.6 et 7. Les variations sont beaucoup plus erratiques sur les stations à l'aval de la confluence entre le Sankarani et le Niger.

Dans l'ensemble les **températures** mesurées in-situ varient entre 20 et 30°C. Les valeurs les plus faibles se rencontrent alors que la décrue est bien avancée (janvier / février), période de minimum "extérieur"..... différence entre les stations effet de l'évaporation ?

La Conductivité, et le TDS (Total Dissolved Solid = $\Sigma^{+} + \Sigma^{-} + \text{SiO}_2$)

La Figure 2 et la Figure 3 représentent l'évolution des concentrations totales en éléments dissous (TDS précédemment défini), et du débit en fonction du temps pour les stations de Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina (sur le Niger) et Douna (sur le Bani) pour une année hydrologique (1995/96). Cet exemple, ainsi que l'ensemble des données, mettent en évidence, pour toutes les stations du bassin amont, trois périodes caractéristiques :

- Une période, au début de la saison des pluies (avril, mai), où il y a une **diminution importante et assez brutale des concentrations** alors que les débits commencent à augmenter.
- Une période d'étale de la crue où **les concentrations augmentent progressivement** alors que les débits augmentent ou diminuent.
- Une période qui correspond à la fin de la crue où **les concentrations augmentent plus fortement** pour atteindre de fortes valeurs.

Les écarts entre concentration maximum et concentration minimum sont très importants à la station de Douna sur le Bani, où les étiages sont sévères. Ils le sont moins pour les stations de Koulikoro et Ké-Macina sur le Niger, où le barrage de Sélingué assure un débit minimum en étiage plus important que sur les deux stations au régime naturel de Banankoro sur le Niger et Douna sur le Bani. De telles variations des concentrations en éléments dissous correspondent à un phénomène déjà rencontré aussi bien à l'échelle des petits bassins versants que dans la plupart des fleuves du globe (e.g. Roose & Lelong, 1981 ; Meybeck, 1984 ; Gac & Kane, 1986 ; Probst *et al.*, 1992 ; ...). La baisse des concentrations au début de la crue est attribuée à la dilution des eaux concentrées du cours d'eau par les eaux de pluie et de ruissellement faiblement minéralisées ; tandis que l'augmentation des concentrations s'explique par une contribution de la nappe plus importante, celle-ci étant plus concentrée. En effet, la concentration dans les eaux de nappes est importante par rapport aux eaux de surface (chapitre I) étant donné le temps de résidence relativement long de cette eau dans l'encaissant rocheux et la forte évapotranspiration qui peut se produire lors du transit des horizons superficiels du sol vers la nappe. Pendant l'étiage, les débits faibles sont assurés par la nappe et l'évaporation est importante. Cette dilution aboutit à une relation entre le débit et la concentration totale dissoute généralement décrite par une loi logarithmique de type $C = aQ^b$, avec une valeur négative de l'exposant b variant de -0.1 à -0.4 (forte dépendance entre C et Q).

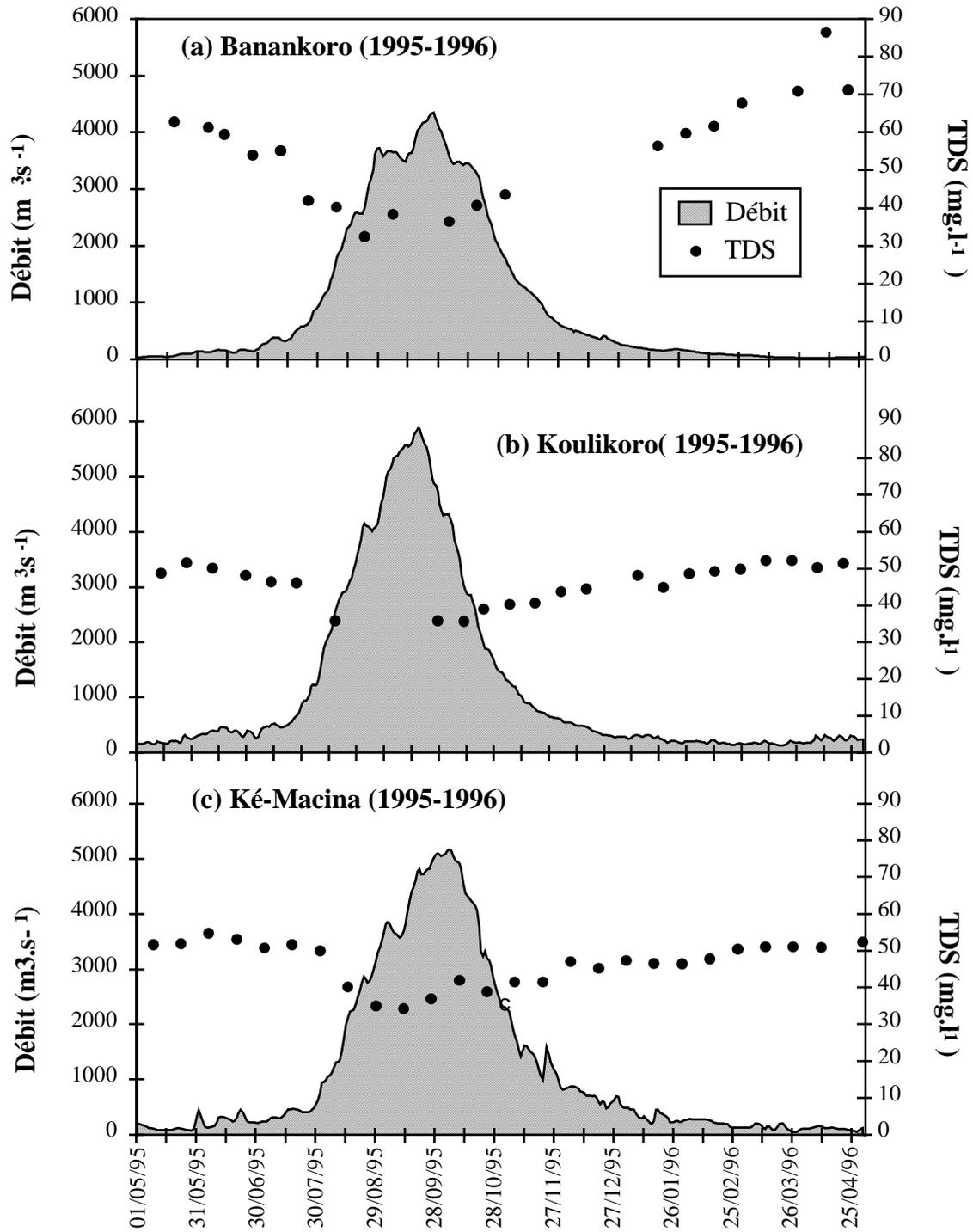


Figure 2. Evolution des concentrations totales en élément dissous (TDS) et du débit au cours de l'année hydrologique 1995/96 sur le Niger ; stations de Banankoro (a), Koulikoro (b) et Ké-Macina (c).

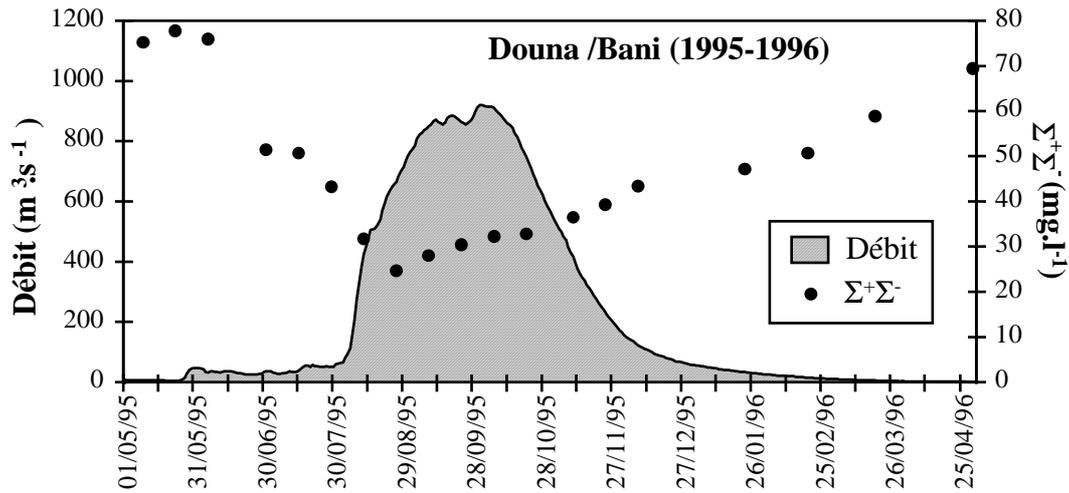


Figure 3. Evolution de la minéralisation globale de l'eau (somme des cations et des anions) et du débit au cours de l'année hydrologique 1995/96 sur le Bani (station de Douna). (NB : il n'y a pas de données pour la silice dissoute cette année là et certaines valeurs de TAC ont été obtenues à partir de la somme des cations en meq/l.)

La Figure 4 illustre ce type de relation pour le TDS observé à la station de Banankoro. Toutefois cette relation est plus ou moins bien définie suivant les éléments, les stations et les années. A la station de Douna sur le Bani, la chute brutale des concentrations au tout début de la crue est plus accentuée que sur les stations du Niger, puis l'augmentation des concentrations s'y produit également très rapidement avant le maximum de crue. La différence de concentrations entre hautes et basses eaux est également très accentuée du fait des étiages plus sévères sur le Bani que sur le Niger. Ceci aboutit à des cycles hystérésis anti-horlogiques bien marqués pour le Bani, comme le montre la Figure 5.

Ce décalage entre les valeurs extrêmes de débits (maximum) et de concentrations (minimum) ("lag effect" des auteurs anglo-saxons) a souvent été remarqué dans les grandes rivières ou à l'échelle d'une crue de quelques heures (Davis & Keller, 1983 ; Walling & Foster, 1975 ; Walling & Webb, 1980, Probst & Bazerbach, 1986 ; Kattan & Probst, 1986).

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les relations en boucle entre concentrations et débits :

- Dans les grandes rivières, cet effet peut être attribué à l'existence de lac en amont des stations étudiées. La vidange des mares et des lacs avec la nouvelle crue, amène au réseau hydrographique par effet de chasse les eaux qui se sont concentrées pendant l'étiage (Davis & Keller, 1983 ; Martin & Probst, 1991). Dans le même ordre d'idée certains auteurs parlent de "flushing effect" (Walling & Foster, 1975 ; Walling & Webb, 1980) pour décrire l'effet de chasse possible qui a lieu pour les premières crues sur le bassin versant. Les minéraux solubles déposés dans le lit mineur lors de la saison sèche (stockage dans le cours d'eau) peuvent être repris lors des premières crues. Il peut également se produire avec les premières pluies un lessivage des horizons du sol enrichis en substances chimiques lors de la saison sèche. Cet effet est ensuite absent avec les pluies suivantes. Ces différents processus aboutissent en général à des cycles horlogiques.
- La présence de relation concentration débit en boucle peut aussi être caractéristique d'une contribution saisonnière variable de différentes sources d'écoulement : pluie, ruissellement, écoulement hypodermique, eaux souterraines....(Davis & Keller, 1983 ; Bravard & Petit, 1997 ; Ewans & Davies, 1998). Les boucles sont alors généralement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, les apports du sous-écoulement fortement concentrés contribuant davantage au débit lorsque l'eau baisse dans la rivière. Il peut également s'agir des contributions saisonnières de différents tributaires situés en amont de la station étudiée qui n'arrivent pas de manière synchrone (Walling & Webb, 1980 ; Ribolzi, 1996 ; Cornieles, 1996). L'effet sur la composition chimique de l'eau ne pourra être important que si les lithologies sont bien marquées entre les différents bassins. Sur le Niger, les différences entre sous bassins versants ne sont a priori pas assez contrastées pour que l'on puisse suivre les différentes sources géographiques des eaux alimentant le Niger.

- Enfin, il peut également exister des processus liés à la forme de la rivière et aux paramètres hydrauliques de l'écoulement. La différence de vitesse entre l'onde de crue et la vitesse moyenne de la crue peut par exemple produire de manière progressive de l'amont vers l'aval un décalage entre le minimum de concentration et le maximum de débit (Walling & Foster, 1975). La présence de plaines inondées, qui constituent des zones de stockage, peut avoir un effet important sur l'occurrence du maximum de débit mais peu d'effet sur l'évolution du minimum de concentrations vers l'aval (Walling & Webb, 1980).

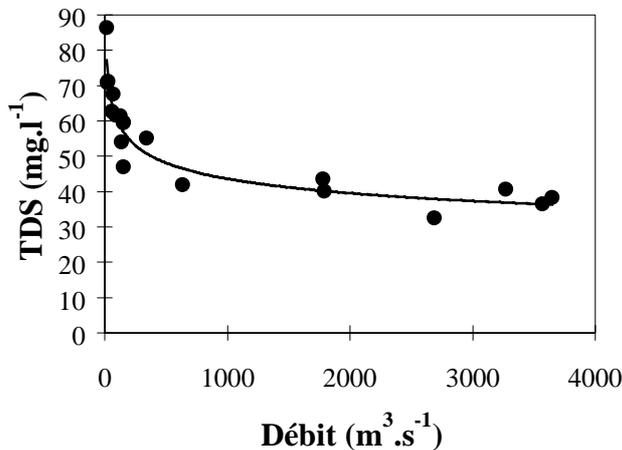


Figure 4. Relation entre la concentration totale en éléments dissous (TDS) et débit pour l'année hydrologique 1995/96, à la station de Banankoro sur le Niger .

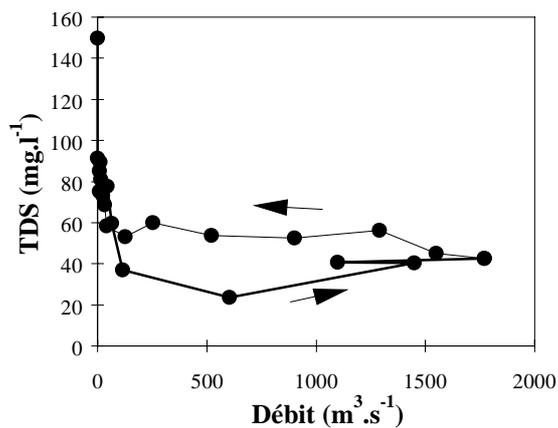


Figure 5. Exemple de relation de type hystérésis entre la concentration totale en élément dissous (TDS) et le débit pour l'année hydrologique 1994/95, à la station de Douna sur le Bani .

Il est assez logique de penser que c'est un ensemble de facteurs de ce type qui vont influencer les variations saisonnières d'éléments dissous dans une rivière. De plus, l'intervention de facteurs internes à la masse d'eau, tels que la présence de phytoplancton, des phénomènes de précipitation... ; et/ou de facteurs externes tels que la fréquence des événements hydroclimatiques, peut rendre l'interprétation des relations C&Q complexe suivant les éléments étudiés.

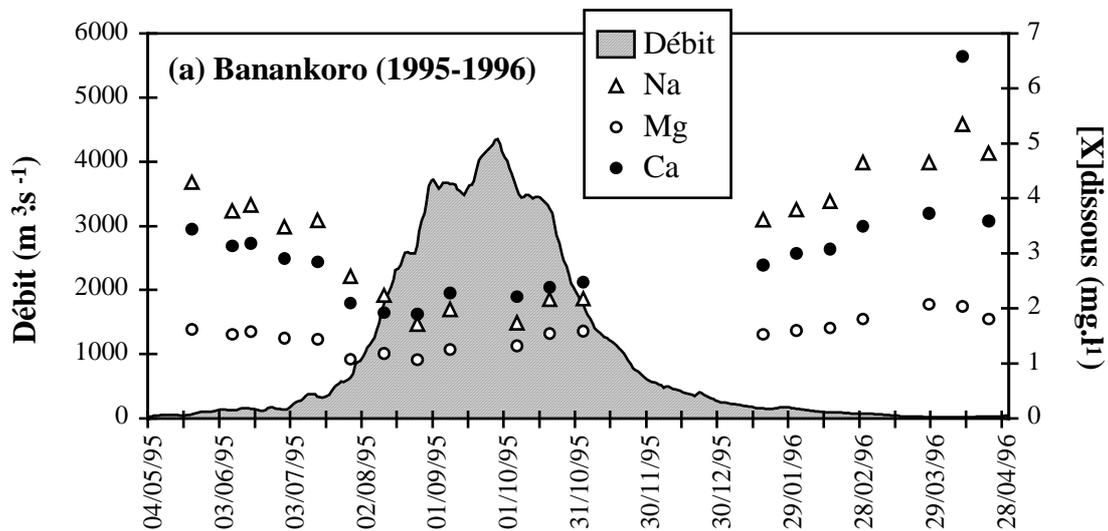
Pour des grands bassins comme ceux du Niger et du Bani, il semble que l'ensemble de ces hypothèses est envisageable étant donné la complexité du milieu tant du point de vue hydrographique (chevelu important, présence de méandres...) qu'hydrologique (nappes perchées sur les versant latéritiques...). L'arrivée massive des eaux de nappes en septembre / octobre qui forme une part importante des écoulements pourrait expliquer que les concentrations commencent à augmenter avant le max. de crue : en effet, la présence des nappes comme apports aux fleuves a été montré à Banankoro et à Douna par l'étude de l'oxygène-18 et du deutérium (Gourcy, 1993). La différence d'évolution des concentrations entre le Niger et le Bani peut être alors attribuée à une différence des propriétés des aquifères déjà évoquée dans chapitre III.

Evolution comparée des éléments dans la phase dissoute sur le Niger et le Bani

L'analyse des fluctuations des concentrations au cours du cycle hydrologique pour chaque élément permet de distinguer, de manière assez schématique, plusieurs groupes d'éléments dont les comportements diffèrent. En effet, les éléments tels que Ca, Na, Sr, Mg et l'alcalinité suivent le comportement du TDS avec une décroissance en fonction du débit décrivant parfois des boucles d'hystérésis anti-horlogiques; tandis que d'autres éléments tels que Rb et K décrivent des cycles d'hystérésis horlogiques. (horlogique = les concentrations sont plus importantes en crue qu'en décrue). SiO₂, Cl ont des comportements moins marqués avec des relations concentrations/débits plus dispersées bien que la tendance générale de dilution soit respectée.

Les ions HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, et Mg²⁺

Les éléments HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, et Mg²⁺ sont très bien corrélés entre eux, et suivent le même type de relation que TDS. Les éléments Sr et dans une moindre mesure Ba suivent le comportement des éléments majeurs ci-dessus. Les relations sont d'ailleurs très bonnes entre ces éléments. Les relations concentration - débit pour ces éléments sont décroissantes et présentent parfois une légère hystérésis (**Figure 7**) antihorlogique. On retrouve le même effet de dilution décrit précédemment pour la minéralisation globale de l'eau avec des légères différences entre éléments : lors de la montée de crue, Na diminue plus brutalement que Ca et Mg et inversement lors de la décrue, les concentrations augmentent plus vite (et régulièrement) que les deux autres cations. Sur le Bani, cette différence est remarquable et la relation Concentration/Débit forme un cycle d'hystérésis marqué par une dilution très forte en début de crue. La baisse importante en Na par rapport aux autres éléments laisse penser qu'il existe un apport supplémentaire pour les autres éléments au début de la crue. La forte augmentation de Na avec la décrue et la participation de plus en plus importante de la nappe au débit du fleuve, laisse penser que Na, libéré par l'altération des silicates, est davantage concentré dans les eaux de nappe. L'augmentation des concentrations en Mg²⁺, beaucoup plus modérée que celles de Ca²⁺ et Na⁺, suggère que le magnésium est en effet peu présent dans les eaux des nappes. Cette hypothèse est possible étant donnée la géologie du bassin versant.



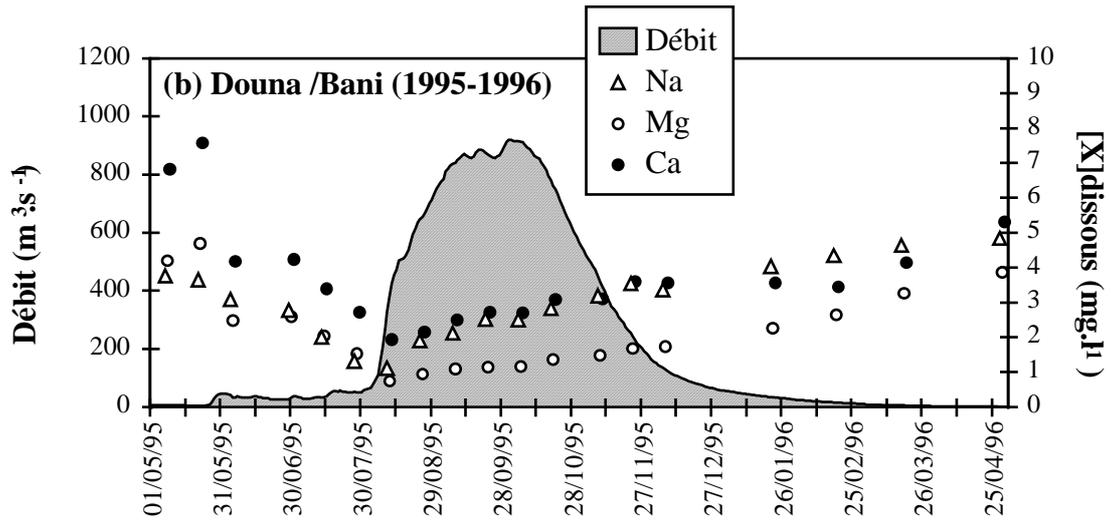
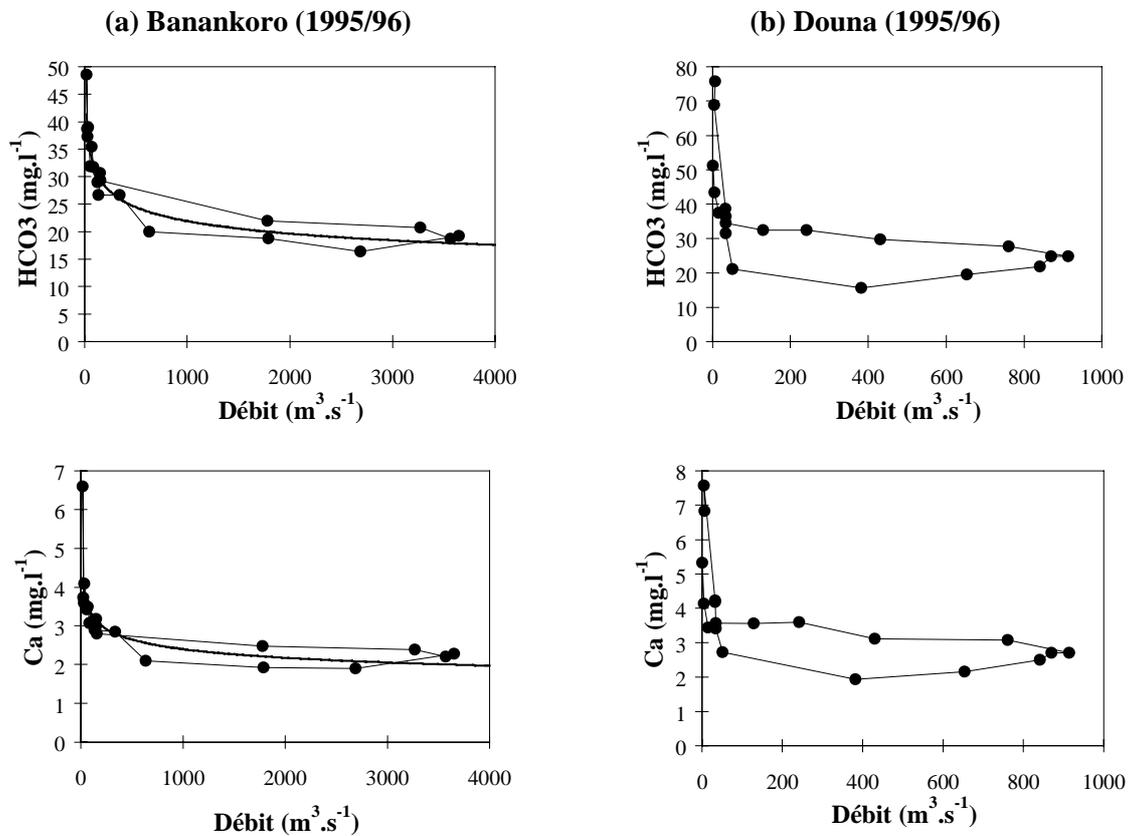


Figure 6. Evolution des concentrations en Ca, Mg, et Na dans la phase dissoute et du débit au cours de l'année hydrologique 1995/96 sur le Niger à Banankoro (a) et le Bani à Douna (b).



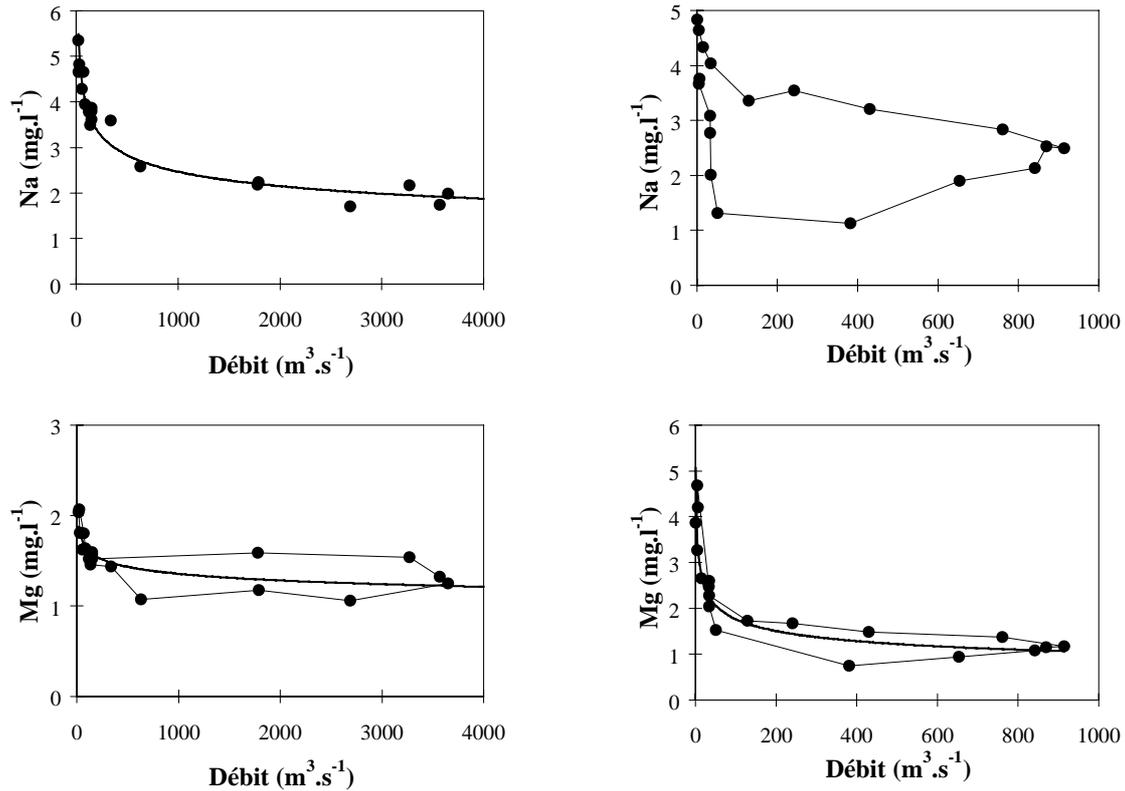


Figure 7. Exemple de relations entre HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+} et le débit pour le Niger à Banankoro (a); et pour le Bani à Douana (b).

Les cations K et Rb

K et Rb, qui sont très bien corrélés entre eux, ne suivent plus ces variations et ceci quelle que soit la station. La première particularité de ces deux éléments est qu'il existe toujours un léger décalage entre la chute des autres cations et K. Ce dernier semble continuer à augmenter alors que les concentrations des autres éléments chutent brutalement. La deuxième particularité de ces deux éléments est de continuer à diminuer alors que la décrue est amorcée et que les concentrations des autres éléments (HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+}) ont commencé à augmenter. L'augmentation des concentrations n'a lieu que lorsque le débit est à nouveau très faible et l'évaporation intense. Il en résulte des relations C/Q formant des boucles d'hystérésis, cette fois-ci, dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette évolution particulière par rapport aux autres cations majeurs tient au fait que K et Rb peuvent provenir, en plus de l'altération des minéraux alcalins, de la matière organique végétale, et donc a priori de la composante ruissellement de l'écoulement. En effet, K est connu pour être concentré dans les eaux de ruissellement de surface (après destruction des colloïdes argileux du sol auquel il est associé) mais se trouve dans de plus faibles concentrations dans les eaux souterraines (Pierson et Taylor, 1994 ; Ribolzi, 1996). Ceci explique que les concentrations continuent à diminuer avec la décrue avec l'apport relatif de plus en plus important des nappes. Ce phénomène en début de crue peut être accentué par le lessivage des terrains cultivés ou il y a épandage de NPK (surtout sur le Bani où il existe des périmètres cotonniers), et/ou par le lessivage des cendres laissées par les feux de brousse pratiqués pendant la saison sèche dans cette région (surtout sur le haut bassin du Niger).

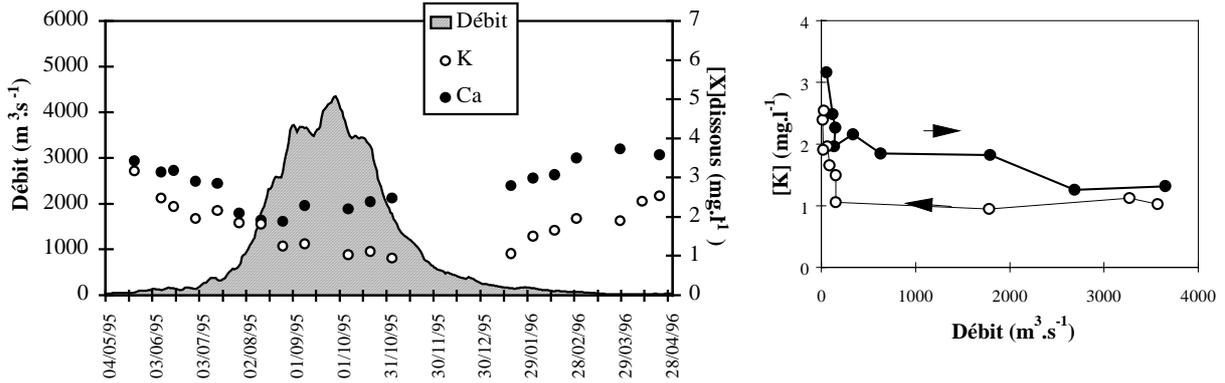


Figure 8. Exemple de relation entre K et le débit pour le Niger à Banankoro (1995/96).

La silice dissoute

Les variations de silice dissoute au cours d'un cycle hydrologique sont plus faibles que pour les éléments majeurs : les coefficients de variation sont toujours inférieurs à 20% sur un cycle. L'évolution de la silice suit toutefois l'évolution des cations majeurs, bien que les relations C/Q soient plus complexes et moins bien définies. A la station de Banankoro sur le Niger la relation C/Q présente par exemple un cycle d'hystérésis antihorlogique plus ou moins marqué (Figure 9).

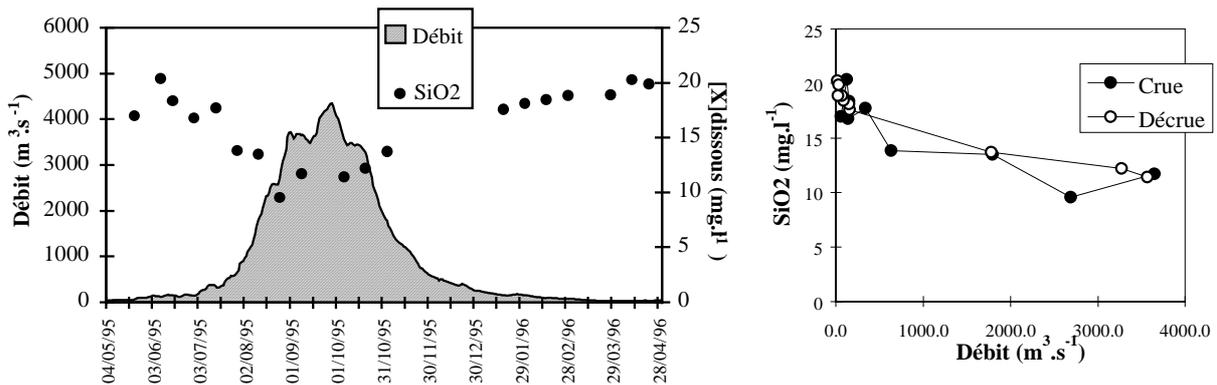


Figure 9. Exemple de relation entre SiO2 et le débit pour le Niger à Banankoro (1995/96).

La silice est libérée par l'altération de silicates et peut être utilisée par les diatomées dans la formation de leurs tests. Des chutes brusques pendant les basses eaux peuvent indiquer des blooms de diatomées (Meybeck, 1979).

Les Chlorures

L'évolution des teneurs en chlorures au cours du cycle hydrologique est assez irrégulière. C'est de manière générale l'ion majeur qui présente les plus grands coefficients de variation. Toutefois la même tendance que pour les autres éléments apparaît, c'est à dire une diminution des concentrations avec le début de la crue et une augmentation des concentrations avec la décrue.

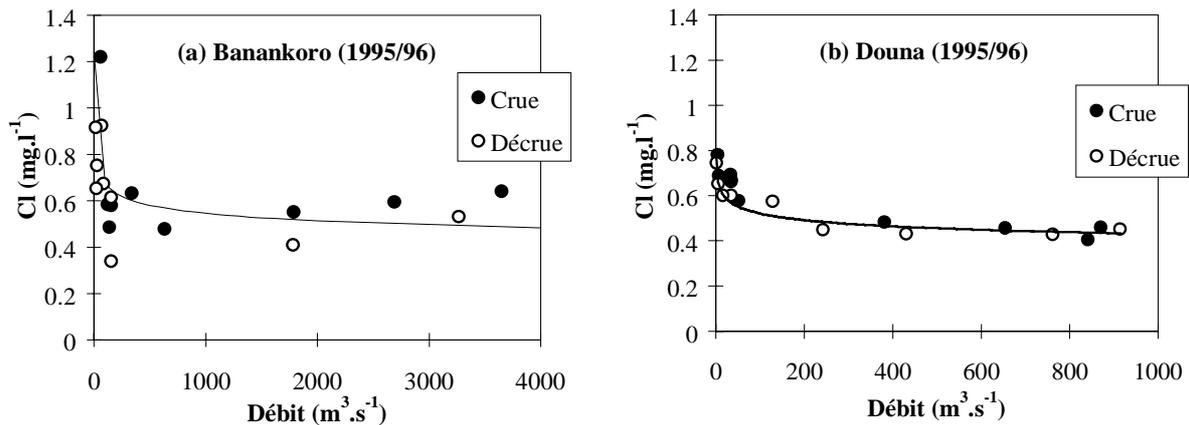


Figure 10 : Relation entre la concentration en Cl et le Débit à Banankoro (a) et à Douna (b) pour l'année 1995/96.

Les autres éléments

Quelques valeurs ponctuelles de NO_3^- montrent que les valeurs maximums se rencontrent en juillet alors que les valeurs minimums se rencontrent lors de la décrue en basses-eaux.

Pour les éléments traces, on a déjà vu que les éléments Sr, Ba décroissent avec le débit et suivent le comportement des cations majeurs et de l'alcalinité tandis que Rb et K ont un comportement un peu différent. Les relations Concentration/Débit ont été étudiées pour les éléments traces uniquement sur les deux stations de Banankoro sur le Niger et de Douna sur le Bani, pour lesquelles les échantillons sont bien répartis sur l'année hydrologique 1996/97 (7 échantillons). Ces relations sont reportées dans la Figure 11 pour quelques éléments et pour la station de Banankoro. Les numéros représentent le mois du prélèvement (rappelons que la crue commence en mai (mois 5) et finit en avril de l'année civile suivante (mois 4)).

Les relations sont très variables et généralement complexes avec des cycles d'hystérésis. Tous les autres éléments (exceptés, Sr, Rb, Ba) présentent un maximum de concentration en juillet, mais se distinguent par différentes variantes :

- Pour les éléments Al, Ti, et V, qui ont exactement le même type de relation C/Q, les concentrations restent assez stables, à partir de l'échantillon d'août, malgré les variations de débit. Pour V, l'augmentation des concentrations entre juin et juillet est faible et les concentrations en avril sont anormalement élevées. Les variations de Th ressemblent à ces éléments avec une différence entre le mois 8 et 10, où les concentrations diminuent.
- La et Co suivent presque le comportement des éléments ci-dessus avec un pic de concentration en juillet, mais celles-ci augmentent entre août (montée de crue) et octobre (décrue). Ces deux éléments sont les seuls à présenter une chute importante de leurs teneurs en février.
- Les relations pour U et Cr forment des cycles d'hystérésis horlogiques bien marqués.
- Les relations C/Q pour Mn sont particulières, avec une faible augmentation des concentrations entre juin et juillet, et une augmentation des concentrations entre août et octobre similaire à l'augmentation observée pour La et Co.
- Zn et Pb aucune relation avec Débit.

La Figure 11 représente l'évolution conjointe, des concentrations en éléments Th, U, La ; des MES et du Débit au cours du cycle hydrologique 1996/97. Le pic de concentration se situe pour ces éléments (et les autres) lorsque les concentrations en MES sont importantes. Pour U les concentrations restent importantes pour le mois d'août (période de maximum de MES) alors que pour les deux autres éléments les concentrations chutent fortement.

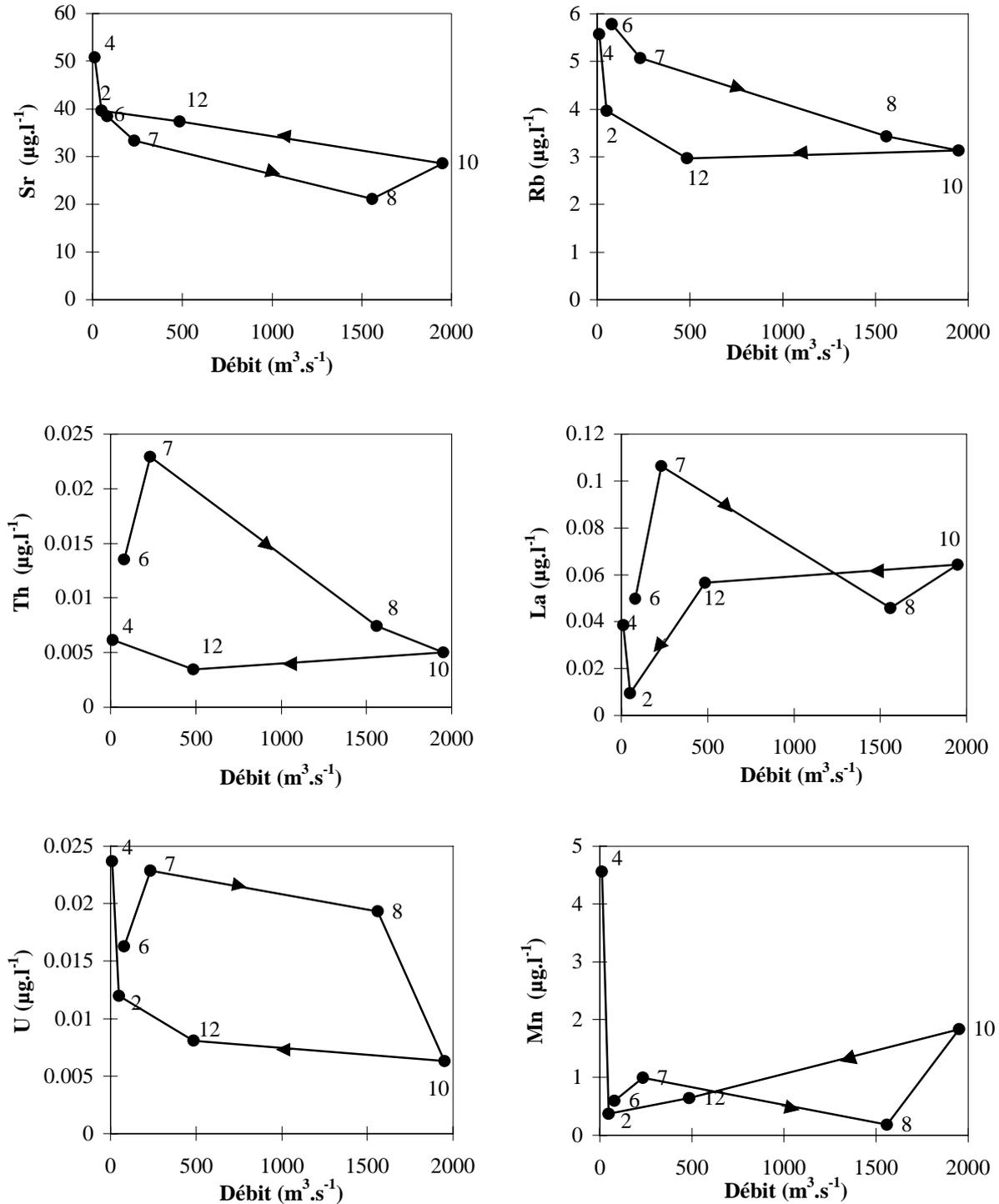


Figure 11 : Relation entre la concentration en éléments traces dans la phase dissoute et le Débit à Banankoro pour l'année 1996/97.

Conclusions

L'étude des variations des concentrations en éléments dissous au cours des cycles hydrologiques de 1994 à 1997 a permis de mettre en évidence une évolution très comparable des concentrations des différents éléments majeurs dissous (Na, K, Mg, Ca et HCO_3 , Cl, SiO_2 et le pH) présents dans les eaux : les teneurs les plus faibles s'observent lors de l'étalement de la crue tandis que les plus fortes se

rencontrent en basses eaux alors que l'écoulement faible n'est plus assuré que par la nappe et que l'évaporation est importante. Il en résulte des relations entre les concentrations et le débit qui évoquent la dilution des eaux du fleuve par les pluies et le ruissellement de surface plus faiblement minéralisés. Mais cette relation est souvent mal définie et présente des cycles d'hystérésis importants, notamment à la station de Douna sur le Bani pour laquelle les minimums de concentrations arrivent nettement avant le pic de crue. Ces boucles d'hystérésis sont variables d'un élément à un autre, suivant les années et les stations. Deux types de boucles peuvent toutefois être distingués : dans le sens des aiguilles d'une montre pour K (concentrations plus importantes en crue qu'en décrue) ou dans le sens inverse pour Na, Ca, Mg, HCO₃⁻ (concentrations moins importantes en crue qu'en décrue). Ces relations en boucles peuvent être interprétées comme le mélange d'eaux de plusieurs réservoirs : écoulement de surface, écoulement hypodermique, écoulement souterrain... qui contribuent de manière décalée à l'écoulement total du fleuve. L'interprétation plus fine des variations de concentrations restent cependant difficile étant donné la complexité des différentes réponses possibles des paramètres individuels étudiés et le nombre d'analyses insuffisant sur plusieurs cycles hydrologiques. Il serait nécessaire d'identifier des traceurs pour chaque type d'écoulement.

Annexe 7

Bilan des exportations des éléments chimiques le bassin amont - Variabilité spatiale et inter annuelle

Cette étude fait suite à celle sur la variabilité temporelle des concentrations en éléments majeurs dans la phase dissoute des eaux du bassin amont du Niger (Annexe 6). La connaissance de ces concentrations bimensuelles, ainsi que des débits journaliers sur les stations principales du Niger amont (Banankoro, Koulikoro, Ké-Macina) et du Bani (Douna) ont permis de calculer les **flux en éléments majeurs dissous** par une méthode d'interpolation des concentrations (cf. chapitre II), méthode acceptable pour les éléments dissous dont les variations sont faibles par rapport aux débits (Meybeck, 1996). Il convient de relativiser les différences entre les valeurs obtenues étant donné les lacunes d'échantillonnage pour certains mois et les problèmes de conservation liés notamment à la faiblesse des concentrations rencontrées. **L'erreur sur le calcul des flux a été estimée à 15%** en prenant une erreur de 5% sur les débits et une erreur de 10% sur les concentrations.

Le calcul des **flux annuels pour les éléments traces** a été réalisé uniquement dans la **phase totale** à partir des concentrations pondérées par les débits et les débits annuels pour chaque station du bassin amont, excepté pour Sélingué pour laquelle seule 4 valeurs sont disponibles. Les flux sont uniquement calculés pour les éléments pour lesquels il y a assez de données (au moins 70% des valeurs supérieures à la limite de détection). L'échantillonnage pour les éléments traces ne couvre pas toute l'année hydrologique 1996-1997, mais les eaux des principales périodes de ce cycle ont été prélevées. De plus, pour chaque station, la moyenne en MES sur les 7 échantillons est proche de la moyenne calculés sur les échantillons hebdomadaires. Par exemple à la station de Banankoro ces deux valeurs représentent respectivement 25 mg.l^{-1} et 23 mg.l^{-1} . On peut donc considérer que nos calculs prennent en compte la variabilité des MES du fleuve au cours de la crue.

Le calcul de ces bilans permet dans un premier temps de montrer la variabilité des flux de matières dissoutes exportées, calculés en année hydrologique (de 1991/92 à 1996/97), suivant l'hydraulicité de l'année. Dans un deuxième temps, ces bilans permettent de confirmer la variabilité spatiale entre les 3 stations du Niger et l'influence du Sankarani sur la composition des eaux à l'aval de sa confluence avec le Niger. Les différences entre Bani et Niger et les bilans de matières entrants dans le delta intérieur du Niger sont aussi présentés.

Principaux résultats

Les résultats des flux annuels et saisonniers des éléments chimiques transportés dans la phase dissoute (éléments majeurs et traces) par le Niger et ses deux affluents (Sankarani et Bani) sont présentés dans le Tableau 4.

Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	Cl	SiO ₂	Σ+S-	TDS	TDS spé
----	----	---	----	------------------	----	------------------	------	-----	---------

Banankoro										
1991-1992	32.5	18.0	30.1	36.8	331	10.5	220	462	682	9.6
1994-1995	84.1	45.0	48.3	71.9	702	23.6	394	1010	1404	19.8
1995-1996	71.0	41.5	38.8	66.5	628	17.1	387	862	1248	17.6
1996-1997	51.6	31.2	24.0	56.4	526	9.7	340	704	1044	14.7
Koulikoro										
1991-1992	48.8	22.2	61	67	483	26.4	202	727	929	7.7
1994-1995	118.1	56.1	74.1	134	1110	51.6	530	1565	2095	17.5
1995-1996	103	48	61.5	115	961.3	30.3	566	1322	1888	15.7
1996-1997	74.6	34	41	97.5	722.8	21	463	994	1457	12.1
Ké-Macina										
1992-1993	42.8	12.9	36.1	75.4	424	25.4	319	625	944	6.7
1993-1994	44.5	27.6	33.5	73.6	463	22.7	302	673	975	6.9
1994-1995	109.3	47.6	61.9	101.9	1324	21.2	386	1683	2069	14.7
1995-1996	102.3	43.2	54.8	100.2	903	20.0	514	1260	1774	12.6
Sélingué										
1994-1995	32.7	13.4	16.2	34.7	290	5.0	155	397	552	16.1
Douna										
1992-1993	12.5	4.3	9.5	15.9	106	3.3	68	159	227	2.2
1993-1994	11.4	6.1	9.5	10.6	107	1.8	55	147	202	2.0
1994-1995	47.2	20.0	32.5	30.9	472	8.3	132	649	785	7.7
1995-1996	19.8	9.1	13.5	18.0	180	3.3	62	246	428	4.2

Tableau 4. Résultats des flux annuels des éléments chimiques transportés dans la phase dissoute (éléments majeurs) par le Niger et ses deux affluents (Sankarani et Bani).

Ces premiers résultats montrent que les flux spécifiques en éléments dissous (sans le COD) sur les stations du bassin amont du Niger, calculés pour la période 1991 à 1997, sont de 9.6 à 19.8 t.km².an⁻¹ pour le Niger à Banankoro, de 7.7 à 17.5 t.km².an⁻¹ à Koulikoro ; de 6.7 à 17.7 t.km².an⁻¹ à Ké-Macina ; et de 2.0 à 7.7 t.km².an⁻¹ pour le Bani à Douna (Tableau 4). Les valeurs les plus faibles sont proches de celles trouvées par d'autres auteurs sur le même fleuve et pour des périodes beaucoup plus sèches (Orange, 1992 ; Gourcy, 1994 ; Boeglin et Probst, 1996). En effet, les valeurs observées ci-dessus présentent, comme pour les débits et les flux de MES, une **variabilité interannuelle importante** : le rapport entre minimum et maximum de flux annuel de TDS (représentant la charge moyenne du fleuve) est au minimum de 3 (observé à Douna). La Figure 12 met en évidence la très bonne relation de type $\log F = a + b \log Q$ qui existe à l'échelle log/log entre les flux spécifiques de TDS transportés et les débits spécifiques. Comme les diagonales représentent les domaines d'égalité de concentrations, on peut déduire que le transport de TDS se fait à concentration constante. En raison des variations de concentrations toujours très faibles (annexe 6) devant celles des débits, la corrélation est toujours très bonne (c'est en fait une auto-corrélation) et les flux de TDS ne dépendent ainsi que du débit annuel. Les **faibles transports spécifiques observés à Douna** s'expliquent en première approximation par la **faiblesse du drainage sur le bassin versant du Bani**.

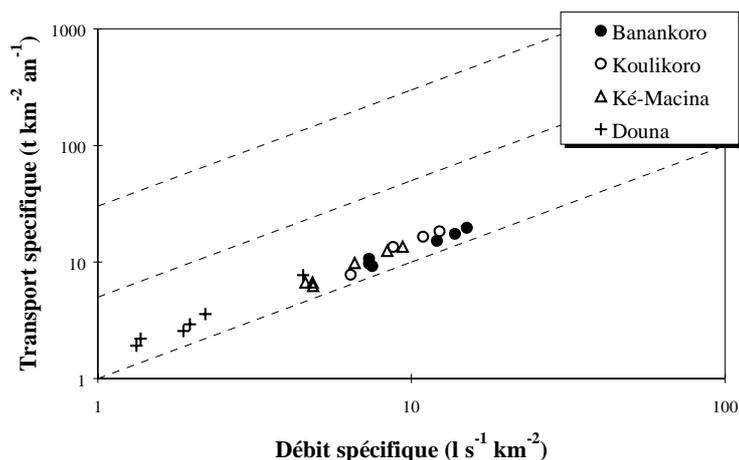


Figure 12. Relation entre les flux annuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont de 1991 à 1997.

La même observation se retrouve au niveau des flux mensuels : les relations entre flux de TDS et débits mensuels sur l'ensemble des années sont des équations de même forme puissance avec des coefficients de corrélation hautement significatifs (les coefficients de corrélations et les équations pour chaque station se trouvent dans la Figure 13). Il apparaît donc que le transport de matières dissoutes suit le comportement de l'eau sur ces stations et qu'ainsi environ 90% du transport a lieu entre juillet et novembre. Les points sont légèrement plus dispersés à Douna, où les écoulements en basses eaux sont faibles, voire nuls ! Le transport dissous y est encore plus regroupé sur les mois de hautes-eaux.

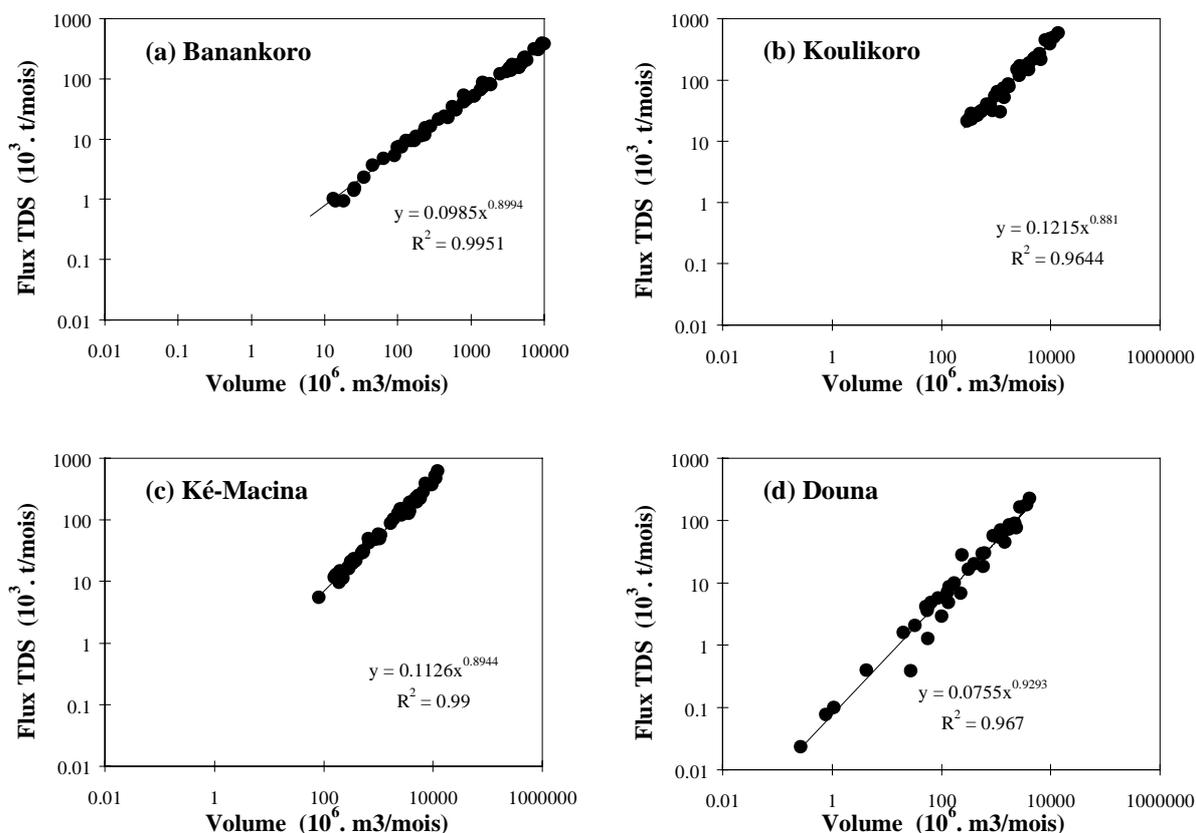


Figure 13. Relation entre les flux mensuels de TDS et les débits mensuels correspondants sur les 4 stations principales du bassin du Niger amont de 1991 à 1997.

Cependant, pour une année donnée, les hystérésis parfois observées sur les concentrations (annexe 6) peuvent se retrouver dans les relations entre le flux et le volume écoulé au pas de temps mensuel : le

transport en TDS pendant la montée des eaux est alors plus faible que pendant la décrue. Ce phénomène a surtout lieu sur les stations à l'entrée du delta de Ké-Macina sur le Niger et de Douna sur le Bani où l'enrichissement en éléments dissous par évaporation des eaux dans le lit majeur pourrait être important. En effet, ces deux stations se trouvent dans des zones où le lits majeur est important et les zones d'inondation aussi.

L'ensemble des résultats du Tableau 4 met également en évidence **la variabilité spatiale** entre stations au niveau des flux de TDS et de chacun des éléments dissous. Bien que les flux de bicarbonates constituent toujours la part la plus élevée du flux total en éléments dissous, les proportions diffèrent légèrement suivant les stations, entre 47 et 52% du flux de TDS. La part relative des flux de silice est toujours en deuxième position mais varie entre 13 et 24% (elle est la plus faible sur le bassin du Bani) ; les proportions relatives de Ca (4.7-6.1%), Na (4.3-7.2%), K (2.3-6.6%), Mg (2.2-3.3%) et Cl (0.8-2.8%) suivent plus au moins cet ordre décroissant suivant les années et les stations. La part de Mg est plus importante sur la station de Sélingué sur le Niger que sur les 4 autres stations. La part de Na est nettement plus importante par rapport à celle de Ca sur les stations de Koulikoro sur le Niger et de Sélingué sur le Sankarani, alors que la part relative de ces deux ions est presque équivalente sur le Niger à Banankoro plus en amont. L'ordre des proportions relatives des flux d'éléments dissous sur Ké-Macina et Douna sont variables d'une année à l'autre.

Pour évaluer les changements qui peuvent subvenir sur le Niger, et les différences entre les deux entrées du delta, nous étudions pour cela, comme pour les flux hydriques et particuliers, les bilans de matières chimique (dissoute et totale) sur les deux biefs du Niger et comparons les flux observés à Ké-Macina et sur le Bani.

Evolution spatiale des flux dissous transportés sur le cours du Niger

On a vu que le fleuve Niger depuis son entrée sur le territoire du Mali (Banankoro) jusqu'à son entrée dans le delta intérieur du Niger (Ké-Macina) subissait quelques transformations. Les apports hydriques du Sankarani, affluent important sur le bief Banankoro-Koulikoro peuvent être important et permettent un soutien d'étiage, tandis que le barrage de Markala et la forme du lit entre Koulikoro et Ké-Macina provoquent de pertes en eau. Qu'en est il des flux dissous?

Bief Banankoro - Koulikoro

Comme pour les MES (chapitre III) il y a un gain annuel (sur le cycle hydrologique) de matière dissoute totale (TDS) entre ces deux stations de 276 000 à 808 000 tonnes par an, qui accompagne le gain de débit (entre 7 et 13 km³ d'eau). Ces gains correspondent à des transports spécifiques pour le bassin intermédiaire (49 000 km²) de 5.6 à 16.5 t.km².an⁻¹. Il semble que plus le gain hydrique est important et plus le gain en TDS l'est aussi (Mais on a que 4 points!).

Le gain de matière dissoute est proportionnellement plus important (entre 42 et 60%) que celui des débits (entre 36 et 44 %). Ceci implique qu'il existe des apports intermédiaires plus concentrés. On a déjà vu que les apports hydriques du Sankarani expliquent presque totalement la différence de débit dans ce bief (chapitre III), on a également vu que les concentrations du Sankarani étaient en général plus élevées que sur les autres stations (chapitre V), il est donc légitime de penser que ces apports pourraient expliquer l'augmentation des concentrations moyennes annuelles entre Banankoro et Koulikoro. La Figure 14 présente le bilan annuel calculé sur la seule année (année "humide" 1994/95) où on a à la fois les débits (calculé à partir des données "usine"¹) et les concentrations à la station de Sélingué (Tableau 4). Cette dernière permet de voir que les apports en TDS du Sankarani expliquent, dans un premier temps la différence de transport entre les deux stations : la différence de 11.5% entre la somme des flux à Banankoro et Sélingué et les flux à Koulikoro est peu significative devant l'erreur potentielle sur les flux de 15%. Le transport spécifique de 15.5 t.km².an⁻¹ pour l'année humide 1994/1995 sur le Sankarani est du même ordre de grandeur que les 16.5 t.km².an⁻¹ calculés sur le bassin intermédiaire. La légère différence entre ces deux valeurs reflète pourtant des apports

¹ Débit "usine" = Débit déversé + Débit usiné (barrage de Sélingué)

supplémentaires (et/ou des phénomènes de concentration au fil de l'eau)... Si l'on regarde le bilan mensuel des flux hydriques sur le bief, il met en évidence, pour l'année 1994-1995, l'effet du soutien d'étiage du barrage de Sélingué, mais surtout des gains en eau importants entre Banankoro et Koulikoro en octobre et novembre (dans une moindre mesure décembre) qui sont largement supérieurs aux apports mensuels à l'aval du barrage. Ceci se retrouve au niveau des flux mensuels. Dans un premier temps, il est évident que l'érosion chimique se poursuit sur le bassin intermédiaire de 17 000 km² en exceptant le Sankarani. Ensuite, ces forts apports hydriques, en fin de saison des pluies sont sans doute aussi liés à l'importance des eaux souterraines sur le bief qui fait tout de même 460 km, surtout pour une année de bonne hydraulité comme en 1994/95. Les concentrations dans les eaux souterraines assez importantes expliqueraient ainsi que le gain en matière dissoute est plus important que celui en eau.

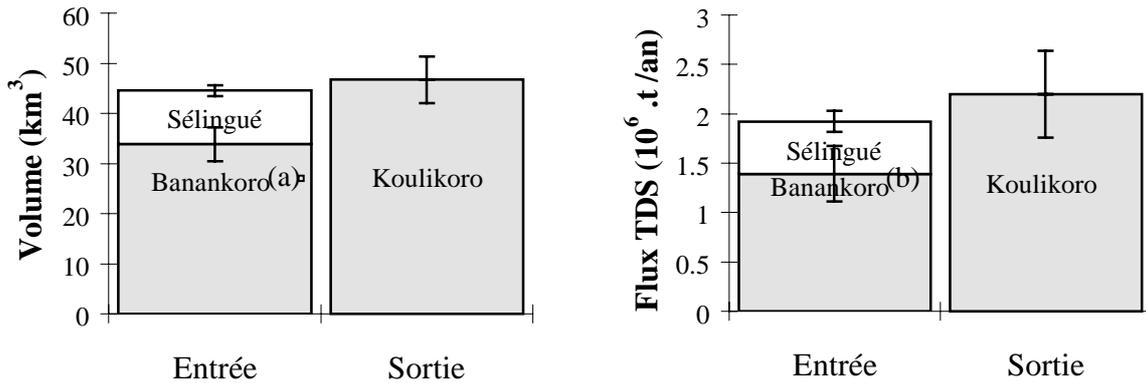


Figure 14. Evolution spatiale des flux moyens annuels (1991-1998) hydriques (a) et dissous (b).

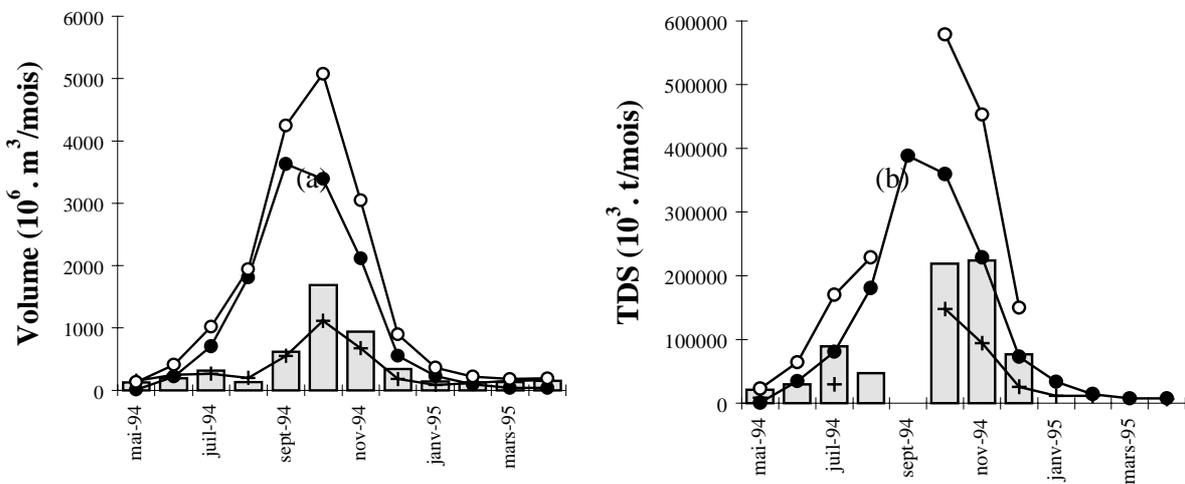


Figure 15. Evolution du bilan des flux hydriques (a) et dissous (b) sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison avec les débits du Sankarani.

Les bilans éléments par éléments (majeurs dissous et traces dans la phase totale) montrent certaines disparités. Une vue d'ensemble des flux en éléments a été réalisée à partir des rapports pour chaque élément entre les flux entrants dans le bief Banankoro-Koulikoro (à Banankoro) et sortants du bief (à Koulikoro). Si tous les rapports sont égaux alors il y a un simple effet de stockage et/ou destockage de matière, s'il y a des différences entre éléments, celles-ci peuvent s'expliquer, entre autre, par des apports supplémentaires, des phénomènes internes (précipitation...),... Ce sont donc avant tout les différences relatives entre éléments qui nous intéressent... Ces diagrammes, représentés dans la Figure 16 et la Figure 17, permettent de mettre en évidence que :

- les rapports entre flux entrants et flux sortants sur ce bief sont inférieurs à 1 (excepté pour la silice et pour une seule année). Ceci tend à dire qu'il y a pour tous les éléments un gain de matière entre les deux stations du cours principal du Niger.
- les diagrammes pour les éléments majeurs ne sont pas plats (Figure 16) : les gains entre les deux stations sont relativement plus importants en Na et Cl et dans une moindre mesure K ; et au contraire, relativement moins importants en Mg par rapport aux autres éléments. Les apports du Sankarani, de minéralisation légèrement différente, ou ceux du bassin intermédiaire dans lequel on trouve des formations lithologiques jamais encore traversées par le fleuve Niger peuvent sans doute expliquer ces changements.

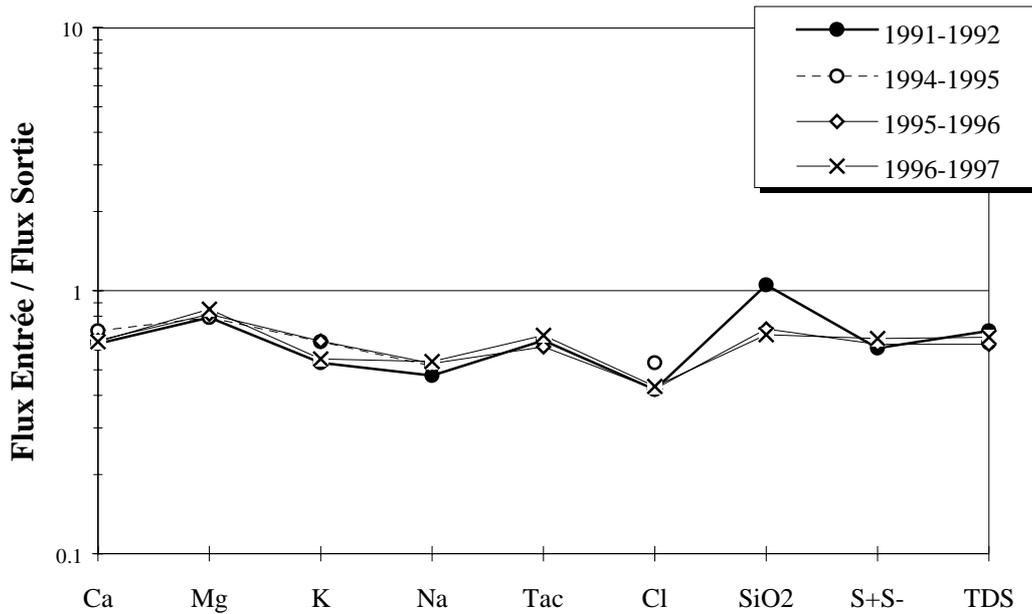


Figure 16. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le bief Banankoro-Koulikoro et l'ensemble des années d'observations.

- le diagramme pour les éléments traces totales (Figure 17) montre que les rapports entre flux entrants et flux sortants moyens annuels sur ce bief sont légèrement inférieurs à 1, mais il n'est pas tout à fait plat. Ce gain est notamment relativement plus faible en Zr ($R=1$), et au contraire relativement enrichi en Pb ($R \ll 1$). Les apports totaux de matières ont donc en première approximation la même composition chimique que celle des eaux de Banankoro. La faiblesse de Zr, élément essentiellement contenu dans les sables, à Koulikoro par rapport à Banankoro témoigne soit d'une sédimentation des sables entre ces deux stations (pertes de compétence de la rivière) soit une dilution par les apports du Sankarani faible en Zr du fait de la présence du barrage. Les apports en Pb peuvent être... soit lithologique, soit anthropique, soit atmosphérique.

Les apports du bassin intermédiaire ne sont donc pas tout à fait de même composition chimique que les eaux à la station de Banankoro tant du point de vue des éléments dissous que des matières particulières.

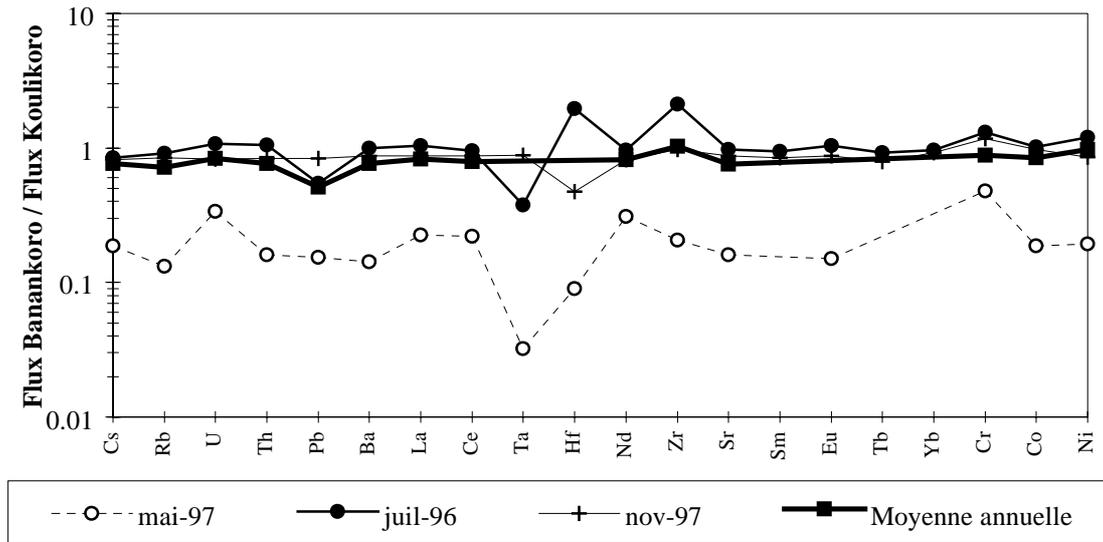


Figure 17. Diagramme des rapports de flux moyens en éléments traces totales pour le bief Banankoro-Koulikoro pour l'année 1996-1997. Quelques flux saisonniers sont reportés.

Comme pour le TDS, on a comparé les gains en eau et les gains de matières dissoutes. Comme dans le diagramme précédent, deux types d'éléments se distinguent :

- Pour Mg, contrairement aux autres éléments, les gains qui atteignent de 5 000 à 12 000 tonnes, sont plus faibles (entre 18 et 27 %) que les gains hydriques (entre 36 et 44 %). Ils sont d'autant plus importants que les gains en eau le sont aussi. Il y a donc a priori une légère dilution des eaux du Niger plus concentrées en Mg par les eaux du Sankarani dont les teneurs en Mg sont plus faibles. Ces transports en Mg restent toutefois très faibles et les différences proches de l'erreur de mesure.
- Pour tous les autres éléments, les gains annuels de matière dissoute sont plus importants que les gains hydriques. Cette différence est faible ou peu significative pour Ca, HCO₃, et SiO₂, mais devient de plus en plus importante pour K, Na et Cl. Il y a donc un apport intermédiaire a priori concentré pour ces derniers éléments.

L'augmentation des flux en K de la station de Banankoro à celle de Koulikoro représente un gain de 50 à 88% de matière (20 000 à 28 000 tonnes par an) que les flux apportés par le Sankarani n'expliquent qu'en partie : il persiste une légère différence de 14.6% entre les flux entrants identifiés en 1994/95 (Sélingué + Banankoro) et Koulikoro mais qui reste de l'ordre de l'erreur de mesure. L'augmentation des flux en Na est encore plus importante par rapport à l'augmentation des volumes : ceux-ci représentent 35 000 à 67 000 tonnes pour Na (entre 86 et 110% de gain de matière dissoute). Pour l'année 1994/95, il reste un gain de matière de 23% pour Na non expliqué par les apports de Sélingué; ces différences commencent à être significatives. Comme pour Na, l'augmentation des flux en Cl est très importante (entre 84 à 138%) par rapport à l'augmentation des volumes et représentent 13 000 à 22 000 tonnes par an. La différence de flux, en tenant compte des apports de Sélingué, est de 36%.

Si l'on regarde les différences de flux mensuels, l'augmentation des flux de Ca sont assez synchrones avec l'augmentation des débits entre les deux stations. Les bilans pour Mg, montrent que l'augmentation des flux est très faible pour l'étale de crue et en décrue, période pendant laquelle le barrage de Sélingué à un débit déversé important (de septembre à octobre). Pour les éléments K, Na, et Cl, il peut y avoir une augmentation très importante en juillet alors que les gains de débits sont faibles (période de remplissage du barrage), puis en décrue. On peut en fait distinguer deux périodes qui sont liées au fonctionnement du barrage :

- Une première période de mai à août, où le gain hydrique entre Banankoro et Koulikoro diminue : c'est la période de remplissage du barrage et les apports du Sankarani sont de plus en plus faibles devant les apports du Niger au cours de l'avancement de la saison pluvieuse. Les gains en

éléments dissous qui sont faibles, sont alors avant tout dus à l'érosion du bassin intermédiaire (13 700 km²) où apparaissent des formations géologiques jamais encore rencontrées (exemple du Faya qui draine un petit BV sur des grès horizontaux)

- Une deuxième période, qui commence en septembre, où les débits déversés du barrage de Sélingué sont importants. Les gains en eau entre les deux stations du Niger augmentent à nouveau. Toutefois, les apports de Sélingué n'expliquent pas entièrement les différences de volume écoulé sur le bief étudié ; des apports supplémentaires, souterrains par exemple, en sont sans doute la cause. Excepté pour Mg, c'est une période où les gains de matière sont importants devant ceux en eaux.

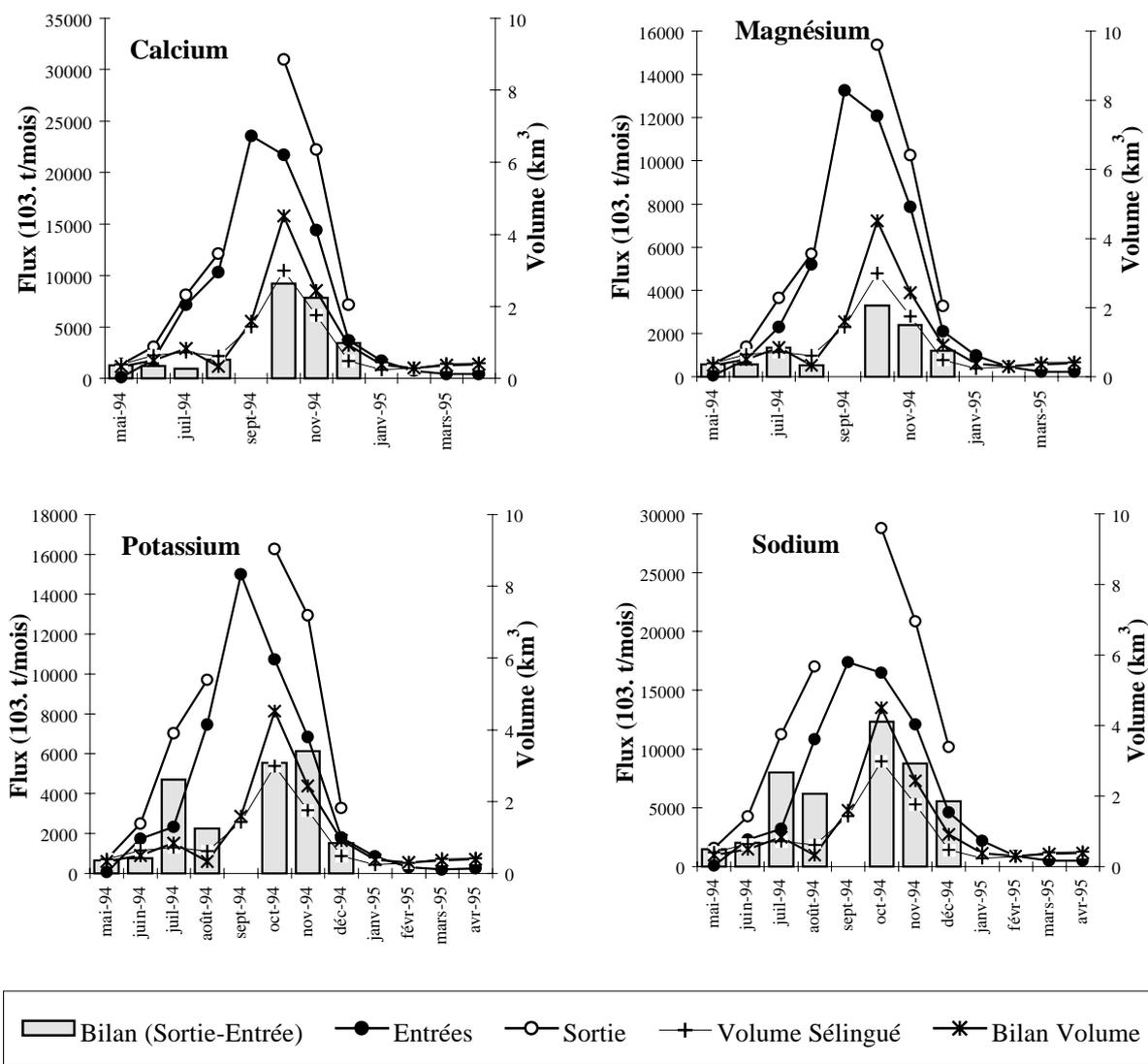


Figure 18. Evolution du bilan des flux dissous de Ca, Mg, K, Na, sur le bief Banankoro - Koulikoro au cours du temps. Comparaison entre les bilan hydrique et les volumes du Sankarani.

Le gain hydrique supplémentaire aux apports de Sélingué est très faible (la différence est de 5.5%) et est donc a priori très concentré en K, Na et Cl. Pour l'année 1994-1995, on a calculé à partir des différences de volumes et de matière dissoute, et pour les 14 000 km² de bassin versants restants, une concentration moyenne annuelle en K, Na et Cl respectivement de 5,1, 14,8 et 7,8 mg.l⁻¹. Ces concentrations sont importantes par rapport aux concentrations observées sur le fleuve. S'agit il des apports intermédiaires (apport entre la station de Sélingué et la confluence, partie assez boisée du cours du Sankarani, ou bief de 172 km ...) ou d'un apport sur le cours principal du Niger ou d'un rejet concentré de type industriel et/ou domestique sur les agglomérations de Bamako et Koulikoro ??...

C'est en effet entre ces deux stations qu'une pollution anthropique peut exister. En effet, la ville de Bamako et de Koulikoro regroupe la quasi totalité des industries du Mali et 10% de la population (essentiellement Bamako). De plus il existe périmètres irrigués et barrages sur ce bief (Sélingué, Sotuba..), et des exploitations minières en activité (sur le Fié)...

Bief Koulikoro - Ké-Macina

Ce bief est caractérisé par des pertes hydriques de 2.6 à 5 km³ sur la période étudiée (1991 à 1997), ce qui représente, par rapport au volume écoulé à Koulikoro, des pertes de 10 à 13 %. Le bilan des flux de matière dissoute (TDS) entre Koulikoro et Ké-Macina montre que les pertes de TDS suivent ces pertes hydriques de manière linéaire. Les pertes allant de 55 000 à 298 000 tonnes par an, représentent de 6 à 14% des flux à Koulikoro et sont donc peu significative devant l'erreur sur les flux. Elles se produisent principalement lors des fortes pertes hydriques en septembre octobre... Les pertes en eau par évaporation, et/ou par prélèvement (voir chapitre X) s'accompagnent d'une augmentation des concentrations moyennes annuelles entre les deux stations du bief. On peut penser que les eaux à Ké-Macina sont donc a priori concentrées par évaporation.

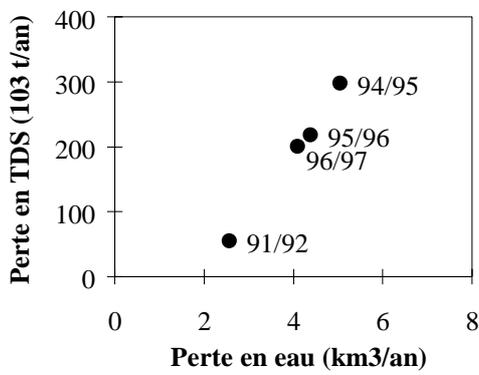


Figure 19. Relation entre les pertes en eau et les pertes en matière dissoute sur le bief Koulikoro - Ké-Macina...

Comme pour le bief précédent, la normalisation des flux de Ké-Macina sur les flux de Koulikoro permet d'avoir une vue d'ensemble des flux en éléments majeurs et traces. La Figure 21 et la représentent ces diagrammes et mettent en relief que :

- les rapports entre flux entrants et flux sortants sur ce bief sont supérieurs à 1 (excepté pour la silice en 1991/92). Il y a donc, pour tous les éléments et comme pour le TDS, pertes de matière dissoute entre les deux stations de Koulikoro et Ké-Macina sur le Niger.
- le diagramme pour les éléments majeurs n'est pas tout à fait plat. Les rapports sont assez variables et en fait peu significatifs (différence < 20%) excepté pour Cl. Effectivement, les pertes en Cl et dans une moindre mesure en Na sont plus importantes par rapport aux autres éléments. Le rapport entre les flux de Cl varie de 1,51 pour l'année 1996/97 à 3.56 pour l'année 1991/92. Cette dernière montre des rapports également très élevés en K et inversement très faible (<1) en SiO₂.
- Le diagramme pour les éléments traces (phase totale) est plus variable que sur le bief précédent et assez proche de 1. Il y a, suivant les éléments, des gains ($R < 1$) ou de pertes ($R > 1$) de matière. Ceci est à mettre en relation avec l'affinité des éléments soit pour la phase dissoute, soit pour la phase particulaire (chapitre V). Effectivement, sur ce bief, on observe des pertes pour le TDS mais des gains en MES et les bilans peuvent donc différer suivant la distribution de l'élément : il y a donc plutôt des pertes pour les éléments connus comme solubles tels que Sr, dans une moindre mesure Rb et Ba qui suivent le comportement des éléments dissous (on trouve également Ta). Si l'on ne tient pas compte de ces éléments, ni de Hf qui montre un gain important par rapport aux autres éléments, le diagramme est plat. Il n'y a donc pas de changement important dans les flux totaux... On peut signaler que Yb et Cr sont légèrement enrichis par rapport à leurs voisins, ce qui signifie que les flux à Ké-Macina sont relativement appauvris en ces éléments... On observe des différences suivant la période de l'année....

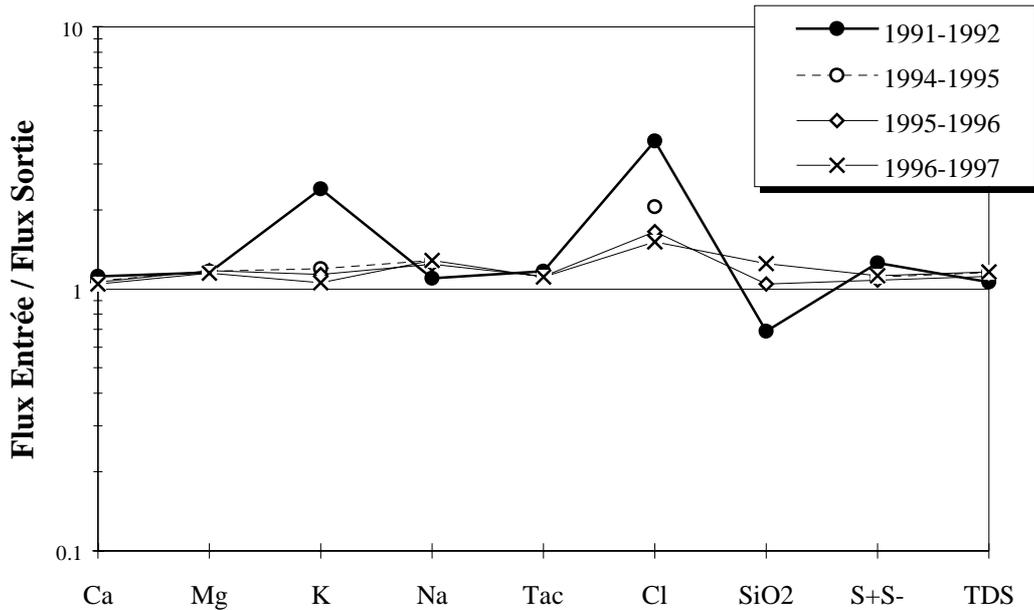


Figure 20. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous pour le bief Koulikoro- Ké-Macina et l'ensemble des années d'observations.

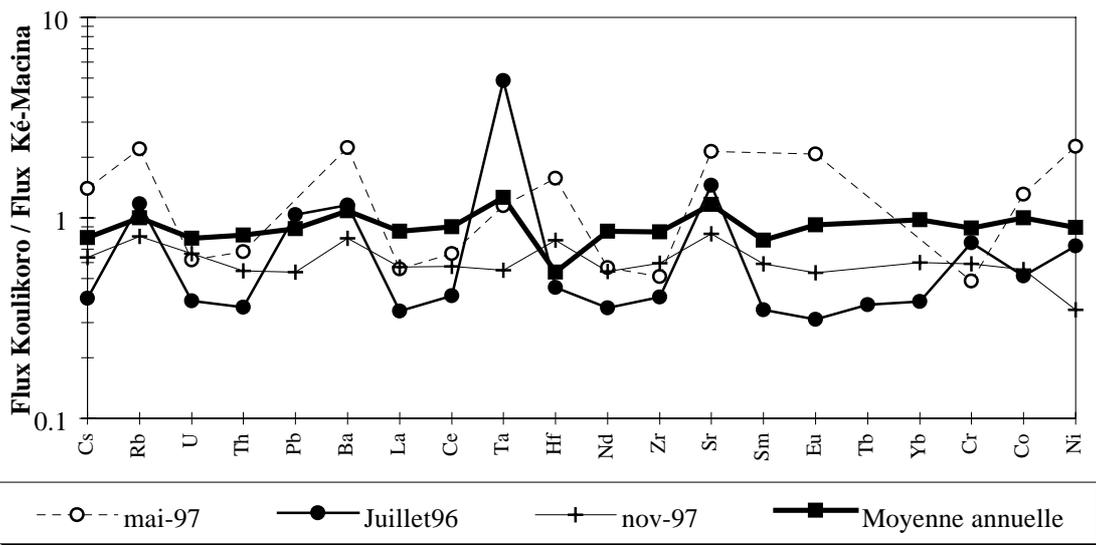


Figure 21. Diagramme des rapports de flux moyens en éléments traces totales pour le bief Koulikoro - Ké-Macina pour l'année 1996-1997. Quelques flux saisonniers sont reportés.

En fait, seul Na suit de manière linéaire, comme TDS, les pertes hydriques. Les autres éléments ont toujours au moins une année qui n'est pas dans la relation..... Les bilans annuels confirme la complexité des bilans sur ce bief. Les différences sont peu significatives et il n'y a pas de reproductibilité d'une année à l'autre....

Bilan des apports au delta intérieur du Niger

Les apports de matière dissoute au delta intérieur du Niger sont composés des flux arrivant de Ké-Macina sur le Niger et de ceux arrivant de Douna sur le Bani, soit de 1 133 000 à 2 682 000 tonnes par an suivant les années. Les apports en éléments dissous sont, comme pour les débits, plus importants sur le Niger que sur le Bani. Le rapport varie de 2.4 à 4.9 et est proportionnel au rapport entre les flux hydriques : **les apports du Bani représentent seulement de 15 à 28 % des entrées au DIN.**

Comme sur les deux biefs du Niger, la normalisation des flux d'une station sur une autre permet de mettre en évidence les différences de proportion relative entre éléments. La Figure 20 représente le rapport flux Ké-Macina/Flux Douna pour les éléments majeurs et le TDS. Toutefois, on peut remarquer que K et dans une moindre mesure Mg sont, de manière relative, plus importants sur le Bani que sur le Niger ; inversement, la part des flux de silice est plus importante sur le Niger.

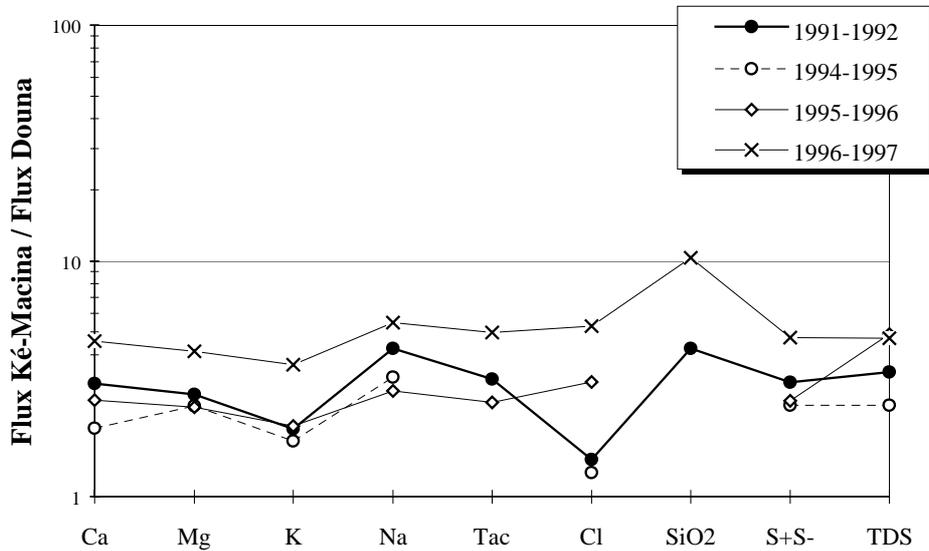


Figure 22. Diagramme des rapports de flux en éléments majeurs dissous entre les stations de Ké-Macina sur le Niger et de Douna sur le Bani.

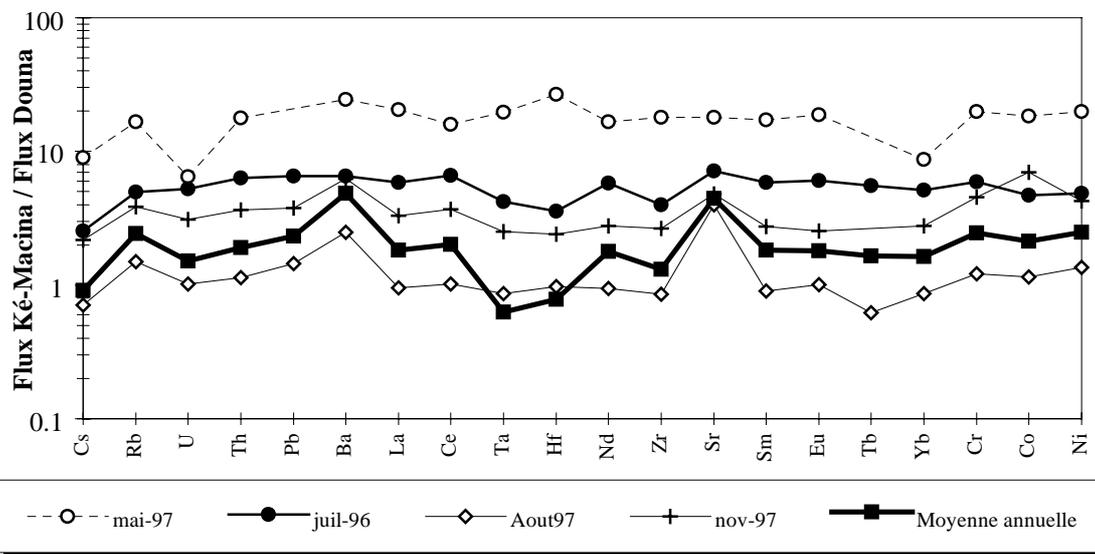


Figure 23. Diagramme des rapports de flux moyens en éléments traces totaux entre les stations de Ké-Macina sur le Niger et de Douna sur le Bani.

La comparaison des apports de matière totale à Ké-Macina sur le Niger et à Douna sur le Bani permet de mettre en évidence :

- un diagramme avec des rapports entre les deux stations supérieurs de 1. On a déjà vu qu'en effet les apports hydriques, de matière dissoute (élément dissous) et particulaire (MES) du Niger étaient très grands devant ceux du Bani.
- un diagramme très variable. Cs, Ta et Hf sont par exemple des éléments qui sont proportionnellement plus importants à Douna qu'à Ké-Macina. Dans une moindre mesure, on trouve aussi U et Zr. Au contraire, les éléments connus comme solubles Ba, Sr e, dans une

moindre mesure, Rb sont nettement appauvris dans les eaux du Bani. Ces différences reflètent en premier lieu les très fortes concentrations en MES que l'on rencontre sur le Bani.