

ORSAY
N'D'ORDRE: 3464

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
U.F.R. SCIENTIFIQUE D'ORSAY

THESE

présentée
pour obtenir

le **GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES**
DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

PAR

Laurence GOURCY

FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE
DE LA CUVETTE LACUSTRE DU FLEUVE NIGER (MALI):
Bilans et suivi des flux hydriques, particulaires et dissous et
des flux de méthane

Soutenue le 19 décembre 1994 devant la commission d'examen :

MM.	Gian-Maria ZUPPI, Jean-François ARANYOSSY, Roberto GONFIANTINI, Jean-Claude OLIVRY, Françoise GASSE, Patrick SEYLER,	Président Rapporteur Rapporteur Directeur de thèse Examineur Examineur
-----	---	---

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à rendre hommage à J.-C. FONTES qui m'a accueillie dans son laboratoire, et a été le coauteur et le guide de cette recherche. Tout au long de la rédaction, son souvenir n'a jamais cessé d'être présent en ma mémoire.

J.C. OLIVRY, initiateur et responsable du projet EQUANIS, m'a accueillie au sein de l'Orstom et a été, durant trois ans, un directeur de recherche avisé.

G.M. ZUPPI a accepté avec intérêt de suivre et de diriger la phase finale de ce mémoire. Sa relecture minutieuse et ces commentaires sagaces m'ont été très précieux.

M. DIALLO, directeur du Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique du Mali a toujours soutenu et défendu le programme EQUANIS.

P. SEYLER m'a ouvert beaucoup d'horizons scientifiques. Je le remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'avoir corrigé quelques chapitres de ce mémoire.

J.F. ARANYOSSY a accepté de juger ce travail en tant que rapporteur. Il a également pu me faire profiter de ces connaissances des techniques isotopiques et du terrain qu'il connaît bien.

R. GONFIANTINI a bien voulu corriger le mémoire et participer à cette commission d'examen.

F.GASSE m'a consacré de son temps et participe à l'évaluation de ce travail.

Je n'oublierais pas J. SIRCOULON qui a été mon directeur de D.E.A. et m'a permis de découvrir l'ORSTOM.

Durant deux ans, j'ai travaillé au centre ORSTOM de Bamako (MALI) où j'ai trouvé une ambiance chaleureuse et accueillante. Je remercie toutes les personnes du laboratoire d'hydrologie qui ont participé aux campagnes de prélèvements, aux mesures, aux calculs, et à la recherche d'informations ; MM Fatogoma Bamba, Jean-Pierre Bricquet, Mamadou Diarra, Arber Dicko, Frédéric Godeau, Thierry Henry Des Tureaux, Kayes Koumare, Mahamane Toure.

Des chercheurs de disciplines diverses et installés depuis quelque temps au Mali m'ont permis de découvrir plus rapidement ce pays et m'ont aidé à me faire une idée du mode de vie des populations de la cuvette lacustre du fleuve Niger. Je pense tout particulièrement à **Jean-Jacques Troubat** dont les connaissances du terrain m'ont été très précieuses et **Yveline Poncet** qui m'a fait profiter de sa capacité de synthèse.

En France, j'ai été accueillie à l'ORSTOM-BONDY par F. SONDAG qui m'a facilité l'intégration au sein du laboratoire des formations superficielles et m'a permis de travailler dans d'excellentes conditions. C'est dans son laboratoire que les mesures chimiques de l'eau ont été faites avec sérieux et compétence par **Thi Dieu Nguyen Tan Loi**.

Mme DELAUNE, M. GADEL, M. OLLIVIER, M. SERVE ont réalisé, dans leurs laboratoires respectifs les diverses analyses.

A. FILLY et S. NOEL m'ont initiée aux techniques de mesures isotopiques au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique d'Orsay.

Je voudrais remercier les personnes qui ont relu et corrigé ce mémoire ; G. MAHE et F. LE CORNEC.

A toutes les personnes que j'ai rencontrées, avec qui j'ai discuté, partagé le quotidien, je voudrais rendre hommage car, partout, la bonne humeur et la gentillesse m'ont accompagné. Je tiens à les citer tous, au risque d'en oublier quelques uns : **Pierre Le Hong, Isabelle Haller, Eric Bolley, Moussa et Bengali Diallo, Clémence, Sally, l'ensemble du personnel de l'Orstom à Bamako, Gérard Bellier, Jacques Berthaux, Fabienne Charpentier, Stéphane Foucher, Patricia Garnier, Isabelle Giffard, Alice Gilfrich, Huguette Guénin, Claudia Hidalgo, Jean Larvy Delarivière, Asta Lefur, Ginette Millot, Danièle Raillot, Stefan Reti, Monique Richard, Marie-Louise Richard, Jean-Pierre Rossi, Patrick Zante.**

A toute ma famille qui m'a toujours soutenue et ce depuis de très longues années.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le fleuve Niger a la particularité d'apporter au Sahel de grandes quantités d'eau qui permettent la survie de ces régions climatiquement défavorisées.

Dans un contexte actuel pluviométriquement déficitaire, la qualité et la quantité des ressources hydriques aux régions semi-désertiques de la zone sahélienne sont des points sensibles qu'il convient d'étudier.

L'étude entreprise s'intègre au programme EQUANIS, Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel, mené depuis 1990 par l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) et le CNRST (Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique-Mali).

Ce programme s'articule autour de plusieurs pôles d'intérêts:

- _ l'estimation des apports solides et liquides du Niger au delta central,
- _ la modélisation du bilan hydrique dans le delta intérieur du Niger à partir du calcul des pertes en eau et de l'évolution des concentrations de la matière dissoute dans le but d'établir une relation surface inondée/durée d'inondation,
- _ la surveillance du milieu et de la qualité des eaux pour déceler les altérations majeures du système.

Ce programme se rattache au projet PEGI (Programme sur l'Environnement de la Géosphère, INSU/ORSTOM) dont le centre d'intérêt est l'étude des grands bassins fluviaux tropicaux comprenant les fleuves de la république du Cameroun, du Congo, de la République Centrafricaine, de la République du Mali, du Brésil et de la Bolivie.

Les études antérieures faites sur le bassin amont et central du fleuve Niger se sont surtout consacrées à la quantification des volumes d'eau traversant cette partie du Sahel. L'installation du réseau hydrologique malien est ancienne et un suivi régulier a permis la collecte de longues chroniques de hauteurs d'eau. Le travail des différents services de l'hydraulique, des ingénieurs et techniciens de l'ORSTOM (Lamagat et Molinier, 1983) a permis l'élaboration de plusieurs monographies du fleuve Niger dont la plus récente date de 1986 (Brunet-Moret et al, 1986). L'établissement d'un modèle mathématique de propagation du fleuve Niger a nécessité l'installation de stations hydrologiques et climatiques de surveillance ainsi que le traitement de nombreuses photos aériennes (Autorité du bassin du Niger, 1982). Actuellement, un traitement d'images satellitaires est fait par le laboratoire IMAGEO-CNRS.

Au cours des années 1980, les recherches se sont portées sur les petits bassins versants et les aquifères fissurés, dans le but essentiellement de répondre à la demande en

eau de la population et de veiller à la qualité et au renouvellement des richesses (Aranyossy et al, 1989, Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali, 1990).

L'aspect géographique, géomorphologique, fonctionnement général de la cuvette a été souligné par Gallais (1967) dont la thèse reste une référence pour les chercheurs de divers horizons.

Les premières mesures de qualité chimique du fleuve ont été faites par Grove (1972) au cours de la mission « Overcraft » qui a descendu le Niger de Koulikoro (Mali) à Lokoja (Nigeria) en 1969-1970.

Une étude complète sur la pêche dans le delta central, regroupant des disciplines aussi diverses que l'halieutique, l'ethnographie, l'économie, la démographie, la géographie, entreprise par l'ORSTOM et l'IER (Institut d'Economie Rurale, Mali) s'est achevée en 1994 (La pêche dans le Delta Central du Niger, 1994).

L'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau du fleuve, des bilans d'eau et flux de matières n'a donc pas été développée dans cette région. Par contre, des milieux similaires (« delta intérieur ») comme le Sudd sur le haut bassin du Nil (Soudan) ou le delta de l'Okavango (Botswana) ont été mieux étudiés du point de vue des bilans d'eau et de matières (Dinçer et al, 1981, McCarthy et Metcalfe, 1990, McCarthy, 1993, McCarthy et al, 1993, Sutcliffe et Parks, 1989).

L'ORSTOM a aussi réalisé sur les zones d'inondation du Chari et du Logone (Les Yaérés) et le lac Tchad des études complètes sur l'hydrophysicochimie de ces hydrosystèmes assez voisins de la cuvette lacustre du Niger (Carré, 1972, Carmouze, 1976, Maglione, 1976, Gac, 1980, Roche, 1980)

Le delta central du fleuve Niger, vaste cuvette inondée, est un site stratégique où l'évaporation intense entraîne une reprise importante des volumes d'eau écoulés. Le delta central est, pour les riverains, un atout économique basé sur l'utilisation des plaines humides. Les activités principales sont la pêche et l'agriculture. Le réseau hydrographique sert de voie de communication pour le commerce des produits.

La région du delta central est donc sensible et dépendante des superficies inondées liées à la hauteur de la crue annuelle.

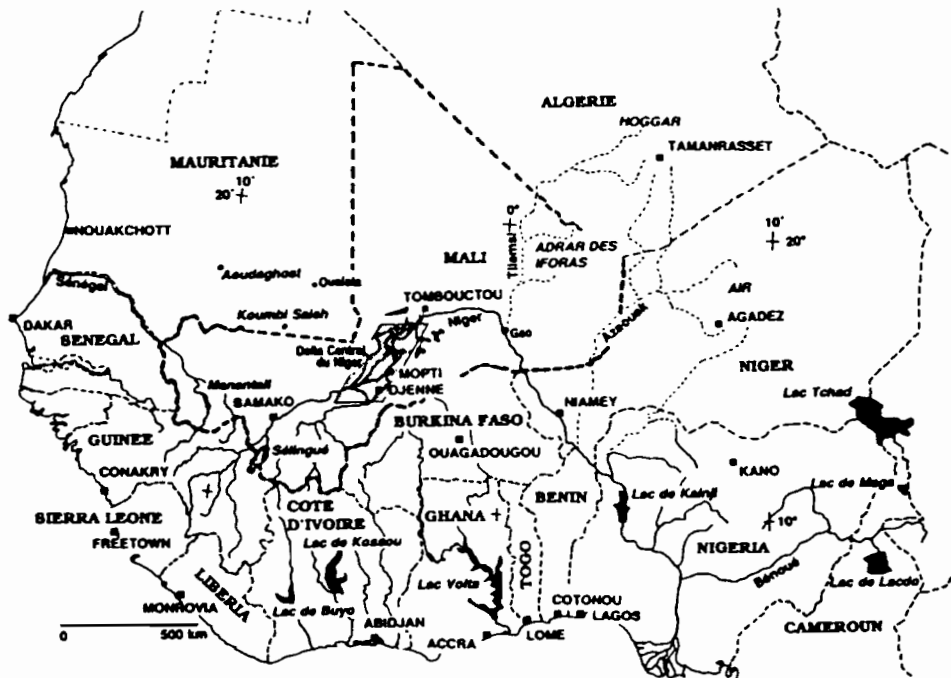
L'analyse et le suivi des paramètres physico-chimiques comme les chroniques hydroclimatiques, les isotopes stables de l'eau, les éléments majeurs dissous, les matières en suspension et les diverses formes du carbone, permettent de définir le fonctionnement hydrogéochimique de cet environnement particulier.

Le projet initial avait pour but de définir un modèle d'estimation des surfaces inondées à partir d'informations climatiques comme le taux d'évaporation et d'évapotranspiration, et de données hydrologiques comme les pertes en eaux dans la cuvette. Il s'est vite avéré que le fonctionnement des plaines inondées était complexe et mal défini. L'établissement d'un

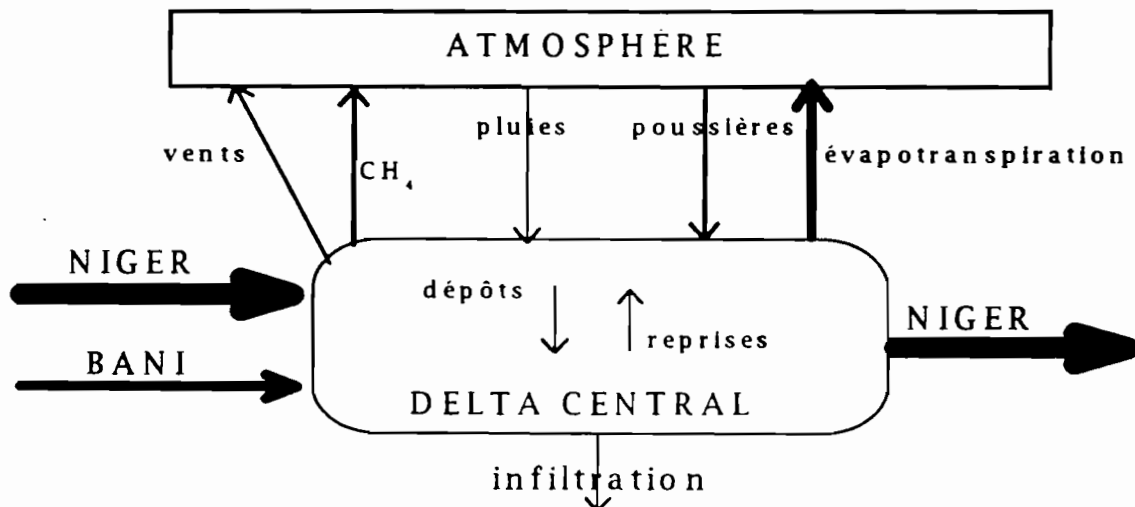
modèle s'est donc couplé d'autres analyses pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrobiogéodynamique de la cuvette lacustre.

L'étude prend en compte trois parties distinctes le long du fleuve: le bassin amont du Niger à Banankoro et du Bani à Douna, le delta en amont du lac Debo et le delta au nord du lac.

La variation des caractéristiques se font spatialement des entrées du delta aux sorties et temporellement en suivant le cycle hydrologique de crue annuelle unique.



L'évolution spatio-temporelle des paramètres étudiés fait intervenir la lithosphère, la biosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère. Un schéma des apports et pertes en eau, moteur et véhicule des échanges de matières, et des principaux agents affectant le fonctionnement de la cuvette est présenté ci-dessous.



Une introduction sur la situation géographique, géologique, la définition des bassins amont et aval, la détermination de la géomorphologie de la cuvette, de sa végétation et de la complexité du réseau hydrographique est indispensable à la compréhension du fonctionnement de ce milieu.

Les vastes étendues, la difficulté d'accès à certaines zones, la nécessité d'un suivi régulier de la qualité des eaux ont rendu nécessaire la recherche de méthodes de prélèvements fiables et économiques. L'accent a été mis sur l'étude des matières en suspension (MeS) dont la concentration dans les eaux fluctue rapidement dans le temps et l'espace.

Les études hydrologiques ont été utilisées pour résoudre le problème de l'estimation des surfaces inondées en fonction des hauteurs d'eau enregistrées à l'entrée du delta. Le bilan est établi à partir des entrées dans le delta : écoulements du Niger et du Bani et précipitations. Les sorties sont composées de l'écoulement du Niger à l'exutoire de la cuvette, des infiltrations et de l'évapotranspiration. Pour chacun de ces éléments du bilan, les couples $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ peuvent être définis. Les rapports isotopiques sont caractéristiques de l'origine de l'eau et de son fonctionnement dans la cuvette.

L'appréhension du bilan global, rapport entre les tonnages de matières importées et exportées, passe par un suivi hebdomadaire des paramètres physico-chimiques de l'eau.

La matière en suspension est transportée par le fleuve. Elle provient de l'érosion des bassins versants amont. L'eau de pluie arrache aux sols des particules minérales et organiques que le ruissellement de surface conduit vers les cours d'eau. La force érosive du fleuve permet, au travers du delta, un enrichissement de l'eau en matières par reprise des bancs de sable, lits et berges. Les poussières atmosphériques amènent au delta des quantités non négligeables de particules minérales.

Tout au long de son parcours, et principalement dans les régions où l'étalement des eaux est maximal, les dépôts de matières particulaires minérales sont évidents, accentués par la filtration des argiles par la végétation. Les particules restent piégées dans la cuvette, colmatent les bas-fonds ou repartent, soulevées par les vents, dans l'atmosphère.

A la sortie du delta, le transport particulaire est composé des matières en suspension et en saltation au fond du lit, il est enrichi par les reprises de dépôts antérieurs et du fond du lit, des minéraux néoformés ainsi que de particules d'origine végétale ou organique ; il est appauvri par des phénomènes de sédimentation.

Les éléments dissous sont systématiquement associés au cycle de l'eau. Les pluies, de faibles concentrations, tombent sur le bassin, ruissellent et prennent alors le cachet chimique des roches et sols du bassin versant par dissolution des minéraux. Les premières

pluies saturent l'horizon de surface et permettent, par effet de chasse (ou effet piston), de pousser vers le fleuve les eaux plus anciennes des nappes et de la zone non saturée. Ces eaux, restées longtemps au contact des roches sont plus concentrées que les eaux de ruissellement direct. Le Niger et le Bani transportent de l'eau provenant de trois composantes principales : le ruissellement superficiel du bassin versant, l'écoulement retardé, l'apport des nappes.

Durant son parcours, le fleuve s'enrichit en cations et anions par dissolution des MeS, érosion des berges et fond de lit. Les apports atmosphériques sont peu importants sur le delta mais enrichis par la dissolution des lithométéores. D'un autre côté, l'étalement de la crue, le remplissage des mares, puis leur isolement vont entraîner une surconcentration des eaux. L'évapotranspiration et le dégagement de CO_2 amènent alors l'eau à saturation vis à vis de certains minéraux qui précipitent. Ces sels sont emportés par le fleuve ou le vent sous forme de matières en suspension puis sont, en partie, redissous. De l'eau des plaines inondées s'infiltré et participe à l'enrichissement chimique des eaux de la nappe.

Les micro-organismes planctoniques, coquillages et macrophytes utilisent les sels minéraux dissous pour leur développement. A la mort de ces organismes, une fraction des éléments absorbés repart sous forme particulaire et dissoute. A la sortie du delta, les anions transportés se retrouvent sous forme dissoute ou particulaire. Une part reste piégée dans les végétaux, nappes ou sous formes de particules solides dans les régions périphériques ou dans les mares déconnectées du réseau hydrographique principal.

Le milieu végétal prend une importance considérable dans les zones humides où la plupart des terres et des mares sont envahies par des plantes aquatiques. Le cycle du carbone organique et particulaire est profondément perturbé dans le delta par l'intensité des échanges, notamment le rejet de CO_2 et CH_4 dans l'atmosphère. Le CO_2 atmosphérique est absorbé par les végétaux pour synthétiser la matière organique. La décomposition des graminées, arbustes crée un horizon de sol riche en matière organique dont 50% sont composés de carbone organique. Toutefois, le carbone organique sous forme dissoute et particulaire provient en majorité du bassin amont et suit les mêmes mouvements que les éléments inorganiques. La production primaire, importante dans le delta, commande les apports autochtones. Dans les sols riches en carbone organique, ce sont les bactéries qui jouent un rôle essentiel en transformant le carbone en gaz, CO , CO_2 et CH_4 . Ce dernier point sera plus précisément développé en raison de l'intensité des dégagements de méthane, gaz à effet de serre important. L'étendue actuelle et passée des superficies inondées joue sur le dégagement de méthane et par conséquent sur le taux moyen mondial de CH_4 dans l'air et les changements globaux du climat.

Au terme de cet inventaire des nombreuses composantes du fonctionnement biohydrogéodynamique de la cuvette lacustre, il est facile de cerner les paramètres et

variables dont la mesure ou l'observation était nécessaire à la compréhension de l'hydrosystème. Cela nous a permis d'abord de retenir les caractéristiques physiographiques de la région étudiée susceptibles d'expliquer telle ou telle réponse du système aux contraintes hydroclimatiques prises au sens large. Ce sera l'objet de la première partie de ce mémoire.

Ensuite, il convenait de prévoir le protocole des mesures nécessaires au suivi des variables intervenant dans les bilans et l'évolution des flux hydriques et de matière. De plus, une validation de l'expérimentation s'imposait pour compléter le corps de cette deuxième partie. Enfin, dans une troisième partie, l'interprétation des résultats permet d'analyser avec une assez bonne précision des composantes principales du bilan et des variations saisonnières des flux hydriques et de matière. L'accent a notamment été mis - c'est un des aspects originaux de ce travail - sur les transports en suspension et les transports dissous. Il est alors possible de préciser le schéma proposé plus haut au niveau des interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère. La dynamique de ces interactions est résumé dans les deux schémas suivants.

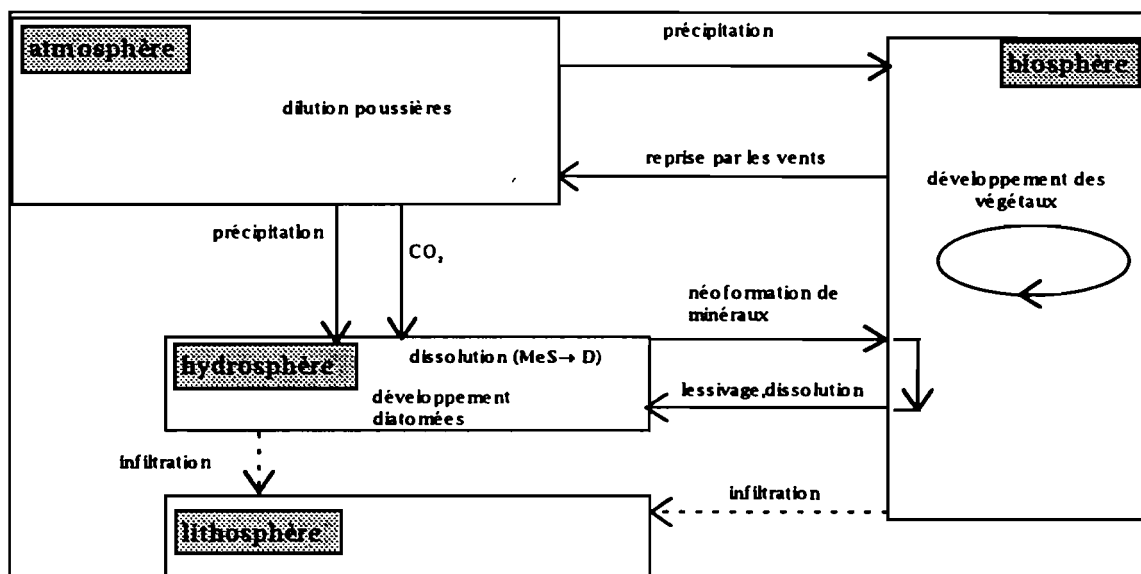


schéma des interactions possibles pour les éléments dissous

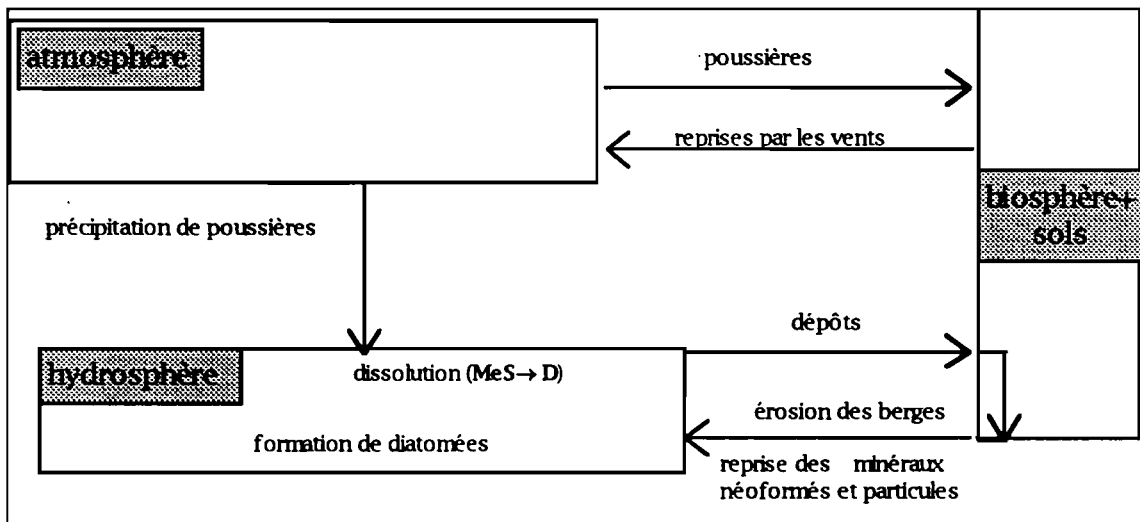


schéma des interactions possibles pour les matières particulaires

Pour terminer ce mémoire, nous avons résumé en conclusion les principaux résultats de notre contribution aux études réalisées sur le fleuve Niger et souligné, en termes de perspectives, les orientations qui nous paraissent importantes pour la poursuite des recherches du programme EQUANIS.

1ère partie

CARACTERISTIQUES DU DELTA CENTRAL DU
FLEUVE NIGER



1. CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.1 GEOGRAPHIE

Le Mali s'étend sur 1240000 km² entre 10-24°N et 12°W-4°E. Le pays, entièrement continental, a des frontières communes avec la Mauritanie, l'Algérie, le Niger, le Burkina-Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée et le Sénégal (figure 1.1.1 et 1.1.2).

Bamako, sa capitale, avec presque un million d'habitants abrite 1/10^{ème} de la population totale.

Sa vaste superficie permet une grande diversité de paysages, des grandes dunes des ergs du Sahara au nord vers les savanes et forêts claires de la région de Sikasso, au sud.

Les grès du Précambrien et du Paléozoïque, qui ont subi des mouvements épirogénétiques jusqu'au Quaternaire, constituent les régions "montagneuses" du plateau Manding (600-800 m d'altitude), des falaises de Bandiagara au pays Dogon (800 m). Dans le prolongement du plateau Dogon, on trouve la Gandamia dont les sommets atteignent 1080 m.

Plus à l'est, les buttes du Hombori dominant la boucle du Niger à une altitude de 1155 m. L'Adrar des Ifoghas s'élève à 890 m près de la frontière Algérienne. Les cuirasses ferrugineuses se retrouvent souvent en contrebas des reliefs à cuirasse bauxitique.

Deux grands fleuves traversent le pays. Le Sénégal prend naissance dans les plateaux du Fouta Djallon, retrouve, en amont de Kayes, plusieurs rivières temporaires et s'échappe ensuite vers le Sénégal. Le Niger coupe le pays selon une direction W-E de Banankoro à Labbezanga.

Au coeur du pays, le fleuve Niger s'étale sur une immense plaine alluviale comblée par différents dépôts quaternaires, la cuvette lacustre.



Fig.1.1.1 : Situation géographique du Mali



Fig.1.1.2 : Carte géographique du Mali

1.2 GEOLOGIE

1.2.1 HISTOIRE GEODYNAMIQUE

Le Mali s'inscrit presque entièrement dans un vaste ensemble géologique composé du craton Ouest Africain et de sa couverture.

Les 2/3 du pays sont représentés par des formations sédimentaires déposées dans la vaste synclise¹ de Taoudenni².

Le craton Ouest-Africain a été façonné au cours de deux cycles géologiques :

Le cycle Libérien (-3000-2000 Ma) et le cycle Birrimien (-2500-1800 Ma).

Une phase d'érosion et de pénéplanation a suivi l'orogénèse Eburnéenne (-1700 Ma). La phase de sédimentation qui s'installa alors se poursuivit jusqu'au Carbonifère (Bertrand, 1976).

L'orogénèse panafricaine (-690-620 Ma) remanie les bordures du craton et leur couverture.

Une première glaciation amène la formation d'un Inlandsis sur l'aire continentale.

Une seconde glaciation se produit vers -450 Ma.

Une phase de distension affecte l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest du Permien au Jurassique. Cette période prélude à la fragmentation de la Pangée par l'ouverture de l'Atlantique Central (-270 Ma).

Au Crétacé inférieur, il y a une subsidence active de la zone de suture panafricaine par son rejeu en extension. Ce jeu serait lié à l'affrontement de l'Afrique et de l'Europe à la fin de l'Aptien (-120 Ma) et à l'ouverture de l'Atlantique Equatorial au Barrémo-Albien.

Le Crétacé supérieur est marqué par plusieurs invasions marines. Une subsidence active est engendrée par les rejeux en distension de la suture panafricaine, liés à l'affrontement des plaques africaines et européennes du Nord. Des épisodes volcaniques fini-Santonien (-84 Ma) découleraient du changement de pôle de rotation de la plaque Africaine.

L'extension de la transgression marine est maximale au Paléocène supérieur (-60 Ma).

Un épisode tectonique intra-Eocène est responsable des rejeux d'accidents anciens. Cet épisode est responsable du retrait définitif de la mer des régions internes (-50 Ma).

¹ : vaste portion de plate-forme de plusieurs centaines ou milliers de km² dont le socle, affaissé à grande profondeur, est recouvert par des sédiments épais et continus (dictionnaire de géologie, 1988)

² : autres orthographes possibles: Taoudenit, Taoudéni

A partir du Miocène principalement, l'Afrique de l'Ouest est soumise à une évolution continentale avec rejeux tectoniques favorisant les venues volcaniques (Bellion et al, 1983, Bellion, 1989).

Le Quaternaire a été marqué par de profonds changements de climat qui ont eu pour conséquence la latéritisation, la silicification et la formation de sebkhas. Les latérites et cuirasses ferrugineuses se sont surtout développées sur les plateaux. Des mouvements tectoniques ont affecté le Quaternaire récent dans la région du lac Faguibine (Tihama El Abbass et al, 1993).

1.2.2 STRATIGRAPHIE

1.2.2.1 Les formations du socle Précambrien inférieur

Au Mali, le massif de l'Adrar des Ifoghas représente les roches granitiques et métamorphiques du Précambrien inférieur et moyen (Tricart, 1959, figure 1.2.1).

Les formations granitoïdes affleurent dans la région frontalière avec le Sénégal et au sud du pays dans les monts formés par l'extrémité nord de la dorsale de Man. C'est sur ce bouclier Eburnéen formé par un complexe gneissique et granitoïde, des séries gneissiques, des séries volcano-sédimentaires ou molassiques que prennent naissance la quasi-totalité des eaux des fleuves Niger et Bani.

1.2.2.2 Les formations sédimentaires du Précambrien supérieur et du Paléozoïque

Le Précambrien supérieur occupe une grande partie de l'ouest du pays. Le fleuve Niger le traverse entre Bamako et l'entrée du delta.

Ces formations sont des séries gréseuses monotones et sub-horizontales. Une partie de ces grès forment les monts Mandings. La base de la stratigraphie est composée de niveaux conglomératiques, suivis par les grès de Sikasso, les grès de Sotuba, les grès de Bobo-Dioulasso (avec bancs de calcaires) et les schistes de Toun (Choubert et Faure-Muret, 1971).

Dans la boucle du Niger, ces formations du Cambro-Ordovicien ont une puissance de 3000 à 4000 mètres (figure 1.2.2). Les formations Paléozoïques, constituées de pélites à passées de calcaire se retrouvent plus au nord, entre Nara et la frontière de Mauritanie. Les intrusions de dolérites sont nombreuses du Permien au Jurassique notamment dans l'ouest du bassin. Au nord, le Paléozoïque comporte des grès et schistes du Cambro-Silurien, des schistes calcaires et bitumineux du Dévonien, les grès et calcaires du Carbonifère.

1.2.2.3 Les séries sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque

On distingue quatre grands complexes : le Continental Intercalaire, divisé en deux sous-ensembles, une série laguno-marine et le Continental Terminal (Bellion, 1989).

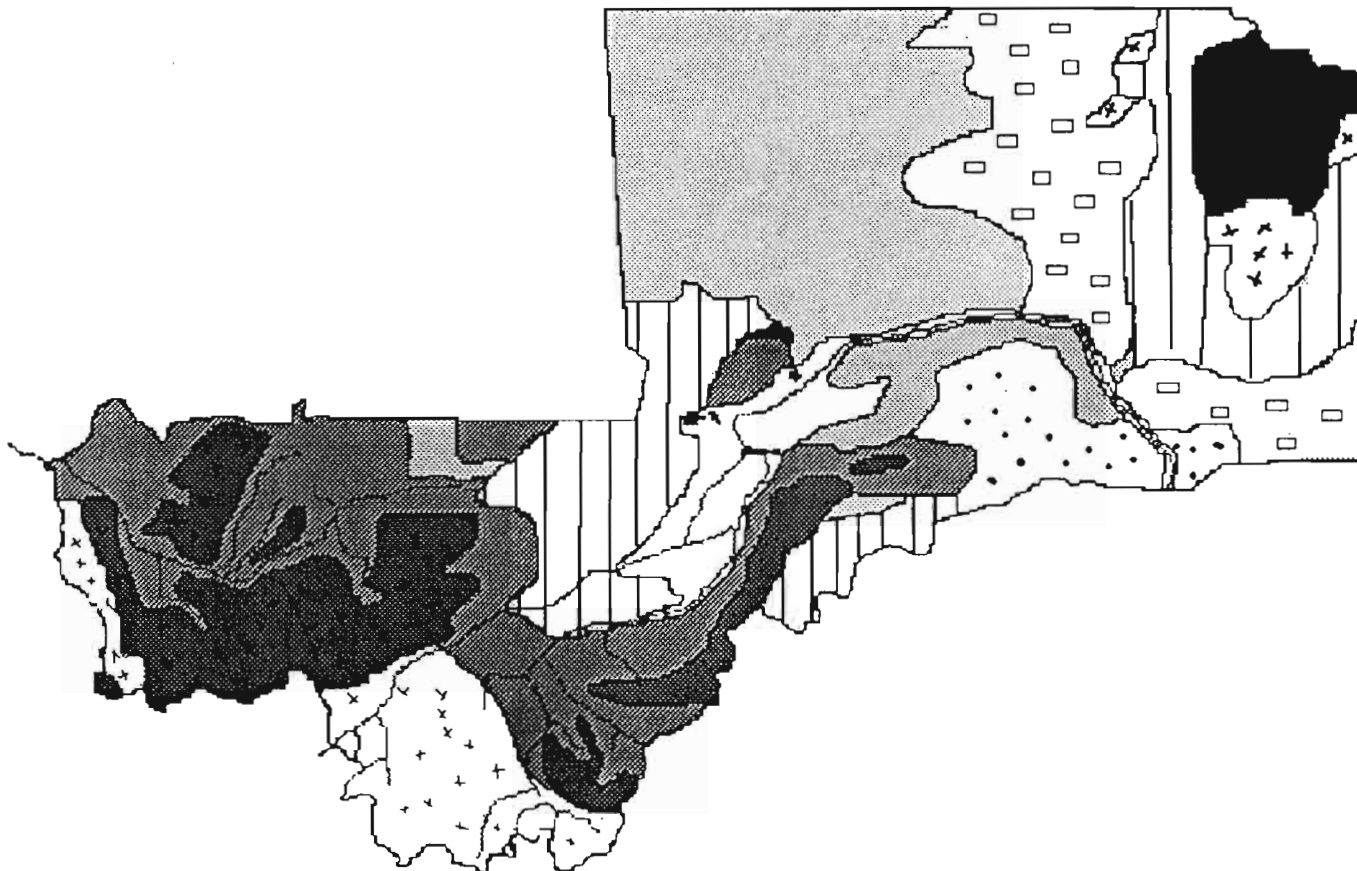
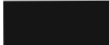

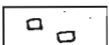

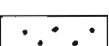
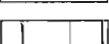





Fig.1.2.1 : Carte schématique des formations géologiques du Mali (d'après Atlas, Jeune Afrique, 1981)

-  Massif de roches granitiques du socle Précambrien inférieur et moyen
-  Plateaux de grès dur du Précambrien sup. et Paléozoïque
-  Plateaux de grès du Secondaire et Tertiaire
-  Collines du socle Précambrien
-  Plaines et reliefs Appalachiens
-  Plaines dans les grès du Secondaire et Tertiaire
-  Plaines du Précambrien sup. et Paléozoïque
-  Plaines d'alluvion du Quaternaire
-  Ensembles dunaires

le Continental Intercalaire

Cette formation débute par des conglomérats d'âge Permo-Triasique surmontés par une série d'alternance de sables, de grès, d'argiles rouges et vertes dans lesquelles s'intercalent la partie supérieure des bancs de calcaire granuleux. Cette formation peut atteindre de 500 à 600 m et s'étage du Jurassique jusqu'au Crétacé inférieur.

la série laguno-marine

Ces dépôts d'âge Crétacé supérieur à Eocène moyen sont en discordance sur les précédents. On retrouve une alternance de grès, silts, argiles dans lesquels s'intercalent quelques bancs calcaires, des niveaux gypseux, oolithiques, glauconieux ou phosphatés.

le Continental Terminal

Tous les dépôts antérieurs sont recouverts par un conglomérat formé de galets et de graviers de quartz déposés au Mio-Pliocène. L'épaisseur varie de quelques dizaines de mètres à plus de 1000 m.

1.2.2.4 Le Quaternaire

Les dépôts alluviaux, lacustres et palustres se sont développés lors des phases humides alors que les périodes arides ont entraîné la formation des dépôts éoliens.

L'évolution de la boucle du Niger a été marquée par:

- > une période d'épandage avec des écoulements fluviaux importants suivie par une période d'entaille et de cuirassement

- > deux périodes de façonnement par le ruissellement concentré le long d'axes majeurs avec accumulation des oxydes de fer (Petit-Maire et al, 1987)

- > deux périodes de cuirassement (Blanck, 1986).

Les formations éoliennes ont une grande importance au nord du lac Debo. La formation de dunes allongées dans le sens est-ouest s'est surimposée aux formations deltaïques actuelles, entraînant le blocage de l'écoulement vers l'aval. Trois émissaires ont franchi ce cordon dunaire appelé Erg de Niafunke³ et permettent une inondation des dépressions interdunaires (Blanck, 1993).

1.2.2.5 Récapitulatif de la géologie du Mali

Une grande partie du Mali présente une histoire géologique très ancienne qui a peu évolué au cours du temps. Le socle granitique pénéplané est une base pour les diverses formations gréseuses du secondaire et tertiaire. Ce sont ensuite les mouvements tectoniques et l'érosion qui ont façonné les paysages maliens peu mouvementés.

³: l'orthographe adoptée dans ce mémoire n'utilise pas les accents. Toutefois, la voyelle e doit se prononcer [e]

Le Quaternaire n'est important que dans les régions soumises aux influences fluviales comme la région de la cuvette lacustre ou éoliennes comme dans les régions désertiques du nord.

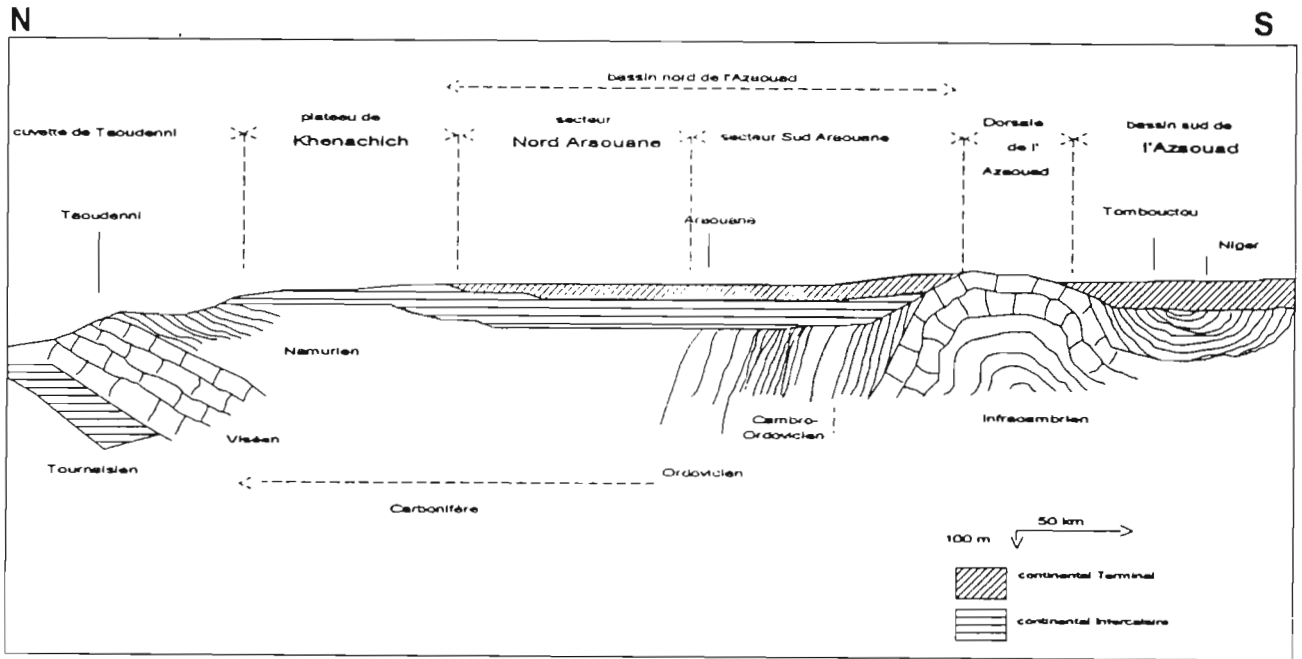


Fig.1.2.2 : Coupe géologique de la région de l'Azaouad (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990)

1.3 HYDROGEOLOGIE

1.3.1 LES AQUIFERES FISSURES

Les aquifères discontinus à perméabilité de fissure sont présent sur 48% de la superficie totale du Mali (figure 1.3.1). Ils sont associés au socle granitique ainsi qu'aux formations sédimentaires anciennes. Leurs caractéristiques hydrauliques dépendent beaucoup des formations superficielles d'altération, des conditions géomorphologiques et pluviométriques (Saad, 1970, Guerre et Aranyosy, 1990).

1.3.1.1 Les aquifères du socle

Ces aquifères se retrouvent vers l'Adrar des Ifoghas, la frontière sénégalaise et la région de Bougouni. Une grande partie des sources du Bani se situe dans cette région sud du Mali. La pluviométrie est importante et permet une recharge de l'aquifère malgré une percolation lente des eaux d'infiltration (Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990). La rivière Baoule est alimentée, en basses eaux, par le drainage des nappes du socle (Guerre et Aranyosy, 1990).

1.3.1.2 Les aquifères infracambriens

Les nappes de l'aquifère du Précambrien plissé se situent au sud-est du delta central et n'influencent pas l'hydrologie de cette zone.

Les aquifères associés aux plateaux infracambriens occupent la majeure partie de la zone climatique soudano-sahélienne. Ils sont constitués de séries gréseuses en disposition tabulaire, surmontés par un recouvrement latéritique argilo-sableux qui permet une bonne perméabilité verticale (Freyssinet, 1990).

Au nord de Bamako les grès sont prédominants avec des niveaux schisteux et intrusions doléritiques (Aranyosy et al, 1989). Les meilleurs aquifères se situent dans les quelques niveaux calcaires. Ces nappes ont un écoulement général avec un gradient moyen de 2,5‰ vers le sud-ouest en direction de la vallée du Niger. Elles sont rechargées par les précipitations (Sarrot-Reynauld et Traore, 1989).

Dans la région de San, l'écoulement de l'aquifère gréseux va en direction du Bani (Travi et Guiraud, 1982, Bahr, 1980). Ce fleuve semble également fournir d'importantes quantités d'eau à la zone superficielle d'alluvions sur une largeur de quelques dizaines de mètres (Ludwig et Wagner, 1986).

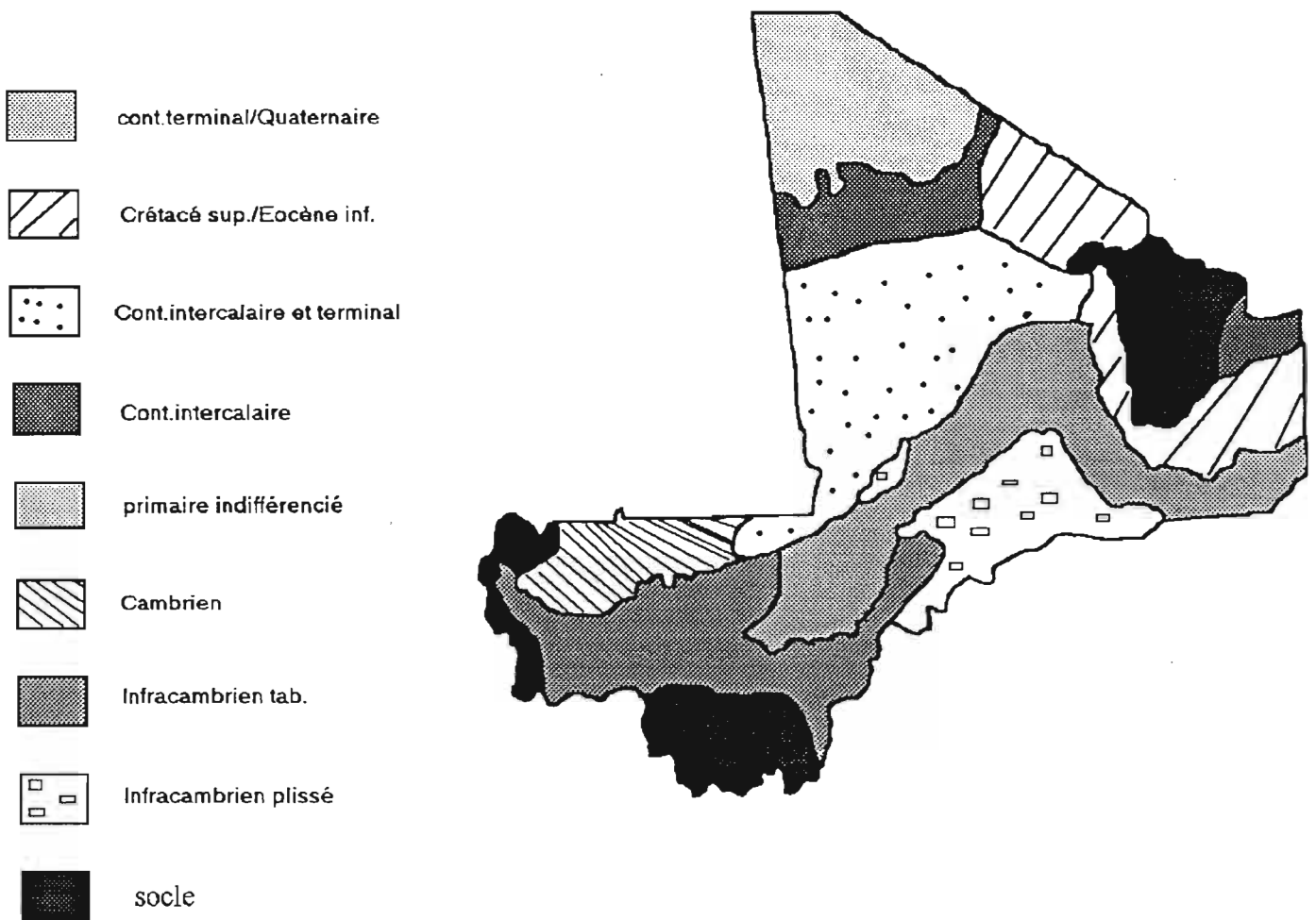


Fig.1.3.1 : Carte des secteurs hydrogéologiques du Mali (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990)

1.3.1.3 Les aquifères du Cambrien

Cet aquifère est important vers la frontière de la Mauritanie, surtout dans la région de Nara. Les intrusions de dolérites (secteur de Nara) ou les intercalations de niveaux calcaires, gréseux et de jaspé permettent la formation d'aquifères discontinus dépourvus de couverture d'altération (Aranyossy et al, 1989). Ce n'est que vers les bas-fonds et les mares que des nappes superficielles locales peuvent alimenter la nappe de fissure. Malgré une pluviométrie faible dans cette région (300 mm an⁻¹), ce mode d'alimentation joue un rôle non négligeable (Guerre et Aranyossy, 1990).

1.3.1.4 Les aquifères du Primaire

Ces aquifères de fissures discontinus se situent essentiellement au nord du pays dans la région de Taoudenni et sont peu exploités.

1.3.2 LES AQUIFERES A PERMEABILITE INTERGRANULAIRE

1.3.2.1 Les aquifères du Continental Intercalaire

Les formations du Continental Intercalaire sont bien représentées au nord du Mali dans la région de l'Azaouad. Ce sont des séquences argilo-sableuses avec des horizons gréseux. Les études isotopiques montrent qu'il n'y a pas de lien entre cette formation et les aquifères fissurés du Cambrien et Infracambrien (Guerre et Aranyossy, 1990). Le fossé de Nara et la région de l'Azaouad sont séparés par un horst qui formerait une barrière hydrogéologique empêchant les eaux infiltrées dans le delta de rejoindre le bassin de Taoudenni (Blanck et Tricart, 1990).

Les eaux datent de l'Holocène moyen et supérieur (Fontes et al, 1991), période durant laquelle les eaux du fleuve Niger s'écoulaient vers le nord et s'accumulaient dans une zone lacustre du bassin de l'Azaouad nord. Une partie des eaux de l'Office du Niger pourrait actuellement participer à la recharge de cette nappe. Dans le secteur le plus oriental, une remontée de la surface piézométrique apparaît vers la zone lacustre actuelle.

1.3.2.2 Les aquifères du Crétacé supérieur/Eocène inférieur

Ces aquifères sont limités au nord et au sud par les affleurements de l'Infracambrien de la dorsale de l'Azaouad et du Gourma. Le fleuve Niger le recoupe sur toute sa longueur. Il est constitué de séquences sablo-argileuses. Il y a remontée de la surface piézométrique vers les zones d'inondations de la bordure nord du delta intérieur. Les liaisons entre la nappe et les eaux de surface sont évidentes mais les transferts d'eau sont limités et ne semblent être importants qu'entre Goundam et Tombouctou (Guerre et al, 1989).

1.3.2.3 Les aquifères du Continental Terminal/Quaternaire

Le Continental Terminal regroupe les formations continentales qui se sont déposées au Miocène et au Pliocène. Cette accumulation s'est faite dans les zones déprimées telles que la

cuvette lacustre et repose directement sur les couches plissées du Précambrien (figure 1.3.2). Cet aquifère est sableux, localement gréseux avec passées d'argiles de couleurs variées. L'épaisseur de ces formations atteint quelques centaines de mètres au coeur de la dépression. Les limites de cette nappe sont formées par le substratum Précambrien, les formations gréseuses du plateau Manding, le plateau de San, le plateau Dogon, le Gourma, les collines de Nampale-Goundam et la dorsale de l'Azaouad (Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).

Ces formations du Continental Terminal et du Quaternaire s'étendent sur une superficie de 87000 km².

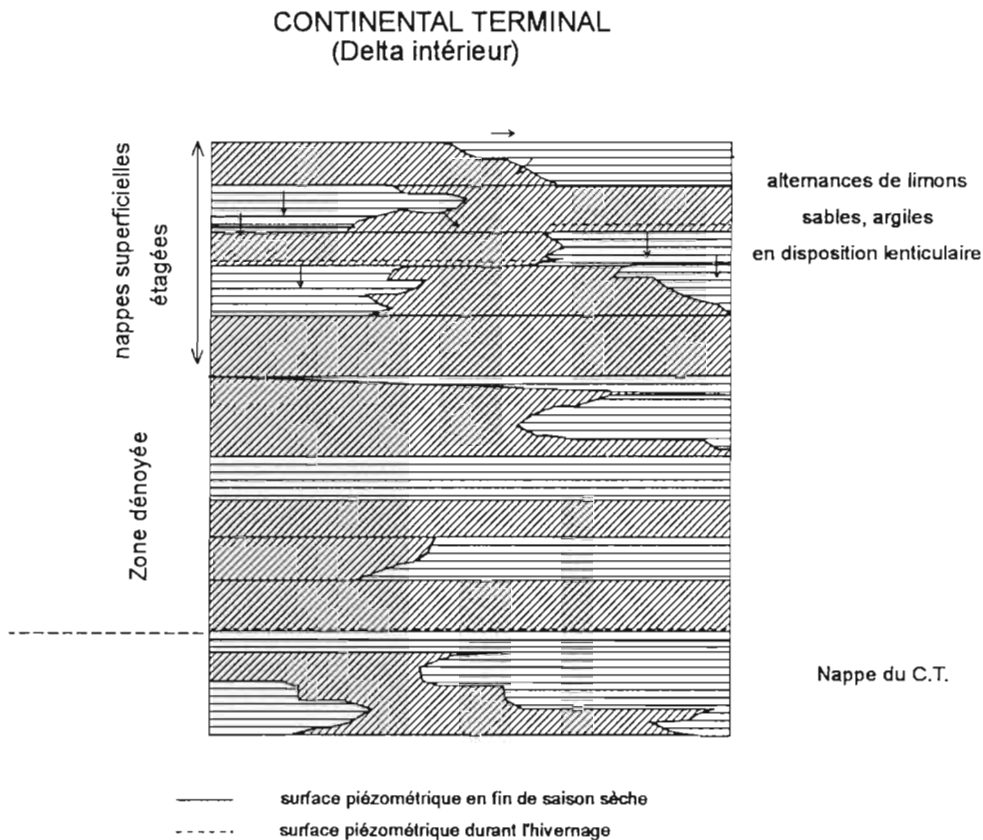


Fig.1.3.2 : Coupe géologique schématique dans l'aquifère du Continental Terminal dans le delta intérieur (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990)

1.4 VEGETATION

La végétation du Mali se divise en 4 secteurs correspondant plus ou moins aux zones climatiques (figure 1.4.1).

Le domaine Soudano-Guinéen, au sud de Bamako, est composé de savanes et forêts claires. C'est le domaine des bassins supérieurs des fleuves Niger et Bani. La densité des arbres est grande et quelques espèces dépassent 10 m. Les essences les plus courantes sont le karité, le néré, le fromager, le palmier à huile et le rônier. Le tapis herbacé est assez efficace contre le ruissellement et réduit l'importance des transports solides.

Le domaine Soudanien se situe au sud du delta avec des savanes arborées/arbustives. La savane arbustive possède de petits arbres épars, de 1 à 3 m de hauteur et quelques grands arbres (Nickling et Gillies, 1993). Le couvert herbacé, surtout composé de graminées pérennes, se développe avec les premières pluies discontinues de mai-juin (Grouzis, M., 1992).

Le domaine Sahélien. Le domaine désertique, au nord de Tombouctou commence avec le passage de la steppe sahélo-saharienne à une végétation rare ou absente.

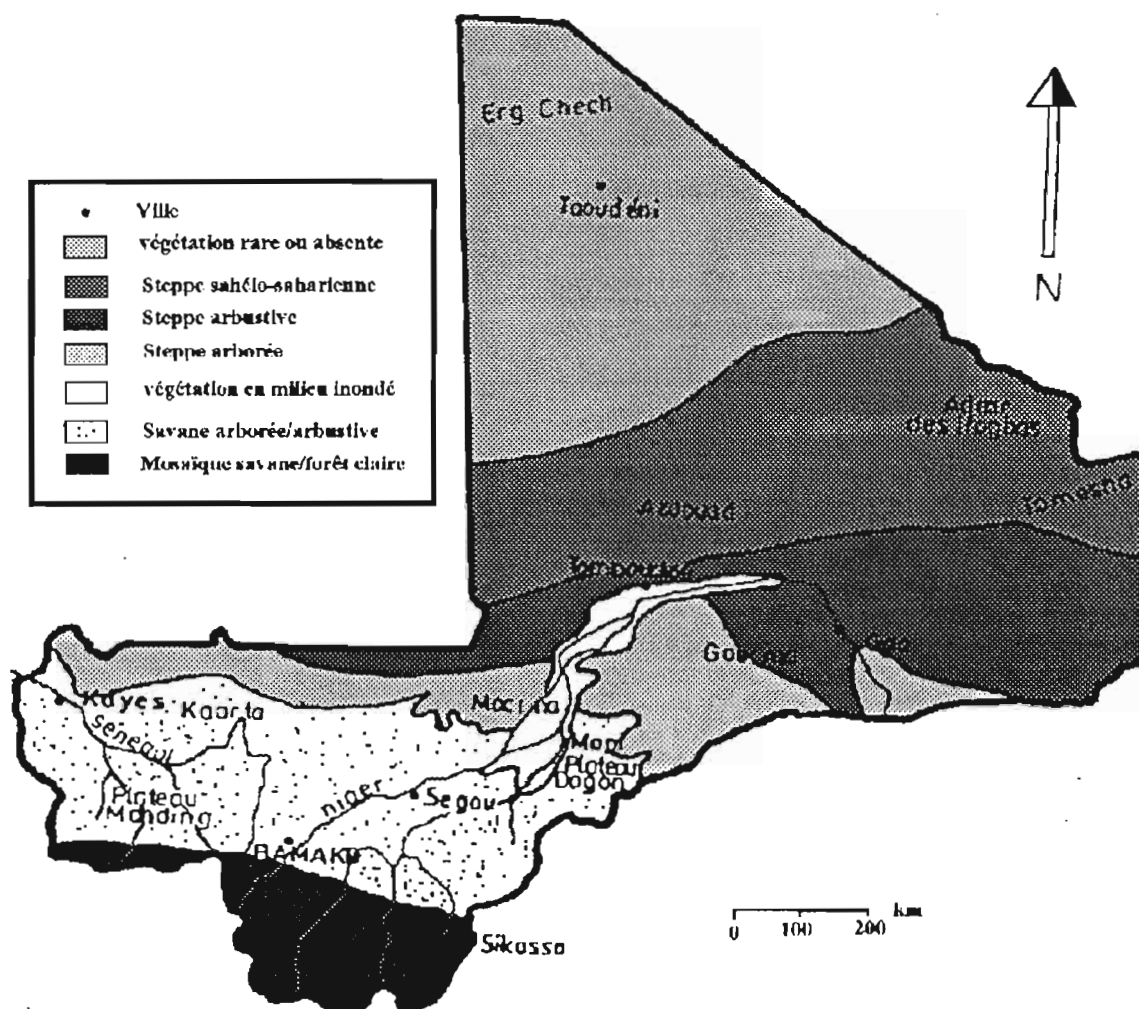


Fig.1.4.1 : Carte des formations végétales (d'après « Atlas du Mali, 1981)

1.5 CLIMAT

1.5.1 ELEMENTS PRINCIPAUX DE CLIMATOLOGIE OUEST-AFRICAINE

L'étude du climat actuel et de ses variations au cours du temps permet de comprendre l'évolution des paysages, des modes de vie, de mesurer l'importance de l'impact sur l'hydrologie et les possibles modifications des écosystèmes.

1.5.1.1 La circulation atmosphérique

L'étude synthétique des climats de l'Afrique a été reprise de Mahé (1993) et Olivry et al (1994b, à paraître).

La circulation de **Hadley** (figure 1.5.1, Fontaine 1991) consiste en un mouvement de l'air des tropiques vers l'équateur, un mouvement de l'air ascendant près de l'équateur, un mouvement de l'air vers les tropiques en altitude et un mouvement subsident au-dessus de ces régions. Les cellules de Hadley sont animées par la convection équatoriale. L'air chauffé à l'Equateur se répand en altitude vers les pôles, perd de sa chaleur, et descend vers les latitudes 30° en se chargeant d'humidité au passage des océans. La force de Coriolis permet de dévier vers l'ouest les masses d'air se déplaçant vers l'Equateur. Les vents prennent alors le nom d'Alizés. Le flux de mousson Atlantique est la branche basse de la cellule de Hadley sud. Il se développe lorsque l'Anticyclone de Ste Hélène est le plus puissant.

La **zone intertropicale de convergence (ZITC)** appelée aussi l'**Equateur Météorologique (EM)** est la branche ascendante de la cellule de Hadley. Elle correspond au contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères. La position de la ZITC est très variable mais reste globalement dans l'hémisphère nord en raison du déséquilibre de la répartition des terres sur le globe. L'EM présente une structure en front, de pente très inclinée, s'abaissant de l'équateur vers le nord, appelée **Front Intertropical (F.I.T.)**.

La circulation basse est déterminée par l'agencement des cellules de pression, elles même liées aux facteurs thermiques locaux. Les masses d'air de basse altitude sont (Leroux, 1983):

- > l'air humide de la **mousson** provenant du Golfe de Guinée au sud. Les déplacements s'organisent autour du centre inducteur de hautes pressions tropicales de Ste Hélène.

- > les masses d'air chaud et sec (l'**Harmattan**) sahariennes. L'Anticyclone Egypto-Libyen distribue ce flux d'alizé de secteur NE et E.

En altitude, la circulation est dominée en période humide par l'existence de jets, vents forts d'est quasi-horizontaux, marqués par de forts gradients de vitesse dans les plans horizontal

et vertical. Le moteur principal de ces jets est la rotation de la terre. Ces courants migrent saisonnièrement en latitude suivant l'EM.

En juillet-août, le **Jet Tropical d'Est (JTE)** circule entre les régions sud asiatiques et la façade atlantique de l'Afrique occidentale. Le JTE interfère alors avec la circulation de basse altitude, circulation de Hadley.

Le JTE semble favoriser l'ascendance dans les couches moyennes soudano-sahéliennes.

Au sud et au nord de l'EM, vers 3000-6000 m, il existe, en Afrique de l'ouest, des accélérations dans le flux d'est. Ce flux est appelé le **Jet d'Est Africain (JEA)**.

Le cisaillement entre le JEA et les flux humides des basses couches qu'il surmonte explique la faible efficacité pluviogénétique du F.I.T. au-dessus de l'Afrique de l'ouest.

1.5.1.2 Les perturbations tropicales

L'essentiel de l'humidité apportée sur l'Afrique occidentale et centrale provient de l'hémisphère sud et transite par le Golfe de Guinée.

Les jets et la pénétration d'air polaire aux latitudes tropicales sont les facteurs dominants agissant sur les précipitations de l'Afrique de l'ouest.

L'instabilité est liée à la création de zones de convergence dans les bas niveaux renforçant la convection, variation de vitesse du J.E.A., favorisant le passage de perturbations mobiles d'est. Les ondes d'est sont des lignes de cisaillement secondaires au sein des alizés qui peuvent développer des foyers pluvio-orageux disposés en lignes mobiles. Les vents sont forts, les averses violentes le long de ces perturbations appelées « lignes de grain » (Godard et Tabeaud, 1993). Ces intrusions du flux d'est dans le flux de mousson, soulèvent l'air humide en un front mobile le long duquel se produisent orages et averses. Les lignes de grains sont des systèmes nuageux composés de cumulo-nimbus, traversant d'est en ouest l'Afrique occidentale et apportant 80 % des totaux pluviométriques sur les régions sahéniennes (Fontaine, 1991). L'importance climatique de ces lignes de grains tient au fait que ce sont pratiquement les seuls événements utilisateurs de l'humidité du flux de mousson au nord de la position la plus septentrionale de la ZITC, le long du FIT.

1.5.2 LES SAISONS

Il existe, au Mali, une variation nord-sud du climat autour d'une dominante tropicale à une seule saison des pluies.

La pluviométrie est régie par la position des masses d'air, conditionnée par le déplacement de la zone du front Intertropical (F.I.T.) représenté au sol par l'Equateur Météorologique (EM). Le déplacement de ce F.I.T. détermine la durée des saisons (figure 1.5.2.).

1- Cadre général de l'étude

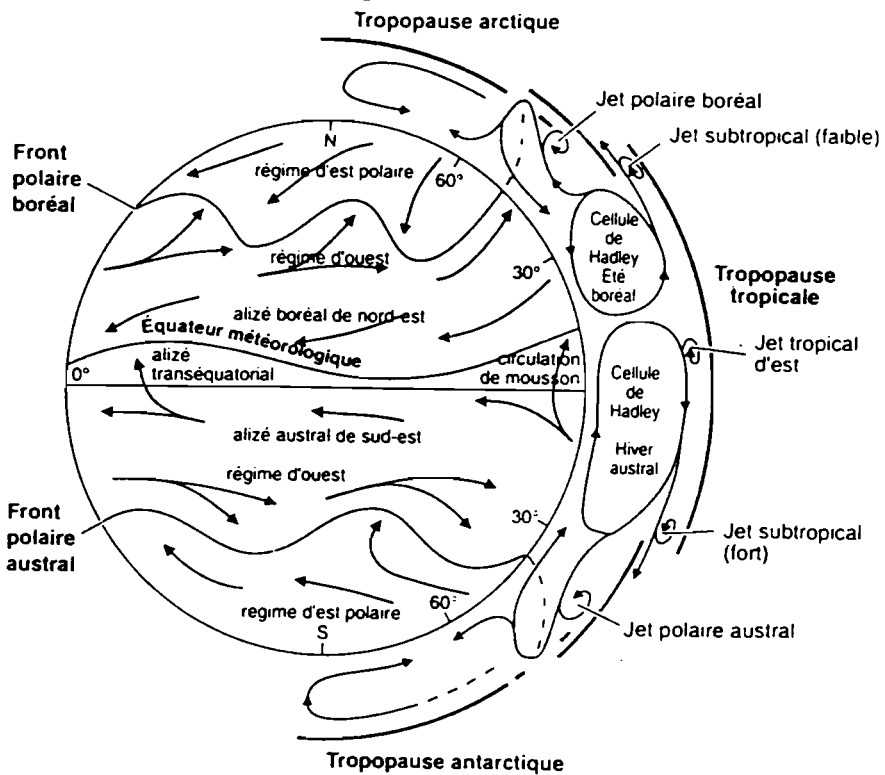


Fig.1.5.1 : Eléments fondamentaux de la circulation atmosphérique (Fontaine, 1991)

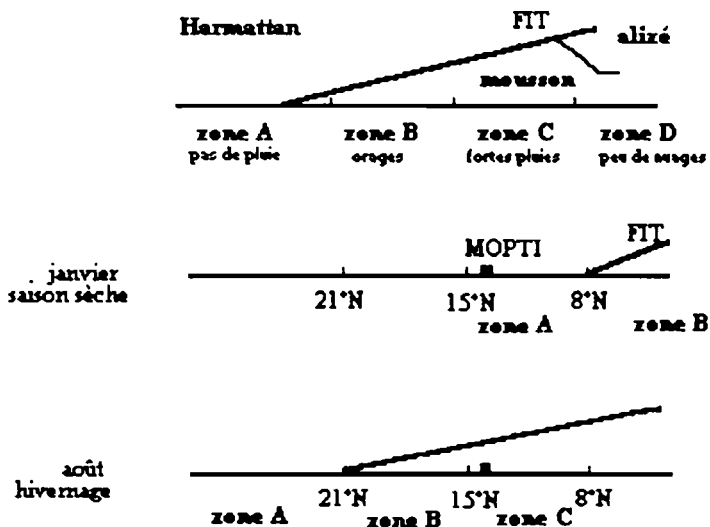


Fig.1.5.2: Evolution saisonnière du FIT (d'après Kamaté, 1981)

En été, entre juin et septembre, sur l'Afrique occidentale, le flux humide de secteur sud-ouest pénètre sur le continent (Fontaine, 1986).

Le F.I.T. se déplace vers le nord jusqu'à la latitude 20°, repoussant le front polaire méditerranéen. L'anticyclone de Ste Hélène se renforce.

En hiver, le processus s'inverse. Sous la poussée advective du vent venant surtout de l'ouest, du nord et de l'est, les pluies du nord atteignent le Sahara (Joseph, 1986). L'E.M. se situe alors vers 4-6°N. L'harmattan souffle en permanence du NE. Dans les basses couches, l'air polaire passe sous le flux tropical, provoquant des mouvements ascendants. En altitude, des langues d'air froid s'avancent légèrement vers l'équateur. En hiver, elles peuvent soulever l'air tropical chaud et humide, entraînant la formation de masses nuageuses génératrices de pluies, les « pluies des mangues ».

1.5.3 DOMAINES CLIMATIQUES

Les variations en latitude des différentes composantes du climat entraînent une différenciation régionale dont les limites de domaines sont définies par la hauteur annuelle des précipitations.

1.5.3.1 Les zones soudaniennes

Sous cette appellation ont été regroupés le domaine guinéen (>1500 mm), le domaine sud-soudanien (1500 à 1000 mm) et le domaine nord-soudanien (1000 à 750 mm) qui correspondent aux climats des hauts bassins versants des fleuves Niger et Bani. La pluviométrie annuelle peut atteindre plus de 2000 mm dans la région de la dorsale guinéenne.

Cette zone s'étend jusqu'à la latitude de Segou vers 13°N.

La saison des pluies est active de juin à octobre. L'ampleur thermique est faible (4-6°C). Les vents de mousson du S-SW dominant en été alors que ceux d'E-NE de l'Harmattan soufflent en saison sèche.

La température moyenne de la zone du haut Niger est de 27° à Siguiri (Guinée) et de 28,5°C à Segou. Les extrema de l'humidité relative sont à Siguiri de 73% maximum et 33% minimum, à Bamako de 85% max. et 39% min. (Brunet-Moret et al, 1986).

1.5.3.2 La zone sahélienne

On considère comme sahéliennes les régions dont la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 750 et 250 mm. La zone sahélienne occupe actuellement la position centrale du Mali entre les latitudes 13° et 17°N. La quasi-totalité de la cuvette lacustre est soumise à ce climat. En 1991, Dire recevait à peine plus de 200 mm.

La saison des pluies est plus courte puisqu'elle dure de juillet à septembre avec, en moyenne, une trentaine de pluies par an.

Les amplitudes thermiques sont importantes.

Dans le delta intérieur, les plaines d'inondation contribuent à modifier le climat régional en agissant sur plusieurs éléments météorologiques dont la régulation thermique et la naissance de vents locaux (Gallais, 1967, Kamaté, 1981).

1.5.3.3 La zone saharienne

Les régions du nord du Mali subissent un climat sec avec moins de 250 mm de hauteur d'eau par an. Il ne tombe que quelques pluies par an, ce qui explique la très forte sensibilité de ces zones devant des fluctuations climatiques même mineures. L'écart thermique entre le jour et la nuit est très fort.

1.5.4 PARAMETRES CLIMATIQUES DU BASSIN DU NIGER

paramètres	GUINEE			MALI			
	Macenta	Kankan	Siguiri	Bamako	Segou	Mopti	Tombouctou
T _{moy.}	24	26	26,9	28,5	28,6	27,7	29,1
T _{max}	34,6 (3)	36,2 (3)	38,0 (3)	39,4 (4)	41,2 (4)	40,0 (5)	43,2 (5)
T _{min}	14,0 (12)	14,2 (12)	13,8 (1)	17,6 (1)	15,4 (1)	14,0 (1)	13,0 (1)
U _{max}	96	90	85	73	74	75	54
U _{min}	58	45	39	33	32	30	21
P (mm)	2100	1508	1250	985	650	415	180
nbre mois sec	1-2	4-5	6	7	8	8-9	10

Tableau 1.5.1 : Température moyenne, maximum et minimum (mois des extrêmes entre parenthèses), humidités relatives moyennes annuelles maximales et minimales, précipitation interannuelles et nombre de mois sec sur quelques stations du bassin du Niger (d'après Olivry, 1994a).

L'étude de quelques paramètres climatiques du sud du bassin au nord souligne l'évolution vers des régions de plus en plus sèches. Les variations interannuelles sont plus importantes dans les régions nord.

1.5.5 CONCLUSIONS

La pluviométrie du Mali est régie par deux grands courants : l'alizé ou flux de mousson provenant de la zone basse de la cellule de Hadley et enrichi au-dessus de l'océan Atlantique et les courants JEA et JET, courants d'altitude provenant respectivement de l'océan Atlantique et de l'océan Indien. Ces deux Jets interfèrent en altitude avec la mousson et forment les « lignes de grains » responsables des principales précipitations sur l'Afrique de l'ouest. L'étendue du Mali et sa position géographique à cheval sur plusieurs grands domaines climatiques créent des variations régionales importantes. Les contrastes nord-sud sont marquants du fait que les précipitations annuelles varient de plus de 1000 mm à moins de 100 mm. Les régions nord reçoivent peu de pluies, réparties sur une courte période, ce qui les rend d'autant plus sensibles aux fluctuations climatiques mondiales.

2. HYDROLOGIE DES BASSINS SUPERIEURS DU NIGER ET DU BANI

Le bassin versant du fleuve Niger représente, à son embouchure au Nigeria, plus de 1 million de km² dont une grande partie en domaine sahélien et désertique. L'étude de l'hydrographie et de l'hydrologie de son bassin en amont de la cuvette lacustre, ainsi que du bassin amont du fleuve Bani permet de caractériser le principal apport hydrique pour le système du delta intérieur.

2.1 HYDROGRAPHIE DU BASSIN AMONT

2.1.1 LE FLEUVE NIGER

Le fleuve Niger se compose de 4 branches mères (figure 2.1.1), le Niger lui-même, le Niandan, le Milo et le Tinkisso. La source se situe à une altitude moyenne de 800 m sur le versant nord de la dorsale Guinéenne.

Le fleuve s'écoule en direction nord-est avec une pente moyenne de 15 à 20 cm par km en amont de Siguiri (Guinée). A partir de Siguiri, la pente tombe à 10 cm km⁻¹. Le fleuve Niger entre au Mali vers Banankoro, il est rejoint par le Fié, rivière temporaire, puis par le Sankarani en aval de Kangaba. C'est sur le Sankarani, 50 km en amont de la confluence qu'a été installé le barrage hydroélectrique qui permet l'alimentation en électricité de Bamako et de ses environs. Le barrage est implanté sur le site de Selingue, une des plaines d'inondation naturelle du Sankarani de 2 à 2,5 km de large entre les collines latéritiques. Depuis sa mise en route en 1980, le lac de retenue de plus de 2 milliards de m³ permet de soutenir les étiages du fleuve.

A partir de Siguiri (Guinée), le fleuve suit un tracé peu encaissé et presque rectiligne et reste navigable jusqu'à Bamako. A la sortie de la capitale, se trouvent les rapides de Sotuba, affleurements de grès durs du plateau Manding. Un site identique s'observe quelques kilomètres en aval, à Kenie. (Brunet-Moret et al, 1986). A Koulikoro, le fleuve est à nouveau navigable pour de grands bateaux alors que cette ville est la dernière station de la ligne de chemin de fer venant de Dakar (Sénégal). Jusqu'à cette ville, le bassin versant du fleuve Niger a été considéré, dans cette étude, comme le bassin amont. La superficie du bassin versant est alors de 120000 km². Au niveau de Ke-Macina, la vallée s'élargit et la pente moyenne tombe à 5 cm km⁻¹ jusqu'à Mopti (Hiernaux, 1982). Cette plaine prend l'aspect d'un "delta intérieur".

2.1.2 HYDROGRAPHIE DU BANI

Les sources du Bani, le principal affluent du Niger, se situent vers Odienne et Boundiala au nord de la Côte d'Ivoire. Elles se composent du Baoule et du Bagoé. Le Bagoé reçoit en rive

gauche le Banifing et le Kankelaba et le Bafini en rive droite. Le bassin du Bani est homogène et les affluents ont des caractéristiques voisines.



Fig.2.1.1 : Le bassin du fleuve Niger

Alors que le bassin du Niger possède, à Koulikoro, 24,4 % de sa superficie totale au-dessus de 500 m, le Bani n'en possède que 1,7 %. Au niveau de Douna, le bassin versant a une superficie de 101 600 km², sensiblement équivalente à celui du Niger. Le Bani rejoint le Niger au niveau de Nantaka après 1 300 km parcourus à travers des régions plates à faible pente.

2.1.3 LE NIGER MOYEN ET INFÉRIEUR

A la sortie du delta intérieur, au niveau de Dire, les eaux se rassemblent à nouveau pour former un bras unique du fleuve. Commence alors le Niger moyen et inférieur. A Tombouctou, le fleuve, qui avait une direction nord-nord-est vire vers l'est puis forme une boucle en direction du sud-est à travers une zone sablonneuse et désertique. Des rapides se forment au niveau du seuil rocheux de Tossaye; en amont de Gao, le fleuve conflue avec le Tilemsi dont l'hydrographie fossile et la vallée sèche marquent un ancien cours supérieur de

l'actuel Niger inférieur. La capture du Niger par le Tilemsi date probablement du Pléistocène-Holocène (Riser et Petit-Maire, 1986). Les rapides d'Ansongo et de Labbezanga marquent la sortie du territoire malien. Après 4200 km de course, à travers la Guinée, le Mali, le Niger et le Nigeria, le fleuve se jette dans le Golfe de Guinée en formant un delta marécageux de 20000 km².

2.2 HYDROLOGIE DES BASSINS AMONTS DU NIGER ET DU BANI

La station de Koulikoro possède, sur le Niger, les chroniques de hauteurs d'eau les plus longues qui permettent ainsi les divers calculs statistiques. Sur le Bani, c'est la station de Douna qui possède les chroniques les plus fiables.

Le Niger suit un régime tropical de transition alors que celui du Bani est tropical pur (Brunet-Moret et al, 1986). Leurs crues ne sont pas synchrones. Le maximum de crue peut passer avec plus d'un mois d'avance à Koulikoro comme en 1984 ou, au contraire, plus d'un mois après celui du Bani à Douna comme en 1989. Ce décalage influence les modalités de l'inondation de la cuvette en aval.

2.2.1 LE FLEUVE NIGER A KOULIKORO

A Koulikoro, le bassin versant du Niger a une superficie de 120000 km². Le débit moyen interannuel calculé sur la période 1907-1993 est de 1396 m³ s⁻¹, soit un module spécifique de 11,6 l s⁻¹ km². Cette longue chronique (figure 2.2.1 et annexe 1) laisse apparaître une nette tendance à la baisse depuis les années 70.

Les modules sont dans un rapport 3,8 avec un maximum de 2320 m³ s⁻¹ en 1924-1925 et un minimum de 626 m³ s⁻¹ en 1984-1985. L'étude statistique des modules (tableau 2.2.1) indique que l'année 1924-1925 a subi une crue centennale humide alors que l'année 1984-1985 correspond à une année sèche de probabilité de retour proche de 50 ans.

	Période de retour sèche (ans)				Période de retour humide (ans)		
	100	20	10	2	10	20	100
Koulikoro	472	750	898	1419	1940	2089	2366

Tableau 2.2.1 : Analyse fréquentielle des modules (m³ s⁻¹) à Koulikoro sur la période 1907-1990 (Olivry et al, 1994a)

La lame d'eau annuelle écoulee est de 367 mm. La hauteur des précipitations interannuelles est estimée à 1600 mm (Olivry et al, 1994a). Le coefficient d'écoulement moyen est donc de 23 %. Ce coefficient élevé s'explique par la géologie du bassin composé de roches granitiques du socle avec peu de végétation.

Les basses eaux se prolongent de février à mai avec un minimum autour du mois d'avril ou mai. Depuis la mise en service du barrage de Selingue en 1981, les étiages sont largement soutenus. Avant cette période, la moyenne mensuelle du mois d'avril était de 63 m³ s⁻¹, elle est de 120 m³ s⁻¹ pour la période 1982-1993 malgré une baisse notable des modules annuels.

La montée des eaux débute au mois de juin et est régulière. Les mois de juillet à décembre voient passer plus de 93 % des eaux de l'année. Le maximum se situe vers mi-septembre à début octobre. Plus de la moitié des eaux s'écoulent durant les mois de septembre et octobre.

La décrue est légèrement plus rapide que la crue et l'hydrogramme est presque symétrique. Seuls les apports par les nappes phréatiques participent à l'écoulement du fleuve dès le mois de novembre.

L'étude statistique est établie sur la période 1907-1992, la période antérieure à 1970 et la période récente de 1971 à 1992. Le tableau 2.2.2 indique les maximums de crue ($m^3 s^{-1}$) pour différentes périodes de retour (Olivry et al, 1994a).

	Période de retour sèche (ans)				médiane	Période de retour humide (ans)			
	100	50	20	10		2	10	20	50
1907 1992	2260	2680	3300	3800	5590	7735	8290	8910	9330
1907 1970	3400	3730	4240	4690	6290	7880	8330	8840	9180
1971 1992	1340	1680	2200	2660	4280	5900	6360	6870	7220

Tableau 2.2.2 : Analyses fréquentielles des maxima de crue à Koulikoro ($m^3 s^{-1}$)

L'écart entre la période actuelle et celle antérieure à 70 est très fort, le coefficient de variation pour la médiane est proche de 20 %, il est supérieur à 40 % pour les fréquences centennales sèches.

2.2.2 LE BANI A DOUNA

A Douna, le bassin versant du Bani, principal affluent du Niger, a une surface de 101600 km^2 . La chronique des relevés des hauteurs d'eau débute en 1922 pour s'arrêter en 1933. Ce n'est qu'à partir de 1951, que les données deviennent régulières et exploitables (fig.2.2.2).

Le module moyen pour la période de 1951-1992 est de $432 m^3 s^{-1}$. Ceci représente donc 32% des débits du Niger pour la même période. Le module spécifique est de $4,25 l s^{-1} km^{-2}$, ce qui est faible par rapport au Niger. Le rapport des modules extrêmes est élevé, de 13, ce qui indique la sensibilité des écoulements aux variations climatiques. L'étude statistique des modules et des maximums confirme l'actuelle faiblesse des écoulements dans cette région (tableau 2.2.3).

	Période de retour sèche (ans)				Période de retour humide (ans)		
	100	20	10	2	10	20	100
modules	70	84	153	419	827	854	918
maximum	364	565	806	2425	3480	3560	4460

Tableau 2.2.3 : Analyse fréquentielle des modules et maximum ($m^3 s^{-1}$) à Douna de 1951 à 1990 (Olivry et al, 1994a)

Le bassin versant est moins arrosé et reçoit 1200 mm d'eau par an. Avec une lame écoulée de 134 mm, le coefficient d'écoulement est de 11,2 %.

Les basses eaux s'étalent sur une longue période avec, depuis 1984, un arrêt possible de l'écoulement au mois de mai.

En 1993, le débit a été inférieur à 10 l s^{-1} durant trois mois de l'année, d'avril à juin. La nappe du bassin versant ne permet plus de soutenir les étiages.

Durant les mois de décembre à juin, l'écoulement représente moins de 9 % du total annuel.

Durant les 4 dernières années, on constate que la montée des eaux commence en juin mais s'arrête très tôt et diminue ensuite alors que les débits n'ont pas atteint les $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La crue est ensuite franche et régulière dès la fin juin, début juillet. Les hauteurs maximales sont relevées vers la fin du mois de septembre mais deviennent plus précoces durant les dernières années.

Le mois de septembre représente près de 40 % de l'écoulement annuel et 80 % de l'eau s'écoulent durant les mois de août à octobre.

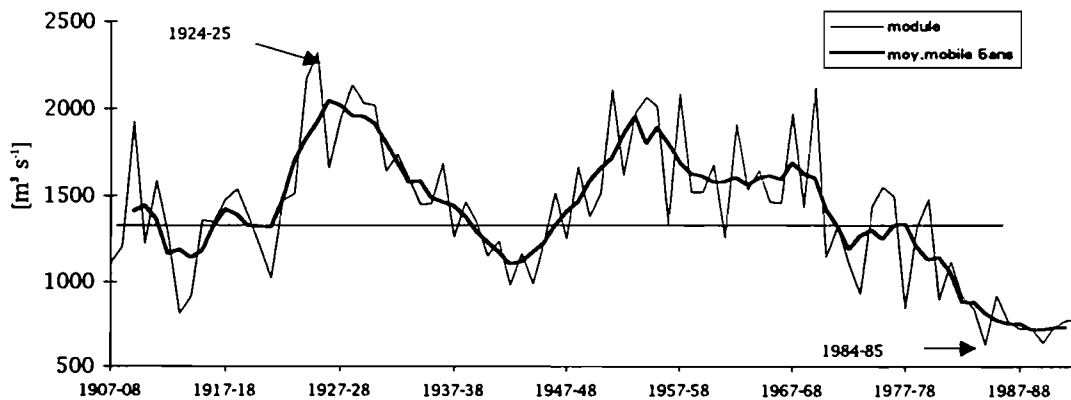


Fig. 2.2.1: Evolution des modules et moyenne mobile sur 5 ans à Koulikoro de 1907 à 1993.

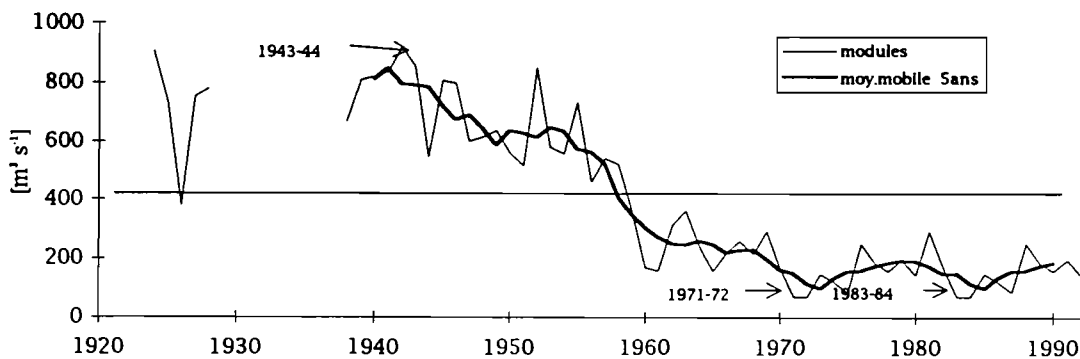


Fig. 2.2.2: Evolution des modules et moyenne mobile sur 5 ans à Douna de 1920 à 1993.

2.2.3 HYDROGRAMMES CARACTERISTIQUES DU NIGER ET DU BANI

Les hydrogrammes du Niger à Banankoro et du Bani à Douna sont reportés en figure 2.2.3.

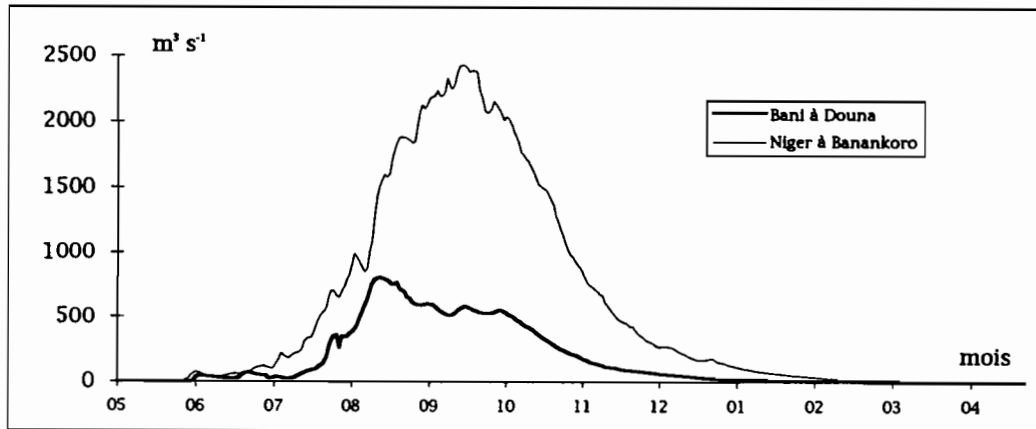


Fig. 2.2.3 : Hydrogrammes de crue (1989-1990) pour le Niger à Banankoro et le Bani à Douna

Ces deux hydrogrammes représentent l'évolution annuelle « naturelle » des cours d'eau puisque, jusqu'à ces stations, il n'y a pas de barrage influent.

Les basses eaux s'étendent sur plus de trois mois pour les deux cours d'eau. La montée de la crue est d'abord lente et irrégulière puis accélère au début du mois de juillet. Pour le Bani, le maximum est atteint moins de deux mois après le début de la montée des eaux. Par contre, le maximum de la crue se produit près de trois après le début de la crue pour le Niger. L'écart entre ces deux cours d'eau est évident en hautes eaux.

Alors que l'hydrogramme du Niger à Banankoro est régulier, avec une montée et une décrue symétriques, l'hydrogramme du Bani à Douna est très mouvementé. La décrue est ralentie par l'arrivée nouvelle d'eau. Ces pluies tardives se produisant sur le bassin versant sud seraient dues à une deuxième petite saison des pluies causée par la montée du FIT.

3. LE BASSIN DU DELTA INTERIEUR

3.1 CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES SPECIFIQUES AU DELTA

3.1.1 PRESENTATION SOMMAIRE DU MILIEU ET DES POPULATIONS

La cuvette lacustre est une immense plaine alluviale comblée par différents dépôts du quaternaire. Cet ensemble géomorphologique représente un rectangle orienté SO-NE de 400 km de longueur et 125 km de largeur. Ces quelques 50000 km² présentent un paysage, une flore et une faune particuliers liés aux inondations saisonnières (figure 3.1.1).

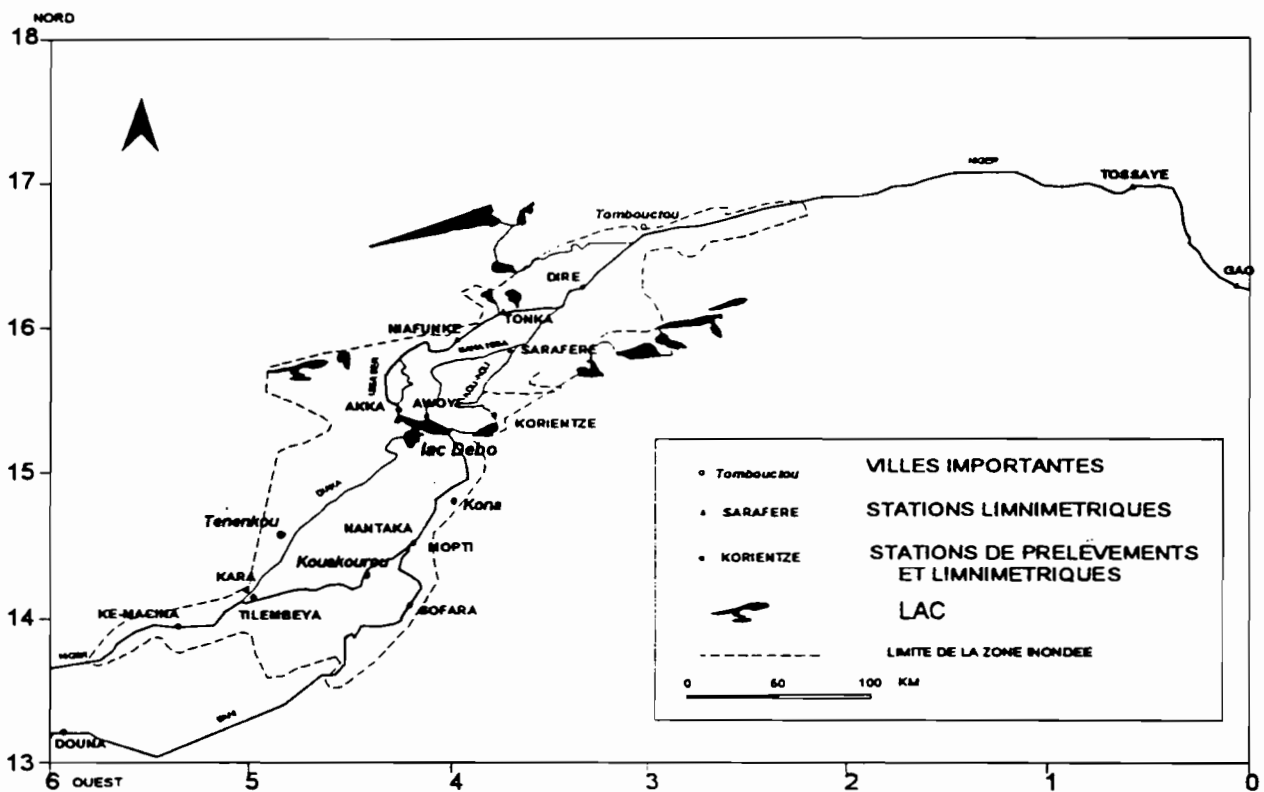


Fig.3.1.1 : Carte schématique du delta central du fleuve Niger

Cette zone abrite environ neuf cent milles habitants, sédentaires ou nomades, essentiellement pêcheurs, cultivateurs et pasteurs (Direction Nationale de la statistique et de l'informatique, 1990).

Mopti, avec plus de 50000 habitants, est le carrefour du commerce, pour le poisson notamment. Tombouctou, ville mythique, ferme le delta au nord.

Les échanges commerciaux sont difficiles à cause de l'inondation qui empêche la construction de grands axes routiers à travers le delta. Le transport se fait par pinasse en

bois (dont certaines transportent plusieurs dizaines de tonnes de marchandises) durant les mois de juillet à décembre.

La culture du riz est très développée sur les bords du fleuve ainsi que celle du mil et du sorgho. Le cheptel est estimé (en 1976, Gallais, 1981) à 1200000 bovins, ce qui entraîne un surpâturage des bourgoutières.

3.1.2 MORPHOLOGIE

La morphologie du delta prend plusieurs aspects (Voute, 1962, Gallais, 1967, Blanck et al, 1969, Grove, 1985, Poncet, 1994):

⇒ au sud d'une ligne Tenenkou-Kouakourou-Sofara l'aspect général présente de grands chenaux rectilignes. L'hydrographie simple explique des phénomènes d'érosion forte. On retrouve un enchevêtrement de levées à dominante sableuse de défluent de l'Holocène. Les cours d'eau actuels ont un tracé rectiligne.

⇒ le delta moyen jusqu'à la latitude de Kona possède de nombreux méandres et chenaux sans hiérarchie apparente. Malgré de multiples défluences, le Niger garde un aspect longitudinal avec un tracé bien marqué.

⇒ le bas delta au bord du lac Debo voit l'apparition de grandes dunes d'orientation E-O qui ont perturbé les cours d'eau durant le quaternaire. Le matériel est d'origine fluviale mais la morphologie est modelée par l'action éolienne. Cet erg inondé (Erg de Niafunke ou Erg de Nara) peut être séparé en deux avec, à l'est et à l'ouest, une végétation différente sur les deux parties et des méandres plus accentués à l'est. Les cours d'eau secondaires suivent, puis coupent les nombreuses dunes en formant des « cluses ». Ces tracés en « baïonnettes » augmentent l'évaporation et réduisent la pente globale.

Des bourrelets de rive sont en constante formation, tantôt sur une rive, tantôt sur l'autre. La formation de ces bourrelets, liée à la pente ainsi qu'à la sédimentation dans le lit du fleuve entraîne un endiguement naturel et un exhaussement du lit par rapport aux plaines d'inondation (Brunet-Moret et al, 1986). Les bras abandonnés et les mayos (petits cours d'eau) des zones éloignées voient leurs levées très atténuées (Sutcliffe et Lazenky, 1989, McCarthy, 1993).

Les mayos de la région du Kotia, ont souvent une profondeur de 2-3 m, ce qui empêche la végétation de se développer et facilite l'écoulement (Courel, 1992).

3.1.3 LE MILIEU VEGETAL AQUATIQUE

La cuvette lacustre est un domaine particulier qui suit le rythme des crues. Cette région présente plusieurs systèmes végétatifs.

3.1.3.1 Zones non inondées

Au Sud du delta se trouvent des palmiers *Borassus aethiopicum* remplacés au nord, essentiellement sur le pourtour du Bara Issa, par des *Hyphaene thebaica* (dum-dum). Dans la zone du delta mort, à l'ouest de Youvarou, domine le *Cenchrus biflorus* (cram-cram). Le long des rizières poussent le *Mimosa asperata*, *Salix chevalieri* et *Cyperus maculatus* (Burgis et Symoens, 1987).

La brousse tigrée (alternance de formations végétales présentant l'aspect du pelage d'un tigre) ne se développe qu'à l'intérieur de la boucle du Niger (Leprun, 1992).

Des systèmes de dunes à taillis apparaissent à proximité des zones saisonnièrement inondées. Une végétation parsemée est associée à des dunes de 0,5 à 3 m de hauteur; *Syzygium guineense*, *Piliostigma reticulatum*, *Aymnema sylvestre*. Les interdunes sont caractérisées par des encroûtements développés avec des concentrations variables de dépôts latéritiques.

De grandes superficies de sols nus, lessivés et encroûtés s'étalent sur les bords de la cuvette lacustre. Une croûte de sable fin est surmontée par une pellicule de limon. Les sols latéritiques sont communs dans le delta.

Les régions sableuses sont souvent exploitées pour la culture du mil (Nickling et Gillies, 1993).

Les fonds des lacs de rive droite, actuellement à sec, sont constitués de sols argilo-limoneux hydromorphes sur lesquels sont cultivés le mil, le fonio et le riz lorsque l'irrigation est possible (Blanck, 1986).

3.1.3.2 Zones régulièrement inondées

Dans les zones d'inondation permanente de la plaine, la végétation est sous la dépendance du régime de submersion : hauteur, durée, vitesse de montée de la crue...(Bertrand, 1976).

Il ne reste dans la zone deltaïque, que trois ou quatre grandes forêts inondées où l'espèce *Acacia kirkii* est dominante (Wuillot, 1994).

Sur les zones inondées durant peu de temps, la végétation est composée essentiellement de vétivers et autres graminées vivaces (Courel, 1992).

Sur les sols hydromorphes envahis par les eaux de 3 à 6 mois, les plantes les plus abondantes sont *Echinochloa stagnina* (bourgou), *Echinochloa pyramidalis*, *Polygonum senegalense*, *Acroceras amplexans* et *Oryza longistaminata* (riz sauvage).

Sur les plaines inondées plus de 6 mois, deux plantes sont très répandues et jouent un rôle important dans l'écologie des mares, ceci jusqu'à 3 mètres de hauteur d'eau, *Echinochloa stagnina* et *Vossia cuspidata*. D'autres plantes cohabitent, *Ceratophyllum demersum*,

Nymphaea maculata (Granier, 1981). La productivité de ces herbiers est de 11 à 33 t/ha pour l'espèce *Eichbornia crassipes* (Welcomme, 1979).

Une partie des terres est utilisée pour la culture. L'Office du Niger exploite la région de Markala, Kolongotomo jusqu'à Niono et Kourouma grâce à une irrigation réalisée par l'intermédiaire du canal du Macina et du canal du Sahel. Un barrage à Markala permet l'alimentation annuelle de quelques 100 000 ha de riz. La canne à sucre occupe un peu plus de 1 000 ha (Gallais, 1981, Bertrand et al, 1994).

Plus au nord, les champs de riz, de fonio sont nombreux mais moins structurés. L'inondation est utilisée grâce aux chenaux naturels et artificiels ainsi que de nombreuses pompes (à gazoil, hydrauliques..) pour l'alimentation des champs en eau (Bacalbasa et Dobrovici, 1971).

Le milieu inondé en permanence, quelques mares et le lit majeur du fleuve, est relativement pauvre en matières organiques. De nombreux mollusques, notamment l'huître d'eau douce *Aetheria elliptica* forment des bancs sur les fonds vaseux. Une algue verte *Spinogyra setiformis* est commune dans les fentes des roches des environs du lac Debo (Poncet, 1994). La crue apporte une grande quantité de nutriments qui favorise le développement de zoo et phytoplancton. La faune ichtyologique du Niger compte actuellement plus de 130 espèces (Quensièrre, 1994).

3.2 PRESENTATION DES SYSTEMES HYDRIQUES

3.2.1 ORIGINE DE LA CUVETTE

Il est bien établi maintenant que, durant les phases les plus humides de l'Holocène (8000 à 6800 ans BP, Petit-Maire, 1986, Bonnefille, 1986, Raimbault, 1986, Riser, 1986, Fontes et Gasse, 1986, Petit-Maire et al, 1987, Lezine, 1987, Fabre et Petit-Maire, 1988, Dubar, 1988, Fontes et al, 1991, Karpoff, 1991, Goetz et Erlenkeuser, 1991, Petit-Maire, 1991), le Niger se dirigeait vers le Nord au niveau de Tombouctou et se jetait dans la dépression de l'Azaouad (Jacobberger, 1988a). La zone inondée s'étendait, vers le nord, bien au-delà de Tombouctou (Fig. 3.2.1).

Au niveau de Ke-Macina, un bras quittait le fleuve en rive gauche et partait vers la frontière de Mauritanie. Un lien possible entre ce bras et le Niger ancien est possible dans la région du Djouf, entre Taoudeni et Araouan (Furon, 1929). Ce sont les paléochenaux du Sansanding et les rares mayos actuels qui ont servi de base pour le réseau d'irrigation de l'Office du Niger. Entre Ke-Macina et Tombouctou, les surfaces inondées s'étendaient bien au-delà des limites actuelles.

Les raisons de la formation d'une telle zone inondée sont sans doute multiples.

La pente du Niger, de l'ordre de 7,5 cm km⁻¹ entre Koulikoro et Ke-Macina passe brusquement à 5 cm km⁻¹ en amont de Mopti (Hiernaux, 1982) puis à 1 cm km⁻¹ jusqu'à Dire.

Cet abaissement provoque un ralentissement qui entraîne le débordement des eaux dans les plaines environnantes. L'engorgement dû à la conjonction de la brutale montée des eaux et de l'abaissement du profil est le moteur du mécanisme deltaïque (Hiernaux, 1982).

Une subsidence et un blocage du Niger par des dunes au sud de Tombouctou sont des facteurs hypothétiques de l'inondation évoqués par Gallais en 1967 puis repris par divers auteurs tels Grove (1985), Jacobberger (1988b).

L'origine tectonique de la formation de la cuvette ne fait aucun doute (Petit-Maire et Riser, 1987). Daveau (1966) suppose que la région du lac Debo se serait légèrement affaissée à la suite de mouvements tectoniques du quaternaire. Tricart (1959), Blanck et Tricart (1990) précisent que le delta central occuperait une gouttière synclinale basculée vers le NE et dont l'affaissement se serait poursuivi jusqu'au Néolithique.

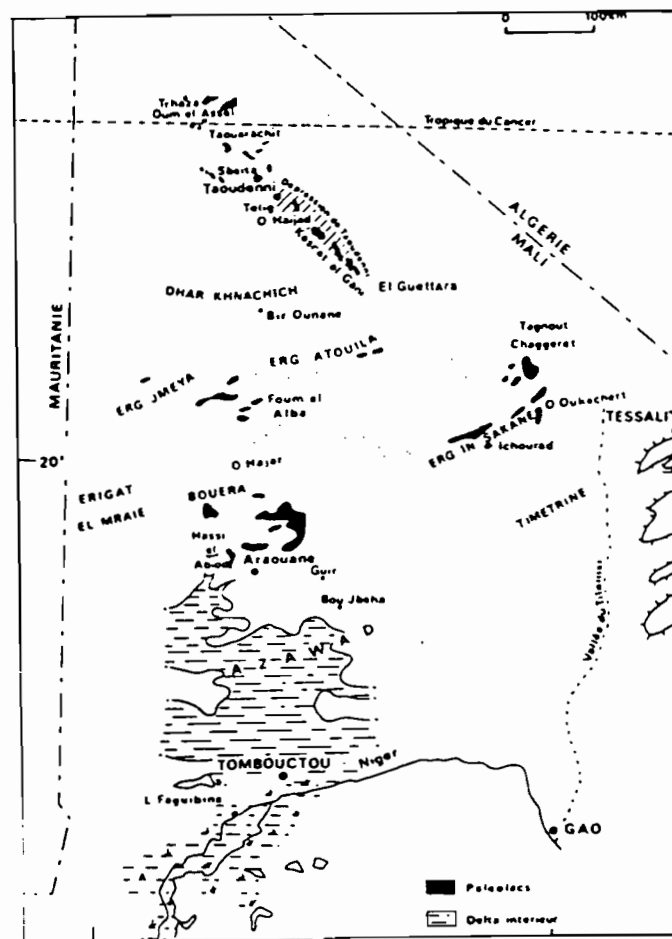


Fig.3.2.1 : Schéma des lacs holocènes au Sahara malien (Petit-Maire et al, 1987)

3.2.2 HYDROGRAPHIE

Au milieu d'un enchevêtrement de mayos en relation les uns avec les autres, entre les mares, les bras principaux, un fil conducteur du fleuve Niger peut être suivi à travers la cuvette lacustre (figure 3.2.2).

En amont de Ke-Macina, au niveau de Markala, l'Office du Niger a implanté un barrage afin de maintenir les basses eaux à une cote fixe et ainsi permettre une alimentation permanente des zones cultivées à l'aide du canal du Sahel, du canal du Macina et du canal du Sansanding (Autorité du bassin du Niger, 1982). En 1991, 60 000 hectares situés dans le delta mort étaient ainsi mis en culture.

Jusqu'à Mopti, les pertes en eaux correspondent à la défluence du Diaka (au niveau de Tilembeya), déversement en rive droite et gauche de plusieurs mayos. Ces déversements alimentent la région comprise entre le Niger et le Diaka.

Au même niveau, sur le Bani, les pertes entre Douna et Sofara sont dues à de véritables écoulements direction N-NE du Bani vers le Niger à travers la zone de Djenne (Auvray, 1952, Gosseye, 1989) également appelée la "mésopotamie".

Les fleuves Niger et Bani sont pseudo-parallèles en amont de Mopti mais ne se rejoignent réellement que 2 km en aval de cette ville. Un passage a été creusé à travers la butte les séparant afin que les pirogues navigant sur le fleuve Niger puissent rejoindre plus rapidement le port de Mopti.

A 25 km en aval, en rive gauche, part le mayo Dembe qui rejoint le Walado et le lac Debo. Depuis le mayo Dembe, s'échappe le mayo Raneo. Ces chenaux sont suffisamment larges pour permettre la navigation.

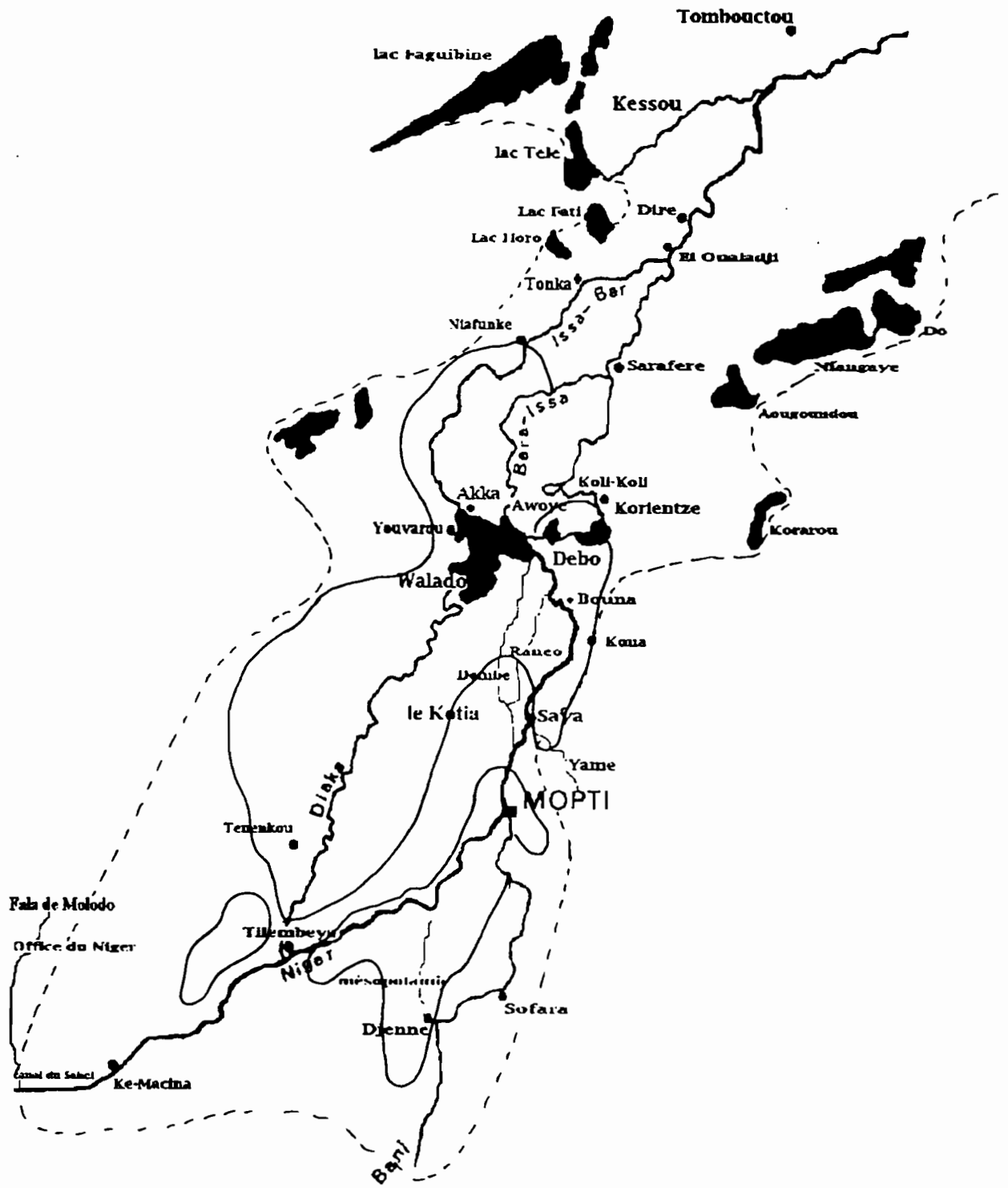
A l'est du fleuve Niger se situe le plateau Dogon. Les pluies tombant sur ce massif montagneux se réunissent pour former le Yame qui se jette dans le Niger au niveau de Saya (Blanck, 1987). Cet apport représenterait à peine 2 % du module à Nantaka (Brunet-Moret et al, 1986).

Au niveau de Bouna, se situe un seuil constitué de passes de graviers et de cailloux. Entre ce village et le lac Debo l'enchevêtrement des canaux est important et la végétation abondante. Parallèlement, le Diaka se jette dans le Walado-Debo, lac situé au sud-ouest du lac Debo et en communication directe avec celui-ci.

Trois défluent sortent du lac Debo.

A l'est, les lacets du Koli-Koli montrent que des dunes fixes EW forment un écran à la pénétration des eaux vers le nord. Ce bras très tortueux forme le lac de Korientze. Du fait de bords abrupts, une partie de ce lac est toujours en eau.

Au centre du Debo part le Bara-Issa. Les plaines reliées à ce bras sont assez bien inondées durant la crue.



(ligne continue: limite actuelle de l'inondation; ligne pointillée: limite de l'inondation, 1955-1965)

Fig. 3.2.2 : Carte synthétique de l'hydrographie du delta central (échelle 1/2200000) (d'après Poncet et Troubat, 1994)

Les deux défluent se rejoignent en amont de Sarafere. Sur la rive droite apparaissent un grand nombre de lac. Les lacs Niangaye et Aougoundou sont alimentés directement par le Bara-Issa tandis que les autres lacs sont alimentés "en cascade" à partir du lac Niangaye. (fig.3.2.3, Brunet-Moret et al, 1986).

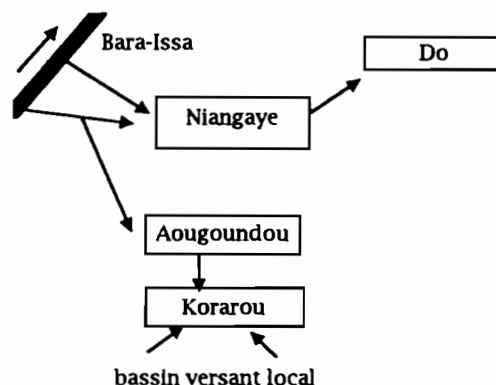


Fig.3.2.3 : Schéma du circuit d'alimentation des lacs de rive droite (d'après Brunet-Moret et al, 1986)

Tous ces lacs sont actuellement à sec.

Le chenal principal du fleuve Niger traverse le lac Debo et ressort au niveau de Akka sous le nom d'Issa Ber. C'est le seul des trois défluent à couler toute l'année. De Niafunke à Dire, les plaines de la rive gauche et droites sont très peu inondées.

An niveau de Tonka s'embranchent l'émissaire du lac Horo. Une vanne permet de régulariser les arrivées d'eau dans une grande zone de culture installée sur cette plaine.

Un peu en aval se situe le chenal menant au lac Fati, aujourd'hui presque à sec.

Plus en aval, vers El Oualadji, le Bara-Issa rejoint l'Issa Ber. Le fleuve arrive ainsi à Dire, fermeture du delta intérieur. Les autres lacs de la rive gauche dont le lac Faguibine, le plus important lac naturel de l'Afrique de l'Ouest, sont alimentés depuis la région de Kessou en aval de Dire. L'eau ne pénètre plus dans ces plaines et les lacs s'assèchent petit à petit. Durant les périodes d'optimum climatique, ces lacs peuvent représenter 10% des surfaces totales inondées (Brunet-Moret et al, 1986).

3.2.3 LIMITES ET MODALITES DE L'INONDATION

La pseudo-limite de la zone inondée (d'après cartes IGN de l'Afrique de l'Ouest au 1/200000, éditions de 1955 à 1960) a été déterminée en considérant l'ensemble de la zone d'expansion des eaux rattachées superficiellement au fleuve (Brunet-Moret, 1986) mais ceci bien avant la période de sécheresse qui sévit depuis 20 ans. La figure 3.2.2 présente les limites avant et après la période de sécheresse actuelle et les différentes parties de la cuvette.

Le delta intérieur se décompose en trois parties distinctes (Gallais, 1967, Autorité du bassin du Niger, 1982) :

⇒ le delta amont se situe au sud du lac Debo et est submergé régulièrement et de manière importante. Cette région représente la superficie inondée la plus importante de la cuvette lacustre.

⇒ le delta aval au nord du lac Debo est constitué de nombreux lacs mais ne subit pas aussi intensément l'inondation annuelle.

⇒ le delta mort est une dépression, ancienne vallée du Fala de Molodo actuellement exploitée par l'Office du Niger.

Actuellement, la plupart des lacs sont à sec, l'inondation dans le delta amont est de faible intensité. Dans le delta amont ou delta vif, la plaine du Kotia et l'est du Diaka sont les zones les mieux exposées aux inondations. La zone d'inondation permanente (toute l'année) représenterait 4000 km² (McCarthy, 1993).

L'inondation des plaines se fait de l'aval vers l'amont par déversement des eaux des mayos par dessus les levées. Durant la crue, les seuls terrains exondés sont les levées récentes, les toguere (buttes non soumises à l'inondation) sur lesquels sont bâtis les villages, les buttes gréseuses de l'Aïre Soroba, l'Aïre Kadiel et l'Aïre Gourao vers le lac Debo (Courel, 1992).

Mais les modalités de remplissage des différentes plaines 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 plaines, effet de barrage dû à des levées, action de la végétation flottante (Bertrand, 1976). Ainsi, il semble qu'une partie des mayos de la région du Kotia soit alimentée, une partie de l'année du moins, à partir des lacs Debo et Walado à la suite d'un rehaussement de l'entrée sud de leur chenaux d'accès (com.pers. Troubat, Poncet). Certains mayos ou bras plus importants comme le Koli-Koli peuvent couler dans les deux sens selon l'état de l'inondation. L'inversion du courant se fait au minimum de l'étiage.

3.2.4 RELATIONS AVEC L'AQUIFERE

Le Quaternaire de la zone inondée a subi de nombreuses altérations au cours du temps sous l'impact des changements climatiques. Les sols du bassin intérieur sont essentiellement des sols hydromorphes, des sols ferrugineux tropicaux lessivés, ou peu lessivés. Les sols hydromorphes ont un caractère lié à l'excès d'eau (pseudo-gley et gley) (Casenave et Valentin, 1989, Leprun et Olivier da Silveira, 1992) et aux battements de la nappe superficielle. Dans les formations interdunaires, les sols sont enrichis en argiles et limons. Les sols favorisés du bétail, à l'intérieur de la boucle, sont enrichis en sels. Ils se sont développés sur les formations doléritiques.

Les sols sont composés de kaolinite, illite, montmorillonite (Censier et al, 1994) et de quartz fins (McCarthy, 1993). Ce caractère argileux dominant ne permet pas les échanges réguliers entre l'eau de surface et les nappes du Crétacé supérieur/Eocène inférieur et du Continental Terminal/Quaternaire. Les transferts d'eau sont limités et ne semblent être importants que

dans les régions où l'inondation s'étend au-delà du lit mineur, augmentant la surface d'infiltration.

C'est, à partir des plaines inondées les plus périphériques, des lacs remis en eau et pendant l'étal de la crue que se produit une possible infiltration (Guerre et Aranyossy, 1989). Les formations quaternaires ne sont en liaison entre elles que dans les zones inondables.

La recharge par infiltration directe des eaux de pluie est également faible. La recharge se fait localement dans les mares et les bas-fonds où le temps de résidence de l'eau est important (Guerre et Aranyossy, 1989).

L'évaporation sur la nappe est d'autant plus importante que celle-ci est moins profonde. Une grande partie de la recharge par les eaux de surface et par l'infiltration locale serait reprise par l'évaporation.

Les relations avec l'aquifère seront précisées grâce aux études physico-chimiques et isotopiques.

3.3 HYDROLOGIE DE KE-MACINA A DIRE

3.3.1 LE DELTA VIF

Cette appellation regroupe les régions de l'entrée du delta à Ke-Macina jusqu'en amont du lac Debo.

Les pertes en eau enregistrées à travers la cuvette lacustre sont importantes. Selon, les années, c'est de 13 à 47 % des volumes d'eau qui disparaissent entre Ke-Macina et Dire.

3.3.1.1 Ke-Macina

La chronique des hauteurs d'eau à la station de Ke-Macina débute en 1953. L'hydrogramme de crue ressemble à celui de Koulikoro, 337 km en amont.

Les pertes entre ces deux stations vont de 6 à 12 % selon les années, les plus fortes pertes étant enregistrées lors des années déficitaires.

L'hydrogramme de Ke-Macina montre des minima et des maxima moins accentués. Les mois de septembre et octobre représentent plus de la moitié de l'écoulement annuel et les mois de juillet à septembre près de 75 % du total.

Le maximum s'établit au début du mois d'octobre (tableau 3.3.1). Le minimum se produit à la mi-mai.

La décrue, comme la crue, est régulière et l'hydrogramme est symétrique.

Le module interannuel sur la période 1940 à 1992 est de $1193 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La chronique des modules de 1924 à 1992 pour les stations principales du delta est reportée sur la figure 3.3.1.

3.3.1.2 Kara

La station de Kara se trouve à l'entrée du Diaka, le plus important défluent du Niger. Ce bras rejoint le cours d'eau principal du Niger au niveau du lac Debo via le Walado.

La liaison entre le Niger et le Diaka se fait par un seuil marqué avec arrêt net de la circulation de l'eau dès une hauteur minimum atteinte. La date moyenne sur la période 1948-1992 du début de l'arrêt de l'écoulement se situe au 25 mars. Il y a une rupture à partir de 1968, date à partir de laquelle l'arrêt de l'écoulement est toujours antérieur au 25 mars. En 1992, le débit de ce bras a été nul de la mi-février à la mi-juin.

Le maximum est enregistré au début du mois d'octobre. Les mois de septembre à octobre représentent 67 % du total annuel (en 1992).

Le module interannuel sur la période 1940-1992 est de $373 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ce qui veut dire que 31% du débit annuel du Niger s'échappe vers le Diaka.

ETUDE DES DATES MAXIMUM DES CRUES					
STATION	période	moyen.	min.	max.	limite de la période à 60% d'occurrence
KE-MACINA	1952-92	1 octobre	9 sept.	29 nov.	19 sept-12 oct
DOUNA	1922-92	24 septembre	14 août	21 oct.	16 sept-1 oct
NANTAKA	1943-92	24 octobre	26 sept.	3 déc.	9 oct-2 nov
AKKA	1955-92	16 novembre	15 oct.	20 déc.	29 nov-5 déc
DIRE	1953-92	30 novembre	27 oct.	7 janv.	4 nov-26 déc

Tableau 3.3.1 : Dates moyennes, les plus précoces et les plus tardives des maximum de crue des stations du delta

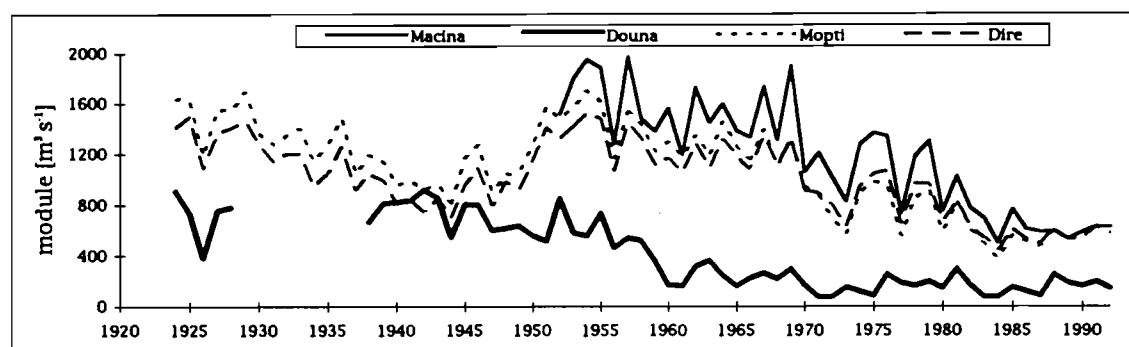


Fig.3.3.1 : Chronique des modules de 1924 à 1992 pour les stations du delta

stations	années	module interannuel	mois d'écoulement max.	% des apports
KE-MACINA	1940-92	1193	juillet à septembre	75
KARA	1940-92	373	septembre à octobre	67
NANTAKA	1923-92	1093	août à novembre	52
AKKA	1985-92	556	août à décembre	84
AWOYE-KORIE	1987-92		octobre à novembre	>50
DIRE	1924-92	1009	octobre à novembre	40

Tableau 3.3.2 : Modules interannuels ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) et part relative des mois de crue par rapport à l'écoulement annuel pour les stations du delta

3.3.1.3 Nantaka-Mopti

La station de Mopti se situe sur le Bani. La station de Nantaka a été installée 3 km en aval après la confluence entre le Niger et le Bani. Une bonne corrélation existe entre ces deux stations. Les jaugeages pour l'établissement de la corrélation hauteur-débit de la station de Mopti se font au niveau de Nantaka. Les débits de Mopti représentent donc ceux du Niger et du Bani.

La forme de l'hydrogramme dépend du décalage qui existe entre les crues des deux fleuves. La date moyenne du minimum d'écoulement, sur la période 1948-1992, est le 21 mai. Les débits d'étiages sont rarement inférieurs à $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et sont donc plus élevés que ceux du Niger en amont plus le Bani. La vidange des plaines inondées et de la nappe superficielle en aval joue un rôle important, durant une partie de la saison sèche, dans le soutien des étiages.

Les hauteurs d'eau les plus importantes sont relevées vers le 20 octobre. Comme pour la station de Kara, on constate que cette occurrence est de plus en plus précoce depuis 1977. Ce décalage temporel est dû au décalage de la saison des pluies sur le bassin amont.

Les mois d'août à novembre représentent 52 % de l'écoulement total.

Le module interannuel pour la période 1923-1992 est de $1093 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

3.3.2 LE DELTA AVAL

Les trois défluent du lac Debo sont dotés d'une station. Pour ces trois stations et pour la station de Nantaka, la corrélation entre les hauteurs lues aux échelles et les débits calculés n'est pas simple. Lorsque la pente moyenne du bief devient inférieure à 5 cm km^{-1} , apparaît le phénomène de non bi-univocité (Lamagat, 1983). Le débit se calcule alors à l'aide de plusieurs paramètres propres à la section de jaugeage et avec les hauteurs d'eau des jours précédents et suivants. Ces étalonnages délicats nécessitent un grand nombre de jaugeages et une surveillance de l'évolution de la section étudiée. Ceci n'est pas le cas pour les trois défluent du Debo étant donné leur éloignement des centres de mesures et leur difficulté d'accès. Les débits calculés sont donc moins précis que sur les stations amont.

3.3.2.1 Akka

Cette station est implantée à la sortie du lac Debo sur l'Issa Ber.

Les débits minimum sont enregistrés à la fin mai. L'hydrogramme montre une décrue, comme une crue, relativement lente.

La date moyenne des hauteurs maximales est le 16 novembre. Après 1977, cette date se situe plutôt au début du mois de novembre.

Pendant les mois d'août à décembre, il s'écoule 84 % du débit annuel moyen.

Le module interannuel, de 1984 à 1992, est de $556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

3.3.2.2 Autres défluent du lac Debo

Deux autres défluent traversent l'Erg de Niafunke. La station de Awoye est placée sur le Bara Issa, la station de Korientze sur le Koli-Koli. Les relevés de hauteurs d'eau sont récents et irréguliers.

Le Bara Issa s'arrête de couler de mi-février à mi-juillet. Les eaux du Koli-Koli s'arrêtent de couler pendant sept mois et le sens de l'écoulement peut même s'inverser. Pour ces deux stations, les mois de octobre et novembre représentent plus de 50 % du débit annuel.

Durant l'année 1992, les modules à Akka, Awoye et Korientze étaient respectivement de 592, 64 et 26 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ soit 87 %, 9 % et 4 % des sorties du lac Debo. Ces rapports passent de 80 à 89%; 12 à 10 % et 10 à 3 % selon les périodes sèches ou humides (Olivry, 1994a).

3.3.2.3 Dire

Après 500 km à travers le delta, les écoulements à Dire montrent un hydrogramme aplani. Cette station est placée sur l'Issa Ber après sa confluence avec le Bara Issa.

La date moyenne du minimum pour la période de 1924-1992 est le 12 juin. La date moyenne du maximum pour la même période est le 30 novembre. Depuis le milieu des années 1970, les hauteurs maximales sont observées vers le début du mois de novembre. Les mois d'octobre et novembre ne représentent que 40 % du total annuel.

Le module interannuel pour la période 1924-1992 est de 1009 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

3.3.3 EVOLUTION DES PENTES HYDRAULIQUES

Comme nous l'avons vu précédemment, une diminution de la pente hydraulique depuis Koulikoro est un des facteurs prédéterminants de l'inondation de la plaine centrale du Mali. Les figures du Bani (3.3.2) et du Niger (3.3.3) montrent l'évolution de la ligne d'eau en basses eaux (mars) et en hautes eaux (octobre) depuis Koulikoro jusqu'à Tossaye sur le Niger et de Douna à Mopti sur le Bani. On constate que les deux lignes sont parallèles. La première rupture de pente a lieu au niveau de Kirango. La deuxième au niveau de Nantaka. La ligne d'eau est pratiquement plane entre Akka et Dire. La pente reste faible jusqu'au seuil de Tossaye.

Pour le Bani, la rupture se fait au niveau du village de Sofara.

NIGER	koulikoro -Kirango	Kirango- Akka	Akka-Dire	Dire- Tossaye	BANI	Douna- Sofara	Sofara- Nantaka
[cm km^{-1}]	9.0	3.6	0.6	2		2.9	1.8

Tableau 3.3.3 : Evolution de la pente hydraulique en octobre 1990

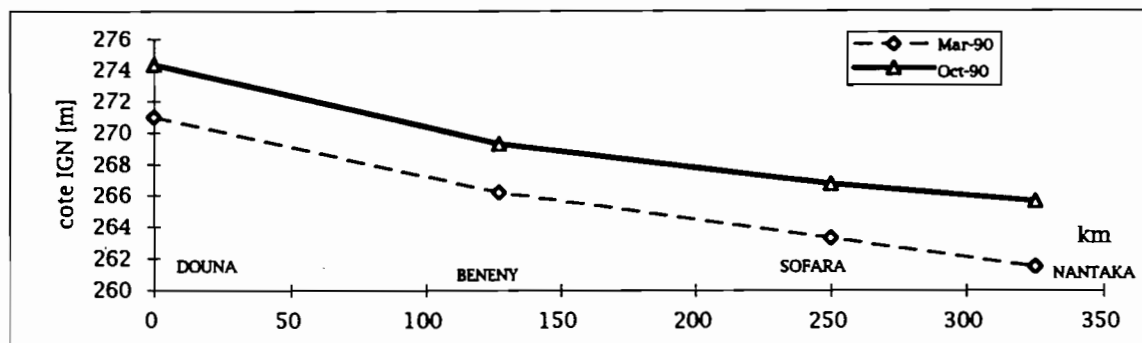


Fig. 3.3.2 : Evolution de la pente hydraulique du Bani en mars et octobre 1990

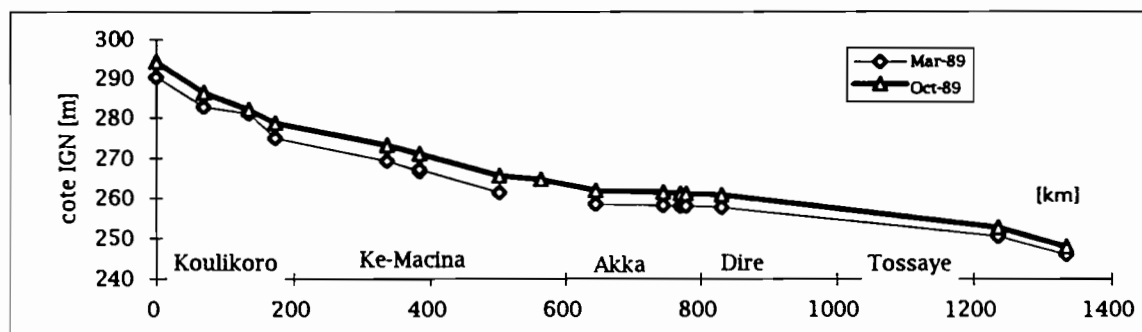


Fig.3.3.3 : Evolution de la pente hydraulique du Niger en mars et octobre 1990

3.3.4 PROPAGATION DE L'ONDE DE CRUE

Une des caractéristiques de l'hydrologie du delta est l'étalement des eaux qui entraîne un amortissement de la crue annuelle. Les hydrogrammes sont aplanis et le maximum de la crue se décale dans le temps.

L'inondation maximale se produit après la saison des pluies, ce qui indique que l'influence des précipitations du pseudo-bassin versant de la cuvette lacustre est nulle sur la formation de la crue.

Entre Ke-Macina et Nantaka		
Hmax [cm] à Ke-Macina	temps moy. [jour]	vitesse moy. [m s ⁻¹]
397 (min.)	3	0.58
398-550	12	0.14
550-650	19	0.09
650-719	29	0.06
720 (max.)	26	0.07

Entre Nantaka et Akka		
Hmax [cm] Nantaka	temps moy. [jour]	vitesse moy. [m s ⁻¹]
450 (min.)	11	0.14
451-550	22	0.07
550-650	26	0.06
650-730	31	0.05
731 (max.)	37	0.04

Entre Akka et Dire		
Hmax [cm] à Akka	temps mo. [jour]	vitesse moy. [m s ⁻¹]
336 (min.)	4	0.52
337-450	8	0.26
450-550	12	0.17
550-624	17	0.12
625 (max.)	15	0.14

Tableau 3.3.4 : Estimation du temps moyen du décalage de la crue et de la vitesse apparente moyenne de la crue pour la période 1953-1991

L'onde de crue se propage rapidement en amont puis ralentit dès son arrivée dans le delta. Une estimation du décalage de l'onde de crue et du temps de propagation de cette dernière a été faite pour la période 1953-1991.

Les calculs de la vitesse et du temps moyens de propagation sont basés sur l'évaluation du déplacement du point le plus haut de l'hydrogramme. Ce ne peut, en aucun cas, correspondre à la vitesse des eaux à travers le bassin intérieur.

Ceci montre que le temps moyen est plus important lorsque la crue est forte. Ceci est dû à un étalement et une dispersion plus forts des eaux. Dans le cas de crues très faibles, les eaux restent plus dans leur lit majeur et l'onde progresse plus rapidement. Les relativement faibles vitesses calculées entre Nantaka et Akka sont dues aux régions inondées en permanence comme la région du lac Debo. Les vitesses moyennes de l'onde de crue varient, de Akka à Dire, de 0,6 pour les faibles hauteurs d'eau à 0,04 m s⁻¹ au minimum lors des crues exceptionnelles. Par comparaison, les vitesses du courant calculées à Akka lors des jaugeages vont de 0,2 m s⁻¹ en août à 0,4 m s⁻¹ en novembre.

3.4 MODELISATION DES SURFACES INONDEES

3.4.1 PRINCIPE DU MODELE

Le modèle présenté ici a été développé par J.C.Olivry (1994a et b). Un autre modèle est étudié par Diarra (1992). Il est basé sur des calculs mathématiques sophistiqués mais reste actuellement peu performant. Un modèle simple utilisant comme entrées les pluies et les débits à Koulikoro et Douna et comme sorties l'évaporation et les débits à Tossaye a été utilisé par Sutcliffe et Parks (1989). Ce modèle estime les surfaces inondées d'après les volumes emmagasinés, comme pour les réservoirs (courbes surface-capacité). Le problème de ce calcul est la difficulté d'appréhension des volumes d'eau de la cuvette en raison de la variation de stockage. L'estimation des surfaces inondées à partir d'un volume d'eau est difficile à obtenir car la topographie de la région est très incomplète.

Le modèle « Olivry » (Olivry, 1994b) se base sur le bilan hydrique simple.

Le diagramme montrant les différences (en km³) des volumes d'eau entrés dans le delta (Ke-Macina + Douna) et sortis au niveau de Dire est établi pour une année à l'échelle mensuelle (figure 3.4.1).

A l'aide de ce diagramme et du diagramme des pertes cumulées (figure 3.4.2), on peut observer plusieurs phases dans le fonctionnement de l'inondation de la plaine du delta.

Au début de l'inondation, il y a de grandes pertes correspondant à l'évaporation et secondairement à l'infiltration et au stockage dans les lacs, mares et plaines. Le maximum de perte se situe, selon l'importance de la crue, entre septembre et octobre. Les eaux diminuent ensuite rapidement. Une partie des eaux piégées lors de la crue repart alors, indiquant des volumes "négatifs".

Olivry estime les pertes comme essentiellement dues à l'évaporation. L'analyse des données hydrogéologiques (chapitre 1.3) indique des infiltrations faibles. L'apport par précipitation est de même ordre que les pertes par infiltration. Le stockage et la restitution sont considérés, dans un premier temps, comme étant de même ordre de grandeur au moment de l'étalement de la crue. Le bilan se résume alors aux entrées à Ke-Macina et Douna, aux sorties à Dire et à l'évaporation. A partir de ces premières hypothèses, l'estimation de la surface moyenne inondée sur l'année est aisée. Mais les valeurs les plus utiles aux aménageurs et aux habitants de cette zone sont les valeurs mensuelles au moins. Le modèle a donc été adapté pour la détermination des surfaces inondées mensuelles, faute de pouvoir descendre à un pas de temps plus court de manière simple.

Sur le diagramme 3.4.3, on note qu'à un instant t , l'inondation ayant atteint son maximum il y a équilibre, c'est à dire ni stockage, ni déstockage. Les pertes, en ce point, correspondent alors à la seule évaporation. Ce point correspond au maximum de l'inondation représenté par la hauteur maximum à Nantaka, station qui se situe au centre du delta. Connaissant ainsi le volume d'eau perdu par évaporation et le taux moyen de l'évaporation sur cette région, il est possible de déterminer les superficies maximales inondées à cet instant.

Le modèle peut être amélioré en estimant les superficies durant les mois encadrant le maximum de l'inondation. Elles sont obtenues à partir d'approximations sur les pertes mensuelles par évaporation. Le bilan final des évaporations successives ainsi obtenues doit correspondre au total des pertes hydrologiques selon l'hypothèse émise plus haut.

3.4.2 RESULTATS

L'étude a été réalisée par Olivry (1994a et b) d'abord sur une période humide 1962 à 1966 et sur une période sèche 1982-1986. Le calcul des superficies maximales inondées a ensuite été effectué pour chaque année depuis 1954, date des premiers relevés à Dire et Douna (tableau 3.4.1). Les régressions obtenues entre les surfaces, les volumes des entrées, les pertes annuelles et les hauteurs maximales à Mopti-Nantaka sont de bonne qualité.

Toutefois, pour les années humides, les superficies semblent exagérées par rapport aux limites morphologiques de la cuvette.

Sans doute, lors des crues exceptionnelles, les zones rarement inondées, permettent-elles des infiltrations importantes. Plusieurs auteurs ont en effet noté la présence de régions sablonneuses dans les régions du nord-est de la cuvette et les zones très éloignées du lit majeur (Guerre et Aranyossy, 1989). Les lacs les plus éloignés ne reçoivent qu'occasionnellement des volumes d'eau qui peuvent rester piégés à la décrue. Du fait que les zones de piégeage d'eau sont plus grandes, l'évaporation sera plus forte. Les formations du Quaternaire reçoivent une certaine quantité d'eau qui pourra se décharger lentement.

Gallais (1967) note que le niveau de base local tend à baisser du fait de l'érosion des seuils avals (Tossaye) qui facilite l'évacuation.

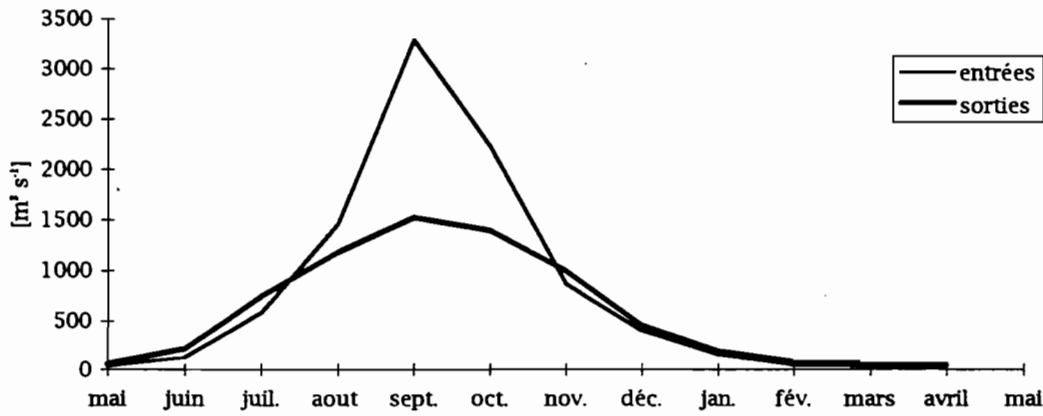


Fig.3.4.1: Hydrogramme des débits mensuels des entrées (Ke-Macina + Douna) et des sorties (Dire) en 1992-1993.

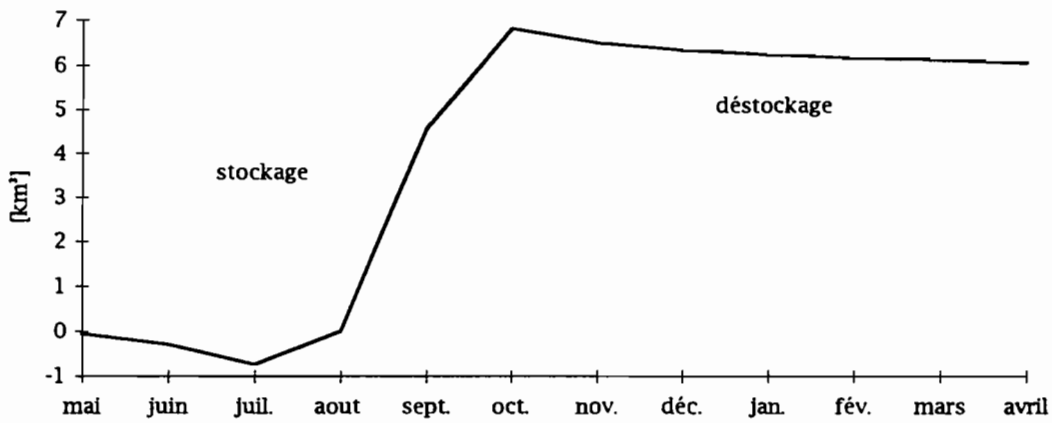


Fig.3.4.2: Courbe des pertes mensuelles cumulées en 1992-1993

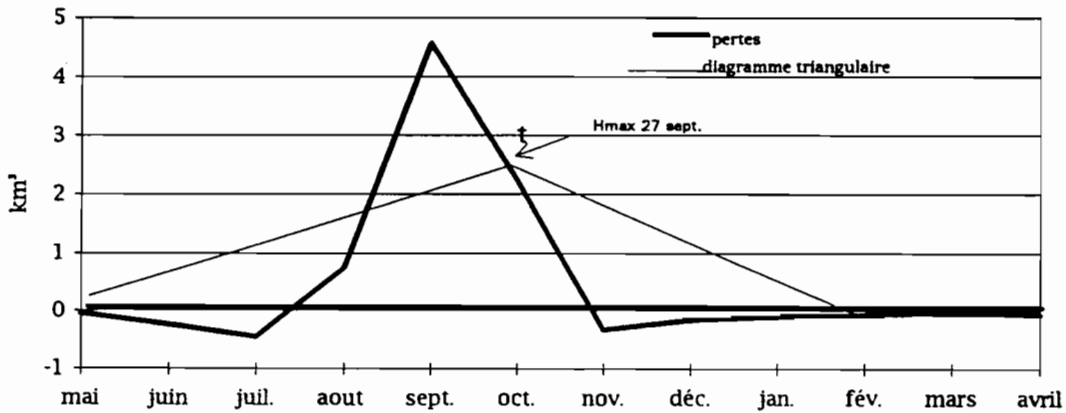


Fig.3.4.3: Exemple d'application du modèle, année 1992-93

année	entrées km ³	pertes km ³	Hmax. Mopti cm	Smax 10 ³ km ²	Sd _{≥4mois} 10 ³ km ²
1953	83.2	38.5	731	36	23.6
1954	90.7	42.7	731	43.2	27.2
1955	86.4	39.7	731	41.3	25.6
1956	57.2	23.7	686	30.3	16
1957	84.5	39.1	730	43.9	25.6
1958	70.1	29.1	703	39.6	19.8
1959	62.8	27.9	697	32.0	18.5
1960	68.7	32.3	697	33.6	20.8
1961	58.6	25.5	699	29.1	16.8
1962	72.1	31.9	706	34.3	20.8
1963	61.8	27.6	685	33.0	18.7
1964	77.2	35.6	716	33.0	21.8
1965	62.0	24.6	684	32.5	16.8
1966	59.1	24.9	686	29.8	16.8
1967	78.1	35.9	720	38.5	23.4
1968	55.6	20.3	651	24.3	13.5
1969	76.8	35.3	684	35.0	22.9
1970	49.8	20.9	658	29.9	14.2
1971	49.3	21.1	651	26.5	14.2
1972	37.4	12.4	665	22.4	7.5
1973	31.3	11.3	568	13.2	7.5
1974	50.0	20.2	650	31.0	12.8
1975	54.4	21.6	663	29.3	14.3
1976	50.1	16.4	623	32.2	9.2
1977	27.9	7.5	566	18.4	1.3
1978	44.0	13.6	620	27.0	6.6
1979	49.3	18.5	638	30.8	11.6
1980	32.0	10.8	592	18.7	6.6
1981	31.6	16.1	628	25.0	10.1
1982	29.7	9.1	551	19.7	3.9
1983	24.2	7.0	507	14.1	3.3
1984	18.0	4.1	440	9.5	1.1
1985	28.9	9.3	570	17.9	4.4
1986	23.0	6.3	534	16.8	0
1987	21.3	5.4	481	14.9	0
1988	26.7	7.2	571	14.8	3.2
1989	22.5	5.7	517	17.2	0
1990	24.0	6.9	510	14.5	2.9
1991	26.4	7.4	530	15.2	3.3

Tableau 3.4.1 : Résultats du calcul des surfaces maximales inondées, des surfaces minimales mises en eau pendant une durée de quatre mois en fonction des entrées (Ke-Macina+Douna), des pertes et en relation avec les hauteurs maximales observées à Mopti

Ainsi, pour un débit annuel identique, les surfaces inondées se réduisent: baisse du plan d'eau des lacs, incision dans les lits des affluents et érosion latérale. Malheureusement, il n'existe aucun relevé topographique actuel précis de seuil qui permettrait de quantifier cette baisse.

Notons que le modèle développé par Sutcliffe et Parks (1989) donne une inondation maximale de 47 000 km² en novembre 1954 qui s'accorde à la superficie obtenue avec le modèle Olivry qui est de 43 000 km² pour cette même année.

4. LE CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE ACTUEL

4.1 EVOLUTION RECENTE DES PRECIPITATIONS

L'analyse des séries pluviométriques de l'ensemble des stations de l'Afrique de l'ouest de l'origine des relevés à nos jours laisse apparaître une évolution récente depuis 25 ans vers un déficit pluviométrique (Sircoulon, 1976, Olivry, 1983, Fontaine et al, 1986). Si les variations n'ont pas cessé depuis l'installation des premières stations (en 1857 à Saint Louis du Sénégal et 1896 à Kayes au Mali), les prédictions basées sur la cyclicité des variations pluviométriques (Faure et Gac, 1981) n'ont jamais été vérifiées dans les faits (Lamb, 1982, Gac et Faure, 1987). Il existe une non-stationnarité de la série des hauteurs d'eau moyennes annuelles depuis plusieurs années (Sircoulon, 1976, Fontaine et Perard, 1986, Hubert et Carbonnel, 1986, Carbonnel et al, 1987, Vannitsem et Demarée, 1991, Carbonnel et Hubert, 1992, Nicholson et Palao, 1993).

Dans les régions soudano-sahéliennes, les hauteurs moyennes annuelles des précipitations baissent sensiblement depuis ces 25 dernières années. Cette période de déficit pluviométrique, la plus longue jamais connue en Afrique depuis le début des enregistrements (soit environ 1 siècle), est d'autant plus grave qu'elle pourrait coïncider avec un réchauffement global lié à l'augmentation des dégagements des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Mahé, 1993). Une amélioration récente est observée mais les moyennes annuelles restent inférieures à la normale (Olivry, 1993). Pour la station de Mopti, la date charnière de ce changement est 1971-1972 d'après Vannitsem et Demarée (1991) et 1972 pour Hubert et Carbonnel (1987).

Les mécanismes climatologiques responsables de la sécheresse se situent à une grande échelle. Plusieurs facteurs, en relation les uns avec les autres ont été mis en cause.

- réduction vers le nord du déplacement de l'ZITC (Nicholson, 1981, Janicot, 1992a, Fontaine et Janicot, 1992, Fontaine et Bigot, 1993, Nicholson et Palao, 1993).
- diminution de l'intensité de la circulation type Hadley (Janicot, 1992b).
- diminution de la vitesse du JET et augmentation de celle du JEA (Fontaine, 1986, Janicot, 1992b, Bayo Omotosho, 1992, Mahé et Citeau, 1993).
- renforcement de la circulation de l'Atlantique subtropical et blocage anticyclonique sur le NW de l'Europe (Leroux, 1987, Fontaine, 1991).
- affaiblissement de l'activité de l'Anticyclone de Ste Hélène et/ou renforcement de l'Anticyclone des Açores (Fontaine, 1986, Guillot et al, 1986, Fontaine, 1991, Mahé et Citeau, 1993)
- diminution de la température de surface des mers (SST)(Fontaine, 1991, Nicholson et Palao, 1993)

Sur le terrain, dans la région de la cuvette lacustre, les moyennes font apparaître une baisse des isohyètes vers le sud (figure 4.1.1). A Mopti, la hauteur annuelle moyenne est passée de 535mm à 415mm (Olivry et al, 1994a).

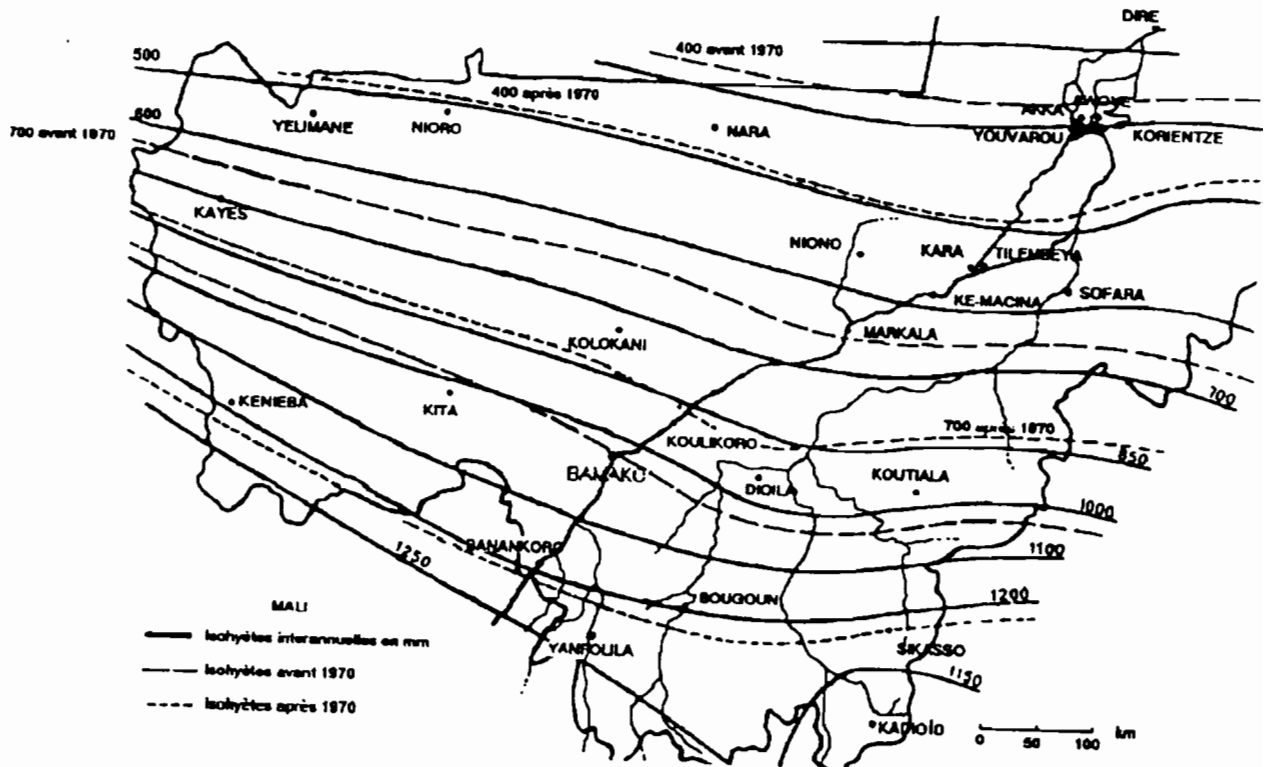


Fig.4.1.1: Isohyètes interannuelles moyennes, avant 70 et après 70 au Mali

4.2 CONSEQUENCE SUR LES ECOULEMENTS

4.2.1 EN AFRIQUE DE L'OUEST

Une diminution durable des précipitations sur les bassins versants des grands fleuves de l'Afrique de l'ouest entraîne une diminution des modules annuels, importante depuis ces 20 dernières années (Sircoulon, 1976, Olivry, 1983, Mahé et Olivry, 1991, Sircoulon, 1992).

L'évolution des écoulements en zone sahélienne depuis le début du siècle montre un premier minimum en 1913, suivi d'une période plus favorable de 1922 à 1936. Une autre période « humide » s'est insérée entre la sécheresse de 1937 à 1950 et la période actuelle (Sircoulon, 1992).

L'ensemble des fleuves de l'Afrique de l'ouest (Chari, Gambie, Sénégal, Niger, Benoue...) a enregistré une perte de $65 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la décennie 1981-1990, soit 24% de la contribution moyenne annuelle (Olivry et al, 1994a).

4.2.2 SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER

La sécheresse actuelle sur le Niger a commencé en 1968 avec un minimum en 1979 et un "minimum minimorum" en 1984 (Olivry et al, 1994a). Depuis cette date, le module le plus bas a été enregistré pour l'année 1989.

La chronique des débits moyens annuels décennaux du Niger à Onitsha (Nigeria) s'établit comme suit (Mahe et Olivry, 1991):

1951-60: 6770 m³ s⁻¹

1961-70: 6690 m³ s⁻¹

1971-80: 5390 m³ s⁻¹

1981-87: 4270 m³ s⁻¹

Sur l'ensemble de l'Afrique sèche (Sénégal, Gambie et Niger), le volume annuel des tributaires à l'océan Atlantique s'élevait, sur la période 1951-1990 à 235 km³. Pour la période 1971-1980, ce volume est de 205 km³ et il est de 170 km³ pour les années 1981-1990. Le déficit a doublé entre ces deux périodes alors que les précipitations sont moins déficitaires. Des étiages plus faibles traduisent un amenuisement des réserves souterraines des bassins fluviaux consécutif à un déficit pluviométrique chronique (Olivry, 1994a).

Les fluctuations récentes indiquent une diminution de moitié des ressources en eaux de surface.

4.2.3 L'HYPERTARISSEMENT

Le régime des basses eaux est très gravement affecté par la sécheresse actuelle. Les étiages absolus des deux dernières décennies sont les plus faibles alors que le barrage de Selingue mis en route en 1980 devrait soutenir ces faibles débits. L'arrêt de l'écoulement pour le Bani au niveau de Douna est systématique chaque année au mois de mai depuis 1985.

Durant les basses eaux, le ruissellement n'apporte plus son soutien aux débits. La ressource majeure est alors la vidange des nappes souterraines. Ceci est important pour la relation nappe-rivière comme nous le verrons plus tard.

Pour les cours d'eau tropicaux, la décroissance des débits suit une loi exponentielle du type:

$$Q_i = Q_0 \cdot e^{-\alpha(n-t_0)}$$

avec Q_i et Q_0 [m³.s⁻¹], débits aux instants t_i et t_0 [jour] et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère [jour⁻¹].

Le coefficient de tarissement est un bon indicateur du régime hydrologique des fleuves.

L'étude du tarissement a été faite par Olivry et al (1994a) à partir des données de la station de Koulikoro (bassin versant 120 000 km²) qui présente les plus longues chroniques (début en 1907). L'observation du coefficient α montre une bonne régularité jusqu'aux années 1972-1973 (figure 4.2.1). Les années plus récentes marquent une remontée brusque des valeurs. Le coefficient est passé de 0,028 j⁻¹ à 0,04 j⁻¹ depuis les années 90. Notons que pour

les années récentes, les calculs sont faits à partir de la station de Banankoro qui n'est pas affectée par la régulation artificielle faite au niveau du barrage de Selingue.

Le coefficient de tarissement du Bani passe de $0,03 \text{ j}^{-1}$ à la fin des années 1970 à $0,04 \text{ j}^{-1}$ à la fin des années 1980.

Le coefficient traduit bien l'accentuation de la faiblesse des étiages due au cumul des déficits pluviométriques depuis une vingtaine d'année. Ce sont les ressources en eaux souterraines qui s'amenuisent actuellement.

Olivry (1977) a montré la relation qu'il existe entre le coefficient de drainage des bassins du Cameroun et le coefficient de tarissement moyen. L'augmentation du coefficient α semble être principalement due à une réduction de l'extension des aquifères et de la largeur des nappes de versant.

Il apparaît que c'est la zone non-saturée des aquifères qui joue un rôle majeur dans la réalimentation des nappes. Cette zone est soumise à une évaporation forte et une bonne partie des apports peut rester "piégée" dans cette couche et ainsi ne pas participer à la recharge de la nappe. Cette zone non-saturée augmente chaque année sous l'effet de la dépression de la nappe phréatique.

La sécheresse entraîne une diminution des infiltrations dans la nappe amont et ainsi une réduction de l'extension de la nappe.

Comme souligné par Olivry (1983), Gac et Faure (1987), et Olivry et al (1994a), un retour à des écoulements plus importants nécessite d'abord une recharge des aquifères. Ceci explique le décalage entre les chroniques de pluviométrie et des écoulements (Sircoulon, 1992).

Cette accélération des coefficients de tarissement peut s'expliquer par une décharge actuelle de la nappe alors qu'il y avait avant la période sèche un équilibre entre les eaux du fleuve et de la nappe.

Ainsi, après un éventuel retour vers un climat plus favorable, il faudra plusieurs années pour que les cours d'eau du Niger et du Bani retrouvent les modules qu'ils avaient, il y a seulement une vingtaine d'année.

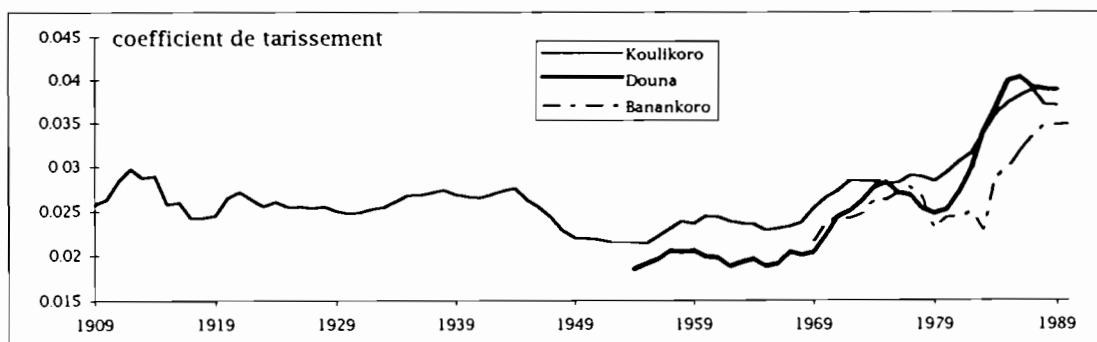


Fig.4.2.1: Coefficients de tarissement à Koulikoro, Douna et Banankoro de 1909 à 1990

2ème partie

PRELEVEMENTS ET ANALYSES



INTRODUCTION

Le milieu étudié concerne la partie malienne des bassins du Niger et de Bani et la cuvette lacustre jusqu'à Dire. Les multiples bras, mayos, mares interconnectés ont un mode de fonctionnement qui dépend de la hauteur, de la durée de la crue et de sa variabilité interannuelle.

Le choix des sites d'observation impliquait de connaître l'hydrographie du réseau principal afin de sélectionner des stations représentatives des flux hydriques totaux. Le nombre de stations dépendra de la variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques étudiés.

La fréquence de mesures se base sur les premières informations de l'évolution des caractéristiques de l'eau au cours de la crue.

Après quelques analyses, il s'est avéré que les concentrations en éléments dissous et en suspension (la limite entre ces éléments (minéraux et organiques) est fixée arbitrairement à $0,22 \mu\text{m}$) étaient faibles. Ceci oblige à utiliser des méthodes les plus précises possibles, avec une séparation du dissous et du particulaire par filtration à $0,22 \mu\text{m}$.

Par ailleurs, si l'évolution des éléments chimiques dissous est régulière, celle des matières en suspension est plus brutale et mérite donc un plus grand contrôle.

L'étendue et les difficultés d'accès de la zone nécessitent de rechercher un protocole de mesure fiable se basant sur un nombre de stations et de prélèvements restreint. Pour cela, il est important de vérifier la qualité des mesures et les variations aléatoires dues à des événements temporaires de courtes durées (passages d'animaux, bloom planctonique, pollution chimique par les lessives...).

Les flux annuels sont calculés à partir des valeurs de concentrations multipliées par les débits et le temps.

L'analyse des résultats (écart-type, coefficient de variation, limites des méthodes de mesure) est indispensable car elle va permettre non seulement le choix d'une méthode appropriée et la fréquence des prélèvements mais également une critique des résultats obtenus.

5. MISE EN PLACE DU RESEAU D'OBSERVATION

5.1 CHOIX DES SITES D'OBSERVATION

5.1.1 LES STATIONS HYDROLOGIQUES

Les points d'échantillonnage ont été choisis afin qu'ils couvrent l'ensemble du bassin et de manière à ce qu'ils soient à proximité d'une échelle limnimétrique étalonnée dont les relevés quotidiens sont faits par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali. Le positionnement des sites d'observation est le suivant: (figure 5.1.1)

BASSIN AMONT:	Banankoro (Niger) Koulikoro (Niger)
ENTREES DELTA CENTRAL:	Ke-Macina (Niger) Sofara (Bani) Douna (Bani)
SEPARATION DIAKA-NIGER:	Kara (Diaka) Tilembeya (Niger)
CONFLUENCE NIGER-BANI:	Nantaka (Niger)
SORTIES DU LAC DEBO:	Akka (Issa Ber) Awoye (Bara Issa) Korientze (Koli-Koli)
SORTIE DELTA CENTRAL:	Dire (Niger)

La station de **Banankoro** contrôle les apports amont du Niger parvenant au Mali. La station est située à quelques kilomètres de la frontière avec la Guinée.

La station de **Koulikoro** a été choisie en raison de sa chronique de hauteurs d'eau ininterrompue depuis 1907. Cette station réunit les eaux du Niger et celles du Sankarani. A l'étiage, le Sankarani est majoritaire puis devient négligeable durant la montée des eaux lors du remplissage du lac de retenue.

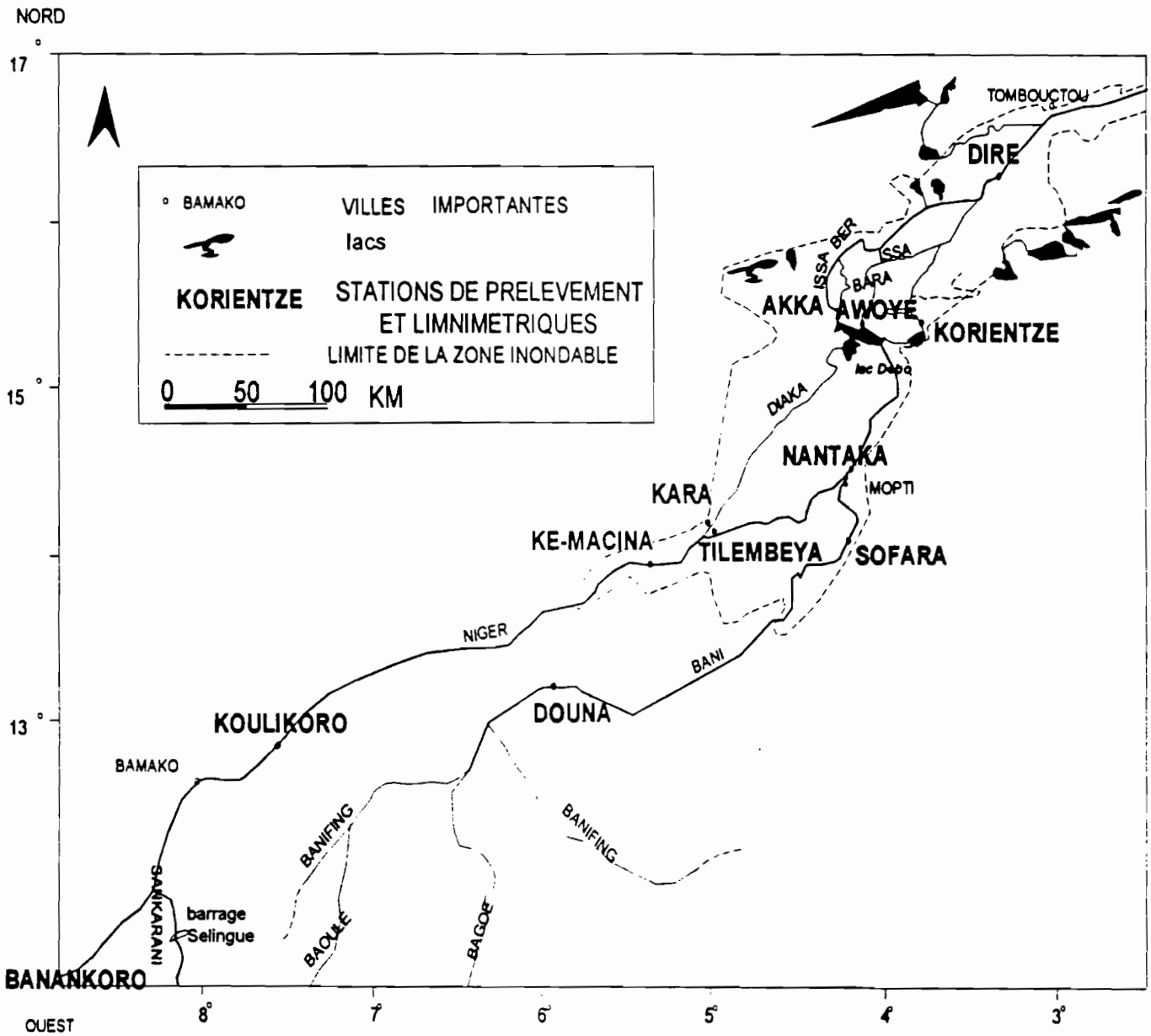


Fig.5.1.1 : Carte de positionnement des stations de prélèvements hebdomadaires

L'entrée du delta est représentée par la station de *Ke-Macina* sur le Niger et de *Sofara* sur le Bani. Les débits mensuels montrent de fortes pertes entre les stations de *Douna* et de *Sofara*. Il semble que ces pertes partent en direction du Niger à travers la "mésopotamie" pour se jeter en aval de *Ke-Macina*. Les entrées représentées par *Ke-Macina* et *Sofara* ne contiendraient pas la totalité des eaux arrivant au delta. C'est pour cette raison que la station de *Douna* sera préférée pour représenter les apports du Bani au delta.

A la station de *Dire* passent toutes les eaux ayant traversé le delta.

Pour permettre de découper le fonctionnement hydrologique du delta entre les régions aval et amont du lac Debo, des stations intermédiaires ont été prises en compte.

Le premier défluent du Niger est le Diaka. La station de *Kara* permet l'enregistrement des eaux partant vers les plaines du Kotia. Les eaux demeurant dans le bras majeur du Niger passent à *Tilembeya*.

Nantaka réunit les eaux du Niger et du Bani juste après leur confluence.

Les eaux qui s'écoulent ensuite dans de multiples mayos, mares, se jettent toutes dans le lac Debo. De là sortent trois bras passant par les villages de *Akka*, *Awoye* et *Korientze*.

Les distances entre ces stations (tableau 5.1.1) ont été déterminées depuis un point 0 situé dans le delta maritime du Niger, au Nigeria. C'est l'Autorité du Bassin du Niger qui, à partir de photographies aériennes au 1/50000 a établi les points kilométriques (pK). La liste des pK pour toutes les stations et les villes importantes est reportée en annexe 3.

STATIONS	D. partielle [km]
BANANKORO-KOULIKORO	172
KOULIKORO-KE-MACINA	337
KE-MACINA-TILEMBEYA	47
TILEMBEYA-NANTAKA	118
DOUNA-SOFARA	247
SOFARA-NANTAKA	77
NANTAKA-AKKA	141
NANTAKA-AWOYE	125
NANTAKA-KORIENTZE	135
AKKA-DIRE	186

Tableau 5.1.1 : Estimation des distances partielles pour les stations d'observation

5.1.2 LES SITES DE PRELEVEMENTS DE POUSSIÈRES

Deux collecteurs de poussières ont été placés dans la région inondée, en amont du lac Debo, à 45 km au nord de Mopti sur le site de la mare de Sare Mama appelé "Batamani" et sur la rive ouest du lac Debo à Youvarou. Le site de Batamani est au coeur du delta vif, entouré de mares à bourgous, de champs de mil et de riz. Youvarou se situe en bordure du delta aval, près d'une région désertique s'étendant vers la frontière de la Mauritanie.

Lors d'études préalables, un collecteur identique avait été installé à Banankoro par A.Novikoff. Les relevés ont été repris par le service hydrologique depuis février 1993.

5.1.3 CAMPAGNES PONCTUELLES

Pour compléter les observations hebdomadaires, des campagnes ponctuelles vont permettre d'échantillonner des stations intermédiaires, de multiplier le type de prélèvement et réaliser des jaugeages.

5.1.3.1 Stations amont

Depuis 1990, des tournées sont régulièrement organisées sur les stations amont de Banankoro, Douna et Koulikoro. La proximité d'axes routiers permet d'accéder en voiture au bord du fleuve. Un Zodiac® ou une pirogue sont équipés du matériel de jaugeage et de prélèvement par pompage des échantillons.

Depuis octobre 1991, le même protocole est utilisé sur les stations de Kara, Tilembeya et Ke-Macina.

Ces tournées se font tous les mois en période de crue ; leur fréquence est réduite pendant les basses eaux (2 à 3 tournées).

5.1.3.2 Stations aval

A partir de novembre 1991, des tournées régulières ont été organisées dans le delta de Nantaka jusqu'à Dire.

La première mission, qui a permis la mise en place du réseau d'observation, s'est déroulée en novembre 1991. La pirogue est partie de Mopti et a descendu le Niger jusqu'à la défluence du mayo Dembe. Ce mayo a été suivi jusqu'au lac Debo. L'équipe a opté pour le Bara Issa, puis l'Issa Ber jusqu'à Dire. Le retour c'est fait sur l'Issa Ber puis le Niger (cf cartes 5.1.1) jusqu'à Mopti.

Les missions organisées en mars et juillet 1992 se sont déroulées sur des pinasses de location également. Les faibles hauteurs d'eaux n'ont pas permis la descente du Bara Issa. L'embarcation a donc suivi le chemin, Mopti-lac Debo par le Niger, Akka-Dire par l'Issa Ber. En juillet, une incursion jusqu'à la station de Awoye a été possible malgré le bourgou bloquant l'entrée du Bara Issa.

Depuis novembre 1992, les missions se font à bord d'une pinasse de l'ORSTOM (l'«Ekwa Neem ») aménagée spécialement pour les mesures hydrologiques dans le delta.

La tournée de novembre 1992 a suivi le trajet Mopti-lac Debo par le Niger, Awoye-Dire par le Bara Issa, Dire-Akka par l'Issa Ber, Youvarou-Kara par le Diaka, Tilembeya-Mopti par le Niger.

Les tournées de février, juillet et août 1993 ont suivi le Niger jusqu'au lac Debo puis l'Issa Ber jusqu'à Dire, le retour se faisant par le même trajet.

Durant les hautes eaux, en septembre et novembre, il a été possible de passer à l'aller par le Bara Issa.

Trois courtes missions ont permis d'atteindre la mare de Batamani en septembre 92, février et avril 93.

5.2 PRELEVEMENTS

5.2.1 FREQUENCE DES PRELEVEMENTS

Durant la période de juillet 1990 à juillet 1991, les prélèvements d'eau ont été effectués lors des tournées des hydrologues du projet « EQUANIS » (ORSTOM-CNRST) et, pour une part, lors des tournées hydrobiologiques du projet "Delta Central du Niger" (ORSTOM-IER). Ces missions à travers le delta se faisaient à une fréquence décadaire ou mensuelle.

A partir de novembre 1991, un observateur a été recruté dans chacun des villages avec pour mission de relever les hauteurs d'eau aux échelles et de prélever un échantillon chaque semaine. A Youvarou et Batamani, l'observateur est chargé de la mesure chaque semaine des collecteurs de poussière.

Le travail n'a pas été interrompu depuis cette période et continuera.

5.2.2 TYPE DE PRELEVEMENT

L'eau a été collectée sur chacune de ces stations en amont des villages dans des bouteilles en plastique de 0,9 litre. Les prélèvements se font au milieu du cours d'eau à une profondeur de 60 cm soit la longueur d'un bras. En hautes eaux, l'eau est collectée depuis une pirogue en bois. Sur certaines stations, selon les saisons, les faibles hauteurs d'eau permettent à l'observateur d'aller à pied jusqu'au centre de la section. A partir de juillet 93, le nombre d'échantillons hebdomadaires est passé de 1 à 2 ou 3 selon la largeur de la section du fleuve et l'importance des stations. Les prélèvements se font alors en rive droite, rive gauche et milieu (Akka, Dire) ou au 1/3 de la rive droite et 1/3 de la rive gauche (Awoye, Korientze, Nantaka, Sofara).

Pour les poussières atmosphériques, l'observateur nettoie le collecteur à l'aide d'une pissette remplie d'eau filtrée à 0,22 μm . L'eau ainsi récoltée est conservée dans des flacons plastiques de 0,9 litres. Durant la saison des pluies, les averses sont collectées dans un grand récipient et mélangées à l'eau du nettoyage hebdomadaire.

Les échantillons portent l'inscription du nom de la station et de la date du prélèvement. Les bouteilles sont conservées chez les observateurs jusqu'au passage d'un des membres de l'équipe du service hydrologique.

5.2.3 PRELEVEMENTS POUR LA CHIMIE, ISOTOPES, COD ET COP.

L'eau pour les analyses chimiques est recueillie au milieu du fleuve à 60 cm de profondeur dans des flacons en plastique de 0,9 l. Un prélèvement est fait chaque semaine sur les stations choisies. Lors des campagnes, des échantillons supplémentaires sont recueillis. Ces prélèvements se font depuis la pinasse, le plus possible dans le courant et en amont des villages. Les sites choisis sont espacés régulièrement le long du Niger : Saya, M'Bouna, lac Debo, Sah, Bougouberry, Bala-Maounde, Niafunke, Sebi. A partir d'avril 1993, l'eau a été filtrée immédiatement grâce à un dispositif Nalgène®. Un double non filtré est également amené à Bamako.

Lors des jaugeages sur les stations de Nantaka, Batamani, Kona, Awoye, Sarafere, Dire, Tonka, Akka, un échantillon supplémentaire est prélevé sur la verticale du milieu du fleuve à 60 cm à l'aide de la pompe.

Des prélèvements de 20 ml d'eau pour les analyses isotopiques se font au niveau des sites jaugés.

Des filtrations pour la détermination particulière du COD et COP sont réalisées avec le même dispositif. Un volume de 1 litre est passé sur une membrane Whatman® GF/C (0,45 µm) préalablement passée au four à 550°C, 20 ml d'eau sont recueillis dans un flacon en verre puis rapidement empoisonnés avec 10 µl de HgCl₂. Un volume identique est passé sur une membrane en fibre de verre pour l'analyse des composés phénoliques.

Pendant la saison des pluies, un pluviomètre a été installé sur le toit du bateau afin de récupérer les eaux de pluies.

5.2.4 PRELEVEMENTS POUR L'ANALYSE DES MATIERES EN SUSPENSION

La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation du débit de la charge solide consiste à procéder comme pour la mesure d'un débit liquide (Billon, 1968, Molinier, 1979, Olivry et al, 1988).

Les jaugeages ont été entrepris depuis 1990 sur les stations de Banankoro, Koulikoro et Douna.

En novembre 1991, les mesures de débits solides par jaugeages ont commencé aux stations de Ke-Macina, Kara, Tilembeya, Nantaka, Awoye, Akka et Dire.

Des jaugeages systématiques sont faits sur les stations de Nantaka, Batamani, Kona, Dire, Tonka et Akka depuis novembre 1992.

Awoye, Sarafere et Tenenkou sont étudiés en hautes eaux uniquement.

La vitesse du courant est relevée et des prélèvements d'environ un litre sont faits en un certain nombre de points, répartis sur plusieurs verticales. Une fois la détermination des concentrations en matières en suspension (inorganique et organique) sur chaque point faite, on porte sur chaque verticale le produit concentration * volume en fonction de la profondeur. La surface des paraboles ainsi obtenues permet la détermination des débits

solides par unité de largeur dans la section qs. L'intégration de ces débits unitaires le long de la section donne le débit solide total Q_s .

$$Q_s = \int_0^L \int_0^P q_s * dl . dp$$

l : abscisse de la section

L : largeur de la section

p : profondeur

P : profondeur totale de la verticale

Les dépouillements se font à l'aide du logiciel ORSTOM de traitement de données hydrométriques HYDROM®.

Depuis le Zodiac® ou la pinasse, les jaugeages se font à l'aide d'un moulinet OTT® fixé sur un saumon de 25 kg relié par un câble en acier à un treuil fixé sur l'embarcation. Lors des basses eaux, sur les stations amont, les jaugeages se font avec un moulinet monté sur une perche (figure 5.2.1). Pendant ces 4 années d'étude, plusieurs hélices différentes ont été utilisées selon la vitesse du courant.

Un tuyau rigide est fixé sur le saumon et relié à une pompe placée sur le bateau et activée par une batterie. A chaque point de mesure de vitesse, un prélèvement de 0,9 litres est fait. Le pH et la conductivité sont mesurés sur l'échantillon du centre de la section vers 60 cm de profondeur.

En hautes eaux, sur les sections de mesure équipées avec des bases (Koulikoro, Banankoro, Douna, Kara, Tilembeya, Ke-Macina), les distances entre les verticales et la largeur du fleuve sont calculées à l'aide du cercle hydrométrique. Un jaugeage complet est réalisé mais les prélèvements d'eau pour l'estimation du débit solide sont faits sur quelques unes des verticales et quelques uns des points seulement.

Pour les stations du delta où aucune base n'est implantée, la largeur de la section est connue par des travaux antérieurs (Guiguen, 1985). Selon la taille de la section, les mesures se font sur 3, 4 ou 5 verticales. Sur chacune de ces verticales, 3 à 5 points significatifs sont choisis. Les verticales se situent approximativement en rive droite (RD), entre rive droite et le milieu (1/2RD), au milieu (M), entre le milieu et la rive gauche (1/2RG) et en rive gauche (RG).

Ce sont en général une quinzaine d'échantillons d'eau qui sont récupérés à chaque jaugeage. Il existe 14 sites jaugés régulièrement. C'est essentiellement la longueur des filtrations au laboratoire qui limite le nombre de mesures par jaugeage.

Durant les campagnes de juillet et août, pour chaque point de mesure, un volume de 0,5 litres était prélevé et mélangé aux autres afin de former un mélange de toute la section de mesure. Ceci représente un mélange de jaugeage de 6 à 9 litres qui s'ajoute aux

prélèvements individuels. Pour les campagnes de septembre et novembre 1993, ceci a été fait uniquement aux stations de Dire et Akka.

5.2.5 POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES

Le dispositif utilisé est simple à mettre en place et est utilisé déjà au Sénégal par une équipe de l'ORSTOM (Gac, 1990). L'installation d'un système identique permettra la comparaison des résultats pour deux régions géographiquement proches.

Le capteur est fabriqué à l'aide de panneaux en Plexiglas[®] soudés avec de l'Altuglas[®]. Le capteur forme une pyramide inversée avec une base de 50*50 cm et une hauteur de 40 cm. Un embout est fixé sur la pointe de la pyramide et permet l'évacuation de l'eau. Le haut du dispositif est placé à un mètre du sol. Lors du nettoyage hebdomadaire ou durant les pluies, un tuyau relié à l'embout conduit l'eau à une bouteille placée sur un support à 20 cm du sol. (figure 5.2.2.). C'est un observateur qui s'occupe de recueillir les poussières atmosphériques.

5.2.6 METHANE

Lors de toutes les tournées dans la zone inondée depuis septembre 92 des mesures de dégagement de méthane ont été entreprises.

Le système adopté est celui de la « chambre close » ou « chambre statique » (Cicerone et Shetter, 1981, Seiler et al, 1984, Delmas et al, 1991, Wilson et al, 1989, White et al, 1994). La fabrication de cette chambre et son installation sur le terrain sont rapides, économiques et permettent une grande maniabilité.

La chambre a été fabriquée à l'aide de panneaux de Plexiglas[®] transparents recouverts d'un film de plastique bleu. L'étanchéité des jointures est faite avec de l'Altuglas[®]. La boîte rectangulaire de 50*50*30 cm représente un volume de 75 litres avec une surface de base de 0,25 m². La flottabilité de l'ensemble est assurée par deux chambres à air (figure 5.2.3.).

A la partie supérieure de la chambre, une membrane étanche a été placée au centre du carré. Une aiguille double est placée au travers de cette membrane. Un capuchon placé sur le côté extérieur de l'aiguille empêche l'échange d'air entre la boîte et l'atmosphère. Les prélèvements sont effectués à l'aide d'un flacon Vacutainer[®] (sous vide) en verre de 20 ml. Les prélèvements se font toutes les 5 minutes durant une période de 30 minutes. L'installation d'une chambre statique close sur le marais durant une plus longue durée entraînerait la modification des caractéristiques du milieu naturel. Chaque série de mesure représente donc 7 échantillons. Parallèlement, les paramètres physico-chimiques de l'eau sont mesurés (conductivité, pH, TAC, température). Le type de végétation présente, sa densité, la hauteur des plantes sont notés ainsi que la hauteur de la tranche d'eau, la température de l'air, la présence de vent, l'heure. Pour pouvoir recalculer le volume exact de la chambre, la hauteur d'eau dans la boîte est également relevée.

Des mesures sur différents sites sont faites lors de chaque tournée dans le delta.

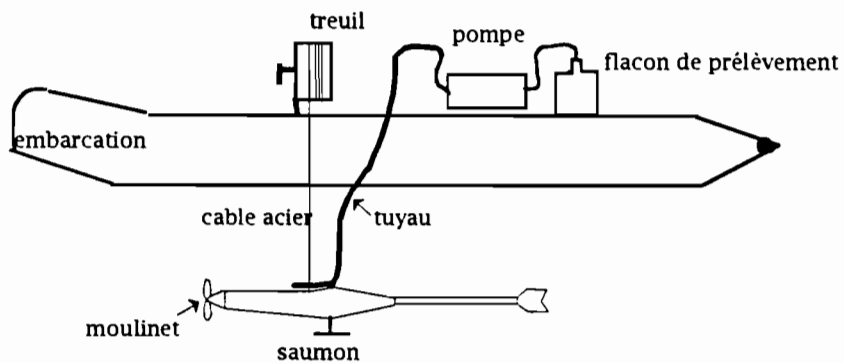


Fig.5.2.1: Schéma de l'installation pour la mesure des débits solides

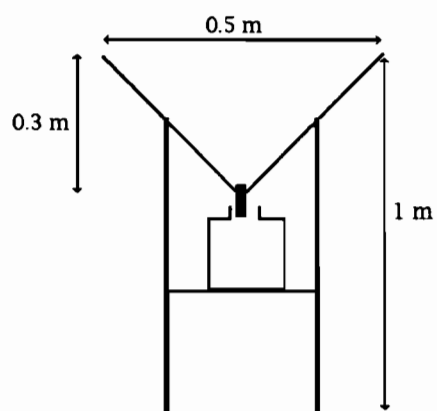
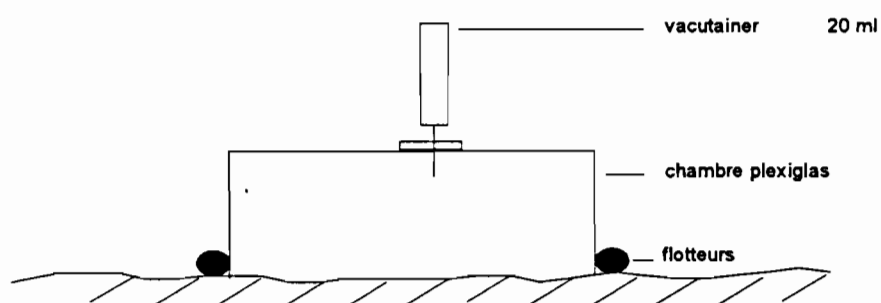


Fig.5.2.2: Schéma du capteur de poussières atmosphériques

Fig. 5.2.3: Schéma de la chambre statique pour la mesure du CH₄

6. METHODES D'ANALYSES

6.1 PREPARATION ET STOCKAGE DES ECHANTILLONS

Les flacons de 0,9 litre prélevés pour les analyses chimiques, lors des jaugeages et pour les poussières atmosphériques sont apportés au laboratoire de l'ORSTOM à Bamako au retour des tournées.

Après mesure des conductivités et du pH au laboratoire, les suspensions sont recueillies par filtration sur des membranes Millipore® en nitrate de cellulose de 0,45 µm puis, depuis août 1991, 0,22 µm de porosité.

Les membranes sont passées à l'étuve à une température de 45°C environ pendant 24h. Elles sont placées ensuite 20 minutes dans un dessiccateur puis pesées.

La concentration en matières en suspension (MeS) est obtenue par:

$$C[mg.l^{-1}] = \frac{P_f - P_i}{V}$$

Avec P_i : poids initial du filtre après passage à l'étuve 24 h et 20 mn au dessiccateur.

P_f : poids final après passage de l'échantillon

V : volume d'eau filtré

Un volume de 100 ml d'eau filtrée est conservé au laboratoire avant d'être envoyé au centre Orstom de Bondy (France) pour l'analyse chimique.

Ces flacons en polyéthylène, ainsi que les flacons de verre de 20 ml pour les analyses isotopiques sont conservés dans un endroit sombre.

Les filtres "chargés" sont conservés dans des boîtes de Petri étanches à la poussière.

6.2 ANALYSES CHIMIQUES

Les analyses des éléments majeurs de l'eau sont effectuées au laboratoire des formations superficielles à l'ORSTOM-BONDY.

L'analyse du SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^- se fait 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, le Ca^{2+} et Mg^{2+} par absorption atomique, Na^+ et 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'écart-type est calculé à partir des trois valeurs mesurées pour chaque échantillon. L'erreur est estimée à 5%.

L'alcalinité est mesurée par titration à l'aide d'un acide fort (HCl).

6.3 ANALYSES ISOTOPIQUES

Une partie des analyses des isotopes stables a été faite par l'AIEA à Vienne pour le projet PNUD MLI/8/004 et MLI/84/005. Les analyses des prélèvements ponctuels des eaux de la cuvette, les pluies 1991, 1992 et 1993 ont été réalisées au laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique à l'Université PARIS IX-Orsay. Pour l'oxygène 18, la méthode consiste à mettre en équilibre l'eau avec du CO₂ industriel de composition isotopique connue. La mesure est faite sur un spectromètre de masse VG602D. L'erreur admise est de ± 0,2 ‰.

Pour le deutérium, il y a réduction de l'eau par du zinc ultra pur à 450° C. Les mesures sont faites sur un spectromètre type VG602C. L'erreur admise est de ± 2 ‰.

6.4 ANALYSE DU CARBONE ORGANIQUE ET COMPOSES PHENOLIQUES

Les composés phénoliques, c'est à dire P-OH benzoïques, résorcinol, pyrocatechol, acide β résorcylique, P-OH acétophénone, vanilline, acétovanilline, acide ferulique, acide sinapique, phloridzozide et phloroglucinol sont mesurés au laboratoire de sédimentologie et de géochimie marine de l'Université de Perpignan. La matière organique en suspension est extraite avec NaOH 1N. La solution est acidifiée vers un pH 1 à l'aide de HCl 6N. Après centrifugation, les phénols libres (acides fulviques) sont extraits à l'éthyl-acétate puis analysés sur H.P.L.C. (Charrière et al, 1991). Les autres particules, acides humiques, sédiment minéral sont extraits et analysés en chromatographie (HPLC : High performance liquid chromatography).

La colonne utilisée est de type Lichrosorb ø 5µm Merck®. Deux standards internes permettent l'évaluation quantitative (Phloroglucinol et acide anisique).

L'analyse du carbone organique particulaire et dissous est faite à l'Université de Bordeaux, Institut de géologie du bassin d'Aquitaine.

Le carbone organique particulaire est mesuré sur un analyseur LECO CS 125 après combustion à 1100°C et décarbonatation avec du HCl 2N à 60° durant 12h. La mesure du CO₂ est faite sur une cellule infrarouge. Les coefficients de variations sont inférieurs à 5 %.

Pour la mesure du carbone organique dissous, la combustion se fait à 680°C et la décarbonatation est plus rapide (20 mn). La précision de cette méthode est excellente puisque les coefficients de variation ne dépassent pas 2 %.

6.5 ANALYSE DES MATIERES EN SUSPENSION

Au laboratoire des formations superficielles à l'ORSTOM-BONDY, les filtres sont trempés jusqu'à ce que l'on puisse retirer les sédiments déposés sur les membranes. Les matières récupérées sont passées à l'eau oxygénée afin d'éliminer la matière organique. La différence entre le poids de départ et le poids final du sédiment donne une estimation de la part végétale.

Les analyses granulométriques sont faites sur un sédigraph 500 OET (Micromeritics) qui mesure par RX la concentration des particules en cours de sédimentation. Grâce à la loi de Stokes, on peut définir le poids moyen des particules sédimentées au temps t où la concentration est donnée. Les résultats sont donnés sous forme d'une courbe cumulative suivant les diamètres sphériques équivalents (μm). La médiane n'est calculée que lorsque la matière est suffisante, c'est à dire d'un poids supérieur à 0,25 g.

La partie inférieure à 50 μm de quelques uns de ces échantillons est conservée pour l'analyse minéralogique par diffractométrie X. Les poudres sont placées sur des porte-échantillons en plastique et passées au diffractomètre Siemens D500 équipé d'une anticathode de cuivre et d'un monochromateur arrière. Le détecteur est un compteur à scintillation et le traitement de l'information se fait à l'aide du logiciel Socabim. Cette détermination s'effectue sur la poudre et avec trois traitements spécifiques. L'un consiste à orienter les particules sur une plaque de verre, l'autre à vaporiser du glycérol sur la préparation et le troisième à chauffer la plaque de verre à 500°C.

6.6 ANALYSE DE METHANE

Les échantillons sont stockés dans le Vacutainer® d'origine durant plusieurs mois. Le conditionnement dans des flacons en verre ou en acier présente les mêmes sûretés dans la conservation (Steele et al, 1987). Aucune mesure sur la conservation du CH_4 n'a pu être réalisée mais il ne semble pas que l'évolution soit importante (Wilson et al, 1989, Steele et al, 1987). Les séries de novembre 1992 et novembre 1993 ne montrent pas de variation significative. Ces échantillons ayant tous été analysés en mai-juin 1994, il semble que la conservation des échantillons dans les Vacutainers® soit bonne.

Les mesures de méthane ont été réalisées au laboratoire de microbiologie de l'ORSTOM basé à l'Université de Provence à Marseille.

Les mesures sont faites par un chromatographe en phase gazeuse (Girdel, série 30) équipé d'un détecteur à ionisation de flamme et d'une colonne chromosorb WAW SP1000, 1 % H_3PO_4 .

La température de la colonne est maintenue à 150°C, le détecteur et l'injecteur à 210°C. Le gaz vecteur utilisé est de l'azote à une pression de 1,5 bars et le gaz de référence du méthane ultrapur.

L'erreur de la méthode est de l'ordre de 5 % soit, pour la gamme de nos valeurs, 0,01 %v.

7. CRITIQUE DES METHODES

7.1 ANALYSES CHIMIQUES

7.1.1 LES EFFETS DU STOCKAGE

Entre deux tournées, les prélèvements effectués par l'observateur sont stockés chez lui durant plusieurs semaines. Les bouteilles sont entreposées à l'abri de la lumière et des rongeurs mais à des températures variables. Les bouteilles sont ensuite apportées au centre ORSTOM de Bamako. Le temps de stockage avant la filtration dépend de la disponibilité du laboratoire.

Deux prélèvements ont été faits à Dire lors de la campagne de mars 1992. Le premier a été filtré dans les 15 jours après le retour de mission. Le double a été filtré une année plus tard. Les écarts-types calculés pour les éléments dissous sont grands (tableau 7.1.1). Seuls les bicarbonates et le potassium ont peu évolué. Le coefficient de variation est supérieur à 35% pour le chlorure, le sulfate et la silice. Il avoisine les 15 % pour le Mg^{2+} , Ca^{2+} et Na^{2+} . Une partie de l'écart observé sur la concentration de silice des eaux de Dire peut être due à un problème de mesure sur l'ICP ; la valeur de 10,42 mg l⁻¹ n'étant pas représentative de la teneur moyenne des eaux à cette station.

prélevé	analysé	unité	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃ ⁻	Cl	SO ₄ ⁻	H ₂ SiO ₄
5/3/92	juillet 92	mg l ⁻¹	2.63	1.78	2.31	4.21	31.24	1.38	0.62	10,42
5/3/92	juin 93	mg l ⁻¹	3.08	1.44	2.19	5.29	31.73	0.75	0.29	17,42
		delta	0.46	-0.34	-0.12	1.08	0.49	-0.64	-0.33	7,00
		CV[%]	11.1	14.9	3.8	16.1	1.1	41.8	51.3	35.6

Tableau 7.1.1 : Evolution de la composition chimique des eaux de Dire avant et après un an de stockage non filtré

Pour une analyse plus fine de l'évolution de la qualité chimique des eaux après leur prélèvement, une autre étude a été réalisée en octobre 1993. Sur l'eau recueillie à Kotaka, 100 ml ont été filtrés immédiatement (J0), 100 autres ml ont été filtrés 10 jours (J10) après et le reste a été filtré 60 jours (J60) après le prélèvement (tableau 7.1.2). L'évolution des éléments chimiques est montrée en figure 7.1.1. Le coefficient de variation est inférieur à 10% sauf pour les chlorures où il est de 45 %.

échantillon	unité	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	H ₂ SiO ₄
J0	mg l ⁻¹	3.81	1.37	2.46	4.65	32.95	0.89	24,18
J10	mg l ⁻¹	3.91	1.44	2.27	4.39	33.56	0.50	24,40
J60	mg l ⁻¹	3.89	1.40	2.23	4.32	33.26	0.46	23,34
de 0 à 10 jours	delta	0.10	0.06	-0.20	-0.25	0.61	-0.39	0,22
	CV[%]	1.8	3.5	-5.7	-4.1	1.3	-39.7	0.7
de 10 à 60 jours	delta	-0.02	-0.04	-0.04	-0.07	-0.31	-0.04	-0,06
	CV[%]	-0.4	-2.0	-1.3	-1.1	-0.6	-5.9	-0.2
de 0 à 60 jours	delta	0.08	0.02	-0.23	-0.32	-0.31	-0.43	0,16
	CV[%]	1.5	1.5	-6.9	-5.2	0.7	-45	0.5

Tableau 7.1.2 : Modification de la composition chimique d'une eau prélevé à Kotaka le 5/7/93 et filtrée immédiatement, après 10 jours et après 60 jours

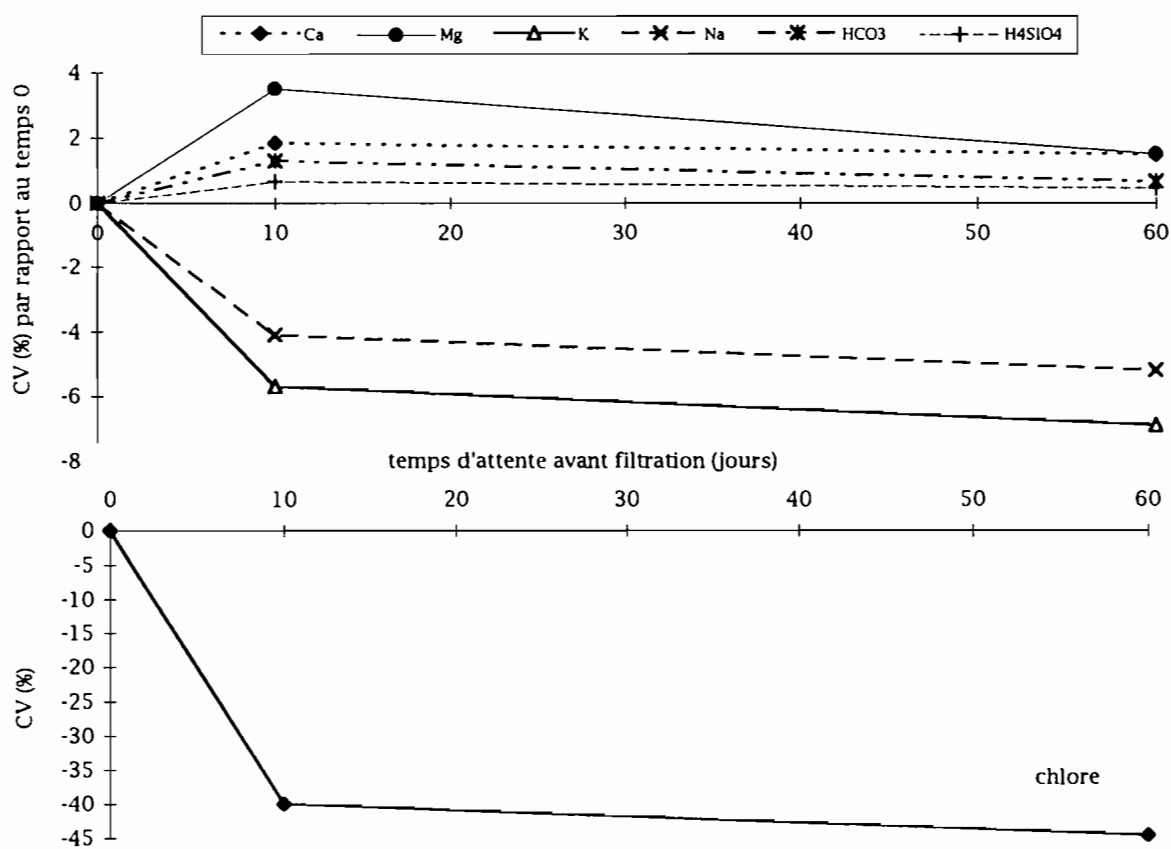


Fig. 7.1.1: Evolution de la chimie selon le temps d'attente avant la filtration

Entre 0 et 60 jours d'attente avant la filtration, les éléments qui évoluent le plus sont les cations sodium, potassium et les ions chlorures. L'évolution du magnésium ne se fait pas dans le même sens après 10 jours et 60 jours. Ces variations sont plus liées à des erreurs analytiques qu'au comportement des cations dans le temps. Le potassium et le sodium sont les cations les plus variables dans le temps. Ils subissent dans les 10 premiers jours une forte diminution puis reste à peu près constants par la suite. Les teneurs en K^+ des eaux du Niger sont faibles et expliquent en partie un écart très variable.

L'altération de la qualité chimique des eaux n'est pas très importante si le stockage avant filtration est inférieur à deux mois. Une exception doit être faite pour le chlorure qui apparaît très instable.

Des échantillons d'eau de Douna du 9 et 16/10/91 ont été filtrés en même temps mais analysés à deux mois d'intervalle. Les résultats du tableau 7.1.3 représentent donc l'évolution chimique après filtration et les variations de mesure.

prélevé le	analysé le	unité	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	H ₂ SiO ₄
9/10/91	octobre 92	még l ⁻¹	0.15	0.11	0.05	0.13	0.41	0.03	
		mg l ⁻¹	2.92	1.35	1.99	3.01	25.01	0.99	24,80
9/10/91	déc 92	még l ⁻¹	0.14	0.10	0.05	0.13	0.43	0.02	
		mg l ⁻¹	2.84	1.26	2.07	2.94	26.23	0.60	23,12
		delta	0.08	0.09	0.08	0.07	-1.22	0.39	1,68
		CV[%]	2.0	4.9	2.8	1.7	3.4	34.7	5.0
16/10/91	octobre 92	még l ⁻¹	0.14	0.10	0.05	0.12	0.40	0.02	
		mg l ⁻¹	2.70	1.24	1.92	2.78	24.41	0.53	23,74
16/10/91	déc.92	még l ⁻¹	0.14	0.10	0.05	0.12	0.39	0.02	
		mg l ⁻¹	2.75	1.22	1.76	2.67	23.80	0.64	22,02
		delta	-0.05	0.02	0.16	0.12	0.61	-0.11	1,73
		CV[%]	1.3	1.1	6.1	2.9	1.8	13.3	5.4

Tableau 7.1.3 : Variation de la composition chimique de deux eaux prélevées à Douna le 9 et le 16/10/91, filtrées rapidement et analysées avec trois mois d'intervalle.

Les coefficients de variation moyens entre les analyses d'octobre 1992 et celles de décembre 1992 sont de 1,7 % pour le Ca^{2+} , 3,0 % pour le Mg^{2+} , 4,5 % pour le K^+ , 2,3 % pour le Na^+ , 2,6 % pour le Tac, 24,0 % pour le Cl⁻ et 5,2 % pour la silice.

En l'espace de deux mois, les teneurs en chlorures ont augmenté sur l'échantillon du 16/10 et diminué pour la mesure du 09/10. Cette différence permet de dire que l'écart-type n'est pas dû à une évolution de l'eau filtrée avant l'analyse.

Le laboratoire des formations superficielles de l'Orstom à Bondy effectue régulièrement des vérifications sur trois eaux témoins. Les coefficients de variation moyens obtenus sur une quarantaine d'analyses sont de 10,4 % pour le Ca^{2+} , 2,5 % pour le Mg^{2+} , 6,8 % pour le K^+ , 2,9 % pour le Na^+ et 6,4 % pour la silice.

Pour les eaux filtrées jusqu'à deux mois après leur prélèvement, l'évolution des éléments dissous n'est pas plus forte que les écarts de reproductibilité des méthodes analytiques. Par contre, après un temps de stockage plus important, les différences observées entre deux séries d'analyse sont presque doublées.

Pour les anions, les trop faibles teneurs en SO_4^{2-} et NO_3^- ne permettent pas de retenir ces éléments pour le calcul des bilans. Le chlorure évolue rapidement et fortement après le prélèvement et ne pourra pas être utilisé pour effectuer les corrections des apports atmosphériques basées sur le rapport moléculaire ionique (X_i/Cl). Les échantillons filtrés immédiatement lors des campagnes permettront de se rendre compte des teneurs moyennes en chlorures du Niger et de ses principaux affluents.

7.1.2 CRITIQUE DES RESULTATS ANALYTIQUES

L'équilibre ionique calculé pour chaque analyse chimique permet de vérifier la qualité des résultats. Le calcul de l'erreur relative (Er) traduit le degré de neutralité électrique des ions en solution.

Les différences entre anions et cations sont dues à plusieurs causes : erreur sur l'alcalinité (pour les eaux non ou mal tamponnées), limite de détection de certains ions (sulfates), présence d'anions organiques, omissions d'anions dans les eaux diluées (Meybeck, 1984), stockage trop long des échantillons et erreurs de dosages.

La précision de la balance ionique se mesure selon la formule suivante : (Schoeller, 1962)

$$Er [\%] = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} * 200$$

D'après Schoeller (1962), l'erreur admise pour des eaux de très faibles concentrations ($<1\text{m}\text{éq l}^{-1}$) doit être inférieure à 10 %.

Les analyses des eaux de pluies n'ont pas été rassemblées dans le tableau 7.1.4. Etant donné les très faibles minéralisations de ces eaux, les erreurs relatives dépassent les 10 % pour plus de 30 % des échantillons.

Sur l'ensemble des stations (figure 7.1.2), pour 585 analyses chimiques d'eau du fleuve, 34 dépassent la marge d'erreur acceptable de 10 %. Près de 60 % des analyses ont un excédent en anions et 67 % des Er de plus de 5 % sont négatives. Les eaux de forte ou de faible minéralisation ($>1\text{m}\text{éq l}^{-1}$) présentent les mêmes variations de la balance ionique.

Afin de ne pas perdre un certain nombre d'informations, quelques analyses dont Er est comprise entre 10 et 12 % ont été conservées.

Pour les stations où le suivi de la chimie de l'eau est régulier, il est possible de définir le ou les éléments en excès ou en déficit qui entraînent un déséquilibre de la balance ionique.

Lorsque les concentrations sont faibles, la détection des ions NO_3^- et SO_4^{2-} entraîne souvent un excès d'anions. Ces deux éléments se trouvent dans les eaux du fleuve Niger à la limite de la détection et on peut estimer que leur valeur n'est pas significative. Ainsi, 7 analyses dont les Er étaient inférieures à -10 % ont été conservées. Toutefois, il ne sera pas tenu compte de ces résultats pour le bilan des éléments dissous totaux (TDS).

A Douna, les analyses des 8/10/90, 10/10/90 et 17/11/90 présentent une erreur relative proche de 14 %. Comme elles sont contiguës et ne présentent aucune anomalie particulière si ce n'est un déficit en cations, elles ont été conservées. Toutes les autres analyses dont l'erreur relative était supérieure à 10,2 % ont été mises de côté. Ceci représente 22 valeurs.

Er [%]	Ft de la concentration des eaux						Ft du déséquilibre (<0) vers les anions ou vers les cations (>0)					
	<1 még l-1			>1 még l-1			<0			>0		
	0-5	5-10	>10	0-5	5-10	>10	0-5	5-10	>10	0-5	5-10	>10
Banankoro	27	21	0	14	4	0	27	24	0	14	1	0
Koulikoro	11	8	1	3	0	0	9	6	1	5	2	1
Ke-Macina	24	13	0	10	8	2	17	19	1	18	1	1
Tilembeya	3	5	4	0	1	0	4	4	4	1	0	0
Kara	10	3	1	8	2	1	8	5	1	10	1	0
Douna	19	10	5	22	9	1	35	18	7	5	1	0
Sofara	12	11	3	24	12	4	10	3	1	26	20	6
Nantaka	22	10	0	22	6	0	29	7	0	15	9	0
Akka	12	4	1	24	6	1	19	7	2	17	3	0
Awoye	14	1	0	14	7	2	13	8	1	15	0	1
Korientze	2	0	0	22	6	4	10	2	1	14	4	3
Dire	13	1	1	17	5	1	18	0	2	12	6	0
autres	11	3	1	7	4	1	4	4	1	14	3	1
campagnes	10	2	0	9	3	0	7	1	0	12	4	0
Total	190	92	17	196	73	17	210	108	22	178	55	12

Tableau 7.1.4 : Récapitulatif des erreurs relatives regroupées en trois classes (0-5%, 5-10% et >10%), selon la concentration des eaux et le déséquilibre ionique

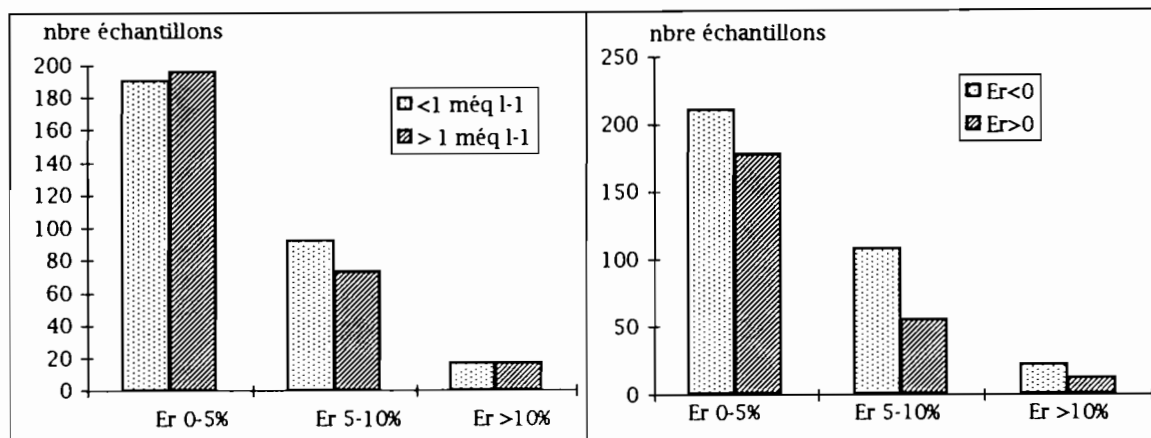


Fig.7.1.2 : Erreur de mesure selon Schoeller pour toutes les analyses chimiques

7.2 LES DEBITS SOLIDES

La mise au point d'une méthode de prélèvement et de mesure fiable pour l'analyse des concentrations en matières en suspension a nécessité de multiples jaugeages et de nombreux prélèvements. La totalité des étapes suivies pour aboutir au protocole de mesure actuelle et au calcul d'erreur est exposée en annexe 8. Il s'avère utile de placer dans le corps du texte les conclusions finales à ces séries de mesures.

Après une année d'analyse (1990-1991), il s'est avéré que les variations observées d'un jour à l'autre pourraient être fortes, ce qui ne s'explique pas toujours par un phénomène naturel d'érosion des bassins et de transport de matière en suspension. Pendant les hautes eaux, de telles différences entraînent des erreurs dans le calcul du bilan annuel de transport de MeS. Les erreurs systématiques lors des manipulations au laboratoire semblent négligeables devant l'erreur aléatoire.

Les variations hebdomadaires relevées sur l'année 1990-1993 sont importantes sur quelques stations et peuvent masquer l'évolution "naturelle" des MeS.

Il est certain que la filtration de plusieurs litres, voire plusieurs décalitres permettrait de minimiser les erreurs de manipulation au laboratoire et sur le terrain. Ceci n'est pas possible dans cette étude du fait du grand nombre de stations étudiées.

Etant donné l'étendue de la région étudiée et sa difficulté d'accès hors voies fluviales, des tournées régulières plus fréquentes de mesures de débit solide sur le terrain ne sont pas non plus possibles.

Des jaugeages doivent être faits au début de la crue, au moment où les concentrations en MeS augmentent et où le débit solide est le plus important, en hautes eaux.

Durant l'année, lors des campagnes, les prélèvements de surface sont conservés car ils sont représentatifs de la concentration globale de la section. Sur les stations du delta aval, les observateurs semblent suivre un protocole valable.

Pour les stations du delta amont, les écarts entre les valeurs de l'observateur et celles des jaugeages sont importants et ne s'expliquent pas uniquement par le manque de fiabilité d'un seul point de mesure. Est-ce que le lieu de prélèvement hebdomadaire est représentatif de la concentration moyenne du fleuve ? Est-ce que le travail des préleveurs est assez rigoureux ? Les teneurs en MeS sont-elles perturbées par le passage régulier et fréquent du bras du fleuve par les troupeaux et les hommes ? Les premières données avec trois points de prélèvement permettront de lever ces incertitudes et d'éliminer les erreurs aléatoires. Toutefois, il faudrait vérifier sur une plus longue période qu'il n'y a pas d'écarts systématiques entre les concentrations des trois points de surface.

7.3 LES POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES

L'étude sur les poussières atmosphériques avait pour objectif d'estimer la part des apports atmosphériques dans le bilan des matières en suspension et dissoutes par rapport à celle provenant de l'érosion mécanique et chimique du bassin.

7.3.1 APPAREIL

La plupart des mesures quantitatives de dépôts d'aérosols se font à partir d'un dispositif de filtration relié à une pompe qui fonctionne en continu et dont le volume d'air absorbé est parfaitement quantifié (Volucompteur, fluxmètre). L'entrée d'air est équipée d'un filtre de $0,45\mu\text{m}$ de diamètre de pores.

Le problème de la pompe, hormis une mise en place onéreuse et complexe, est le colmatage du filtre après quelques heures de fonctionnement. Ceci amène une diminution de l'absorption.

Plusieurs autres types de collecteurs composés d'un cylindre de diamètre variable avec une bouteille pour la réception des dépôts secs et humides ont été utilisés depuis quelques années (Steen, 1977). Chacun présente des avantages et permet une utilisation personnalisée au type d'analyses désirées (mesure de la chimie des dépôts, des métaux, mesures quantitatives, qualitatives, pas de temps variable...) mais une homogénéisation entre ces différentes méthodes serait nécessaire.

Le capteur pyramidal présente l'avantage d'être simple à installer et à utiliser.

Une étude comparative a été entreprise par Orange et al (1990) entre un dispositif avec une pompe aspirante et un capteur pyramidal identique au notre mais placé à 5 m au-dessus du sol. Les résultats sont concordants.

L'étude comparative entre un capteur pyramidal placé à 5 m et à un mètre n'a pas été faite. Il paraît évident que le capteur placé à une faible hauteur va tenir compte de la poussière soulevée au passage des troupeaux ou des hommes des villages avoisinants et des apports par les plus fortes turbulences qui se forment au niveau du sol.

Pourtant les teneurs moyennes de $0,09$ à $3 \text{ g m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ ne sont pas très élevées par rapport à celles obtenues à Dakar à 5 m de hauteur dans un capteur pyramidal et dont la moyenne interannuelle journalière est de $0,54 \text{ g m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.

D'autres mesures effectuées en zone sub-aride (Yaalon et Ganor, 1977) indiquent des dépôts de $0,5 \text{ g m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ en concordance avec nos résultats.

Le problème majeur de ce système est basé sur son principe même qui consiste à capter les poussières, empêchant toute reprise éolienne des dépôts. Ceci est représentatif des quantités de poussières arrivant sur les nappes d'eau qui, elles aussi, piègent les particules. En revanche, il surestime les apports réels sur les terres exondées qui subissent une importante reprise des dépôts toute l'année.

7.3.2 CHOIX DES SITES

Banankoro représente le sud du Mali et permet les comparaisons avec les zones du domaine soudanien et les apports en domaine sahélien.

Le site de Batamani se trouve à proximité d'une mare et d'un mayo. En hautes eaux, le passage des habitants et troupeaux ne peut se faire que sur la langue de terre exondée sur laquelle a été placé le capteur.

A Youvarou, le capteur a été placé en bordure de la ville dans la cour fermée de l'ancien bâtiment du commandement de cercle. Autour se trouvent des bâtiments administratifs, des champs de mil ou des terrains nus avec quelques cram-cram. Ce site est souvent battu par des vents forts soulevant les poussières d'une grande place au sol dénudé. Cette place est le lieu de fréquents passages de troupeaux en direction du fleuve.

Il ne semble pas que ceci représente le milieu naturel car les sols sont rendus "disponibles" du fait essentiellement de la présence humaine.

La ville est construite au bord du lac Debo. Les vents venant de l'Est n'apportent que peu de poussières en raison de leurs dépôts au-dessus du lac.

Au vu des premiers résultats, il apparaît que les fortes variations hebdomadaires sont, sans doute, en partie liées à l'action anthropique. L'installation doit pourtant se faire à proximité du lieu d'habitation du préleveur afin que celui-ci puisse se rendre rapidement sur les lieux lors des averses. La superficie importante (0,25m²) de la base de la pyramide entraîne l'emmagasinement de grands volumes d'eau et le capteur ne pourrait contenir la totalité des fortes averses au risque de perdre les poussières collectées.

Etant donné l'architecture des habitations, il est difficile de placer ces pièges sur les toits. L'installation a une certaine hauteur obligerait la construction de tourelles métalliques.

Un enclos est nécessaire afin d'éviter les problèmes avec les troupeaux.

7.3.3 FREQUENCE DE MESURE

La fréquence de prélèvement retenue est la même que celle des mesures de MeS ou des échantillonnages pour la chimie. Cette fréquence hebdomadaire ne permet pas de distinguer les événements exceptionnels mais suffit à l'estimation qualitative et quantitative des intrants mensuels.

7.4 METHANE

7.4.1 APPAREIL

La méthode utilisée est celle de la chambre close. Une boîte complètement étanche est placée sur le site choisi.

Par rapport au système de la « chambre ouverte » (Sebacher et Harriss, 1982, Delaune et al, 1983, Seiler et al, 1984b, Holzapfel-Pschorn et Seiler, 1986, Sheppard et al, 1982), cette méthode a l'inconvénient de créer un environnement artificiel.

Les conditions climatiques naturelles de température, humidité, teneurs en CH_4 , CO_2 , vents sont changées (Moore et Knowles, 1990, Wilson et al, 1989, Husted, 1993) du fait de l'étanchéité du système. Pour éviter un réchauffement direct trop important à cause du rayonnement direct du soleil, un film plastique bleu clair a été placé sur les parois.

Ceci a pour principale conséquence un blocage des effets du vent sur le flux de méthane, une interférence avec le transport tourbillonnaire, une diminution du transport par bulles par rapport à la diffusion (Cicerone et Shetter, 1981, Barber et al, 1988).

Pour les plantes, la pression extérieure de CO_2 , le flux de photon photosynthétique, la température des feuilles, la pression d'air sur les feuilles influencent la photosynthèse, la conductance (ouverture des stomates) et le dégagement de CH_4 (Knapp et Yavitt, 1992).

C'est pour ces raisons que la méthode de la chambre close a tendance à sous estimer les flux (Moore et Knowles, 1990).

Ce système ne permet pas la distinction entre les dégagements par bulle, la diffusion et le dégagement au travers des plantes. L'analyse du $\delta^{13}\text{C}$ peut pallier à cet inconvénient (Cicerone et Oremland, 1988, Stevens et Engelkemeir, 1988) ainsi que certaines estimations (Wassmann et al, 1992, Devol et al, 1990). Malheureusement, cette mesure nécessite de grands volumes d'air et n'a pas été envisagée au début de la manipulation.

L'utilisation d'une chambre ouverte assurerait de meilleurs résultats mais obligerait à apporter sur le terrain un matériel très important, gaz, tuyauterie, pompes, groupe électrogène, limitant ainsi le nombre de sites échantillonnés.

Les méthodes « aériennes » nécessitent de gros moyens financiers mais permettent de donner une idée du flux régional de CH_4 (Tathy et al, 1991, Roulet et al, 1994).

Au contraire, la chambre statique exige un grand nombre de mesures afin de permettre une détermination précise des flux de méthane selon les qualités physico-chimiques du milieu environnant, la hauteur d'eau, les types de sols et de plantes. Nous avons préféré adopter ce système simple et multiplier le nombre des expériences afin de pouvoir extrapoler les valeurs de flux obtenues.

La taille de la boîte a été adaptée au type de site échantillonné. En général, les herbes placées à l'intérieur de la boîte ne dépassent pas deux fois la hauteur de la chambre close.

7.4.2 SITES

Les sites ont été choisis afin d'englober le plus possible de types de milieux rencontrés sur l'ensemble de la cuvette lacustre. Selon les paramètres de variation du dégagement de méthane, nous avons choisi des sites avec des différences de:

- ⇒ hauteurs d'eau de la nappe - de 0,1 à 2,3m.
- ⇒ type de végétation - bourgou, gomou, riz, nénuphars et eau libre.
- ⇒ densité et taille de la végétation
- ⇒ température de l'air et de l'eau
- ⇒ saison - septembre, novembre, février, avril, juillet, août
- ⇒ luminosité - toutes les trois heures durant 24 heures

7.4.3 FREQUENCE

La durée de fermeture de la chambre est critique pour :

- ⇒ les changements d'environnement de vie de la plante qui a des effets physiologiques

- ⇒ le taux de diffusion des gaz qui dépend du gradient de concentration entre les plantes et la chambre.

Le temps de mesure n'excédera pas 30 minutes afin de limiter les perturbations du milieu, les réponses par la plante à l'environnement pouvant être très rapides.

Pendant ce laps de temps, un prélèvement a été fait toutes les 5 minutes afin de permettre le calcul d'un flux moyen qui tiendrait compte des hétérogénéités locales.

3 ème partie

LES FLUX A TRAVERS LA CUVETTE LACUSTRE
de KE-MACINA et DOUNA à DIRE durant les années
1990 à 1994

8. LES FLUX HYDRIQUES

INTRODUCTION

L'estimation des flux de matières dissoutes et en suspension nécessite une bonne connaissance du bilan hydrologique. L'eau représente non seulement le principal moyen de transport de la matière mais elle est aussi responsable de l'érosion et du lessivage sur le bassin versant.

Le flux hydrique est la quantité d'eau qui traverse le milieu en un temps donné. Le milieu considéré dans notre étude est le delta central du fleuve Niger de Ke-Macina et Douna à Dire. Les apports sont essentiellement composés des *écoulements* du fleuve Niger et du Bani. Les *précipitations* sont faibles sur cette région sahélienne et les reprises par *évaporation* dépassent largement les apports atmosphériques. L'étude hydrogéologique nous a montré que *les liaisons avec la nappe superficielle* sont importantes sur le bassin amont mais de faible ampleur dans le delta.

C'est l'ensemble de ces apports et pertes qui sera discuté dans ce chapitre. Le dernier facteur qui intervient dans l'estimation du flux dans la cuvette lacustre est la *capacité de stockage et déstockage* des grands lacs, mares et surfaces inondées. Ce paramètre est le plus difficile à appréhender et sera considéré, à l'échelle annuelle, comme constant.

Dans un premier temps, l'étude portera sur les entrées du système. Les précipitations sont faibles dans ces régions sahéliennes. Les pluies recueillies à Bamako de 1991 à 1993 sont représentatives de celles de la Dorsale Guinéenne qui sont responsables de la crue du fleuve. Les teneurs isotopiques permettent de définir le mouvement et le fonctionnement des masses d'air à l'origine de la formation des précipitations.

L'analyse des modules sera complétée par celle des isotopes stables de l'eau au cours du cycle hydrologique 1990-1991 à Douna et Banankoro. Ainsi seront étudiées les relations avec les nappes dans le bassin amont du Bani. Les données actuelles ont été complétées par des mesures faites par l'AIEA dans le cadre d'un projet PNUD-DNHE. Une étude ponctuelle des $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ a été faite sur les diverses stations de la cuvette lacustre en fin d'étiage et en période de crue afin de mieux définir le fonctionnement hydrologique de cet ensemble.

Dans un deuxième temps le travail est consacré aux facteurs climatiques qui influencent l'écoulement. L'évapotranspiration est responsable de la majeure partie des pertes en eau mesurées entre les entrées du delta et Dire. Le calcul de ce facteur nécessite la détermination des températures de l'air, de l'humidité relative, de la force des vents, de l'ensoleillement.

La connaissance de l'ensemble de ces facteurs à une échelle mensuelle ou annuelle sur les années d'études 1990 à 1994 permet d'appliquer le modèle d'estimation des superficies inondées développé par Olivry (1994a et b, cf chapitre 3.4).

8.1 LES PRECIPITATIONS

8.1.1 APPORTS PLUVIOMETRIQUES DANS LE DELTA

Peu de stations météorologiques ont été installées dans la cuvette lacustre.

Pour le calcul des apports pluviométriques sur le delta, la méthode des polygones de Thiessen (Gilman, 1964) a été préférée à celle des isohyètes. Cette méthode apporte une précision par rapport au calcul simple des moyennes des stations en raison de l'hétérogénéité des précipitations et notamment de la diminution rapide de la lame d'eau précipitée en allant vers le nord.

Pour les trois années étudiées, les stations pluviométriques n'ont pas été toutes relevées et la construction des polygones de Thiessen a été refaite pour chaque année. Le tableau 8.1.1. indique les surfaces d'influence de chaque station et le pourcentage respectif par rapport à la superficie totale inondée.

ANNEE		SAN	MACI	MOPTI	LERE	DIOUR	SOFARA	DJENNE	SARAFE	TONKA	KORI	DIRE
1990	km ²	1900	4000	9600	500					5600	3400	
1990	%	7.6	16	38.4	2					22.4	13.6	
1991	km ²	500	2800	9200	2000	1200	1200	3500				
1991	%	2	11.2	36.8	8	4.8	4.8	14				
1992	km ²	500	2500	7200		1000	1000	3750	3250	1500	4300	
1992	%	2	10	28.8		4	4	15	13	6	17.2	
1993	km ²			6050			8525		3200		6225	1000
1993	%			24.2			34.1		12.8		24.9	4

Tableau 8.1.1 : Estimation la zone d'influence de chaque station météorologique selon la méthode de Thiessen

Les précipitations moyennes (météorologie nationale) pour les années 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993 et 1993-1994 pondérées par les coefficients calculés avec la méthode de Thiessen sont :

ANNEE	mai	juin	juill.	août	sep.	oct.	nov.	déc.	jan.	fév.	mars	avr.	total
1990-91	5.5	58.7	110.2	96.6	56.3	24.1	0	0	0	0	7.1	0.9	359.4
1991-92	18.6	43	127.4	137.7	37.3	24.2	0	0	33.6	0	0	0.2	422.0
1992-93	18.5	36.9	122.2	132.1	47.6	2.9	0.3	0	0	0	0	0	360.5
1993-94	0.3	24.7	82.3	139.5	58	9.1	0	0	0	0	0	0	313.8

Tableau 8.1.2 : Hauteur moyenne des précipitations sur le delta central

En 1990, sur les stations les plus au sud (Ke-Macina, San, Mopti), la saison des pluies va de juin à septembre et 97.2 % du total annuel tombent durant cette courte période. Au nord, sur la station de Dire, 91 % des pluies sont tombés durant les mois de juin, juillet et août. Le nombre des événements pluvieux diminue et les pluies efficaces (qui amènent un ruissellement réel) sont de moins en moins nombreuses lorsque l'on s'éloigne vers le nord.

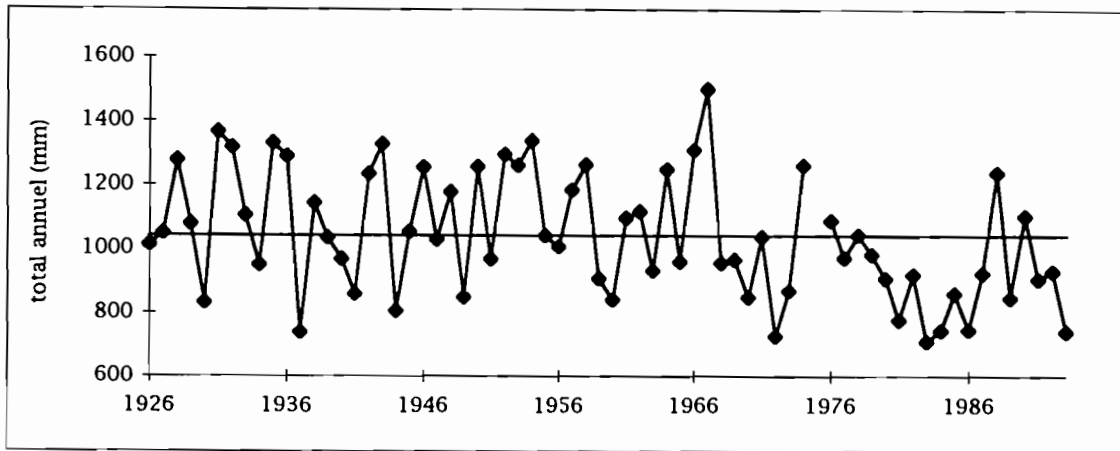


Fig.8.1.1: Chronique des précipitations annuelles à Bamako de 1919 à 1993

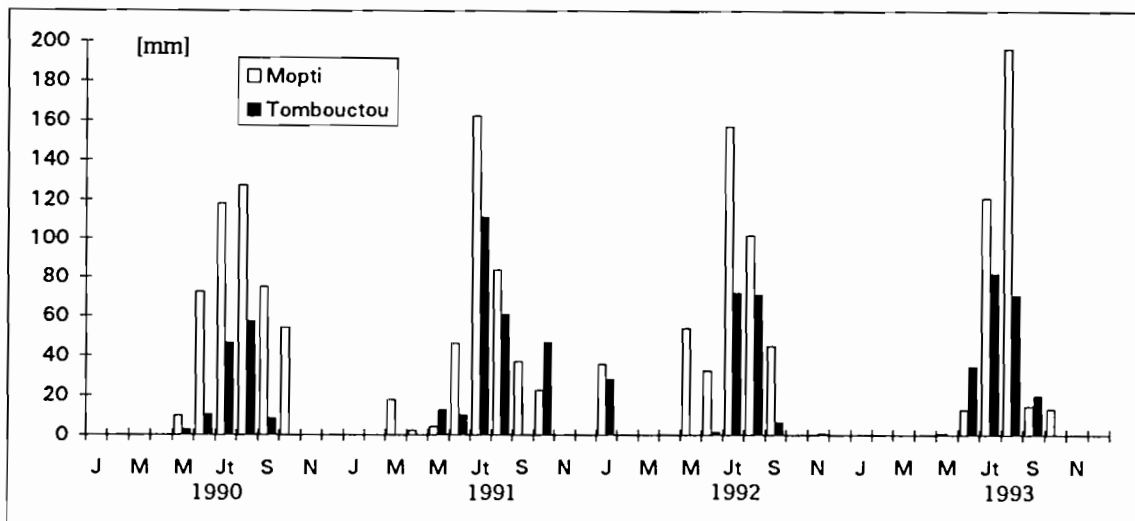


Fig.8.1.2 : Précipitations mensuelles sur les stations de Mopti et Tombouctou

Pour la période 1990-1993, le nombre moyen de pluies d'une hauteur supérieure à 10 mm est de 5 à Tombouctou, 15 à Mopti et 20 à Segou. Sur ces quatre années, la plus pluvieuse est 1991-1992 avec 422 mm alors que 1993-1994 n'a reçu que 313.8 mm. Cet écart représente près de 30 % par rapport à la moyenne des années d'étude. La variabilité de la pluviométrie en région sahélienne est très importante. La chronique des précipitations à Bamako de 1926 à 1994 (figure 8.1.1) indique que les années d'études sont déficitaires en apports atmosphériques. La moyenne interannuelle est de 1040,4 mm. Les années 1990 à 1993 sont donc inférieures de 20% par rapport à cette moyenne.

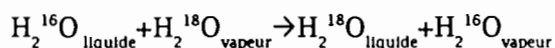
Nous avons retenu les stations de Mopti-Sevare et Tombouctou afin de comparer les pluviométries mensuelles sur quatre ans (figure 8.1.2). La saison des pluies est plus étalée à Mopti et présente, pour le total mensuel précipité, moins d'écart d'une année sur l'autre que la station de Tombouctou.

8.1.2 EVOLUTION DES TENEURS ISOTOPIQUES DES PLUIES DE BAMAKO

8.1.2.1 Présentation des pluies retenues pour l'analyse des isotopes stables

Les changements d'état de l'eau, par évaporation et condensation, entraînent des fractionnements isotopiques durant le cycle hydrologique. Ainsi, les teneurs en isotopes stables des fleuves s'écartent plus ou moins de la composition moyenne des eaux de pluie à l'origine de l'écoulement. La contribution des différentes sources de surface et de subsurface peut également se différencier à l'aide des isotopes.

Les isotopes peuvent s'échanger entre deux phases sans qu'aucune réaction ne se produise :



Les eaux océaniques représentent le point de départ et le point final du cycle hydrologique. Leur teneur isotopique (^{18}O et ^2H) a donc été choisie comme référence (Standard Mean Ocean Water, SMOW). Toutes les valeurs sont exprimées par rapport à cette référence.

Le rapport isotopique R est le rapport de l'isotope lourd sur l'isotope le plus léger ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/^1\text{H}$). Les résultats sont exprimés en $\delta[\text{‰}]$ par rapport au V-SMOW selon l'expression :

$$\delta = \frac{R_e - R_s}{R_s} * 1000$$

Re: rapport isotopique de l'échantillon Rs: rapport isotopique du standard

Les teneurs isotopiques varient selon la quantité des précipitations (effet de masse), l'origine de la pluie, la répartition au cours de l'année. Les faibles précipitations subissent une évaporation importante durant leur chute dans l'atmosphère, ce qui entraîne un enrichissement en isotopes lourds (Fontes, 1976, Taupin, 1990). D'autre part, les pluies du début et de fin de saison humide sont enrichies en isotopes lourds par rapport aux pluies du milieu de saison. Il y a, en effet, une reprise par évaporation de l'air atmosphérique tant que le profil d'humidité de l'atmosphère n'est pas saturé (Fontes, 1976). C'est pour ces raisons que les pluies éparses, de faible intensité et se produisant dans un environnement très favorable à l'évaporation n'ont pas été étudiées.

Sur les mois les plus arrosés, de juillet à octobre, seules les précipitations supérieures à 8 mm ont été retenues pour les années 1991, 1992 et 1993 (annexe 4).

Les 31 événements pluvieux de 1991 représentent 80% des hauteurs d'eau précipitées durant l'année 1991. Sur les 924,2 mm tombés au cours de l'année, les pluies de mars à juin représentent 143,1 mm dont seule la dernière pluie (H = 30,2 mm) a été prise en compte. Les pluies analysées représentent 95% de la lame d'eau précipitée en saison humide. En 1992, la pluviométrie totale a été de 839,6 mm dont plus de 89% des épisodes présentent un total précipité supérieur à 8 mm. Les 31 pluies se répartissent irrégulièrement sur les 4 mois de la saison des pluies. Le mois de septembre 1992 a été exceptionnellement bien arrosé alors que le mois d'août a subi peu de précipitations. En 1993, la pluviométrie annuelle a été

déficitaire par rapport aux deux années précédentes. On observe beaucoup de petites pluies (<8 mm) essentiellement durant les mois de juin et de septembre. On relève seulement 21 pluies de plus de 8 mm qui ont apporté 75 % des 698,8 mm annuels. Les mois de juillet et août sont les plus arrosés.

Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ s'échelonnent en 1991 de -3,2 à -10,6 ‰ (moyenne : $-6,1 \pm 2,5$) et le deutérium de -2,9 à -67,6 ‰ (moyenne : $-38,4 \pm 21,1$). Elles s'échelonnent de -0,2 à -10,5 ‰ pour l'oxygène-18 en 1992 (moyenne : $-4,6 \pm 2,7$), $\delta^2\text{H}$ de 11,3 à -79,8 (moyenne : $-27,9 \pm 22,7$) et de -0,9 à -10 $\delta^{18}\text{O}$ (moyenne : $-5,2 \pm 2,7$) et 4,5 à -65,6 ‰ $\delta^2\text{H}$ (moyenne : $-29,2 \pm 21,8$) en 1993. L'année 91 présente des teneurs en isotopes lourds plus faibles que les années 1992 et 1993. La répartition des valeurs de ^{18}O (figure 8.1.3.) montre un recentrage pour les valeurs de -3 et -5 ‰ et -8 à -10 ‰ en 1991, -1 à -2 ‰ et -5 à -7 ‰ en 1992, -3 à -4 ‰ et -8 ‰ en 1993.

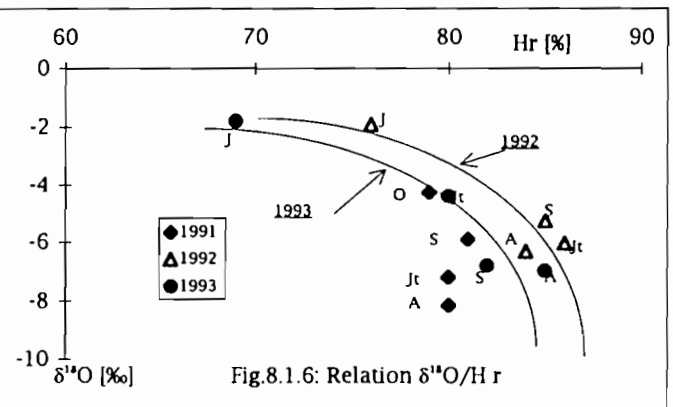
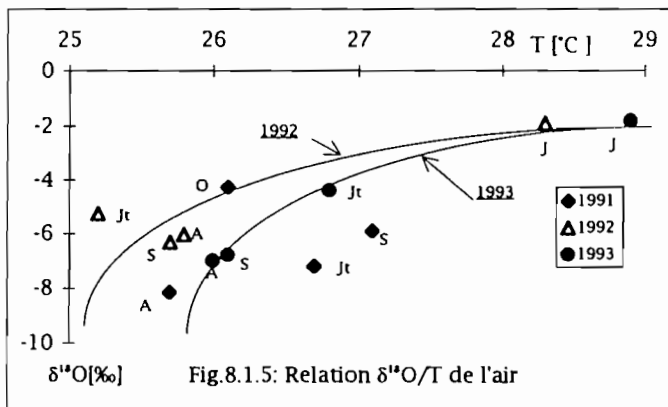
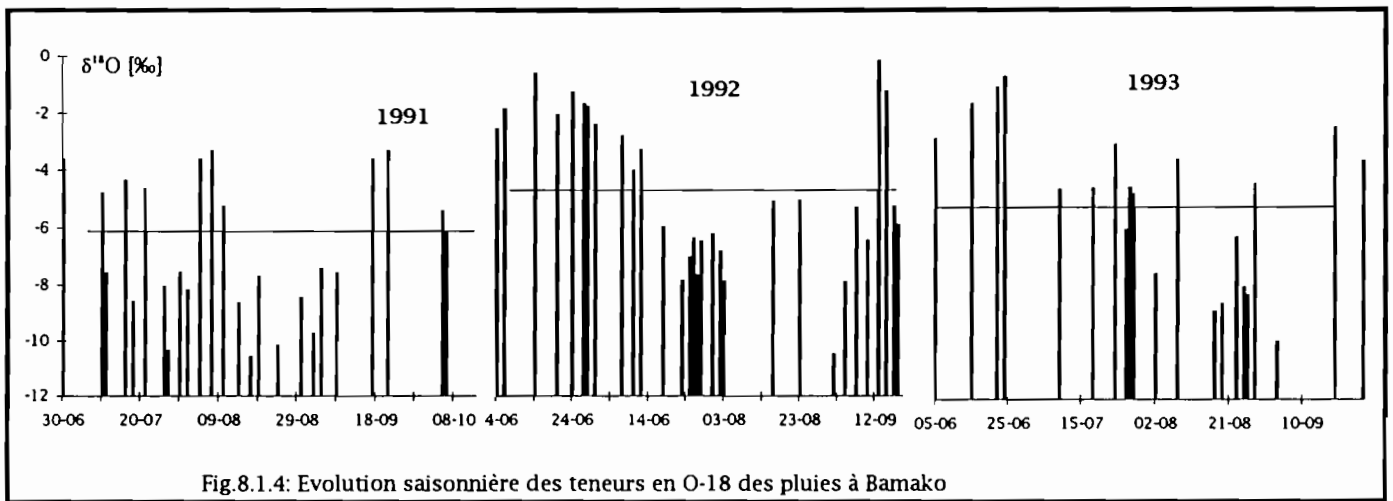
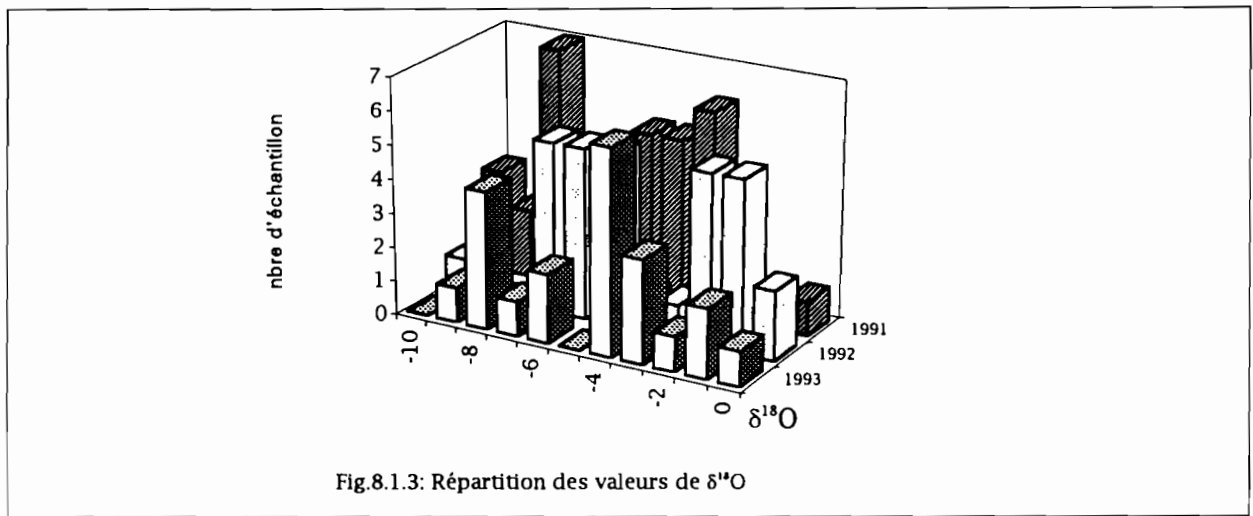
8.1.2.2 Evolution saisonnière de ^{18}O

La répartition des isotopes sur trois années (figure 8.1.4) montre que les pluies de début de saison et les pluies de la fin de la saison se situent vers les valeurs les plus enrichies en ^{18}O . En 1991, on relève de nombreuses pluies en octobre, inexistantes en 1992 et 1993. Par contre, l'année 92 montre un déficit net de bonnes précipitations. Pour chaque année, le coeur de la saison des pluies (fin juillet-début août) montre des teneurs en isotopes lourds plus faibles.

Les écarts d'une année sur l'autre sont le reflet des fluctuations d'humidité relative et de l'origine des masses d'air, circulation des JET... (Fontes, 1976) comme nous le verrons après.

8.1.2.3 Relation $\delta^{18}\text{O}$ /température de l'air

Le fonctionnement de l'atmosphère peut être simplifié en considérant qu'il y a une relation directe entre la température de condensation à la base des nuages et la température au sol. Dans ces conditions, une évolution corrélée entre la température au sol et les teneurs en oxygène-18 est possible. Des études précédentes (Fontes, 1976) ont montré que les teneurs isotopiques des pluies ne sont pas en relation avec les températures à la surface du sol dans les régions semi-sahéliennes et sahéliennes car elles subissent une forte évaporation de la base des nuages jusqu'au sol. La relation observée ici entre les valeurs moyennes mensuelles de $\delta^{18}\text{O}$ et de température de l'air (°C) n'est pas linéaire (figure 8.1.5) car de nombreux paramètres entrent en jeu. La température au sol baisse au moment de la pluie de plus de 30' (Gallaire et al, 1994). L'évaporation est donc plus forte au début de la pluie puis il y a ensuite rééquilibrage. Ce phénomène est accentué par le fait que les pluies se produisent généralement en fin d'après-midi alors que l'irradiation du sol est maximum. Cette action importante du sol éclipse la relation entre les teneurs isotopiques et la température de l'air pour les faibles précipitations.



Par contre, pour les précipitations intenses, il y a petit à petit un équilibrage et on peut supposer un lien entre les teneurs en isotopes lourds et la température au sol.

Les pluies de juin condensent à des températures comprises entre 28 et 29°C. Les eaux sont enrichies en isotopes lourds du fait des forts taux d'évaporation. En 1991, les teneurs isotopiques de juin n'ont pas été mesurées. Les conditions climatiques (humidité, température, vent) sont semblables en août et septembre et ne permettent pas une

différenciation de la composition isotopique des pluies sauf en 1991. Les températures du mois de septembre 1991 sont plus élevées du fait de la faible pluviosité durant ce mois.

C'est en juillet que la disparité des concentrations isotopiques d'une année sur l'autre est la plus importante. En 1991, les pluies à Bamako sont très négatives alors que les conditions climatiques, température et humidité, sont proches de celles des autres années. Des températures plus basses peuvent impliquer des altitudes de condensations plus élevées. Ceci est le cas des pluies provenant d'occlusions de fronts polaires comme pour les lignes de grains (Fontes, 1976). Les échanges au cours de la chute de l'eau peuvent être également moindres.

Pour les années 1992-1993, on constate une différence dans l'évolution annuelle. En 1992, les températures sont légèrement plus faibles et les teneurs isotopiques moins appauvries qu'en 1993. L'écart est toutefois faible (1°C).

8.1.2.4 Relation $\delta^{18}\text{O}$ /humidité de l'air

La vapeur de mousson subit une condensation partielle tant que le profil d'humidité de l'atmosphère n'est pas proche de la saturation. L'étude à l'échelle mensuelle en 1991, 1992 et 1993 ne permet pas de confirmer cette relation (figure 8.1.6). L'analyse à l'échelle de la pluie pourrait permettre de confirmer qu'aux mois de juillet, août et septembre, la ré-évaporation des pluies est plus faible et le $\delta^{18}\text{O}$ plus négatif.

Les écarts d'humidité relative pour les deux années 1992 et 1993 (6% en juillet et 1% en août) permettent toutefois une différenciation isotopique des pluies. L'écart est plus prononcé pour les pluies de juillet.

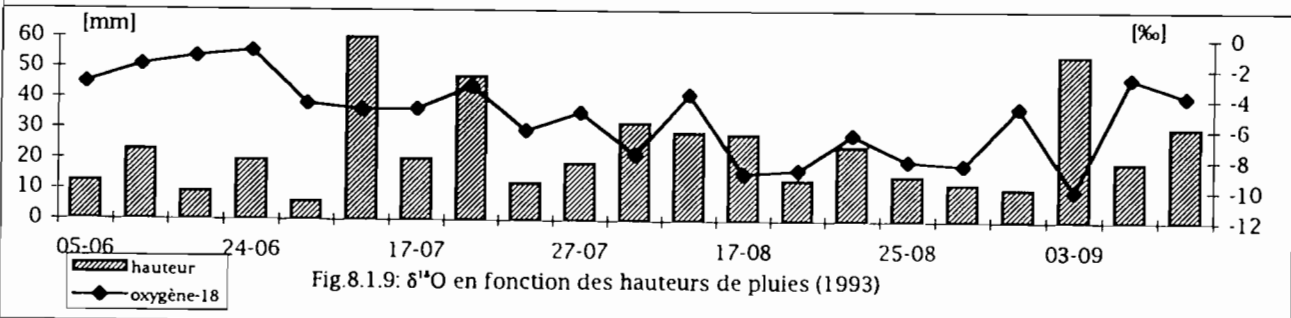
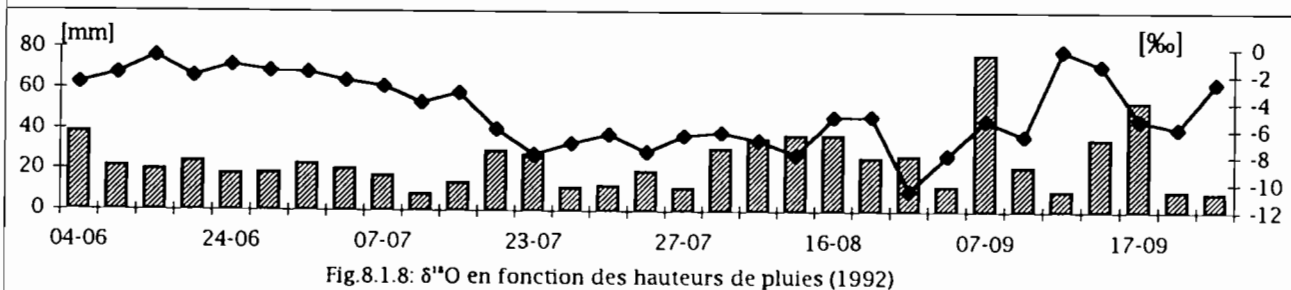
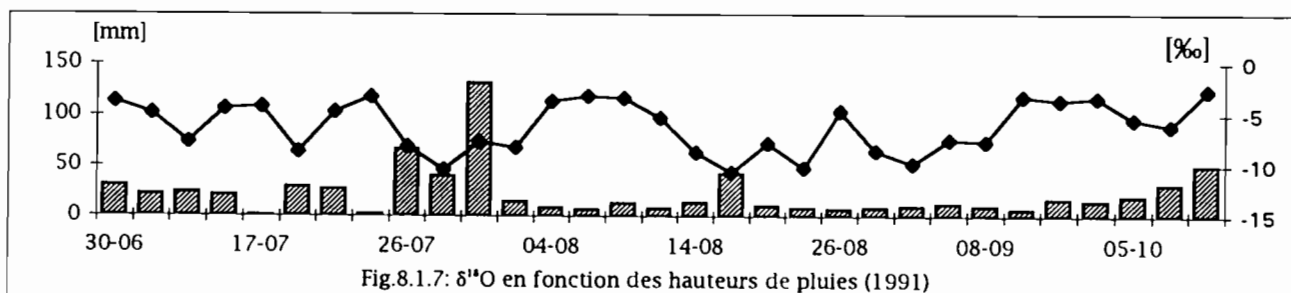
Il apparaît que les pluies de juillet 1992 se forment dans un environnement de températures moins élevées et d'humidité relative plus forte qu'en 1993. L'air est plus saturé et devrait être moins sélectif vis à vis de ces précipitations dont les teneurs en O-18 sont, par conséquent plus négatives. Le mois de juillet qui présente le maximum d'écart entre la température et l'humidité va dans le sens d'une plus faible reprise évaporatoire en 1992 qu'en 1993 avec des valeurs plus négatives. Les écarts de températures et d'humidité relative sont attribuables à la faiblesse des précipitations pour ce mois de juillet. La hauteur mensuelle est de 177,8 mm en 1992 et 148,8 mm en 1993. Il apparaît donc que les variations isotopiques sont liées aux conditions climatiques de précipitations, elles mêmes liées au nombre et à l'intensité des événements pluvieux. Pourtant, les conditions de juillet 1992 paraissent correspondre à des pluies de mousson d'altitude de condensation moyenne et d'échanges modérés. Au contraire, les précipitations de juillet 1993 proviendraient de phénomènes de type convectif (Gallaire et al, 1994) comme les lignes de grains dont l'origine est également l'océan Atlantique mais avec une condensation à plus haute altitude.

8.1.2.5 Relation $\delta^{18}\text{O}$ /hauteur des précipitations

Les graphiques 8.1.7, 8.1.8 et 8.1.9 présentent les hauteurs d'eau précipitées et les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$. Pour l'année 1991, un net appauvrissement en isotopes lourds ressort pour les pluies les plus importantes alors qu'il y a enrichissement après plusieurs événements de faible intensité (début août ou octobre). La corrélation entre les hauteurs précipitées et la composition isotopique est l'«effet de masse». Lors des pluies fines, les gouttes d'eau, de petite taille, ont des surfaces spécifiques plus importantes et subissent une évaporation plus intense. De plus, il n'y a pas saturation de l'air et l'eau s'évapore plus facilement.

Ceci reste valable pour quelques pluies de 1992 et 1993 mais pour ces deux années, la corrélation entre les hauteurs de pluies et les teneurs en oxygène 18 n'est pas bonne car d'autres facteurs influencent les teneurs comme le taux d'humidité de l'air, la température au sol, l'intensité des pluies, l'origine des masses d'air... Il est possible également que les pluies les plus négatives soient liées au Jet d'Est Tropical (Joseph et al, 1993) ou à des mécanismes de convection. Les masses d'air peuvent alors atteindre des altitudes très élevées (>10000 m). La condensation se produira à des températures plus basses. Si le rééquilibrage de l'eau ne peut pas se produire totalement lors des pluies, la résultante sera plus négative que pour les autres pluies.

Des points très négatifs sont observés fin juillet et mi-août en 1990, mi-août en 1992 et fin juillet à début septembre en 1993. La différenciation isotopique des eaux de pluie dépend alors de l'existence d'événements pluvieux de types différents.



8.1.3 RELATION $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ ENTRE LES EVENEMENTS PLUVIEUX

Les teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux précipitées mondiales (DMM) sont fortement corrélées et donnent une droite définie par Craig (1961) d'équation :

$$\delta^2\text{H} [\text{‰}] = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$$

Une étude plus actuelle sur 25 années de mesures donne une droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} [\text{‰}] = (8,17 \pm 0,08) * \delta^{18}\text{O} + (10,56 \pm 0,64) \text{ (Yurtsever et Gat, 1981).}$$

Une pente de 8 doit se retrouver systématiquement pour les événements pluvieux « non évaporé » du fait que la condensation est considérée comme un phénomène d'équilibre (Fontes, 1976). La valeur « d » (+10) est représentative d'un régime de perturbations océaniques pur (Craig, 1961). Cette valeur correspond à l'équation $d = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$ selon l'équation donnée par Craig. L'excès de $\delta^2\text{H}$ a une signification géophysique en terme de composition des masses d'air dont les pluies dérivent (Yurtsever et Gat, 1981). La valeur « d » augmente lorsqu'une part de la vapeur provient d'un bassin fermé soumis à l'évaporation et/ou de vapeur continentale recyclée. Pour « d » inférieur à 10, il y a évaporation des pluies et/ou appauvrissement par « effet continental ». En passant au-dessus des continents, les premières précipitations amènent un appauvrissement en isotopes lourds. Le réservoir atmosphérique sera de plus en plus pauvre ou fur et à mesure que les masses d'air évolueront et que l'eau condensera.

Les pluies de 1991 supérieures à 8 mm, la droite de corrélation entre ces points et la droite de Craig (droite des eaux mondiales) ont été placées sur la figure 8.1.10.

La relation obtenue avec les pluies de 1991 montre une très bonne corrélation entre l'oxygène 18 et le deutérium ($R=0,98$). L'équation est de la forme :

$$\delta^2\text{H} [\text{‰}] = (8,4 \pm 0,3) * \delta^{18}\text{O} + (15,6 \pm 2,3)$$

La pente de cette droite est proche de celle des eaux océaniques mondiales avec un fort enrichissement en deutérium. L'alignement des points sur une même droite indique une origine commune des masses d'air. Pour les valeurs moyennes de l'année, «d» est de 10,4.

Les valeurs de l'année 1992 ont été placées sur le graphique 8.1.11. La droite de corrélation ($R=0,96$) est proche de la droite de Craig.

$$\delta^2\text{H} [\text{‰}] = (8,4 \pm 0,3) * \delta^{18}\text{O} + (10,9 \pm 1,6)$$

Si la pente de la droite de corrélation est la même que celle de l'année 1991, la valeur «d» est de 8,9.

L'année 1993 (fig.8.1.12) se rapproche de l'année 1991 avec «d» de 12,4 et une droite de corrélation ($R=0,98$) de la forme :

$$\delta^2\text{H} [\text{‰}] = (8,2 \pm 0,35) * \delta^{18}\text{O} + (13,6 \pm 2,0)$$

Les pentes de ces trois relations sont proches de la pente de la droite des eaux mondiales (+8) mais les valeurs «d» sont différentes. Les pluies analysées représentent bien les teneurs de la vapeur condensée avec peu de pluies évaporées. L'excès de deutérium en 1993 est synonyme d'un appauvrissement de la vapeur de ces masses d'air par de l'eau évaporée recyclée des sols continentaux, des bassins intérieurs (cuvette lacustre du Niger, lacs).

L'année 1992 serait moins soumise à un mélange d'air repris sur les terres humides puisque l'excès en deutérium est proche de celui des eaux mondiales. Les pluies de septembre, majoritaires en 1992, créent peut-être la différence avec les années 1991 et 1993.

Une étude faite à partir des eaux recueillies dans des petits aquifères discontinus du nord Mali et considérées comme représentatives des eaux moyennes précipitées, donne une droite de pente 7,57 et d'intercepte 8,15 (Joseph et Aranyossy, 1989).

8.1.4 ETUDE COMPAREE DES MOYENNES PONDEREES

Vu l'importance de la hauteur des précipitations sur le cachet isotopique, il est nécessaire de pondérer les moyennes annuelles (ou mensuelles) en isotopes stables afin de ne plus tenir compte de cette variable. La pondération consiste à affecter pour chaque pluie sa hauteur d'eau précipitée selon l'expression :

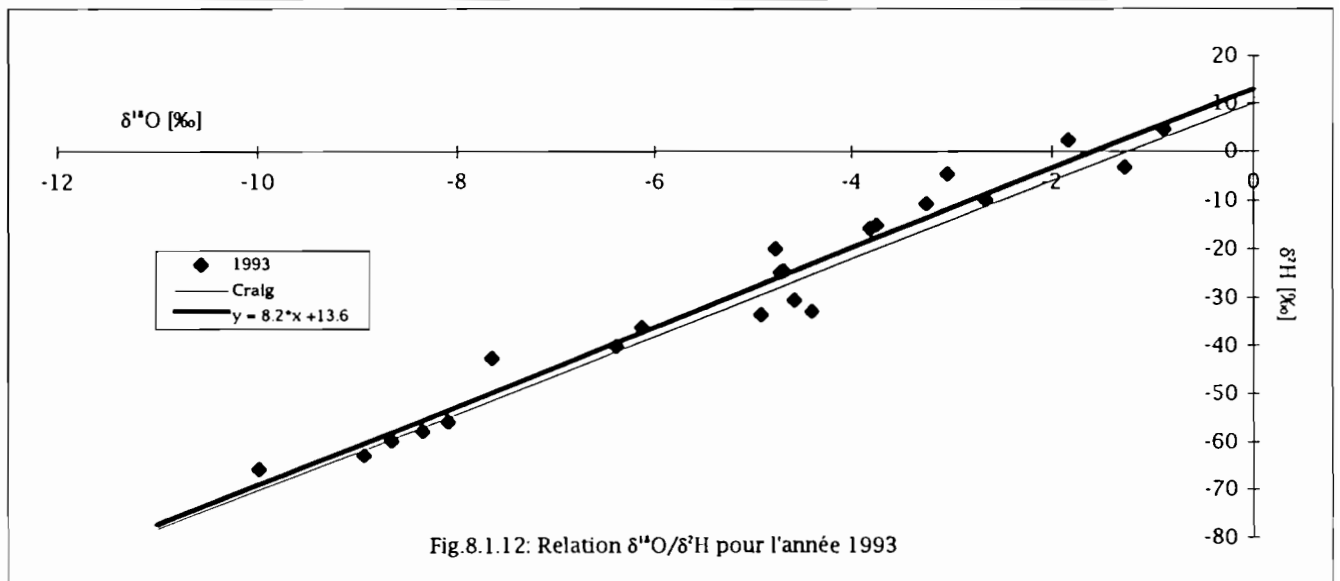
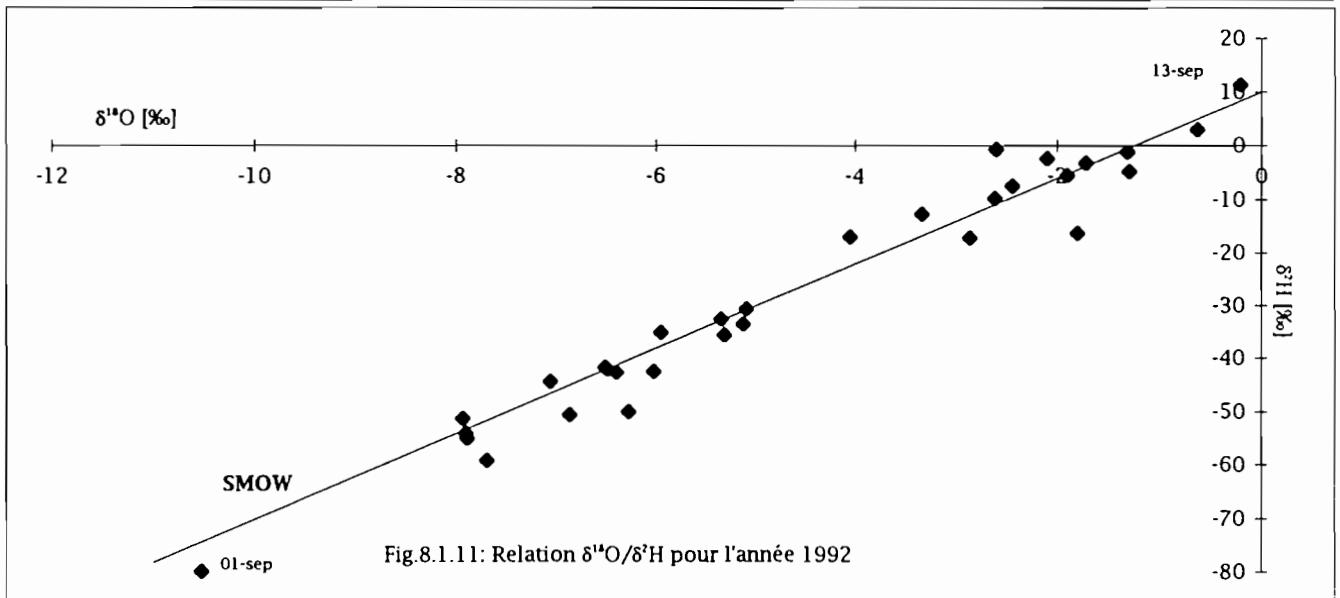
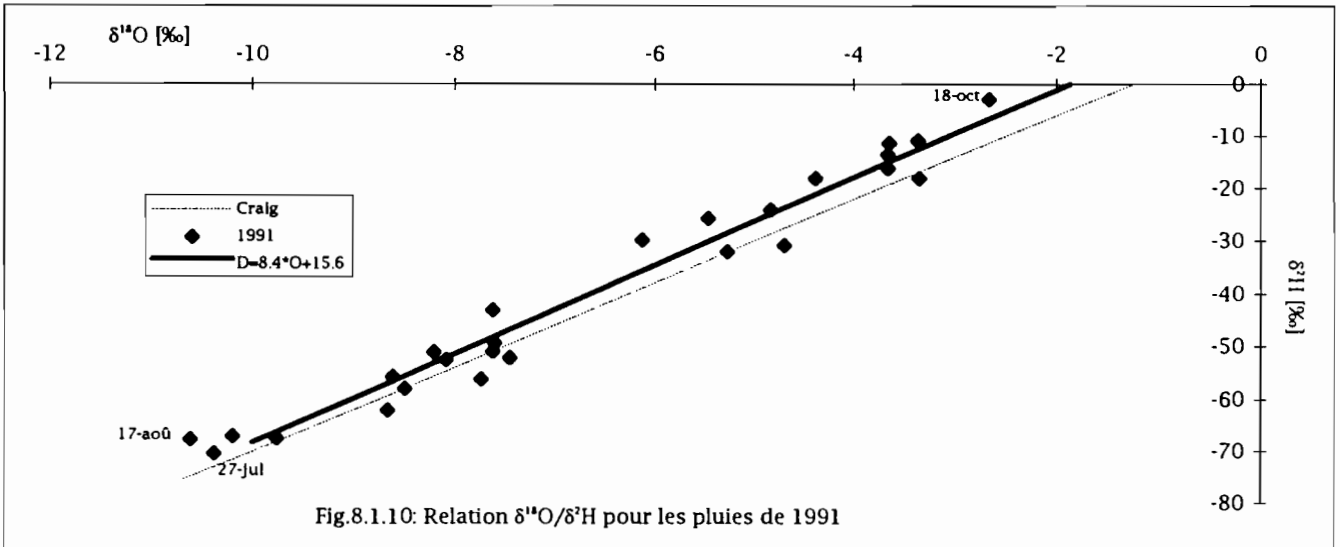
$$\delta I_p = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * \delta I_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

P_i : quantité d'eau précipitée durant la période i (année ou mois) en mm.

δI_i : composition isotopique durant la période i (^{18}O ou ^2H) en ‰.

** moyenne annuelle*

La valeur annuelle moyenne pondérée des eaux de pluies 1991 est -6,7 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et -44,4 ‰ pour $\delta^2\text{H}$, -4,8 ‰ / -30,4 ‰ en 1992, -5,2 ‰ / -29,3 ‰ en 1993. Les moyennes interannuelles pondérées de $\delta^{18}\text{O}$ en 1962-1969 et 1973 (Jusserand, 1976) sont de -4,6 et -5 ‰. Ces valeurs sont proches de celles des années 1992 et 1993. A l'opposé, la teneur moyenne des eaux de pluies des années 1969-1978 à Bamako est de -2 ‰ pour l'oxygène 18 et -13 ‰ pour le deutérium (Travi et al, 1987) et s'écarte fortement de nos valeurs. Ces eaux montrent un enrichissement important en isotopes lourds par rapport aux pluies actuelles. Les valeurs plus négatives de 74, 75 (AIEA, 1979) et 1991 indiquent de faibles reprises par évaporation sans doute du fait d'une meilleure saturation de l'air et donc de précipitations plus importantes. Les études statistiques faites par l'AIEA à la station de Bamako de 1962 à 1979 donnent une moyenne interannuelle de -4,44 $\delta^{18}\text{O}$ ‰ et -30,7 $\delta^2\text{H}$ ‰ (AIEA, 1992). Les années de sécheresse (1965-1966, 1972-1973), les teneurs en oxygène 18 sont très enrichies en isotopes lourds ($\delta^{18}\text{O} = -0,34$ ‰ en 1972). Ceci se retrouve pour toutes les régions sahéliennes. Les variations saisonnières, qui sont le reflet de fluctuations de température et d'humidité, sont d'autant plus importantes que les précipitations se produisent loin de la zone d'origine des masses d'air. Ces écarts peuvent être de 5 à 20 ‰ (Fontes, 1976). L'écart très fort entre les années 1990 et les années 1970 peut s'expliquer par une diminution de la durée de la saison des pluies. La saison des pluies s'étendait d'avril à novembre dans les années soixante-dix alors qu'elle se restreint aux seuls mois de juin à octobre actuellement.



L'origine des précipitations, la présence de mouvements de convection, l'importance des lignes de grains par rapport aux pluies de mousson entrent en compte dans la différenciation isotopique des eaux de pluies sur ces trois décennies.

Les événements pluvieux les plus importants en dehors des pluies de mousson sont les lignes de grains qui sont apportées par le Jet d'Est Tropical. Ces lignes de grains peuvent apporter 80% des précipitations dans les zones sahéliennes (Fontaine, 1991). L'origine et les mouvements des lignes de grains, des pluies de mousson, la présence de phénomènes convectifs de haute altitude (Taupin et al, 1994) peuvent expliquer une différenciation des compositions isotopiques. L'importance des JEA entraînant les masses d'air vers de hautes altitudes et générant ainsi des pluies très négatives a été évoquée par Gallaire et al (1994). Les particularités soulevées au paragraphe 8.1.2.5 et qui seraient liées à des mouvements de convection en juillet n'apparaissent pas dans les moyennes annuelles. Ce mois n'a pas un poids très fort sur l'ensemble de l'année.

** moyennes mensuelles*

Pour mieux comprendre ces différences, il est intéressant de revenir à une échelle mensuelle. Le graphique 8.1.13 regroupe les valeurs de 1991, 1992, 1993 (cette étude), 1974 et 1975 (AIEA, 1979). Les mois de juin, septembre, octobre, novembre 1974 et octobre 1975 se placent au-dessous de la droite de Craig. Les pluies se produisent alors que l'atmosphère est « désaturé » et sont ainsi soumises à une évaporation au cours de leur chute. Le caractère évaporé que souligne la pente des droites de corrélation pour les pluies des années 1974 et 1975 vient sans doute du fait que toutes les pluies ont été prises en compte, même les plus faibles en intensité. Le mois d'octobre 1991 se détache plus nettement. L'évaporation au-dessus des terres traversées par le JEA et la mousson entraîne un appauvrissement progressif de la vapeur. Les pluies seront localement et temporairement plus « légères ». Le delta central du fleuve Niger ainsi que les forêts tropicales humides de la Côte ouest Africaine influencent notablement les masses d'air. Les points des années 1975 et 1992 se positionnent sur la droite alors que ceux des années 1991 et 1993 sont au-dessus de la droite des eaux mondiales.

Les pluies les plus appauvries en isotopes lourds se situent au cours du mois de juillet en 1974 et 1975 et en août pour les années 1991, 1992 et 1993. Ceci confirme un décalage de la saison des pluies entre ces deux périodes et l'importance des pluies du mois d'août sur la caractéristique isotopique annuelle.

8.1.5 ORIGINE DES PRECIPITATIONS

L'évolution des teneurs en isotopes lourds au cours de l'année à Bamako et leur comparaison avec d'autres stations d'Afrique de l'Ouest va nous permettre de mieux définir l'origine et le déplacement des masses d'air circulant au Mali. Les effets de continentalité et de latitude pourront être soulignés.

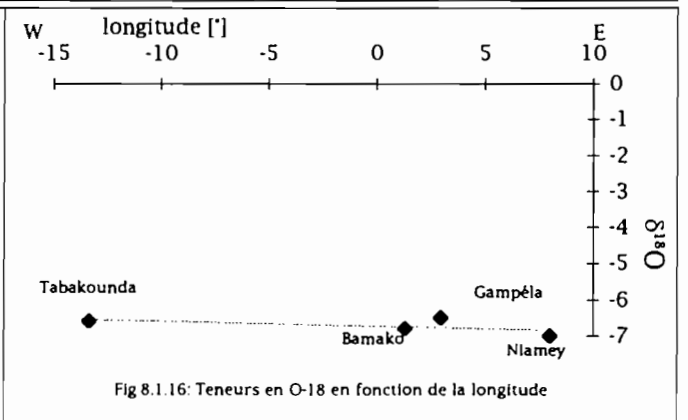
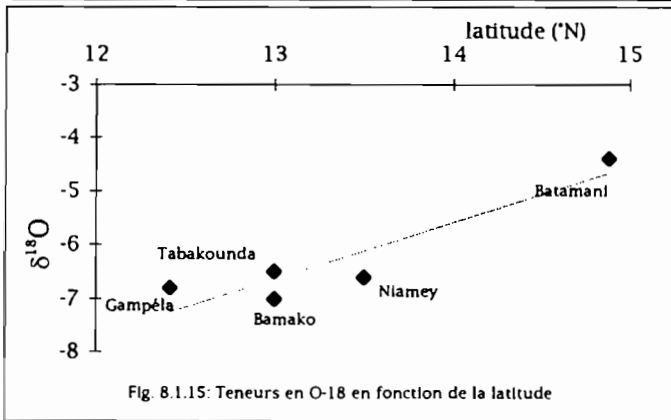
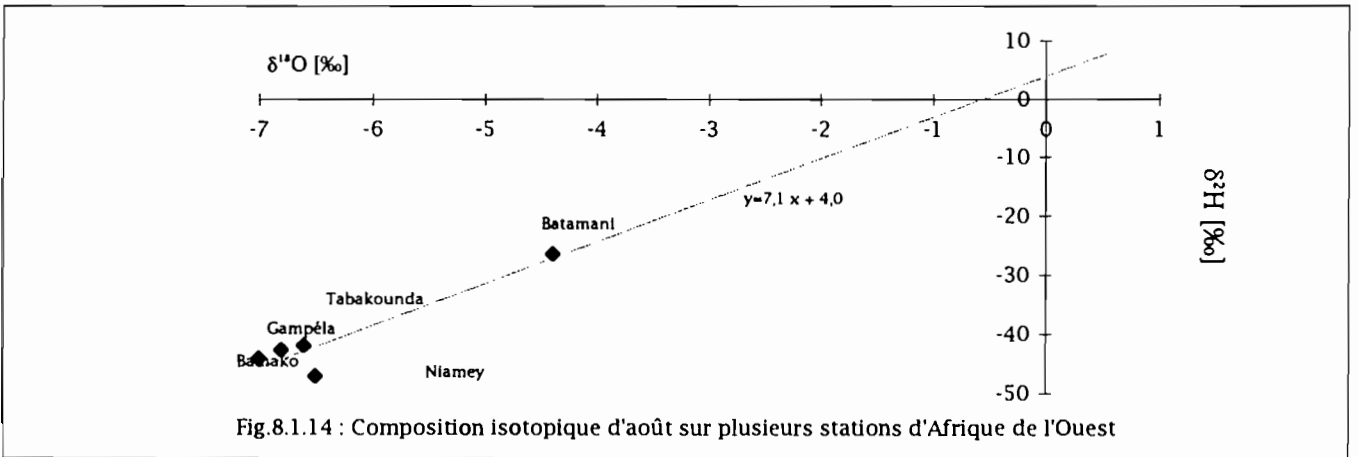
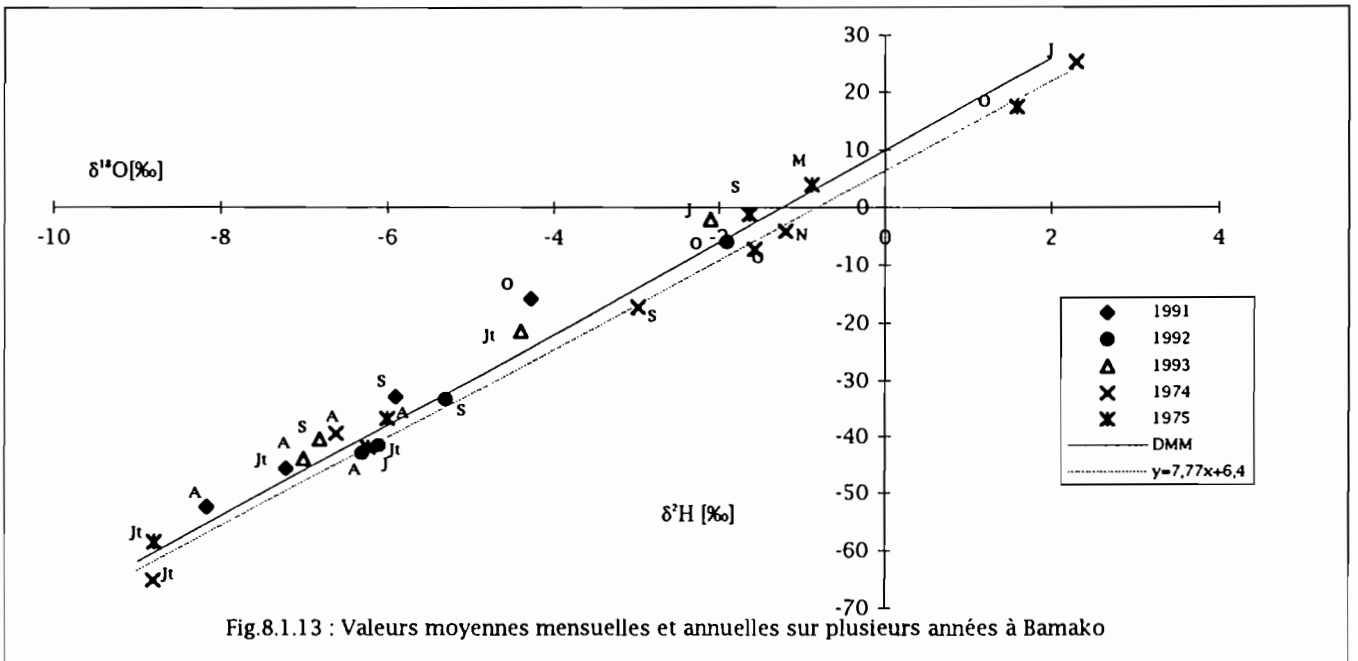
Nous avons sélectionné plusieurs données les plus proches des années actuelles. Etant donné la variabilité saisonnière des teneurs isotopiques, il aurait été préférable de comparer les valeurs d'une même année. Une étude ponctuelle sur la pluie du 8/8/89 (46 mm) à Gampéla au Burkina-Faso (1°20'42 E / 12°25'05 N) donne un couple de valeur de $-6,8 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ et $-42,7 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$ (Carbonnel et al, 1990). La moyenne mensuelle d'août 1981 à la station de Tabakounda au Sénégal ($\approx 13^{\circ}20'W / 13^{\circ}30' N$) est de $-6,6 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ et $-41,9 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$ (Travi et al, 1987). La moyenne d'août 1991 à Niamey (3°E / 13°N) est $-6,5 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ et $-47,1 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$ (Taupin com.pers.). La valeur des pluies cumulées du mois d'août 1993 à la station de Batamani (4°05'W/14°53'N) est $-4,4 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ et $-26,5 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$. Ces valeurs, la moyenne du mois d'août 1993 à Bamako (7°W/13°N) et la droite de Craig, ont été placées sur le graphique 8.1.14. Les teneurs isotopiques sont proches sauf à la station de Batamani. La droite de corrélation est définie par une pente de 7 qui indique une évaporation. Ce sont les eaux de pluies de Batamani, coeur du delta central, qui attirent la droite de corrélation. Les eaux de Bamako sont plus pauvres en isotopes lourds.

Les $\delta^{18}\text{O}$ de ces stations sont représentés sur le graphique 8.1.15 en fonction de la latitude. La station de Batamani se détache nettement des autres. Cette station est située la plus au nord, en zone sahélienne. Les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies de Batamani sont influencées par les fortes températures et l'évaporation des surfaces inondées.

Les teneurs en ^{18}O des stations sont représentées sur la figure 8.1.16 en fonction de la longitude. Hormis Batamani, les autres stations sont situées autour de la latitude 13°N. Elles permettent donc de comparer l'évolution des masses d'air d'est en ouest sur une même ligne. Contrairement aux conclusions énoncées par Joseph et Aranyossy (1989) qui ont étudié une même masse d'air, il n'apparaît pas de gradient de « continentalité inverse ». Ce gradient est considéré par les auteurs comme représentatif des « lignes de grains ».

Les études faites à Niamey en 1988 (Ousmane, 1988, Le Gal La Salle, 1990, Taupin, 1990) indiquent une droite proche de celle de Craig. Les valeurs obtenues sur plusieurs stations Sénégalaises (Travi et al, 1987) montrent également une droite proche de celle des eaux mondiales. Ceci confirme la similitude des compositions isotopiques sur les stations de cette région de l'Afrique de l'ouest. Les précipitations du Sénégal sont fortement influencées par les apports océaniques (alizés marins) d'excès en deutérium +10 (Travi et al, 1987).

L'essentiel de l'humidité apportée sur l'Afrique occidentale vient de l'hémisphère sud et transite par le Golfe de Guinée. Ces pluies océaniques s'enrichissent en vapeur d'eau au contact des masses d'air régnant au-dessus des forêts. En se déplaçant du sud vers le nord, il y a appauvrissement de la vapeur en isotopes lourds. Les pluies sont alors de plus en plus « légères ». Ceci ne peut être démontré sur les stations situées entre 12 et 14 ° de latitude puisque les écarts sont minimes. L'enrichissement en isotopes lourds des eaux de pluies à Batamani s'explique par les conditions climatiques favorables à une évaporation de la pluie au cours de sa chute. L'humidité relative en août à proximité de la mare de Batamani est de 67 % et la température moyenne de 31,1°C.



Les stations étudiées sont influencées par ces pluies de mousson. Les courants JEA et JET reprennent ces courants de mousson et ajoutent une humidité venue surtout de l'Afrique centrale et de l'océan Indien. Des études menées au Niger ont montré que des différences de signature isotopique d'une année sur l'autre peuvent être attribuées, non pas à la position du FIT, mais à la présence d'apports du JEA ou l'existence d'advection d'air polaire d'altitude (Gallaire et al, 1994). Ces phénomènes de haute altitude sont importants puisque les lignes de grains représentent 80 % des précipitations des régions sahéliennes.

8.2 L'ÉCOULEMENT DE SURFACE

8.2.1 MODULES ET HAUTEURS SUR LE BASSIN AMONT

Les premiers prélèvements et analyses ont commencé en 1990. Les années hydrologiques 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993 et 1993-1994 sont des années de faible hydraulité. Pour le Bani, le plus fort module de la période a été enregistré en 1991-1992 alors que l'année 1992-1993 a été très mauvaise.

Les études statistiques faites sur les débits maximums enregistrés à Koulikoro indiquent une probabilité de retour sèche de 17 ans pour l'année 1992-1993, de 44 ans pour l'année 1993-1994 (figure 8.2.1).

Les débits moyens mensuels et annuels sur les deux stations amont et les stations du delta pour les années étudiées sont reportés en annexe 2. La comparaison des débits moyens mensuels en basses eaux à Banankoro et Koulikoro montre l'importance du soutien de l'étiage par les eaux du barrage de Selingue. La retenue ne représente que 5% de l'écoulement total interannuel et le régime du fleuve n'est pratiquement pas affecté en hautes eaux (Olivry, 1994a).

8.2.2 LES ÉCOULEMENTS DANS LA CUVETTE LACUSTRE

Sur l'ensemble de la cuvette lacustre, l'année 1991-1992 a été la plus favorable à une bonne inondation au contraire des années 1990-1991 et 1993-1994 où les débits moyens annuels étaient de 5 % inférieurs au module moyen sur les trois années complètes.

Il faut noter que la somme des modules des stations de Kara et Tilembeya est supérieure à celle de la station de Ke-Macina. La différence entre l'entrée du delta et les deux stations amont de Mopti est de 55 à 60 m³ s⁻¹ par an, soit un gain de 8,5 à 9,5 %. Cette eau provient très probablement du fleuve Bani d'où elle a transité à travers la « mésopotamie ». L'estimation de ces échanges entre les deux fleuves est importante pour la précision du bilan sur la partie amont du delta. Comme il y a un décalage dans la crue des deux cours d'eau, il est possible que le plus précoce se déverse dans la mésopotamie et rejoigne l'autre. Une inversion de cette tendance aurait lieu lorsque le deuxième cours d'eau atteindrait, à son tour, son maximum. Les débits journaliers de l'année 1992-1993 ont été relevés pour les

stations de Ke-Macina, Douna, Akka et Dire (figure 8.2.2a.). La forme de l'hydrogramme est très différente pour les stations amont et pour les stations après la zone inondée. L'hydrogramme plat des stations de Akka et Dire indique l'effet régulateur du lac Debo et de l'ensemble des régions inondées. Le décalage du maximum de la crue dans le temps apparaît nettement pour les stations à l'aval du lac Debo.

L'étude comparée des débits mensuels pour les stations principales de 1991 à 1994 est faite sur la figure 8.2.2b.

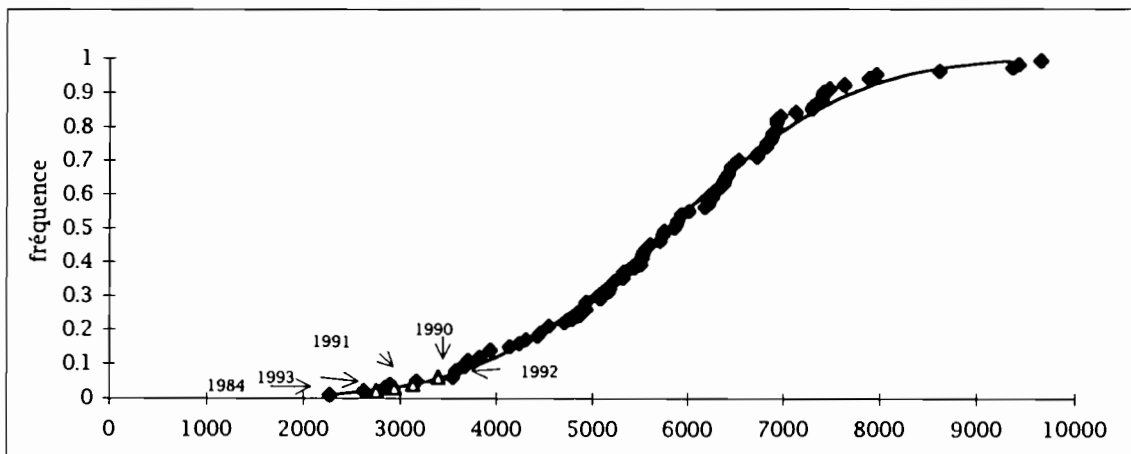


Fig.8.2.1: Etude statistique des débits maximum à Koulikoro de 1907 à 1993

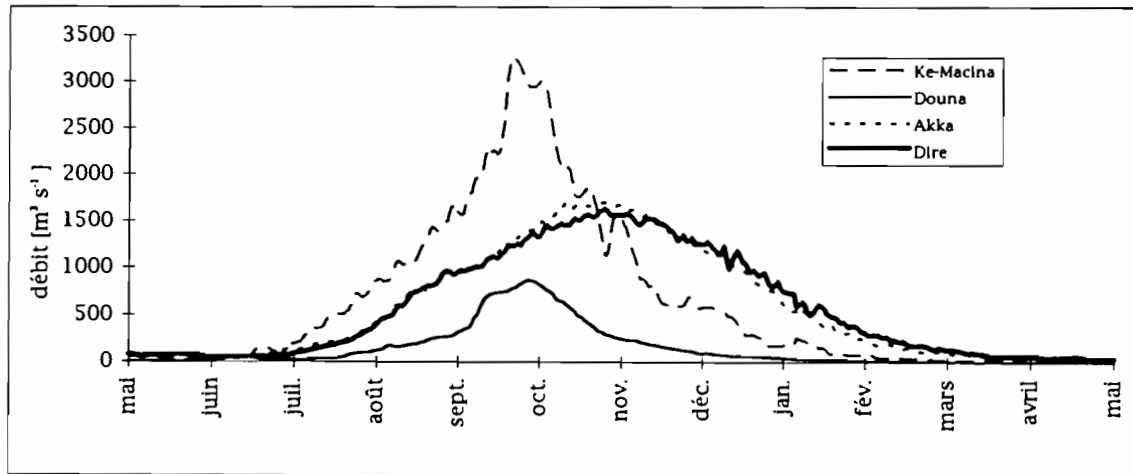


Fig.8.2.2a: Débits journaliers à Ke-Macina, Douna, Akka et Dire en 1992-93

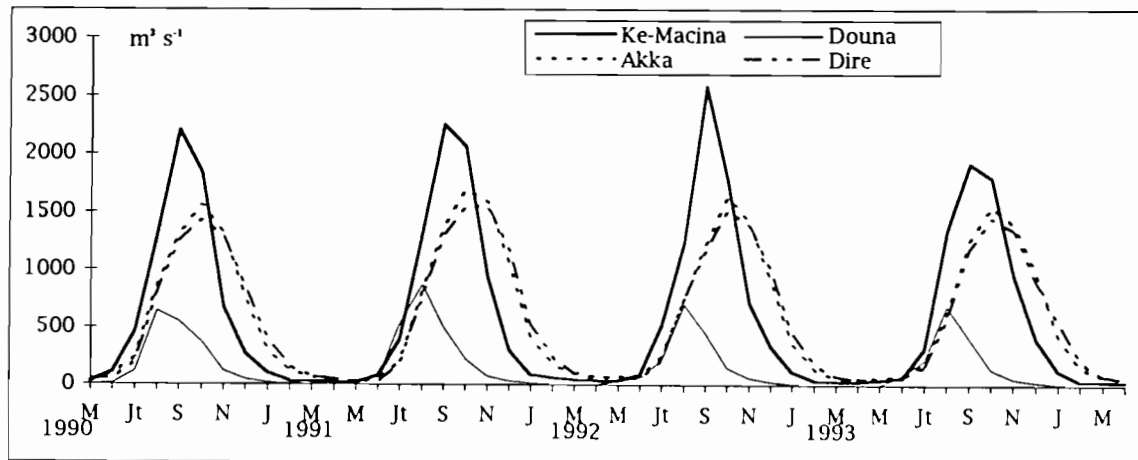


Fig.8.2.2b: Variations interannuelles des débits mensuels de 1990 à 1994

8.2.3 EVOLUTION DU $\delta^{18}\text{O}$ AU COURS DE LA CRUE

L'étude et l'interprétation des isotopes stables (^{18}O et ^2H) des eaux de surface au travers de la cuvette lacustre au cours du cycle hydrologique permettent de comprendre le fonctionnement du système hydrique en soulignant les pertes par évaporation, les recharges par les pluies et les connexions avec la nappe souterraine.

Un suivi décadaire sur les stations de Douna et Banankoro (tableau 8.2.1) permet de connaître la composition isotopique des eaux entrant dans le delta et les relations nappes-rivières en amont. La station de Banankoro sur le Niger a été préférée à celle de Koulikoro car elle représente l'état «non-influencé» de l'eau du Niger amont. Les eaux du barrage de Selingue se jettent dans le fleuve quelques kilomètres en aval de Banankoro. De juillet 1990 à avril 1991, un mélange de prélèvements journaliers a été fait alors que les points d'avril 1991 à août 91 sont ponctuels.

Les teneurs varient à Banankoro de +3,4 à -5,4 ‰ pour l'oxygène 18 avec une moyenne de -2,4 ‰ (écart-type : 2,4) et +10,9 à -49,5 ‰ pour le deutérium avec une moyenne de -15,4 ‰ (écart-type : 12,4).

A Douna, les écarts sont plus importants du fait que la période des basses eaux est plus longue et permet une évaporation plus forte. Pour ^{18}O , les valeurs vont de +5,2 à -5,6 ‰ avec une moyenne de -1,6 et un écart-type de 3,2. Le deutérium évolue entre +15,3 et -46,1 ‰ (moyenne : -12,1 ; écart-type : 14,7).

NIGER A BANANKORO					BANI A DOUNA				
du	au	18 O	2 H	d	du	au	18 O	2 H	d
07-jul-90	16-jul-90	-1.76	-8.0	6.1	09-jul-90	18-jul-90	1.39	6.0	5.1
17-jul-90	26-jul-90	-3.36	-20.3	6.6	19-jul-90	28-jul-90	-2.18	-11.1	6.3
27-jul-90	05-août-90	-5.24	-32.4	9.5	29-jul-90	07-août-90	-4.78	-29.6	8.6
07-août-90	17-août-90	-5.43	-32.5	10.9	08-août-90	17-août-90	-5.61	-34.1	10.8
18-août-90	27-août-90	-5.15	-31.2	10.0	18-août-90	27-août-90	-5.17	-32.6	8.8
28-août-90	06-sep-90	-4.82	-28.8	9.8	28-août-90	06-sep-90	-4.29	-26.1	8.2
07-sep-90	17-sep-90	-4.84	-27.6	11.1	07-sep-90	17-sep-90	-3.91	-22.0	9.3
18-sep-90	27-sep-90	-4.64	-27.6	9.5	18-sep-90	27-sep-90	-3.83	-22.1	8.5
28-sep-90	07-oct-90	-4.25	-24.4	9.6	28-sep-90	07-oct-90	-3.58	-19.1	9.5
08-oct-90	17-oct-90	-4.01	-22.4	9.7	08-oct-90	17-oct-90	-3.33	-19.0	7.6
18-oct-90	27-oct-90	-3.73	-19.9	9.9	18-oct-90	27-oct-90	-3.12	-18.9	6.1
28-oct-90	07-nov-90	-3.42	-19.4	8.0	28-oct-90	06-nov-90	-2.83	-17.3	5.3
08-nov-90	18-nov-90	-3.27	-19.2	7.0	07-nov-90	16-nov-90	-2.47	-13.7	6.1
19-nov-90	28-nov-90	-3.30	-19.8	6.6	17-nov-90	26-nov-90	-2.22	-15.0	2.8
29-nov-90	07-déc-90	-3.11	-18.6	6.3	27-nov-90	06-déc-90	-2.01	-14.2	1.9
09-déc-90	16-déc-90	-2.79	-16.0	6.3	09-déc-90	16-déc-90	-1.74	-13.2	0.7
23-déc-90	30-déc-90	-2.74	-17.0	4.9	23-déc-90	30-déc-90	-1.14	-11.1	-2.0
06-jan-91	13-jan-91	-2.59	-16.5	4.2	06-jan-91	13-jan-91	-0.87	-8.7	-1.7
20-jan-91	27-jan-91	-1.97	-12.3	3.5	20-jan-91	27-jan-91	-0.41	-8.9	-5.6
03-fév-91	10-fév-91	-1.10	-9.1	0.0	03-fév-91	10-fév-91	0.18	-5.6	-7
17-fév-91	24-fév-91	-0.45	-6.6	-3.0	17-fév-91	24-fév-91	0.86	-2.9	-9.8
03-mar-91	10-mar-91	0.71	-0.1	-5.8	03-mar-91	06-mar-91	1.53	-0.5	-12.7
17-mar-91	24-mar-91	1.43	2.4	-9.0	13-mar-91	20-mar-91	2.43	3.5	-15.9

31-mar-91	07-avr-91	2.38	7.3	-11.7	27-mar-91	03-avr-91	3.38	8.2	-18.8
14-avr-91		3.39	10.9	-16.2	10-avr-91		4.58	11.8	-24.8
17-avr-91		3.26	10.9	-15.1	18-avr-91		4.47	14.1	-21.7
23-mai-91		3.20	9.5	-16.1	24-mai-91		5.22	15.3	-26.5
27-jun-91		-2.84	-17.9	4.8	29-jun-91		-1.30	-12.6	2.2
02-août-91		-4.47	-24.6	11.2	22-jul-91		-3.07	-18.0	6.6

Tableau 8.2.1 : Composition isotopique des eaux du Niger et Bani en 1990-1991

Le cachet isotopique de l'eau des rivières dépend des différentes contributions du système de surface, subsurface, sous-sol et peut être modifié par l'évaporation (AIEA, 1981). L'évolution des teneurs en oxygène 18 au cours de l'année 1990-1991 est en relation directe avec les débits (figures 8.2.3 et 8.2.4).

Au début de la saison des pluies (juillet), il y a une diminution rapide des teneurs en isotopes lourds. Ceci peut être alors dû à un ruissellement direct des pluies et/ou à un apport par les nappes souterraines.

La première hypothèse suppose que les précipitations amènent les eaux du Niger et du Bani vers des teneurs très négatives (-5,43 et -5,61 ‰). Ceci suppose que les pluies qui ont généré la crue soient encore plus négatives puisque l'évaporation a déjà agi sur les eaux du fleuve (Fontes et al, 1991). Les pluies responsables de la crue sont localisées dans les régions montagneuses de la Dorsale Guinéenne et du Fouta Djallon où les teneurs en oxygène 18 sont de -5 à -6 ‰ (Fontes et al, 1991). La pauvreté en isotopes lourds de ces eaux s'explique par un gradient d'altitude qui se situe entre -0,16 ‰ au Cameroun (Fontes et Olivry, 1976) et -0,3 ‰ pour 100 m au Pérou (Aranyossy, 1989).

La valeur extrême du $\delta^{18}\text{O}$ est plus faible à Douna (-5,61). L'altitude moyenne d'origine des pluies du Bani est inférieure à celle du bassin versant du Niger. Toutefois, l'origine géographique est différente, et c'est la proximité de l'océan qui permet de maintenir des eaux de pluies négatives.

La valeur la plus négative correspondrait aux pluies du mois d'août qui sont les plus appauvries en isotopes lourds. Il semble pourtant que les pluies du bassin amont ne sont suffisamment négatives pour expliquer des valeurs de -5,6 ‰.

La deuxième hypothèse suppose que les eaux très appauvries proviennent en partie des nappes par «chasse» des eaux des premières pluies. Avant la sécheresse des années 1970, les isohyètes étaient plus hautes, les eaux précipitées sans doute plus négatives qu'actuellement à Bamako (cf paragraphe 8.1). De plus, la recharge des aquifères est maximale lorsque les précipitations sont fortes et donc les plus négatives.

Cette deuxième hypothèse suggère donc que la totalité des eaux au point le plus négatif vienne des nappes. Ceci représenterait un débit de $695 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Banankoro et $587 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Douna. Cet apport semble surévalué surtout lorsque l'on compare avec les débits de la nappe calculés en fin de décrue qui sont de l'ordre de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour le Niger et $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour le Bani (voir plus loin dans ce chapitre).

L'explication la plus logique avec les informations dont l'on dispose est celui d'un mélange entre les eaux de la nappe et les eaux de ruissellement des pluies du bassin versant amont. Au point le plus négatif, les eaux de la nappe seraient les plus importantes.

Sur le Niger et le Bani, un enrichissement en isotopes lourds débute en août alors que la saison des pluies n'est pas terminée et que les débits continuent d'augmenter. Ceci est dû en partie à l'évolution isotopique des pluies au cours de la saison. La composition isotopique des pluies est différente sur l'ensemble du bassin mais il est possible de comparer avec Bamako où les pluies du mois d'août sont les plus négatives de l'année (cf chapitre 8.1.1). Avec le décalage dans l'espace, on peut supposer que les pluies les plus négatives se produisent en juillet en Guinée et au Sénégal puis subissent, au cours de l'année, un enrichissement en isotopes lourds. Ceci se traduit pour l'eau des fleuves par une augmentation des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ dès le début du mois d'août.

Un mélange entre les eaux de ruissellement et les eaux de la couche superficielle des sols amène également un enrichissement en isotopes lourds. En effet, dans ces zones semi-arides, les concentrations en isotopes lourds des nappes sont plus importantes que celles des précipitations (AIEA, 1981). L'eau de la zone non saturée est soumise, en basses eaux, à l'évapotranspiration et s'enrichit en isotopes lourds. Les pluies saturent cet horizon et permettent l'arrivée de l'eau vers le fleuve. Le bassin a un temps de réponse plus ou moins long et l'arrivée de cette eau est décalée dans le temps.

A la station de Douana, l'écart important des teneurs en oxygène-18 le 18/9/90 pourrait indiquer un nouvel apport par précipitations. Ceci se confirme par la forme de l'hydrogramme de crue qui présente un plateau au début de la décrue, soulignant un deuxième épisode de pluies. Le régime du fleuve Bani est de type tropical à deux pointes de crues. C'est la descente du FIT en septembre qui amène un retour des précipitations dans les régions du nord de la Côte d'Ivoire et de la Guinée.

Un palier s'observe également le 28/08 à Banankoro. A ce moment, le débit du fleuve est constant et il y a équilibre entre les apports par précipitations, ruissellement et nappes.

Dès la décrue, la part des apports souterrains est de plus en plus grande, l'évaporation plus forte, ce qui permet un enrichissement progressif des eaux du fleuve. On note une accélération de l'augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ en fin de décrue. A cette date, les débits du Bani sont de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (après le 9/12) et ceux du Niger de $109 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (après le 6/1). On peut supposer qu'à partir de ce moment, les eaux de pluie n'ont plus aucune influence sur la composition isotopique des eaux. L'écoulement provient entièrement des nappes souterraines et est d'autant plus fortement soumis à l'évaporation que les débits sont faibles. L'enrichissement en isotope lourd est favorisée par les conditions climatiques plus favorables à l'ETP lorsque la saison des pluies est passée.

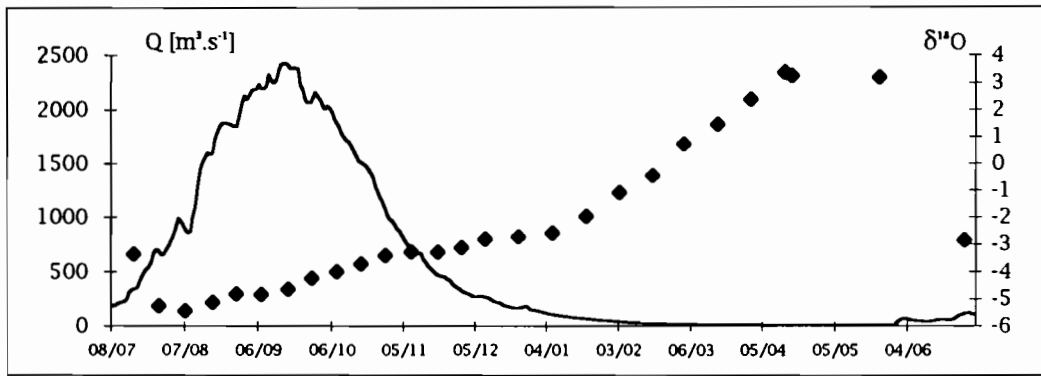


fig.8.2.3: Evolution de l'O-18 à Banankoro au cours de la crue 1990-1991

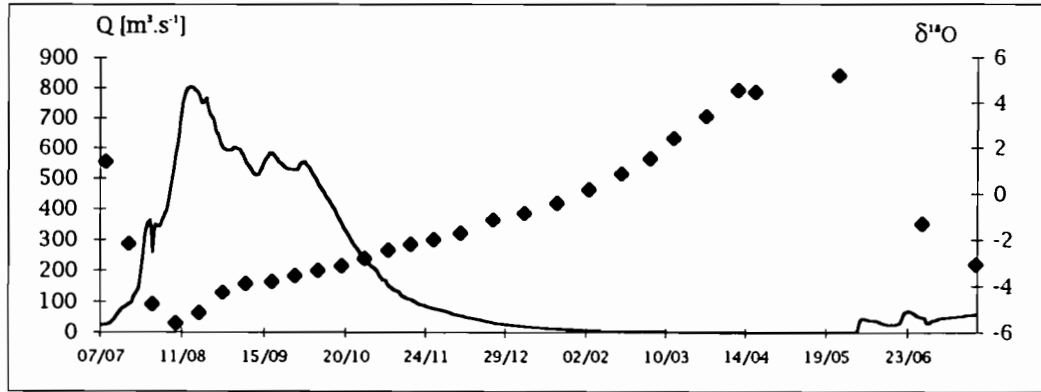


fig.8.2.4: Evolution de l'O-18 à Douna au cours de la crue 1990-1991

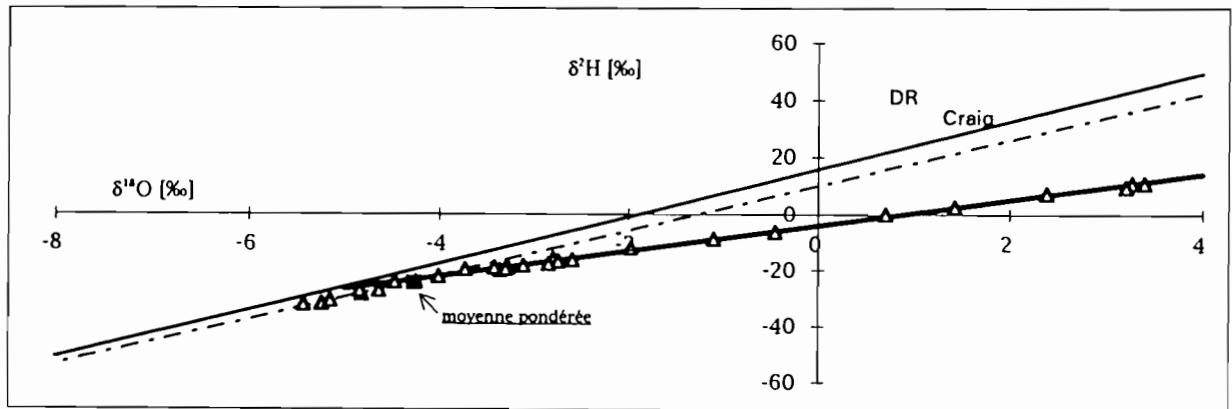


Fig.8.2.5: Relation O-18/H-2 à Banankoro lors de la crue 1990-1991

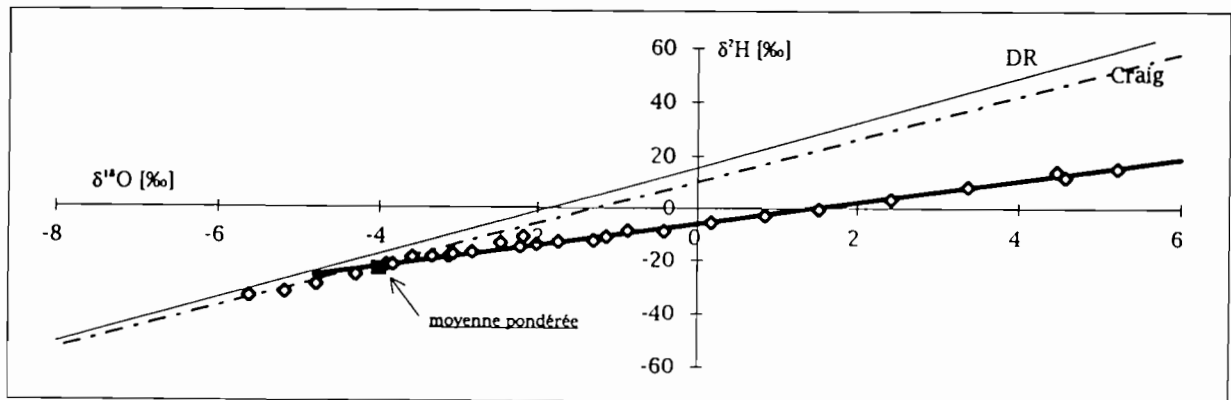


Fig.8.2.6: Relation O-18/H-2 à Douna lors de la crue 1990-1991

8.2.4 RELATION $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$

Sur les graphiques 8.2.5 et 8.2.6, nous avons placé les valeurs décadaires, la droite des eaux météoriques mondiales ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) et la droite des eaux de pluies de Bamako en 1991 calculée au chapitre 8.1.

On peut distinguer deux relations différentes pour les hautes eaux et la décrue. A Douna, la droite de régression en période des hautes eaux regroupe les points du 29/7/90 au 28/9/90. Elle est de la forme :

$$\delta^2\text{H} = (7,5 \pm 0,5) * \delta^{18}\text{O} + (7,1 \pm 2,1) \quad R=0,99_0$$

A Banankoro, cette droite comprend les eaux du 27/7/90 au 18/10/90. Elle est de la forme:

$$\delta^2\text{H} = (7,6 \pm 0,4) * \delta^{18}\text{O} + (8,2 \pm 1,7) \quad R=0,99_0$$

L'équation de la droite est le reflet de la teneur isotopique des eaux de pluies qui alimentent le fleuve. L'excès en deutérium, terme « d » de l'équation, est plus élevé à Banankoro (+10 contre +9,1), ce qui confirme que les apports météoriques ont une origine légèrement différente. Pour les deux stations, la pente s'écarte légèrement de celle des eaux mondiales (+8) car le fleuve a déjà subi, depuis la Dorsale Guinéenne, une évaporation (Fontes et al, 1991). Il apparaît que les valeurs de « d » sont plus faibles que celles des eaux de pluies recueillies à Bamako. Les eaux de pluies qui influencent la composition isotopique des eaux du fleuve Niger et Bani sont un peu différentes des pluies de Bamako. On peut supposer que les eaux précipitées dans les régions montagneuses de la Dorsale Guinéenne ont des teneurs en isotopes stables qui suivent la corrélation O-18/H-2 établie pour les eaux météoriques mondiales. Les pluies de Bamako subissent un effet de continentalité et l'influence de masses d'air d'origine et de « parcours » différents.

En basses eaux, les droites ont un cachet nettement évaporé. A Douna, les eaux du 8/10/90 au 22/7/91 se placent sur la droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = (4,2 \pm 0,1) * \delta^{18}\text{O} - (6,1 \pm 0,2) \quad R=0,99,$$

A Banankoro, les eaux du 28/10/90 au 27/6/91 ont permis d'établir la relation :

$$\delta^2\text{H} = (4,6 \pm 0,1) * \delta^{18}\text{O} - (4,2 \pm 0,2) \quad R=0,99,$$

La pente de la droite est plus faible pour les eaux du Bani qui sont donc plus soumises à l'évaporation. Ceci s'explique par une longue période sans écoulement notable et un module moyen annuel plus faible.

L'intersection entre la droite d'évaporation et la droite des eaux régionales 1991 se fait au point $\delta^{18}\text{O} : -5,2 / \delta^2\text{H} : -33,3 \text{ ‰}$ pour Banankoro et $-5,2 / 27,5 \text{ ‰}$ à Douna. L'interception avec la droite des eaux météoriques mondiales se fait aux points $\delta^{18}\text{O} : -4,2 / \delta^2\text{H} : -23,6 \text{ ‰}$ pour Banankoro et $\delta^{18}\text{O} : -4,2 / \delta^2\text{H} : -23,9 \text{ ‰}$ pour Douna. Ces points très proches représentent les teneurs moyennes des eaux à l'origine de l'écoulement. Ces eaux sont plus riches en isotopes lourds que les eaux de précipitations mesurées à Bamako en 1991 (moyenne $-6,1 \text{ ‰}$). La zone non saturée joue un rôle important en permettant cet enrichissement en isotopes lourds sous l'effet de l'évaporation qui agit de la fin de la saison humide aux premières

précipitations de l'année suivante. Ainsi, les eaux du fleuve présentent sur les stations amont un cachet légèrement évaporé, mélange des eaux de pluies du bassin amont (Fouta Djalon) et des eaux des nappes.

Il est intéressant de placer les points moyens annuels pondérés par les débits à chacune des stations (fig.8.2.5 et 8.2.6). Ces points de valeurs $\delta^{18}\text{O}$: -4 ‰ et $\delta^2\text{H}$: -23.5 ‰ à Douna et -4,3 ‰ et -24,9 ‰ à Banankoro se placent sur la droite de Craig à l'intersection avec la droite des eaux évaporées.

8.2.5 RELATION AVEC LES NAPPES PHREATIQUES

Pour la région de Douna-San (Bani), une étude des aquifères a été faite de 1980 à 1988 par l'AIEA (Aranyossy et al, 1989, Guerre et Aranyossy, 1990, Aranyossy, 1991). Les deux aquifères analysés sont de type fissuré et se situent dans les formations gréseuses de l'Infracambrien et les formations sablo-argileuses du Continental Terminal (tableau 8.1.2). Les abords du Bani sont plus influencés par les nappes gréseuses alors que le Niger longe les aquifères du socle de l'Infracambrien.

AQUIFERE INFRACAMBRIEN					AQUIFERE DU CONTINENTAL TERMINAL				
date	lieu	18 O	2 H	d	lieu	18 O	2 H	d	
22-mai-80	Batirikui	-4.53	-27.3	8.9	15-déc-87	San plaine	-3.95	-25.6	6.0
06-mar-80	Be-2	-6.95	-37.9	17.7	27-jan-88	San plaine	-3.67	-25.5	3.9
06-mar-80	Be-2	-6.15	-38	11.2	28-mar-88	San plaine	-3.73	-17.3	12.5
05-mar-80	Bla 4	-5.34	-31	11.7	23-avr-88	San plaine	-3.85	-26.4	4.4
07-mar-80	Bossoni	-5.35	-36.3	6.5	27-mai-88	San plaine	-3.87	-26.8	4.2
23-mai-80	Dougoudala	-4.67	-27.4	10.0	08-jul-88	San plaine	-3.95	-25.2	6.4
23-mai-80	Dialakoro	-5.22	-33	8.8	27-août-88	San plaine	-3.61	-23.6	5.3
21-mai-80	Diarani	-4.47	-39.7	3.9	28-sep-88	San plaine	-3.57	-24	4.6
20-mai-80	Heremakono	-6.00	-40.6	7.4	25-oct-88	San plaine	-3.23	-23.5	2.3
24-mai-80	Kayes	-5.43	-34.6	8.8	29-nov-88	San plaine	-3.49	-23.4	4.5
07-mar-80	Kimparana	-5.30	-33.7	8.7	11-fév-88	Dougouni	-5.08	-31.5	9.1
07-mar-80	San-Pere	-5.56	-39.5	5.0	11-fév-88	Ndongola	-5.09	-33.8	6.9
06-mar-80	San-stade	-5.24	-35	6.9	11-fév-88	Sy	-4.42	-28.9	6.5
05-mar-80	Touna 1	-6.36	-43.2	7.7	11-fév-88	Titama	-4.82	-34	4.6
05-mar-80	Touna 1	-6.80	-43.9	10.5					
05-mar-80	Touna 2	-6.46	-42.4	9.3					

Tableau 8.2.2 : Composition isotopique des eaux souterraines de la région de Douna-San (d'après Aranyossy, 1990)

On note une dispersion des points des aquifères dont les valeurs varient entre -17,3 et -43,9 ‰ pour $\delta^2\text{H}$ et -3,2 ‰ et -6,9 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$. Ces eaux correspondent aux pluies de juillet à octobre ($\delta^{18}\text{O} = -6$ à -5 ‰) pour la grande majorité. Les eaux issues de l'aquifère de l'Infracambrien s'alignent sur la droite des eaux mondiales (figure 8.2.7) et sont plus appauvries en isotopes lourds que les eaux du Continental Terminal. Des points situés au-dessus de cette droite indiquent qu'une partie de la recharge a eu lieu avec des eaux de pluies de composition isotopique proche de celle des pluies actuelles à Bamako. Les pluies à

l'origine de la recharge des nappes sont de composition isotopique proche des eaux météoriques mondiales et des quelques précipitations de Bamako (1992) mais non pas des toutes les pluies actuelles de Bamako. Une perméabilité de fissure importante permet la percolation rapide des eaux d'infiltration actuelles avec pour conséquence un taux de renouvellement rapide de la nappe de fissures (Gourcy, 1993). Cependant les mesures de tritium montrent la présence d'eau ancienne et d'un mélange en proportion variable avec les eaux d'infiltration actuelles. La présence d'eau enrichie en isotopes stables permet de dire que l'évaporation agit sur l'aquifère jusqu'à des profondeurs supérieures à 2 m et jusqu'à 20 m probablement (Guerre et Aranyossy, 1990).

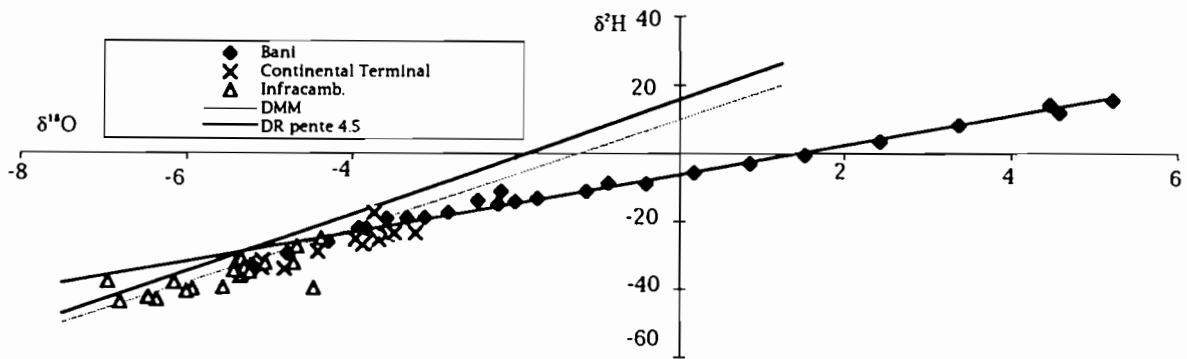


Fig.8.2.7 : Etude isotopique des aquifères de la région de San, du Bani et des pluies régionales

Les teneurs isotopiques des eaux du Bani à Douna avant l'évaporation correspondent à un seuil d'équilibre entre les eaux de pluies, les eaux évaporées et non-évaporées des deux aquifères. Ainsi, ce sont ces deux réservoirs qui fournissent l'eau du Bani durant toute la saison sèche. Une étude faite en 1978-1979 a permis d'établir une carte piézométrique pour cette région. Les courbes isopièzes confirment l'alimentation du fleuve par les eaux souterraines durant les basses eaux (Bahr, 1980).

8.2.6 FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE SUR LES STATIONS AMONT

Les études isotopiques nous donnent des indications sur les origines des eaux et pourraient permettre la séparation de l'hydrogramme de crue des différents types d'écoulement, ruissellement direct et écoulement souterrain. Mais, la composition isotopique des eaux précipitées sur le Dorsale Guinéenne et le Fouta Djallon n'est pas connue pour l'année 1991, ni la composition des eaux de l'aquifère soutenant le Niger dans la région de Banankoro.

Pour les sites et l'année étudiée, on considère que l'écoulement est uniquement d'origine souterraine à partir du 9/12/1990 à Douna et du 6/1/1991 à Banankoro.

Le rapport général établi par Guerre et Aranyossy (1990) pour l'AIEA (projet DTCD/MLI/84/005) nous donne toutefois un aperçu du fonctionnement des aquifères au Mali. La nappe du socle qui existe dans cette région présente un horizon superficiel d'altérite épaisse perméable qui favorise un écoulement latéral de type ruissellement différé qui est évacué par le réseau de surface. Cet horizon est enrichi en isotopes lourds sous l'effet de

l'évaporation durant la saison sèche. Les premières pluies permettent l'écoulement de la nappe vers le Niger par infiltration et effet piston. En amont de Banankoro, à partir de Siguiri (Guinée), il existe quelques plaines d'inondation dont les grandes superficies permettent un enrichissement par fractionnement isotopique dû à l'évaporation. Ces plaines se vidangent dans le fleuve et jouent un rôle dans l'enrichissement observé durant les hautes eaux.

8.2.7 EVOLUTION SPATIALE A TRAVERS LE DELTA DURANT L'ETIAGE ET LA CRUE

Des prélèvements ponctuels ont été faits lors de plusieurs campagnes en juillet 1991 et 1992 (fin de l'étiage) et début novembre 1991 et 1992 (hautes eaux)(tableau 8.2.3).

Les figures 8.2.8 et 8.2.9 représentent les teneurs en oxygène-18 des eaux recueillies à travers le delta central. En juillet, seuls les bras principaux du Niger et le Bani ont été étudiés. En novembre, le Bani, le Diaka, le Niger, le Bara Issa et l'Issa Ber ont été pris en compte.

DELTA DU NIGER-CRUE					DELTA DU NIGER-ETIAGE				
date	station	18 O	2 H	d	date	station	18 O	2 H	d
08-nov-91	Nantaka	-3.09	-20.7	4.0	03-jul-92	Nantaka	1.57	5.48	-7.0
09-nov-91	PK100	-3.29	-20.1	6.2	04-jul-92	Akka	2.13	7.04	-10.0
14-nov-91	Severi	-3.24	-21.0	4.9	04-jul-92	Ke-Macina	0.77	1.46	-4.7
12-nov-91	Dire	-3.31	-20.8	5.7	06-jul-92	Douna	0.8	0.88	-5.5
21-oct-92	Ke-Macina	-3.77	-23.5	6.7	06-jul-92	Dire	2.7	13.45	-8.2
04-nov-92	Kona	-2.86	-16.4	6.4	28-jun-91	Koulikoro	0.07	-4.2	3.6
05-nov-92	lac Debo	-2.85	-17.8	5.0	31-jul-91	Koulikoro	-4.65	-27.4	9.8
06-nov-92	Sarafere	-2.44	-14.2	5.4					
07-nov-92	Dire	-2.37	-18.8	0.2					
12-nov-92	Diondiori	-1.25	-16.8	-6.8					

Tableau 8.2.3 : Composition isotopique des eaux du delta en période de crue et d'étiage

* juillet

La rupture de pente observée entre Banankoro et Koulikoro correspond à un mélange des eaux du Niger avec celles du Sankarani. Ces eaux ont une origine et un parcours différents des eaux du Niger. Durant l'étiage, les eaux enrichies en isotopes lourds représentent la plus grande part du débit du Niger.

Entre Koulikoro et Ke-Macina, il n'y a pas d'apport et le faible enrichissement peut s'expliquer par un équilibre isotopique entre les eaux souterraines, les eaux de surface, les eaux de pluies et la vapeur atmosphérique. L'évapotranspiration est compensée par les pluies.

Les eaux du delta vif ne sont pas encore mélangées avec les eaux de la crue de l'année 1991-1992 et les seuls facteurs responsables des variations observées sont l'évaporation et les échanges avec les nappes. Aucune pluie efficace n'a été encore enregistrée. Le delta fonctionne comme un système ouvert à niveau constant. Le facteur de fractionnement isotopique est donc limité par la valeur de l'humidité relative et la valeur du $\delta^{18}\text{O}$ tend vers une valeur limite (Fontes, 1976). Cette valeur limite est estimée à 3,3 ‰.

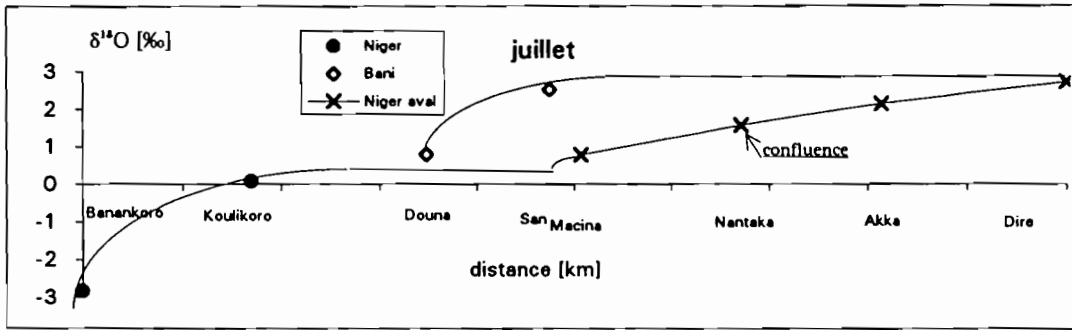


Fig.8.2.8: Teneurs en O-18 le long du Niger et du Bani en fin de saison sèche

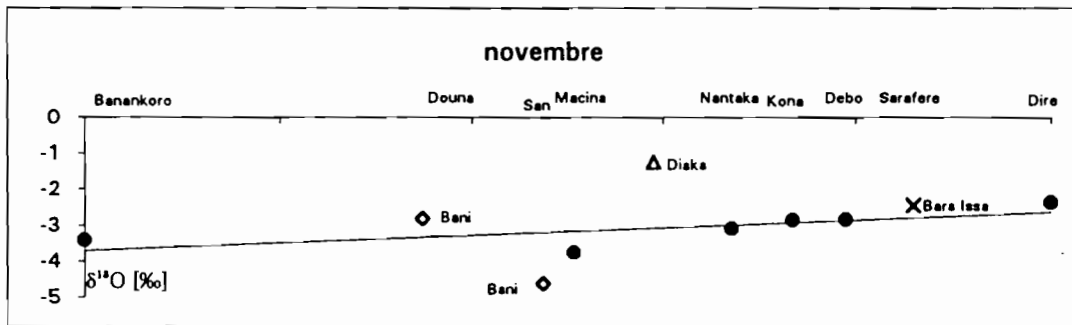


Fig.8.2.9: Teneurs en O-18 des eaux du fleuve Niger et de ces affluents durant la crue

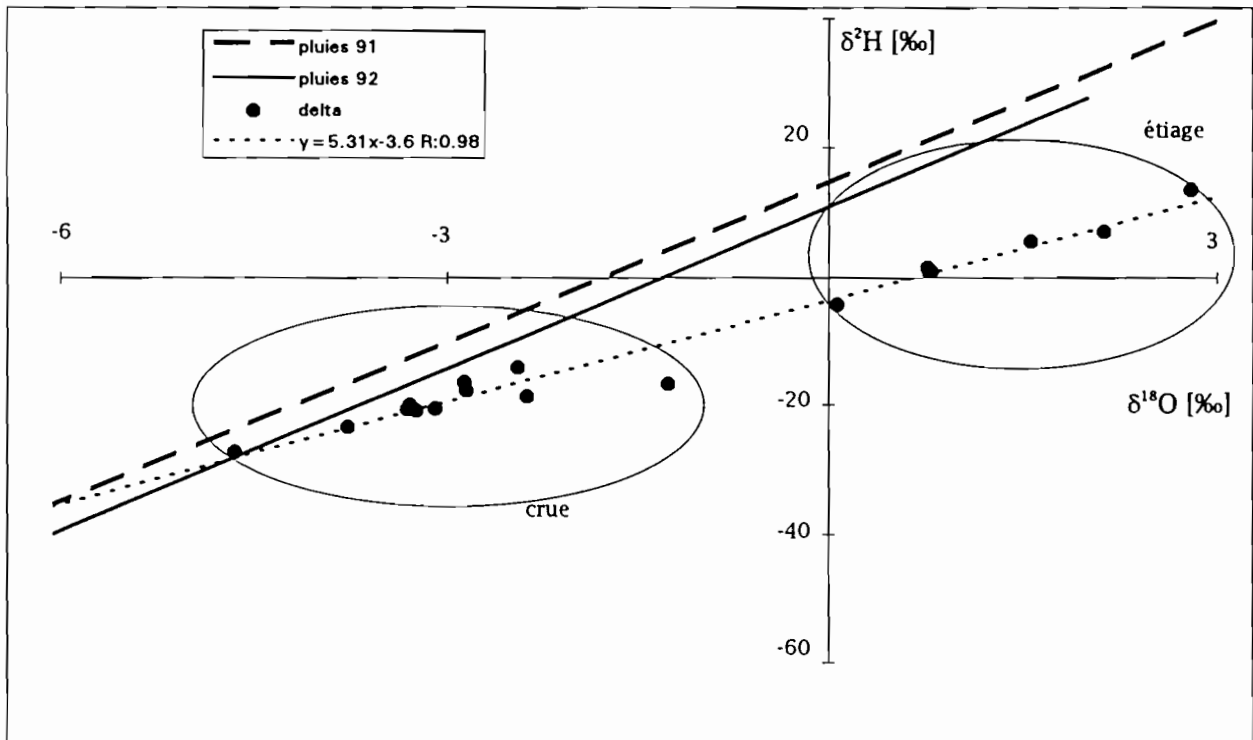


Fig.8.2.10 : Relation H-2/O-18 à l'étiage et en crue sur le delta

Une composition isotopique constante semble être atteinte au niveau de Akka. Les eaux sont en équilibre avec la température, l'humidité relative. En juillet, l'humidité relative de l'air passe de 70 % à Ke-Macina à 60 % à Nantaka et 52 % vers Dire. Dans un même temps, la température moyenne de l'air sous abri passe de 28° le plus au sud à 29,8°C puis 31,1° vers Dire. Cette évolution du climat explique un enrichissement en isotopes lourds des stations de Ke-Macina à Dire.

Les eaux du Bani subissent un enrichissement entre les stations de Douna et de San avant de se jeter dans le Niger au niveau de Nantaka. La valeur limite de l'enrichissement semble être 3,3‰, comme pour le Niger.

*** novembre**

On constate une régularité de la station amont de Banankoro aux stations du delta.

Au moment des hautes eaux, il y a équilibre entre les différentes sources (nappes, pluies), la température et l'humidité relative. Les eaux de la station de Awoye, à l'entrée du Bara Issa, n'ont pas subi de différenciation par rapport au bras majeur de l'Issa Ber.

Alors que la crue atteint son maximum dans le delta, l'écoulement au sud du Mali est uniquement dû au drainage des nappes phréatiques. Le Diaka, petit défluent du delta vif, est déjà en période de décrue depuis un mois. Il est soumis à l'effet de l'évaporation d'autant plus fortement que son écoulement est faible.

Pour le Bani, les valeurs à San sont plus négatives qu'à Douna. La décrue est bien amorcée et les apports des nappes (eaux plus appauvries en isotopes lourds) se font sentir. Les aquifères sont bien en relation, à cette période, avec le Bani comme nous l'avons montré au paragraphe 8.2.4.

*** Relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$**

Les valeurs des rapports isotopiques des stations du delta des deux campagnes, les droites des eaux de précipitations de 1991 et 1992 ont été replacées sur le graphique 8.2.10. Les points s'alignent sur une droite d'équation :

$$\delta^2\text{H}=5,3*\delta^{18}\text{O} - 3,8 \quad R=0,98$$

La pente de 5,3 montre une évolution par évaporation. La droite coupe celle des eaux météoriques régionales au point $\delta^{18}\text{O} = -6,2$ et $\delta^2\text{H} = -36,2$. D'après l'étude des aquifères, la recharge des nappes, se fait actuellement avec des pluies de composition isotopique proche de celle des eaux mondiales. Il est donc plus intéressant d'étudier le point d'interception entre la droite calculée pour les nappes et celle des eaux mondiales. Ces coordonnées $\delta^{18}\text{O} = -5,1$ et $\delta^2\text{H} = -30,9$ correspondent aux valeurs moyennes des eaux du Niger et Bani en début de crue (mélange pluies du Fouta Djallon et Dorsale et aquifères) et/ou des aquifères de la région de San (Aranyosy, 1989). Les précipitations locales influencent peu la qualité de l'eau dans le delta.

8.3 AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES

8.3.1 TEMPERATURE ET HUMIDITE

Pour la période actuelle, les stations de Segou, Mopti-Sevare et Tombouctou donnent un enregistrement continu de divers paramètres climatiques. Les valeurs de température moyenne mensuelle, température minimale et maximale de l'année (T_x et T_n), humidité relative moyenne mensuelle, humidité relative maximale et minimale (U_x et U_n) ainsi que la vitesse du vent caractérisent le climat et permettent d'appréhender le calcul de l'évaporation. Le tableau 8.3.1 donne les moyennes mensuelles de ces valeurs pour les trois stations en 1993.

STATION DE TOMBOUCTOU												
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Umoy.(%)	27	26	20	22	20	36	52	61	55	31	33	36
Umax.	39	37	31	31	29	54	75	82	76	48	47	48
Umin.	17	17	12	13	16	21	33	39	33	16	20	24
Tmoy.(°C)	20.1	23.9	28.5	32.6	34.8	35	32	31.1	31.8	31.6	26.5	21.2
Tmax.	27.2	31.8	37.3	40.9	42.9	42.3	38.7	37.4	38.9	40.3	35	29.6
Tmin.	13.3	16.3	19.7	24	26.2	28.5	26.1	27.5	25.9	23.3	18.8	13.4
Vent (m s ⁻¹)	4.7	3.6	4	4.1	4.3	3.7	3.7	3.4	3	2	2.5	3

STATION DE MOPTI												
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Umoy.(%)	23	22	19	22	27	42	60	67	62	49	30	24
Umax.	37	32	29	32	40	62	82	87	81	70	44	39
Umin.	12	14	12	12	14	25	39	46	41	24	15	11
Tmoy.(°C)	22.7	27.2	31.3	34.2	35.7	33.3	29.8	28.7	29.7	30.9	28.5	24.2
Tmax.	30.5	35.1	39.4	41.6	42.7	40	35.8	34.5	35.5	38.1	36.6	32.4
Tmin.	15.3	19.5	23.4	26.7	28.7	27	24.3	23.6	24.8	24.4	21.5	16.5
Vent (m s ⁻¹)	3.4	3.4	3.6	3.4	3.5	4.1	3.6	2.9	1.9	1.3	1.8	1.8

STATION DE SEGOU												
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Umoy.(%)	35	27	27	32	38	59	70	77	74	55	42	38
Umax.	50	39	41	49	56	81	90	94	94	82	58	54
Umin.	21	14	13	15	20	37	49	60	54	28	25	22
Tmoy.(°C)	23.3	27.3	31	33.5	34.4	30.6	28	26.6	27	29.5	28.2	24.4
Tmax.	32.3	36.7	39.7	41.1	41.7	37	33.5	31.3	32.6	37.4	36.3	33.4
Tmin.	16.6	20.2	23.4	27	27.9	24.8	23.2	22.3	22.5	23.2	21.6	17.6
Vent (m s ⁻¹)	2.6	1.8	1.6	1.4	1.7	2	1.1	0.9	0.6	0.5	0.8	1.7

Tableau 8.3.1 : Valeurs mensuelles des moyennes et extréma d'humidité relative (Umoy., Umax. et Umin. en %), de température de l'air (Tmoy., Tmax., Tmin. en °C) et de vitesse des vents (m s⁻¹) en 1994

Les vents sont maximums de décembre à juin alors que l'Harmattan est dominant. Les vitesses moyennes mensuelles ne dépassent pas les 5 m s⁻¹ et augmentent en allant vers le nord.

Les figures 8.3.1 et 8.3.2 représentent les moyennes mensuelles de la température de l'air sous abri et de l'humidité pour l'année 1993 sur ces trois stations. La hausse des températures commence en janvier, au début de la saison sèche pour arriver à son maximum en mai à Mopti et Segou et en juin à Tombouctou. L'arrivée des pluies entraîne une diminution des températures de juin à août. La légère remontée des températures en octobre et novembre correspond à la deuxième saison chaude. L'influence de la cuvette lacustre sur les températures notée par Brunet-Moret et al (1986) ne se retrouve qu'en saison froide. A cette période, les moyennes à Segou et Mopti sont les mêmes malgré le décalage géographique. L'évaporation intense qui agit sur le delta inondé atténue la baisse des températures nocturnes.

L'humidité relative réagit presque en opposition avec la température. La saturation de l'air est inférieure à 40% durant les mois de décembre à mai. L'arrivée des pluies permet un enrichissement de l'air en vapeur d'eau jusqu'à un maximum en août.

Les plus grands écarts entre les minimums et maximums sont enregistrés à la station de Tombouctou pour les températures et Mopti et Segou pour l'humidité relative.

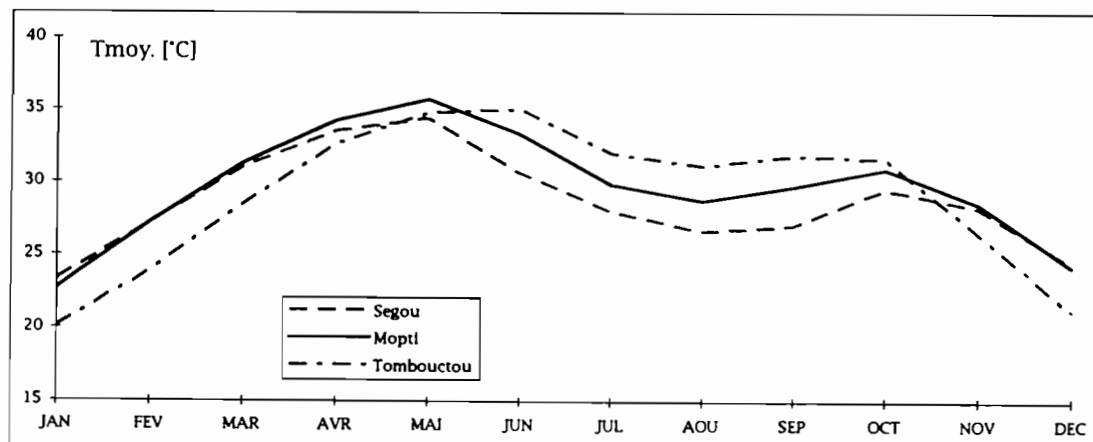


Fig.8.3.1: Valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air sous abri à Segou, Mopti et Tombouctou

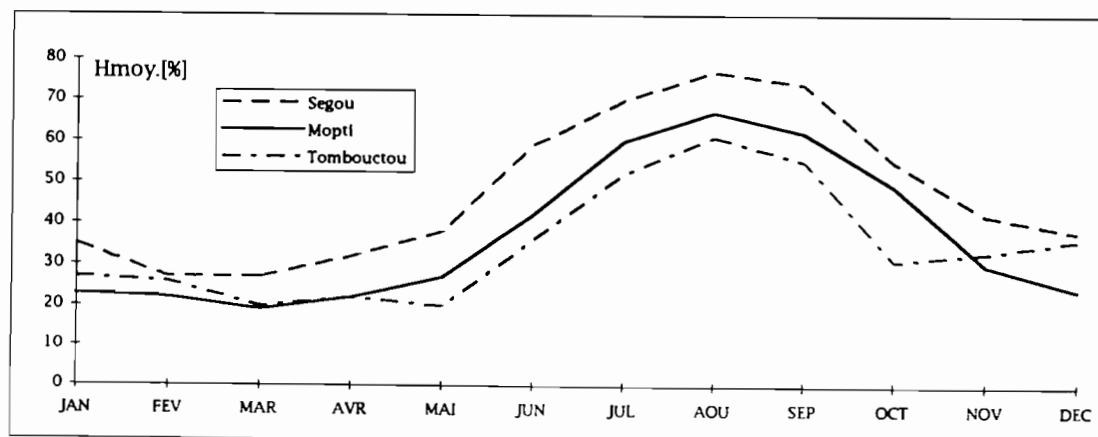


Fig.8.3.2: Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative à Segou, Mopti et Tombouctou

8.3.2 EVAPORATION

Le taux d'évaporation est déterminé par la différence entre la pression de vapeur du corps d'eau et celui de l'air au-dessus de la surface de l'eau. L'évaporation et la condensation sont des processus continus. L'évaporation est plus importante lorsque l'air n'est pas saturé. Les principaux facteurs influençant l'évaporation sont la température, le vent, la pression atmosphérique, la nature de la surface du corps d'eau.

L'évaporation de l'eau libre, l'eau des sols et des végétaux ainsi que la transpiration des plantes représentent l'évapotranspiration réelle (ETR). Ce terme réunit donc deux types de processus physiques, l'un est communément appelé évaporation sur nappe d'eau libre, l'autre transpiration. Pour un milieu comme le delta central, comprenant des chenaux, des marécages et des champs, ce terme général d'évapotranspiration permet de réunir tous les phénomènes se produisant sur la zone inondée.

La plupart des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration se basent sur le calcul du potentiel d'évapotranspiration (ETP), c'est à dire l'évapotranspiration (ET) possible sur un milieu saturé en eau. L'ETP est donc supérieure à l'ETR lorsque les sols ne sont pas saturés en eau.

L'ETP varie lentement lorsque les surfaces dépassent quelques dizaines de m². Au-dessus d'une certaine valeur, on peut admettre que l'ETP ne dépend pratiquement plus que du climat (Riou, 1975). C'est essentiellement la valeur de l'albédo qui différencie les estimations de l'évaporation de l'eau de celles d'un couvert végétal. L'évaporation dépend aussi de la nature de la surface concernée et de son degré de saturation en eau. Dans les plantes, ce sont principalement les stomates qui régulent la transpiration. Les facteurs affectant la transpiration sont alors de nature physiologique et environnementale (température, radiations solaires, vent, humidité des sols (Veihmeyer, 1964)).

Plusieurs études se sont intéressées aux diverses méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration dans les régions africaines (Riou, 1975, Pouyaud, 1986,...). Riou a utilisé la formule de Penman appliquée sur une nappe d'eau libre (l'albédo est égal à 0,05 pour l'eau peu chargée en matières en suspension et à 0,10 pour l'eau très chargée en matières en suspension, Pouyaud, 1987). Il a ensuite comparé les valeurs d'évaporation calculées avec les valeurs de l'évapotranspiration calculées à partir des informations recueillies sur les stations météorologiques équipées (Evaporomètre Piche, bac d'évaporation...). Les écarts systématiques observés ont amené à introduire dans le calcul un facteur (f) qui intègre toutes les erreurs systématiques commises par la formule et ses approximations et de passer ainsi de l'ETP à l'ETR. Le facteur f utilisé dans les régions sahéliennes est 0,85, il dépend du lieu, du mois et du type de surface.

La formule la plus appropriée à une analyse au pas de temps mensuel sur des grandes superficies est celle de Penman. Le principe de cette mesure est reporté en annexe 5.

Nous avons utilisé la formule de Penman avec un albédo moyen correspondant à l'ensemble des végétations de la cuvette lacustre. La valeur de l'albédo est fonction de la couverture du sol. Pour un couvert de grandes graminées couvrant mal le sol, cette valeur est de 0,15 à 0,17 (Riou, 1975). Pour une nappe d'eau couverte de végétation, l'albédo peut atteindre 0,15 à 0,20 (Pouyaud, 1986). Pour des herbes vertes et végétation basse, ce coefficient va de 0,15 à 0,25 (Chevallier, 1990). Le delta central est composé de terrains très divers, eau libre peu profonde, herbes hautes ou rases selon la saison, sols dénudés, sables.

L'albédo de surface en 1982 sur les régions du Sahel a été estimé d'après les données satellitaires à 0,25 (Courel et al, 1984, Courel, 1986, Nacke, 1991). Notre région d'étude étant située un peu plus au sud, avec une végétation plus abondante, la valeur de l'albédo retenue pour notre étude est de 0,20.

Les autres facteurs utilisés dans le calcul, valeurs moyennes mensuelles de température, humidité relative, insolation et vitesse du vent sont tirées des annuaires climatologiques du Mali (1991 et 1992). Sur la zone concernant la cuvette, deux stations sont équipées pour le relevé de tous ces paramètres, Mopti et Tombouctou.

La valeur moyenne de l'évapotranspiration sur le delta est le résultat de la combinaison des stations de Mopti et Tombouctou affectées d'une pondération spatiale 2/3, 1/3 (Olivry, 1994b).

année	mai	juin	juill.	août	sept	oct.	nov.	déc.	jan	fév.	mar.	avril	total
1990-91	217	208	186	167	158	166	157	174	183	156	193	200	2165
1991-92	233	240	217	185	181	169	185	168	177	195	199	219	2368
1992-93	206	216	181	163	163	175	178	167	174	193	200	209	2225

Tableau 8.3.2 : Valeurs de l'ETP moyenne sur le delta

Les valeurs de l'ETP sont maximales durant la saison chaude, de mars à juin avec des valeurs mensuelles de 187,5 à 245,1 mm (figure 8.3.3). Les minimums s'observent durant la saison froide et se situent aux environs de 150 mm mois⁻¹. Selon les années, le maximum se situe en avril (1992) mai (1990) ou juin (1991). Les minima sont en août (1992), octobre (1991) ou novembre (1990). A la station de Tombouctou, les maxima d'évaporation se situent en avril (1990) ou juin (1991, 1992). Les minima s'observent en février (1990, 1992) ou mars (1991).

Les valeurs de l'ETP sur la station de Tombouctou sont supérieures à celles de Mopti. Cette différence est faible (< 81mm) pour les deux premières années. En 1992, la différence est de près de 300 mm. Cette différence est essentiellement due aux mois les plus secs.

La hauteur moyenne annuelle d'eau évaporée s'élève de 2122 mm (Mopti, 1992) à 2472 mm (Tombouctou, 1992) ce qui correspond bien aux valeurs obtenues par diverses méthodes dont Penman sur les régions sahéennes (Riou, 1975, Pouyaud, 1986, Chevallier, 1990).

Le calcul de l'ETP a également été fait avec la formule de Riou, affectée d'un facteur f de 0,85 et utilisant l'albédo des surfaces d'eau libre (0,05). Sur la station de Tombouctou en août 1991, avec $a=0,2$ l'ETP est de 210,8 mm. La formule de Penman transformée par Riou donne, avec $a=0,05$, une ETP de 248 mm affectée du facteur 0,85, soit une ETR de 198,4 mm. Ces deux résultats montrent un écart de moins de 6%.

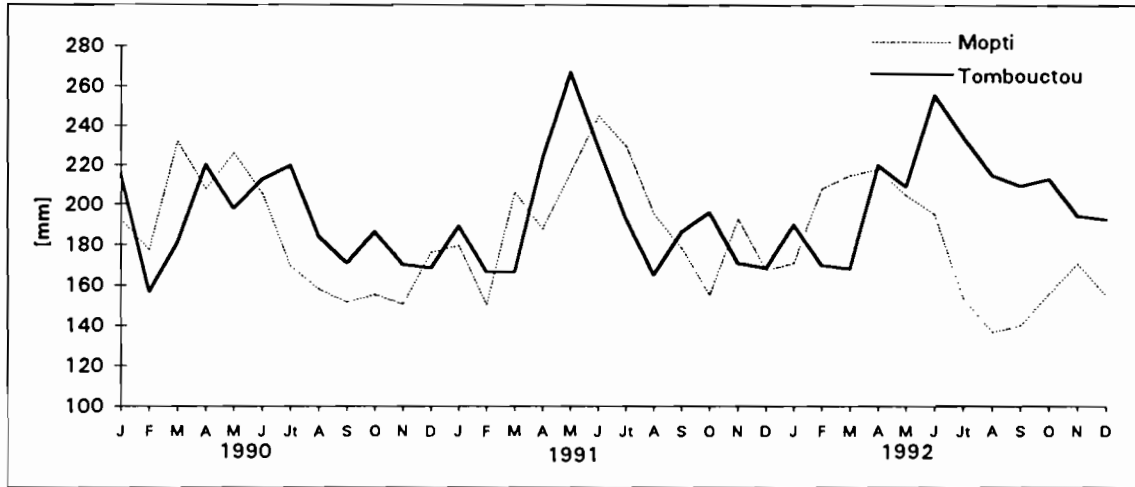


Fig.8.3.3: Variations de l'ETP sur les stations de Mopti et Tombouctou de 1990 à 1993

8.3.3 APPLICATION DU MODELE D'ESTIMATION DES SURFACES INONDEES

Le modèle développé par Olivry (1994b) a été utilisé avec les données des années concernées par le programme Equanis, 1990-1991 à 1993-1994.

Comme nous l'avons souligné au chapitre 8.1, les modules s'inscrivent dans la moyenne des derniers trente ans. Il n'y a pas de brusques variations climatiques qui pourraient amener à sortir des limites de validité de la méthode (cf chapitre 3.4).

Le tableau 8.3.3, rassemble les données (entrées et sorties) et les résultats du calcul de la superficie maximum d'inondation pour les quatre années d'étude. Pour l'année 1994, les données sur les entrées et pertes annuelles sont manquantes. Les débits de hautes eaux suffisent toutefois au calcul de la surface maximum d'inondation.

année	entrées km ³	pertes km ³	Hmax. Mopti cm	date	Smax 10 ³ km ²
1990	24,0	6,9	510	3/10/90	14,5
1991	26,4	7,4	530	5/10/91	15,2
1992	24,3	6,0	545	27/9/92	13,4
1993	22,9	5,8	473	6/10/93	11,2

Tableau 8.3.3 : Calcul des entrées et pertes en eaux et estimation des surfaces maximales inondées du delta central de 1990 à 1994

L'observation des hydrogrammes de crue souligne des différences d'une année sur l'autre pour le temps de montée de la crue, le décalage des crues du Bani et du Niger, la durée des

hauteurs maximales. Ce sont autant de facteurs qui modifient les modalités de l'inondation et les surfaces moyennes inondées que le calcul des surfaces maximales ne peut mettre en valeur. Ainsi, si les surfaces maximales d'inondations sont en légère baisse durant ces quatre années, elles ne sont pas en relation directe avec les hauteurs max. à Mopti. En 1992, alors que la hauteur de la crue était supérieure à la hauteur 1991, les pertes en eau sont moins importantes. Il apparaît que, en 1992, la pointe de crue était de courte durée et n'a pas permis une inondation maximale des plaines.

Le volume des pertes est bien lié à l'évaporation et donc aux surfaces inondées. La surface maximale d'inondation est en relation directe avec les surfaces moyennes inondées qui sont elles-mêmes fonction des modalités de l'inondation. Des études menées sur les mares du Niger ont montré que le volume des pertes est lié exponentiellement aux surfaces inondées durant les hautes eaux. Les surfaces permettent de fortes évaporations et la perméabilité des sols est meilleure sur les parties périphériques des cuvettes (Desconnet et al, 1994).

Le déroulement de l'évolution de l'inondation au moment de la crue est le même pour des crues d'amplitude identique.

Les différences observées entre le volume des pertes et la hauteur maximum de la crue à Nantaka sont également dues aux modalités de l'inondation. La hauteur d'eau à Nantaka ne tient pas compte de la variation des stocks des lacs, mares et mayos qui influence le bilan des pertes de volume de l'année suivante en accélérant ou ralentissant l'inondation et en soutenant la période d'étiage.

Cette première approximation des surfaces inondées nous montre que le déficit actuel ne peut être compensé par une augmentation faible des volumes d'eau annuels écoulés comme observé en 1991-1992. Malgré une remontée des débits, le fleuve Niger reste influencé par le déficit des années précédentes. Pour les nappes de surfaces, l'augmentation des apports en eau sera suivie de l'accélération des reprises évaporatoires et de l'infiltration (Ndiaye et al, 1993).

La remontée des modules doit être durable pour que la zone non-saturée, la nappe phréatique superficielle et les lacs, mares, mayos retrouvent un niveau moyen qui permette de constituer des réserves suffisantes pour ralentir la décrue, soutenir les étiages et permettre ainsi à l'inondation de retrouver un niveau plus important (env.30000 km²).

8.4 SYNTHÈSE DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES DANS LE DELTA CENTRAL

Pour les quatre dernières années, les débits relevés correspondent aux modules moyens de ces vingt dernières années. Les années d'observation sont donc représentatives de la longue période déficitaire qui a débuté dans les années soixante-dix.

Les mayos et déversements du fleuve sont nombreux essentiellement dans le delta en amont du lac Debo. Une petite partie du Bani se déverse vers le fleuve Niger à travers la « mésopotamie ». Des échanges entre le Diaka et le Niger sont possibles à travers la plaine du Kotia. Ces liaisons multiples font qu'il est difficile de calculer des flux précis entre les stations entrées de Ke-Macina et Douna et le lac Debo où confluent les bras.

Les précipitations jouent un rôle négligeable sur la région sahélienne du fait du nombre réduit de jours de pluies et de leur faible intensité. Ce sont, par contre, les précipitations tombées sur le bassin versant amont, dorsale Guinéenne et Fouta Djallon, qui forment les crues du Niger et Bani et permettent la recharge des nappes. Les pluies se composent d'une part des « lignes de grains » et d'autre part des pluies apportées par la mousson Guinéenne. L'équilibre entre ces deux types d'apports, l'origine et l'évolution spatiale des masses d'air (advection de l'air polaire...) conditionnent la qualité (nombre, hauteur, répartition) des précipitations annuelles. Les courants d'altitude JEA et JET provenant de l'océan Atlantique et Indien apportent de grandes quantités d'humidité qui seront « utilisées » par le flux de mousson.

L'analyse des isotopes stables de l'eau confirme que les pertes au travers de la zone inondée sont dues à l'évaporation et l'évapotranspiration uniquement. Les crues arrivent toutefois à réduire l'influence de l'ETP. Les nappes de l'Infracambrien et du Continental terminal, en amont du bassin, viennent soutenir les étiages. Elles sont l'unique source d'eau au cœur de la saison sèche (janvier à mai). En aval de Banankoro, les eaux du barrage de Selingue renforcent et régulent les débits d'étiage. Les aquifères jouent le rôle tampon dans l'évolution des compositions isotopiques.

La température et l'humidité de l'air relevées sur la cuvette sont influencées par la superficie des surfaces inondées. Des vents forts, l'Harmattan surtout, contribuent à maintenir un « microclimat » sur cette région.

Pour le bassin en aval de Ke-Macina, les nappes sont importantes du point de vue du soutien des débits d'étiages mais l'évolution spatiale des flux hydriques à travers la cuvette n'est plus influencée par ces apports souterrains. Les flux peuvent être limités aux seuls apports par écoulement du fleuve Niger et du Bani. Les pertes par infiltration sont négligeables devant les pertes par évaporation qui sont en moyenne de 2200 mm par an.

La détermination des facteurs hydroclimatiques a permis d'appliquer le modèle d'estimation des surfaces maximales inondées sur les quatre années d'étude. Ce calcul nous donne une surface inondée actuellement de 14000 km² alors qu'elle est, sur la période de 1954 à 1991, en moyenne de 27000 km². Cette différence est due aux faibles précipitations actuelles, entraînant une diminution progressive de la réserve des nappes.

9. FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION

INTRODUCTION

Les particules en suspension sont les éléments minéraux ou organiques transportés par le fleuve et qui ont été arrachés au bassin versant, aux rives et lits du fleuve ainsi que les particules organiques produites in-situ (phytoplancton, diatomée), les minéraux néoformés, les poussières atmosphériques apportées par les vents. Ils s'opposent aux matières dissoutes et aux sables les plus grossiers transportés par saltation.

La limite entre les éléments dissous et particulaires est fixée, par convention, aux alentours de 0,22 μm . Les filtres utilisés sont d'un diamètre de pore de 0,22 μm mais les particules recueillies peuvent être légèrement inférieures à cette limite du fait de la floculation, du colmatage des filtres et également à cause des traitements appliqués aux matières en suspension et nécessaires à leur analyse.

Pour le Niger, les matières en suspension comprennent moins de 1 % de particules de diamètre supérieur à 50 μm (sables), une majorité de particules plus fines (silts et argiles) et une part de matière organique de 10 % à 40 %.

Le rôle des particules est physique puisque leur abondance agit sur le pouvoir érosif de la rivière. Le transport de matière conduit au comblement des dépressions, au surcreusement des mayos, au colmatage argileux des sols.

La première partie de ce chapitre concerne l'évolution spatio-temporelle des concentrations de matières en suspension (MeS) sur 3 cycles hydrologiques de l'entrée du fleuve Niger au Mali jusqu'à Dire. Les variations de concentrations de MeS sont en relation avec les débits et la capacité d'érosion des roches mères du bassin versant.

L'analyse granulométrique et minéralogique des suspensions minérales permet de définir leur origine et leurs modalités de transport.

La deuxième partie expose le bilan du transport à l'échelle mensuelle et annuelle. L'évolution à travers le delta permet de comprendre le rôle des zones inondées dans la filtration et le dépôt des particules et par conséquent les changements futurs dans cette région. Le rôle des poussières atmosphériques transportées essentiellement par l'Harmattan durant l'hivernage pourra être soulevé par corrélation avec les variations mensuelles du bilan ainsi que les interactions biologiques comme la formation de diatomées ou phytolithes. L'étude spécifique des particules organiques sera reprise dans le chapitre concernant le carbone organique dissous.

A partir des informations recueillies au cours de diverses études (isotopes, hydrologie, concentrations de MeS), le bilan annuel spécifique de l'érosion du bassin versant a été calculé pour les stations de Banankoro sur le Niger et Douana sur le Bani.

9.1 EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS DE MES

9.1.1 CONCENTRATIONS MOYENNES, MAXIMALES ET MINIMALES

Les moyennes annuelles sont comprises entre 10,8 g m⁻³ à Koulikoro et 73,5 g m⁻³ à Dire. Notons que, pour la zone Ouest-Africaine, les concentrations moyennes annuelles relevées vont de 196 g m⁻³ sur le fleuve Sénégal à Bakel à 19 g m⁻³ pour le fleuve Gambie à son embouchure (Gac et Kane, 1986a, Duvert, 1987, Gac et al, 1987, Orange et Gac, 1990, Martins et Probst, 1991). Les concentrations de MeS sur le fleuve Niger sont faibles mais évoluent spatialement assez vite. Ainsi, Gallaire (1994) relève des concentrations moyennes interannuelles pour la période de 1984 à 1986 de 206 g m⁻³ sur le fleuve Niger à Niamey, du fait de ses affluents de rive droite.

Les concentrations journalières de matières varient entre 1 et 220,7 g m⁻³ avec des valeurs encore plus fortes relevées lors de très faibles écoulements (tableau 9.1.1). L'ensemble des données de concentration est regroupé en annexe 6.

Les valeurs les plus basses s'observent au maximum de la crue et en période d'étiage alors que les concentrations maximales sont situées au début de la crue (figure 9.1.1a, b, c). Des concentrations moyennes fortes sont relevées pour les stations où le débit moyen annuel est faible. L'amplitude entre les valeurs minimales et maximales est également plus forte sur les stations à écoulement modéré. Les variations peuvent être importantes d'une semaine à l'autre. Lors des crues, les mayos se chargent très vite de matières en suspension. Ces cours d'eau se jettent dans le fleuve en créant un panache de particules qui est mélangé à l'eau d'origine. Ces apports sont ponctuels et locaux et expliquent des variations hebdomadaires rapides durant la saison des pluies.

Pour les stations situées en amont du lac Debo, les coefficients de variation sont plus forts en période d'étiage. Ils dépassent 100 % durant cette période. Ces faibles volumes d'eau enregistrent plus rapidement les remises en suspensions dues aux passages de troupeaux, hommes ou aux lâchûres du barrage de Selingue.

En hautes eaux, l'évolution des concentrations est liée à l'arrivée de la crue qui transporte les sédiments provenant de l'érosion du bassin versant. Les coefficients de variation sont alors inférieurs à 65 % sauf à Akka et Dire où ils sont plus proches de 70 %, un autre facteur d'enrichissement existant sur ces stations ; le vent et l'érosion des berges.

Les variations hebdomadaires sont importantes durant la période d'étiage alors que les apports du bassin versant sont pratiquement nuls. Le transport est dû à l'érosion des berges et lits qui jouent alors un rôle ponctuel non négligeable. La productibilité biologique peut alors s'avérer également importante.

Pour quelques stations, deux années complètes sont disponibles. A Banankoro, à l'entrée du fleuve au Mali et à Sofara sur le Bani, les concentrations moyennes de MeS sont plus fortes en 1992-1993 qu'en 1991-1992. Pour les stations de Koulikoro, Ke-Macina et Douna le

transport de matières a été plus conséquent en 1991-1992. L'écart est de 11 à 40 % et doit être relié à l'évolution des débits pendant cette même période.

STATION	ANNEE	CONCENTRATION DE MeS [g m ⁻³]							
		Moyenne	σ	max.	date	min.	date	CV crue [%]	CV étiage [%]
Banankoro	1991-1992	13.6	12.6	42.7	19-jul	0.1	14-jan	55.8	101.9
	1992-1993	21.2	16.7	44.6	01-jul	1.1	07-avr		
Koulikoro	1991-1992	17.6	17.4	76.6	22-aoû	1.9	30-déc	52.5	81.8
	1992-1993	10.8	8.6	34.9	03-aoû	1.1	24-jan		
Ke-Macina	1991-1992	41.4	49.7	150.4	22-aoû	1.9	30-déc	65	90
	1992-1993	36.7	22.5	104.8	10-aoû	7.1	01-fév		
Douna	1991-1992	31	41.8	209	06-aoû	0.5	24-déc	69.9	117.8
	1992-1993	26.4	28	93.7	03-aoû	0.7	01-mai		
Sofara	1991-1992	45.5	47	220.7	18-jun	3.7	30-mar		
	1992-1993	58.7	46.3	184.7	20-jul	13.2	09-nov		
Tilembeya	1992-1993	13.1	14	53.1	20-jul	1.8	02-nov	46.2	65.6
Kara	1992-1993	42.6	38.6	187.1	21-sep	3.7	23-nov	85.1	
Nantaka	1992-1993	32.1	21.6	111.1	03-aoû	2	25-mai	64	82.4
Akka	1992-1993	54	32.3	115.1	29-jun	5.4	19-oct	79.7	62.9
Awoye	1992-1993	52.8	37.5	132.9	17-aoû	7.1	30-nov	91	
Korientze	1992-1993	58.4	66	233	18-aoû	6.5	09-nov	122.6	
Dire	1992-1993	73.5	44.5	163	08-fév	10.2	09-nov	67.6	69.8

Tableau 9.1.1 : Concentrations moyennes, minimales et maximales, écart-type et coefficients de variation (CV) pour les matières en suspension des stations du delta

La relation entre la vitesse de l'eau et les concentrations de matières en suspension a été établie à partir des données recueillies lors des jaugeages. La vitesse du courant diminuant, les grains les plus lourds devraient se déposer et la concentration moyenne être relativement moins importante. Pourtant, la figure 9.1.2 montre qu'aucune relation ne ressort entre ces deux paramètres. Ceci signifie que les particules sont très fines et la diminution des vitesses en basses eaux ne permet pas un dépôt dans les bras majeurs. Au delà d'un certain seuil, ce n'est pas la vitesse de l'écoulement qui est majoritairement responsable des variations de concentration observées.

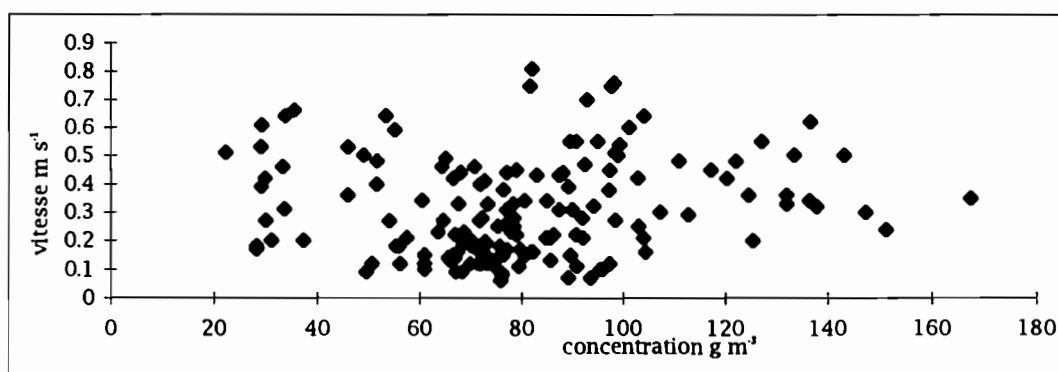


Fig.9.1.2 : Relation entre la vitesse de l'eau et les concentrations de MeS pour les jaugeages réalisés de Nantaka à Dire de 7/93 à 11/93

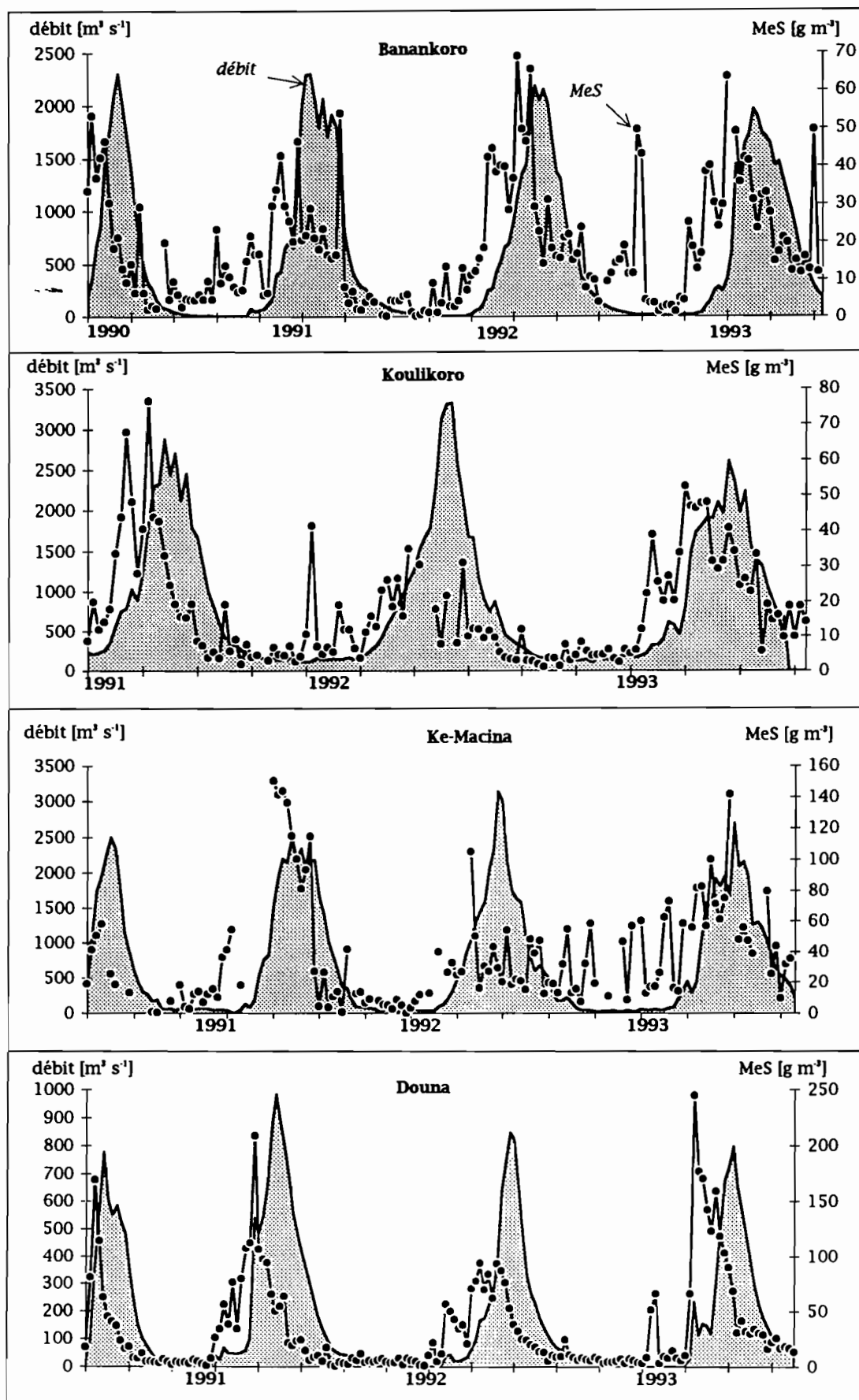


Fig. 9.1.1a : Evolution annuelle des concentrations ponctuelles de matières en suspension

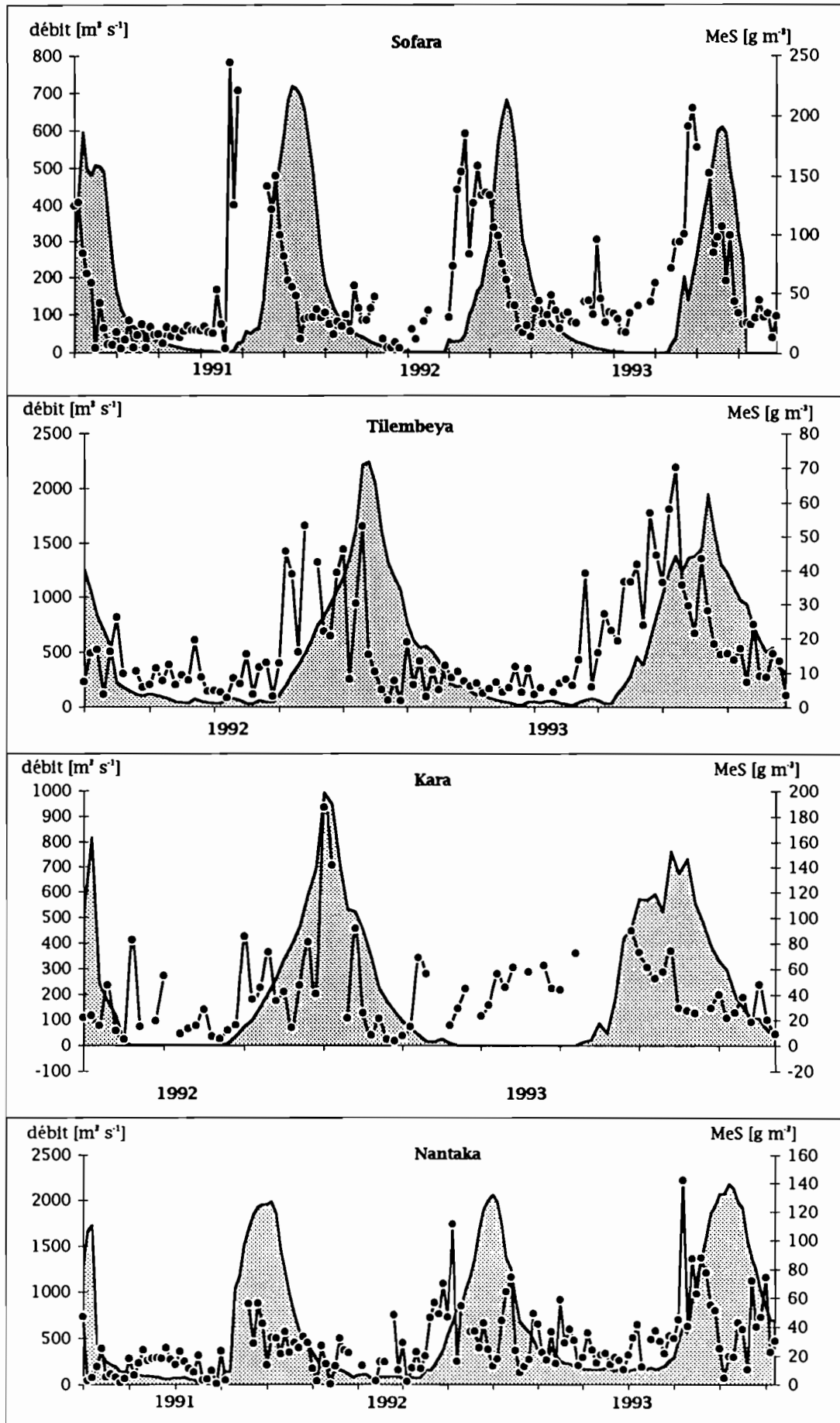


Fig. 9.1.1b : Evolution annuelle des concentrations ponctuelles de matières en suspension

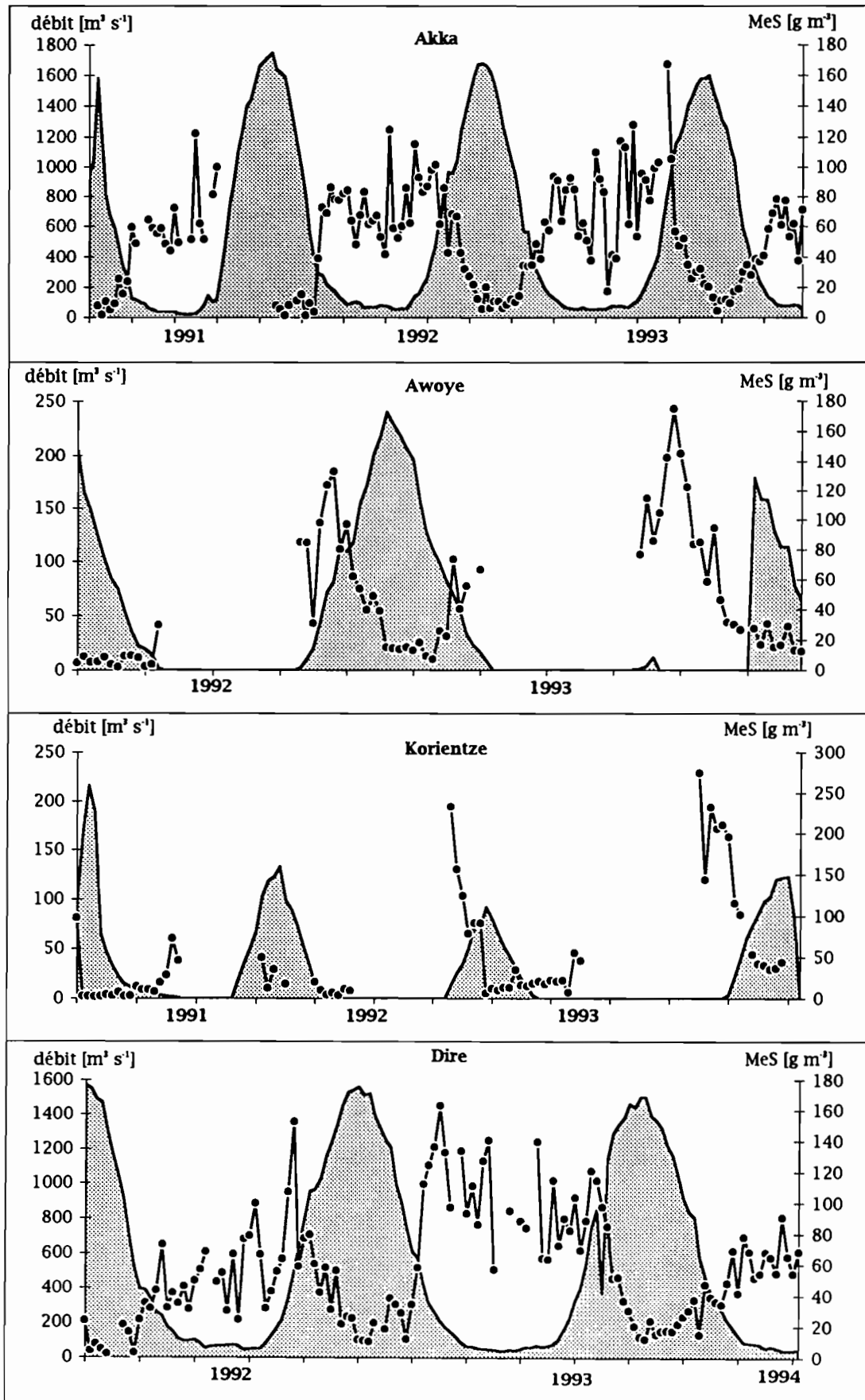


Fig. 9.1.1c : Evolution annuelle des concentrations ponctuelles de matières en suspension

9.1.2 RELATION DEBITS/CONCENTRATIONS A L'ECHELLE MENSUELLE

Les relations à l'échelle mensuelle entre les débits et les concentrations moyennes forment des boucles d'hystérésis. Les valeurs de concentration à la crue et à la décrue ne sont pas similaires. De plus, les figures 9.1.3a et b montrent une hétérogénéité entre les stations amont et aval du delta dans le comportement des variations de matières en suspension en fonction du débit.

Beaucoup d'auteurs se sont intéressés aux paramètres physico-chimiques qui permettent et entretiennent l'érosion et le transport des matières minérales et organiques en suspension. La tendance saisonnière générale montre trois phases classiques des régions tropicales (Olivry, 1977, Gac et Kane, 1986b, Olivry et al, 1988) :

- * au début de la crue, il y a une érosion du bassin versant sous l'effet des précipitations et un transport par le fleuve des sédiments ainsi arrachés. Le pic de MeS arrive donc très rapidement dès le début de la crue.

- * les concentrations de MeS diminuent. Les sédiments ne proviennent plus de bassin mais essentiellement de l'érosion du lit et berges. Les premières pluies ont permis le transport des particules disponibles. Durant le reste de la saison humide, la proportion de particules prêtes à être arrachées aux sols est moindre et la végétation s'est installée. L'érosion est ralentie.

- * le débit diminue et la rivière perd de sa compétence. Les particules sont alors déposées dans les lits majeurs ou les plaines inondées. A l'étiage, il arrive que l'on observe de fortes concentrations de matières en suspension suscitées par l'érosion de bancs de sables, de bords de rivières, de remises en suspension artificielle par l'homme, une production biologique importante (algues...). Ainsi, durant l'étiage, on peut trouver de très faibles valeurs puisque les apports sont uniquement dus à l'érosion des berges et au développement phytoplanctonique mais on relève aussi de très fortes valeurs du fait de la faible tranche d'eau qui rend la couche de dépôts superficiels sensible aux moindres perturbations du milieu, comme l'action du vent.

9.1.3 EVOLUTION SPATIALE ENTRE KE-MACINA ET DIRE

L'étude des concentrations moyennes mensuelles nous montre que le comportement des concentrations de matières en suspension se différencie de l'amont vers l'aval de la cuvette. Durant les basses eaux, les concentrations moyennes de MeS sont plus élevées sur les stations en aval du lac Debo. Par contre, le pic de MeS que l'on observe en début de crue est beaucoup moins marqué sur ces stations aval.

Le tracé des variations des concentrations en fonction du débit montre des hétérogénéités importantes entre les stations amont et aval du delta (figure 9.1.3a et b).

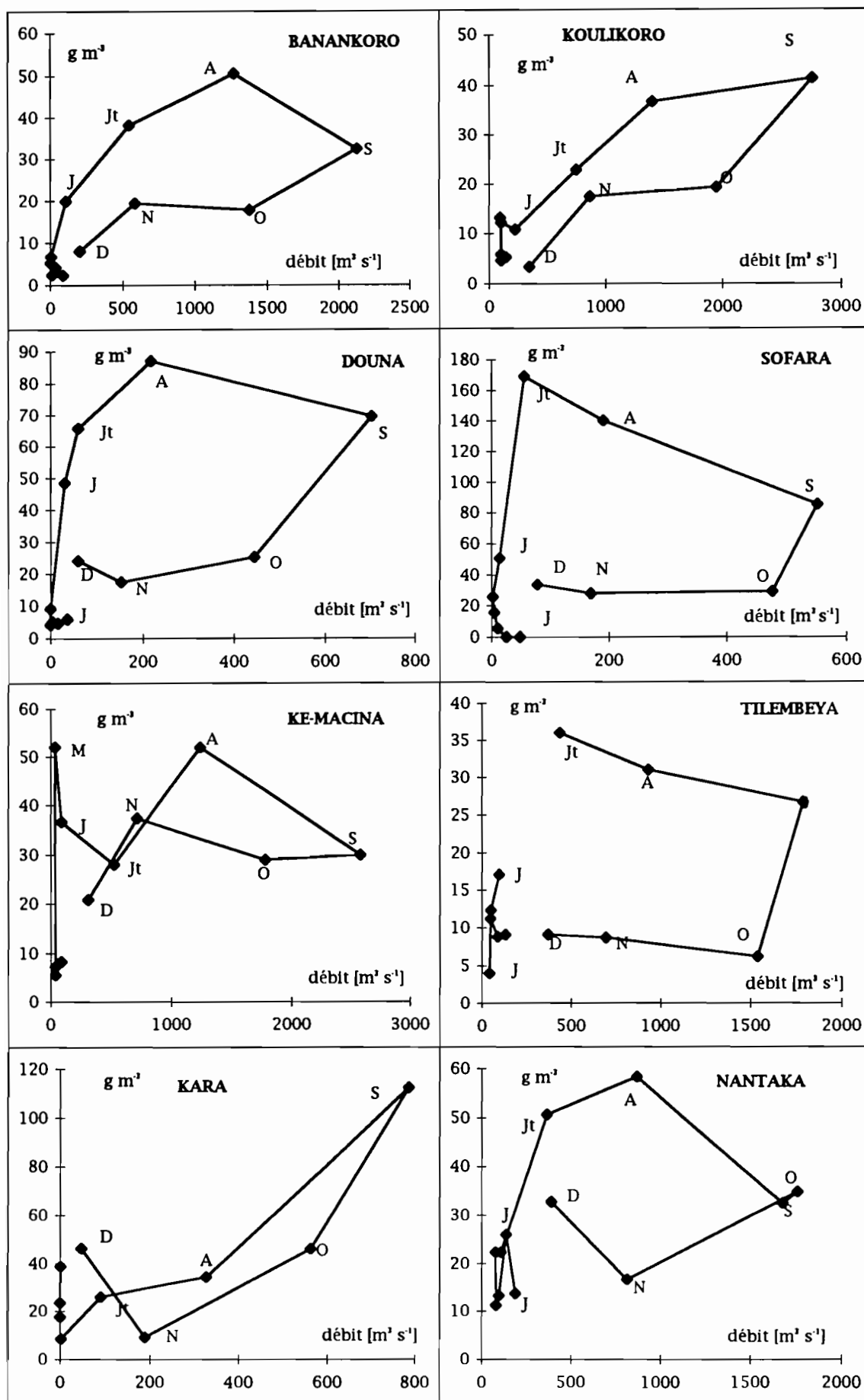


Fig.9.1.3a : Evolution des concentrations moyennes mensuelles en fonction du débit 1992

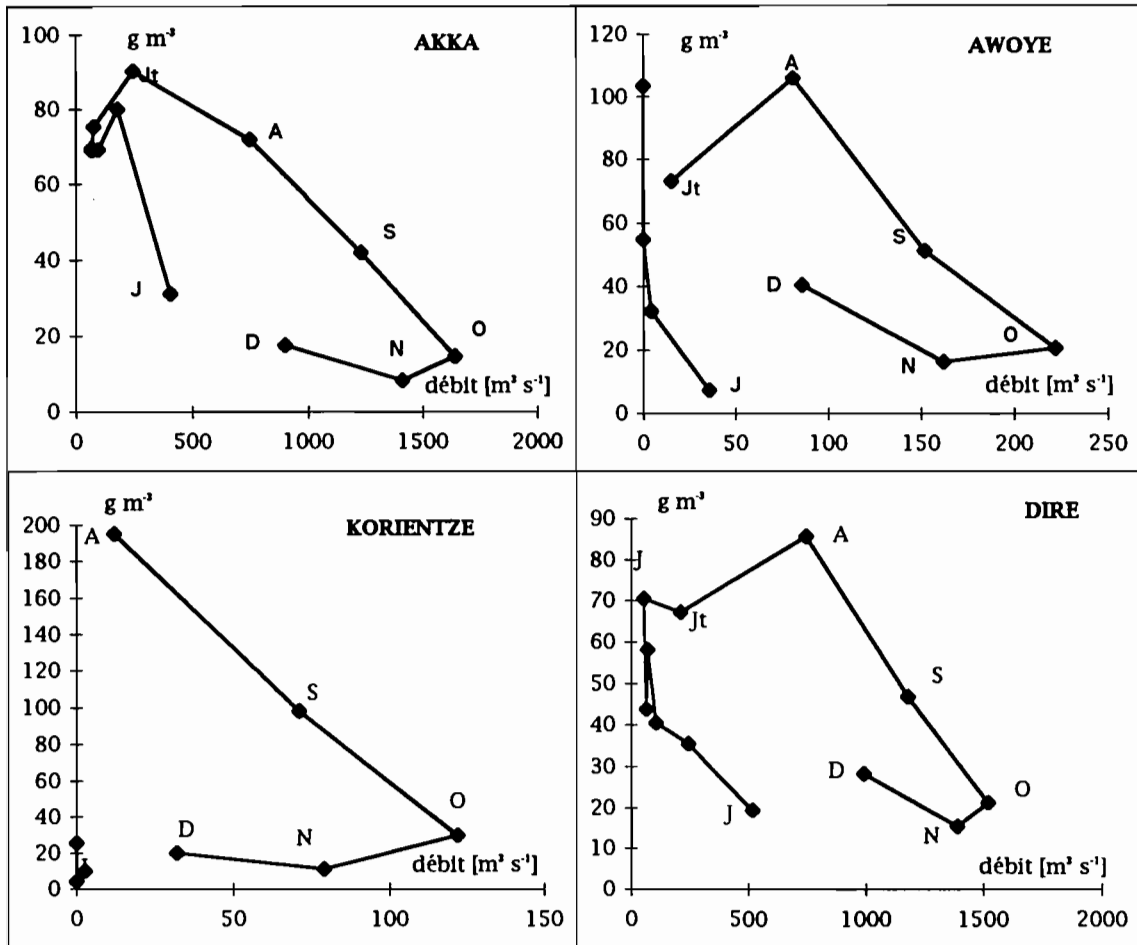


Fig.9.1.3b : Evolution des concentrations moyennes mensuelles en fonction du débit 1992

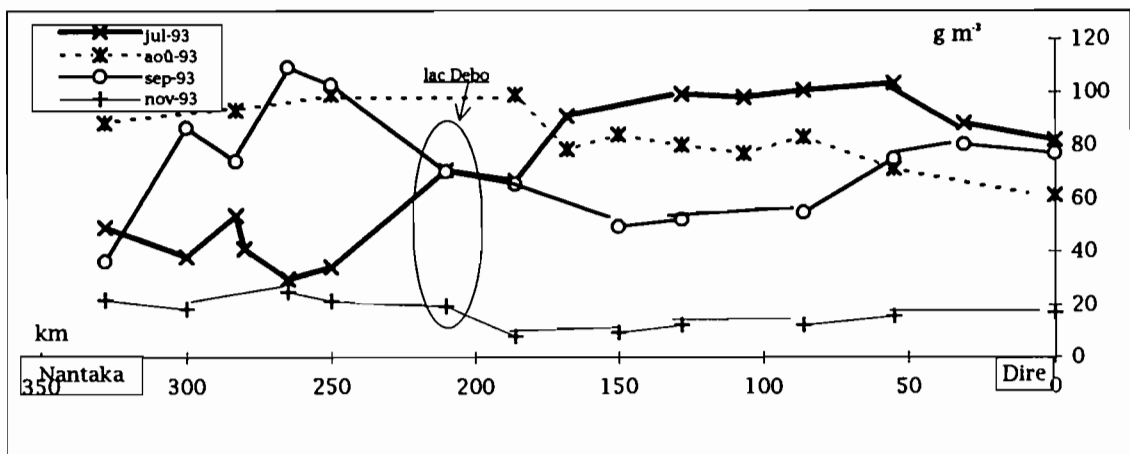


Fig.9.1.4 : Evolution spatiale des concentrations de MeS mesurées lors des campagnes en 1993

Sur les stations de Banankoro, Koulikoro, Douna, Sofara et Ke-Macina, les concentrations maximales se situent de 25 à 40 jours avant le débit maximum et plus de 2 mois après le début de la crue (tableau 9.1.2). Ce sont bien les pluies du bassin amont qui sont la cause principale de l'augmentation des matières en suspension.

Pour les stations de Akka, Awoye, Korientze et Dire, les maxima de matières en suspension se situent plus de 2 mois avant le maximum de crue et seulement 23 à 45 jours après le début de la montée des eaux. La montée des eaux est plus lente vers l'aval mais le pic de MeS arrive plus vite. Ainsi, alors que l'onde de crue montre un décalage de plus d'un mois entre Ke-Macina et Dire, les valeurs maximales de matières en suspension sont synchrones.

STATION	conc. max. de MeS (D1)	début de la crue (D2)	max.de la crue (D3)	D1-D3 jours	D2-D1 jours
BANANKORO	10/08	01/06	12/09	33	71
KOULIKORO	17/08	10/06	17/09	31	68
KE-MACINA	10/08	14/06	18/09	39	57
DOUNA	17/08	04/06	24/09	38	78
SOFARA	10/08	19/06	25/09	45	51
KARA	07/09	30/06	20/09	13	68
TILEMBEYA	03/08	9/06	30/09	51	37
NANTAKA	3/08	17/06	27/09	54	46
AKKA	3/08	19/06	21/10	79	44
AWOYE	17/08	25/07	12/10	68	23
KORIENTZE	18/08	15/08	19/10	61	3
DIRE	3/08	28/06	23/10	81	36

Tableau 9.1.2 : Décalage entre le début, le maximum de la crue et le maximum de concentration de MeS

Pour les stations de l'Erg de Niafunke, les dépôts de fond de lit et des berges sont facilement mobilisables dès le début de la montée des eaux.

Pour les rivières dont l'écoulement n'est pas pérenne, l'augmentation des concentrations au début de la crue est très rapide.

En aval du lac Debo, les concentrations minimums sont observées en novembre à l'étale de la crue. Il y a ensuite, de décembre à février une augmentation brusque des concentrations qu'une diminution des débits n'explique qu'en partie. En effet, si l'on considère qu'il n'y a ni apport ni perte de MeS, une variation de débit mensuel de 1390 à 994 m³ s⁻¹ devrait entraîner une augmentation maximum des concentrations de MeS de 6 g m⁻³ pour la station de Dire. L'eau du fleuve drainant la région du lac Debo est de plus en plus concentrée de décembre à février. On peut donc supposer qu'il y a des apports extérieurs ou des phénomènes locaux de remise en suspension des dépôts. Les poussières atmosphériques transportées par l'Harmattan sont susceptibles de fournir de grandes quantités de matières durant l'hivernage. Les vents orientés dans l'axe du lit du Niger créent des vagues qui attaquent les berges du fleuves et permettent la remobilisation de ces dépôts anciens. La production algal importante dans le lac Debo, notamment à cette période est un facteur à ne pas négliger bien que la mesure n'ait pas été faite dans cette étude.

D'autres analyses ont été faites durant les campagnes entre Nantaka et Dire. A chaque saison, il se produit une rupture dans l'évolution moyenne des concentrations au niveau du lac Debo (fig.9.1.4).

Au début de la crue, en juillet, il y a une diminution des teneurs de Nantaka à Bouna. Les concentrations augmentent ensuite au niveau du lac Debo et restent fortes sur le delta aval.

En août, les concentrations augmentent jusqu'aux sorties du lac Debo puis diminuent régulièrement. Le décalage de l'onde de crue, qui est de 15 jours entre Nantaka et Dire, peut expliquer que les concentrations en aval n'aient pas encore augmenté.

Entre les régions amont et aval, la tendance générale est à la hausse en septembre. Il y a une baisse des concentrations au niveau du lac Debo et les valeurs continuent d'augmenter après Aore. Les concentrations sont constantes (20 g m^{-3}) durant les hautes eaux en novembre.

En août, septembre et octobre, les concentrations de matières en suspension sont plus faibles en aval du lac Debo. Durant ce mois, la diminution des vitesses d'écoulement, la végétation abondante permet le dépôt des matières. Le processus est inversé au mois de juillet en raison du décalage de l'arrivée de l'onde de crue.

L'étude souligne l'importance de l'évolution des concentrations des régions autour du lac Debo. La zone comprise entre Bouna (km 250) et Aore (km 168) est une zone de transition entre le delta vif et la région nord moins soumise aux inondations.

L'observation de l'évolution annuelle des concentrations de MeS de Ke-Macina à Dire nous montre un changement de l'amont vers l'aval du fonctionnement dynamique du fleuve. Les stations amonts suivent le même comportement que les fleuves des régions tropicales alors que les stations avals ont des particularités liées à la fois à l'inondation de la cuvette et au climat sahélien (vents de sables). Le lac Debo, par son étendue, son système végétal très développé, sa géomorphologie joue un rôle charnière dans le changement de comportement des matières particulaires.

9.2 CARACTERISTIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION

9.2.1 GRANULOMETRIE

L'étude granulométrique a porté sur les stations principales du delta de juillet 1990 à décembre 1992. En raison des faibles quantités de matières minérales récoltées sur les filtres lors des prélèvements hebdomadaires, les suspensions recueillies lors des jaugeages ont également été analysées. Malgré cela, la chronique n'est pas continue à l'échelle mensuelle et ne permet pas de comparaisons interannuelles (tableau 9.2.1).

Les particules en suspension sont composées de matières organiques (notamment le phytoplancton de taille supérieure à $10 \mu\text{m}$), de sables et d'une fraction plus fine silto-argileuse.

date	KOULIKORO		DOUNA		KE-MACINA		NANTAKA	AKKA		DIRE	
	médiane	>50 μ	médiane	>50 μ	médiane	MO	MO	médiane	MO	médiane	MO
	μm	%	μm	%	μm	%	%	μm	%	μm	%
jul-90			0.17	0.08							
aoû-90			0.38	0.06							
sep-90			0.15	0.07							
oct-90			0.16	0.13					11.9		
nov-90			0.22	0.09					1.1		
déc-90				0.34			9		18.6		16.9
jan-91			0.19	0.44			46.4		6.3		8.7
fév-91				0.86			31.6		3.1	0.18	10
mar-91			0.36	1.88		22.6	12.3	0.86	4.7		6.3
avr-91				1.44		5.3	16.6		5.4		
mai-91				1.97		10.8	15.7		5.4		
jun-91	0.31	2.1	0.31	0.5			12.9	0.15	3.9		
jul-91	0.302	2.6	0.16	0.26				0.21	7.1		
aoû-91	0.3	2	0.17	0.26	0.18	3.1	4.9				
sep-91	0.3	3.2	0.23	0.41	0.25	2.1					
oct-91	0.344	4.6	0.25	0.92	0.15	4.6					
nov-91	0.38	1.95		1.81		13.8			20.6	0.19	11
déc-91				2.67		5.5			35.2		32.1
jan-92		0.8		1.59		20.4	2.9		9.7		16
fév-92				0.85		8.8	11.1	0.14	5.5	0.16	6.6
mar-92	0.9	0.8		0.4	0.64	31.3	6.7	0.36	5.8	0.15	6.2
avr-92		3.1		0.34		24.7	4.3	0.22	5.3		4.9
mai-92		0.8		0.23		20.1	39.8	0.16	5.3		
jun-92		1.2				8.3	7.8	0.17	4.5		
jul-92	0.4	1.5				12.8	3.1	0.18	3.6	0.17	3.2
aoû-92		0.2	0.2	5.15	0.54	5.4	1.1	0.27	5.6	0.26	3.5
sep-92	0.68	0.1	0.44	4.31		6.8	4		8.1		
oct-92	0.366	0.8				6.8	1.7		17.7		
nov-92	0.33	1.2			1.3	5.5	5.5		19.4		17
déc-92		0.7		6.55		8.5	1.6	0.16	11.7		10.2

Tableau 9.2.1 : Analyse granulométrique des matières en suspension, (médiane et fraction sableuse) et teneurs relatives en matières organiques

*** la fraction organique**

La comparaison des poids de matière recueillie sur les filtres avant et après une attaque à l'eau oxygénée permet de donner une idée approximative de la part des matières organiques (MO) dans les suspensions. L'estimation du taux de MO varie sur l'année de 1,1 à 46,4 %. Les valeurs les plus élevées se retrouvent d'octobre à janvier pour les deux stations placées en aval du lac Debo. C'est au maximum de l'inondation que la production végétale (ou production primaire) est la plus importante dans la zone inondée.

A Ke-Macina et à Nantaka, les teneurs maximales de matières organiques sont observées en basses eaux, de janvier à mars. A ce moment, les particules minérales sont peu abondantes et la contribution relative des particules organiques est d'autant plus forte.

*** la fraction sableuse**

Les particules d'un diamètre supérieur à 50 μm sont considérées comme des sables fins, par opposition aux silts et argiles dont le diamètre caractéristique est inférieur à cette limite.

La séparation de ces deux types de particules a été faite pour les sédiments de la station de Koulikoro et de la station de Douna. La contribution relative des sables dans le transport total des particules est comprise entre 0,06 et 6,7 % à Douna et 0,1 et 4,6 % à Koulikoro.

Sur le Niger, le maximum de particules sableuses s'observe de septembre à novembre alors que les débits sont élevés. L'énergie du fleuve permet la remise en suspension des plus grosses particules déposées au fond du lit.

A Douna, la fraction sableuse est plus abondante en août et septembre 1992. Ce sont également les vitesses élevées de l'eau qui permettent le transport des particules les plus lourdes.

Sur cette station, on note également deux petits pics centrés sur le mois de mars et de décembre 1992. Ceux-ci sont dus au fait que des jaugeages ont été ajoutés aux prélèvements hebdomadaires. Durant l'étiage, les jaugeages sont faits alors que la tranche d'eau est faible. De ce fait, une partie des particules sableuses transportées par saltation est filtrée.

Les apports atmosphériques ont fait l'objet d'une analyse granulométrique pour les mois de novembre à février. La partie sableuse représente 17,6 % des particules en novembre et 4,5 % en janvier et février. Ces teneurs en particules grossières sont faibles en comparaison des poussières venant des grands ergs sahariens (Coude-Gaussen, 1991, Møberg et al, 1991).

*** Fraction silteuse**

La fraction inférieure à 50 μm a pu être mesurée sur toutes les stations. Toutefois, le suivi mensuel n'est pas établi. Le diagramme granulométrique (fig.9.2.1) nous donne la part relative de chaque diamètre de particule. La médiane, qui est le diamètre supérieur de 50 % des matières en suspension, représente le mieux la répartition des granulométries.

Sur les trois années d'étude, la médiane varie de 0,14 à 0,38 μm avec quelques plus fortes valeurs (0,7 à 1,1) pour la station de Koulikoro. Ces diamètres sont beaucoup plus petits que ceux relevés sur le fleuve Congo et l'Oubangui qui sont compris entre 0,5 et 2,75 μm (Giresse et al, 1990, Jouanneau et al, 1990).

La médiane est plus élevée en période de hautes eaux et est minimum en fin d'étiage et au début de la crue. Ceci correspond à un simple tri granulométrique qui est fonction de la puissance du fleuve.

La médiane moyenne de la station de Koulikoro est de 0,37 μm alors que celle de la station de Dire n'est que de 0,19 μm . En traversant les plaines inondées, les particules les plus grosses se déposent dans le lit et les plaines inondées. La végétation peut également jouer un rôle mécanique dans l'accélération des dépôts. L'eau, en aval, est proportionnellement plus riche en particules fines.

Pour les poussières atmosphériques, la médiane moyenne pour les quatre mois d'étude est de 2,55 μm . Cette période représente la saison où la fréquence et la vitesse moyenne des vents sont maximales. L'Harmattan est dominant. La médiane des poussières recueillies à Tessalit est de 63 μm (Coude-Gausson, 1991). Les apports atmosphériques relevés à Batamani ont subi de forts remaniements durant leur transport depuis leur région d'origine (les erg du nord au Sahara). Il est certain également qu'une partie des particules est autochtone et provient donc des argiles recouvrant le delta. Ceci expliquerait la finesse relative des particules transportées.

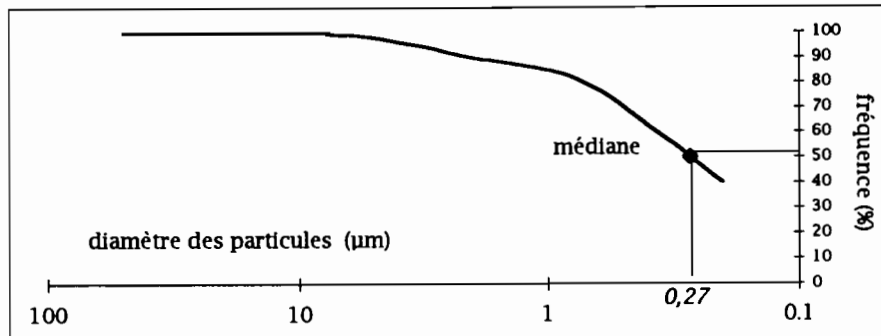


Fig.9.2.1 : Distribution de la taille des particules à Dire en août 1992

9.2.2 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DÉTERMINÉE PAR DIFFRACTOMÉTRIE AUX RAYONS X

La minéralogie des matières en suspension dépend de la composition minéralogique des roches du bassin versant. Les roches sédimentaires participent largement à la charge en suspensions. La contribution des granites est moins grande (Vaithyanathan et al, 1988). Les minéraux sont plus ou moins altérés selon l'activité du fleuve et la distance parcourue par les particules.

L'analyse minéralogique a été faite sur les stations de Ke-Macina, Douna, Akka et Dire en période de basses et hautes eaux. Une mesure sur les poussières atmosphériques recueillies à Batamani en janvier a été ajoutée à la série.

Ce sont les quartz qui dominent sur tous les diffractogrammes (tableau 9.2.2) puis, en moindre quantité, la kaolinite. On retrouve de l'illite, un feldspath calco-sodique (anorthose, labradorite ou anorthoclase), du rutile et de la goéthite à l'état de trace. Cette composition minéralogique moyenne reflète un matériel soumis à la pédogenèse ferralitique en milieu tropical. Elle se rapproche de celle du lac Tchad (Gac, 1980) et de celle du Nil hormis l'absence de montmorillonite (Irion, 1991).

STATION	PERIODE	QUARTZ	ARGILES		TRACES			cristallisation
			KAOLINITE	ILLITE	FELDSPATH	GOETHITE	RUTILE	
Batamani	déc-92	+++	75	25	oui	-	oui	
Ke-Macina	fév-92	++++	70	30	-	oui	oui	
Douna	jun-90	+	100	0	-	oui	oui	mauvaise
Akka	mar-92	++	75	25	oui	oui	oui	
Dire	avr-92	++	85	15	oui	-	oui	
Ke-Macina	oct-92	++	80	20	-	oui	oui	
Douna	oct-90	++	85	15	oui	oui	oui	
Akka	oct-92	+	100	0	-	-	-	mauvaise
Dire	déc-92	++	90	10	-	-	oui	mauvaise

Tableau 9.2.2 : Composition minéralogique semi-quantitative établie à partir des spectres de diffractométrie

Le quartz des matières en suspension relevées à Akka et Dire en hautes eaux et à Douna en basses eaux est très mal cristallisé et les spectres présentent alors un bruit de fond fort.

La composition moyenne des poussières atmosphériques ressemble à celle des sables des erg du nord et notamment de la région de Béni-Abbès qui se composent essentiellement de quartz, de minéraux argileux interstratifiés et d'illite (Coude-Gaussen, 1991). L'étude minéralogique des poussières apportées par l'Harmattan au nord du Nigeria concorde avec celle des poussières au Mali avec la présence de quartz essentiellement, kaolinite et smectite ou autre argile interstratifié (Adetungi et Ong, 1980). Les feldspaths peuvent provenir également du socle des régions nord (Coude-Gaussen, 1991). Mais la similitude de composition minéralogique des poussières et des particules en suspension sur le fleuve laisse supposer aussi qu'une grande part des poussières recueillies dans le capteur pyramidal est autochtone. Un long trajet ou une part relative autochtone forte pourrait expliquer l'absence d'autres minéraux caractéristiques des régions sahariennes (gypse, palygorskite, chlorite, halite, calcite). Drees et al (1993) notent la présence de poussières apportées au Niger par l'Harmattan de composition minéralogique proche de celles recueillies à Batamani mais avec quelques traces de calcite et de halite. L'origine des poussières apportées à Batamani est sans doute allochtone (régions nord saharienne) et autochtone (delta central lui-même).

* Les argiles

L'estimation de la part relative de chacune des argiles a été faite selon la méthode recommandée par Holtzapffel (1985). La présence de illite ne peut être déterminée sur les échantillons mal cristallisés. Pour les autres analyses, le taux de kaolinite varie entre 70 et 90 % et augmente vers la sortie de la cuvette. Ces forts taux de kaolinite indiquent que le matériel érodé a été soumis à la latéritisation. Il est également synonyme de faibles taux d'érosion (Irion, 1991). Le taux de illite est proportionnellement plus important en basses eaux. Cette argile peut provenir de l'altération de certains faciès schisteux compris dans les

grès de Bandiagara (Gallais, 1967). Ils sont rapidement exportés en hautes eaux alors que, durant l'étiage, ils ont tendance à se concentrer.

Le pourcentage de illite dans les poussières atmosphériques est important. Il semble que plus les aérosols transportés par l'Harmattan subissent un long trajet et plus la part d'illite et de quartz est grande (Paquet et al, 1984, Coude-Gaussen, 1992). Au cours de leur transport, les argiles perdent les caractéristiques des régions arides (palygorskite, smectite) pour s'enrichir en particules originaires d'un milieu plus humide (kaolinite)(Coude-Gaussen et Rognon, 1983).

De longs trajets et une part autochtone importante sont des facteurs qui permettent d'expliquer que les poussières atmosphériques aient des compositions minéralogiques très proches de celles des sédiments transportés par le fleuve.

*** Le quartz**

La présence de quartz domine largement à Ke-Macina en basses eaux. Pour chaque station, la contribution relative du quartz par rapport à la kaolinite est plus grande en basses eaux. Sur le Niger en hautes eaux, les minéraux amorphes créent un fond spectral important. La présence de renflements à 3,45 Å et 4,16 Å révèle la présence d'opale diatomique dont l'abondance coïncide avec la période la moins turbide et la plus riche en éléments nutritifs. Ces constituants amorphes peuvent également être d'autres dérivés de la silice comme le gel, verre ou tests d'organismes comme les diatomées (Lapaquellerie, 1987, Giresse et al, 1990). Leur abondance ne peut être définie sur les diagrammes mais confirme la présence de reminéralisation de la silice dissoute sous diverses formes amorphes de la silice (Censier et al, 1994). L'observation au microscope (grossissement *200) montre la présence largement dominante de cristaux de quartz.

*** Autres minéraux présents**

Le feldspath (plagioclase ou alcalin) se distingue dans les apports éoliens et sur les stations aval du delta en basses eaux. Il provient essentiellement de roches granitiques du bassin amont.

La présence de goethite n'est pas décelable dans les poussières atmosphériques et les sorties du delta (sauf Akka à l'étiage). Ces particules lourdes, provenant de l'altération des cuirasses latéritiques se déposent rapidement dans la cuvette.

La seule différence minéralogique entre les particules transportées par le vent et le fleuve est l'absence de goethite dans les poussières atmosphériques. Il n'est toutefois pas possible de différencier la part des apports du bassin amont de celle de l'érosion des lits et berges.

9.3 BILAN MENSUEL DU TRANSPORT DE MES

Pour permettre le suivi d'une même masse d'eau à travers le bassin intérieur, les résultats obtenus à chaque station ont été décalés dans le temps en tenant compte des distances entre les stations et de la vitesse de l'onde de crue. Pour une eau prélevée à Banankoro le 2 juillet 1990, son arrivée sera ainsi estimée au 17 août. Le tableau 9.3.1 résume la distance entre chaque station et le décalage approximatif de l'onde de crue.

Stations	distance [km]	décalage [jours]
BANANKORO-KOULIKORO	180	6
KOULIKORO-MACINA	280	4
MACINA-KARA	50	1
MACINA-NANTAKA	150	13
DOUNA-SOFARA	220	5
SOFARA-NANTAKA	60	1
NANTAKA-KORIENTZE	135	13
NANTAKA-AWOYE	115	13
NANTAKA-AKKA	130	13
AKKA-DIRE	180	10

Tableau 9.3.1 : Distance et décalage entre les stations de prélèvement

Il existe un écart de temps entre l'arrivée de l'onde de crue et le passage de l'eau correspondante qui est un peu plus tardive. Le décalage adopté est donc imprécis mais il reste le seul moyen pour permettre une comparaison des bilans aux entrées et aux sorties du delta. Une numérotation régulière par période de 5 jours a été ainsi utilisée pour permettre l'estimation du bilan sans alourdir la routine de calcul.

Les mois notés sur les figures et discutés dans le texte sont ceux des prélèvements à Ke-Macina.

Le calcul du flux de matière transporté se fait selon une intégrale du type :

$$F = \int_0^t C_j * Q_j * t$$

F : Flux (tonnes par unité de temps)

C_j : concentration journalière de matière en suspension (g m⁻³)

Q_j : débit journalier (m³ s⁻¹) t : unité de temps choisie (mois ou année)

Pour les stations de Banankoro et Douna, la chronique des concentrations de matières en suspension est continue depuis novembre 1990. Le bilan a été établi pour les années 1991-1992, 1992-1993 et 1993-1994. Pour les autres stations du delta, les chroniques ont une lacune au cours des mois de juillet, août et septembre 1991. Comme les maximums de MeS sont enregistrés durant ces trois mois, les données n'ont pu être conservées pour le calcul des flux. Les stations du delta portent sur les deux cycles hydrologiques 1992-1993 et 1993-1994.

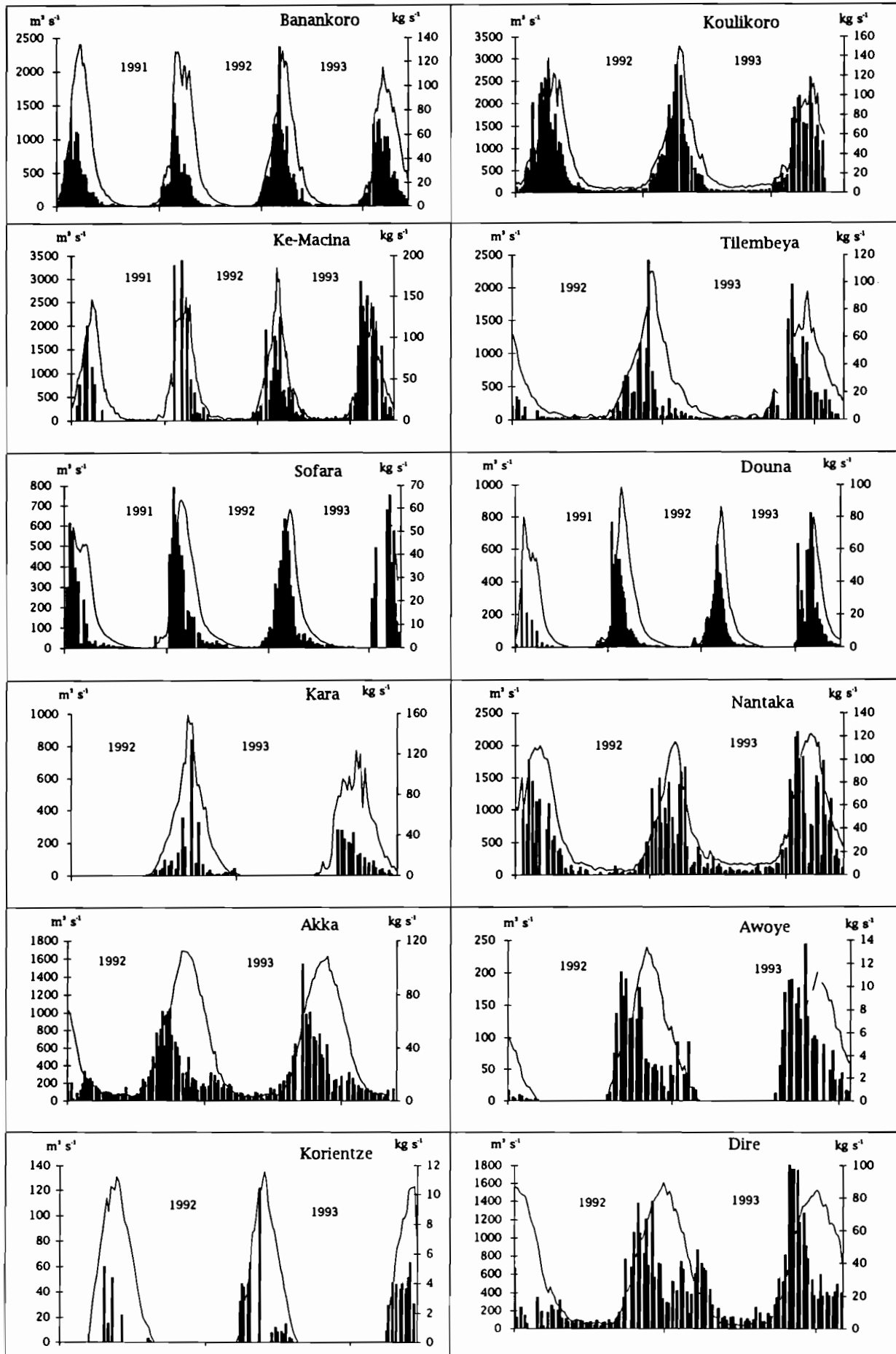


Fig.9.3.1 : Débits solides (histogramme) et débit liquide (courbe) pour toutes les stations du delta

9.3.1 VARIATIONS SAISONNIERES DES FLUX PARTICULAIRES DE 1990 A 1994

Les débits solides sont très irréguliers sur l'année (figure 9.3.1). Les variations d'une année sur l'autre sont également importantes. Les débits solides les plus forts se situent une quinzaine de jours avant le maximum de la crue pour les stations les plus en amont de Banankoro à Ke-Macina, Douna et Sofara. Ce décalage est de presque un mois pour les stations du coeur de la zone inondée de Tilembeya, Kara, Nantaka et de plus d'un mois pour les stations en aval du lac Debo.

Les pics sont plus fins et étroits pour les stations en amont du lac Debo et au contraire plus larges à Akka et Dire. A Dire, une seconde arrivée de matière s'observe en fin de décrue. Un pic identique mais très léger s'observe également à Akka. Ce pic serait dû aux poussières atmosphériques abondantes vers les régions nord et notamment dans la région de l'Erg de Niafunke.

Pour les stations de Kara, Awoye et Korientze, le pic de débit solide est très rapide car l'écoulement est de courte durée et la remobilisation des matières en suspension rapide.

9.3.2 EVOLUTION MENSUELLE DU TRANSPORT DE MATIERES EN SUSPENSION

9.3.2.1 Transport mensuel à chaque station du delta

Les flux mensuels de matières ont été calculés pour les stations du delta central de mai 1990 à mai 1994. Les dates indiquées dans le tableau 9.3.2. sont celles du passage de l'eau à Ke-Macina et les flux sont exprimés en milliers de tonnes par mois.

Les bilans mensuel et annuel ainsi calculés négligent le transport de fond. La comparaison des concentrations ponctuelles mesurées lors des jaugeages à travers une section du fleuve montre peu de différences spatiales systématiques. Le charriage de fond étant lié à la vitesse de l'écoulement, on peut affirmer que le transport de fond sur le fleuve Niger dans la cuvette lacustre est peu important. Walling (1984) estime que le transport de fond des grands fleuves africains n'excède pas 10 % du transport total. L'erreur faite en ne tenant pas compte de ce type de transport est sans doute inférieure à cette valeur étant données les vitesses peu élevées de l'écoulement.

9.3.2.2 Etude du transport mensuel cumulé durant l'année 1992-1993

Nous avons reporté sur la figure 9.3.2 le cumul des transports mensuels au cours de l'année 1992-1993 sur les stations les plus représentatives (c'est à dire celles où le volume d'eau annuel écoulé est le plus fort).

* *Ke-Macina*

Durant les mois d'août, septembre et octobre, 570 000 tonnes de matières sont transportées par le Niger soit 72 % du total annuel. L'augmentation de juin à juillet et l'arrêt du transport d'octobre à novembre se font lentement.

* *Douna*

Sur le Bani, le transport est maximum pendant les mois d'août et septembre qui représentent 75,7 % du total annuel. De novembre à juin, les tonnages exportés sont négligeables.

* *Tilembeya*

Cette station se situe juste en aval de la défluence du Diaka. Le comportement temporel devrait être le même que celui de la station de Ke-Macina située 50 kilomètres en amont. Le calcul montre que 75,0 % du transport annuel se produit de juillet à septembre. Le maximum de septembre correspond aux matières provenant du bassin versant et transitant par le fleuve Niger. Par contre, les tonnages relevés en juillet sont plus forts qu'à Ke-Macina. Cet écart est dû en partie à une reprise importante de bancs de sables, levées, sédiments de fond déposés à l'étiage précédent. On note que l'arrêt du transport se fait rapidement dès la fin du mois de septembre.

* *Nantaka*

Les matières transportées sont 17 fois plus importantes en juillet qu'en juin. Une aussi rapide hausse ne peut s'expliquer par l'arrivée de particules provenant de plusieurs centaines de kilomètres en amont. Une forte proportion des particules de ce mois de juillet est d'origine autochtone. Comme pour Ke-Macina, le transport se produit essentiellement de juillet à octobre. C'est 85,5 % des particules en suspension qui transitent par le fleuve durant ces quatre mois de hautes eaux.

* *Akka*

Le comportement des stations en aval du lac Debo est très différent de celui des stations de l'entrée de la cuvette lacustre. Les mois de juillet et août ont le même poids et représentent 46,6 % du total annuel. L'évolution des tonnages cumulés est ensuite régulière de septembre à décembre. Pour cette période de hautes eaux, ce sont 40,6 % des particules en suspension qui transitent par l'Issa Ber.

* *Dire*

Les mois de juillet et août ne représentent plus que 33,6 % du transport annuel. De mai à juin, puis de septembre à janvier, le transport moyen mensuel est de 76 000 tonnes. Il n'y a qu'en février, mars et avril que le transport de matière ralentit.

date	Macina	Kara	Tilembey	Douna	Sofara	Nantaka	Akka	Awoye	Korientz	Dire
mai 90										
juin										
juillet		19.9		38.6	77.8					
août	166.7	50		69.3	94.7	105.2			2.6	
sept.	257.7	84.6		33.3	30.5	16.6			0.75	
octobre	109.1	30.2		10.3	6.1	18.9	13.7	1.7	0.35	
nov.	31.8	7.2		1.9	3	14.8	15.4	1.2	0.1	39.8
déce.	9.1	0		0.5	1.6	11.5	19.1	2.3	0	59.2
janvier	0.9	0		0.2	1	1.9	20.2	0.1	0	20.8
février	0.6	0		0	0.4	4.3	13	0	0	7.1
mars	0.6	0		0	0.2	3.7	7.5	0	0	
avril	0.7	0		0	0.1	2.1	5.8	0	0	
mai 91	1.9	0		0.9	2.5	1.3	8.2	0	0	
juin	98.9			6	40		45.6		0	
juillet	359.6			56.7	96				0	
août	633.8			126	143.2	130.4			1.8	
septe.	701.3			65.3	59.7	177.2			9.6	
octobre	373			19.6	32.8	134.2			8.1	48.6
nov.	36	16.6	28.3	5.5	10.9	69	28.1		4.5	28.8
déc.	31.5	2.1	22.3	1.6	6.7	17.2	19.9	0	2.4	33.3
janvier	1.8	0	3.6	0.6	5.2	9.5	46.3	0	0.5	31.5
février	1.5	0	2.2	0.3	2.6	7.2	23.3	0	0	13.1
mars	0.5	0	1.2	0	0.4	3	13.7	0	0	11.7
avril	0.6	0	1.4	0	0.3	7.1	16.5	0	0	9
mai 92	0	0	1.4	0.05	0.4	3.2	12.3	0	0	11.3
juin	14.7	0	7.3	0.5	5.6	8.3	50.9	0.6	0	72.9
juillet	56.9	17.9	69.9	17.3	29.8	141.9	126	17.5	5	124.7
août	198.1	34.8	103.7	60.6	92.3	139	149.9	21.5	12.1	140.9
septe.	210.9	111.9	149.4	122.9	115.9	128.7	71.6	15.9	8.7	90.8
octobre	161.4	47	67.5	33.2	26.4	127.6	45.5	7.1	2.8	54.8
nov.	82.5	4.3	16	5.5	10.8	33.3	27	6.1	2.3	75.1
déc.	25.7	5.2	8.4	1.7	6.1	25.8	44.5	9.2	0.2	88.4
janvier	12.5	5.3	3.1	0.5	2.6	15	29	1.8	0	75.6
février	3.5	0	1.3	0	2.1	6	17	0	0	25.9
mars	16.7	0	1.3	0	0.6	3.7	8.7	0	0	13.8
avril	9.3	0	1.3	0	0.4	3.5	10.2	0	0	15.7
mai 93	2.4	0	1.5	0	0	8.1	10.2	0	0	13
juin	5.9	0	2.3	0	0	10.2	26.8	0	0	20.1
juillet	36.7	15.6	27.4	32.3	48	10.8	104.3	13.6	0.3	89.8
août	172	54.3	110.1	71.8	82.1	70	201.1	25.8	4.6	226.3
septe.	245	82.4	151.7	146.4	154.7	265	122.5	19.2	10.0	123.6
octobre	181	52.6	86.2	48.8	53.5	121	66.2	12.9	7.1	83.9
nov.	101	23.4	36.6	13.8		64	35	9.1	3.8	67.1
déc.	26.6	6	16.2	1.4		46.1	30	1.7	1.4	63.5
janvier	19.7	3		1			9.1	0	0	44.8
février	9.4	0		0.8			7	0	0	23.4
mars	9.3	0		0.1			6	0	0	10.7
avril	5.0	0		0			7	0	0	10.5

Tableau 9.3.2 : Transport moyen mensuel (10³ tonnes) pour les années 1990-1994 dans le delta

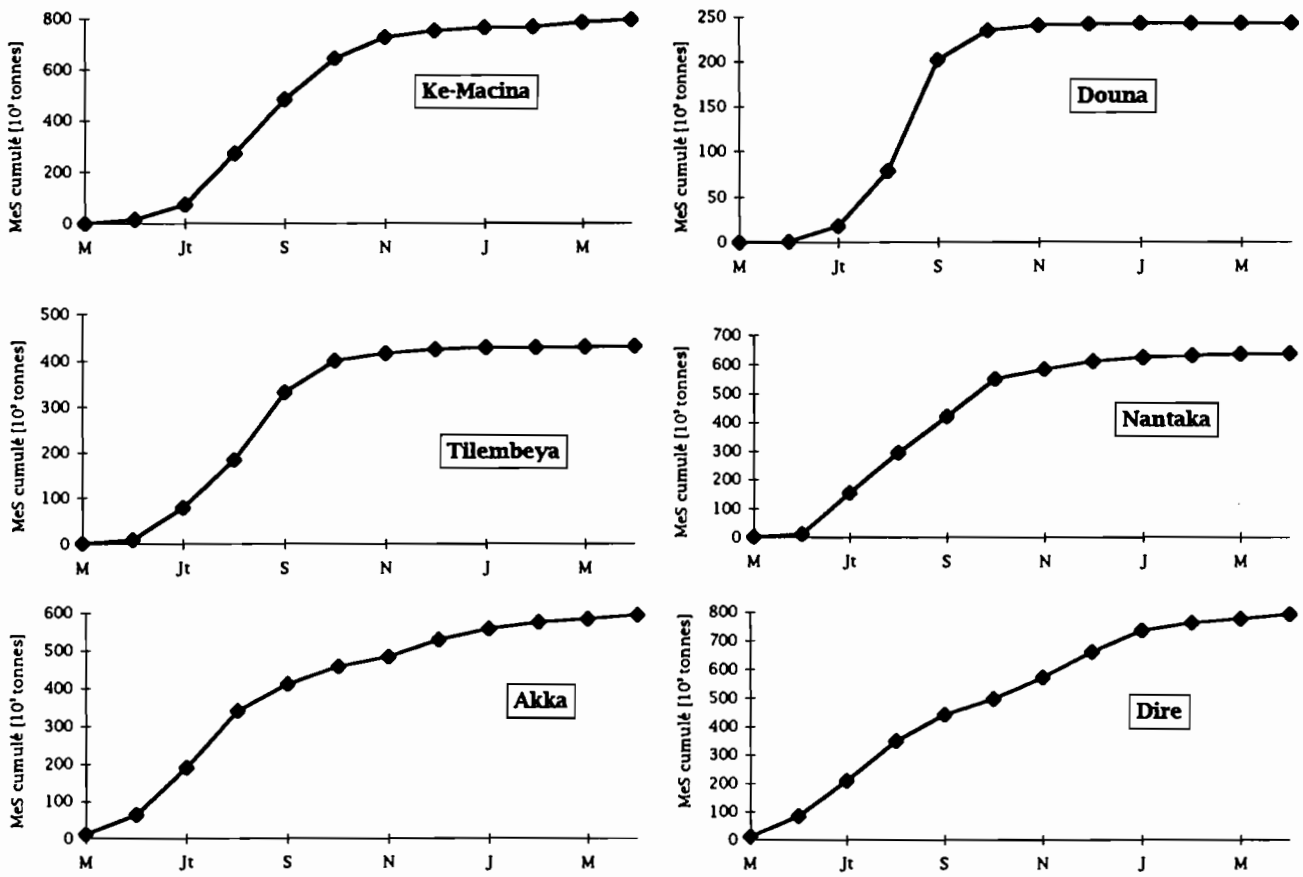


Fig.9.3.2 : Transport mensuel cumulé de matières en suspension en 1992-1993

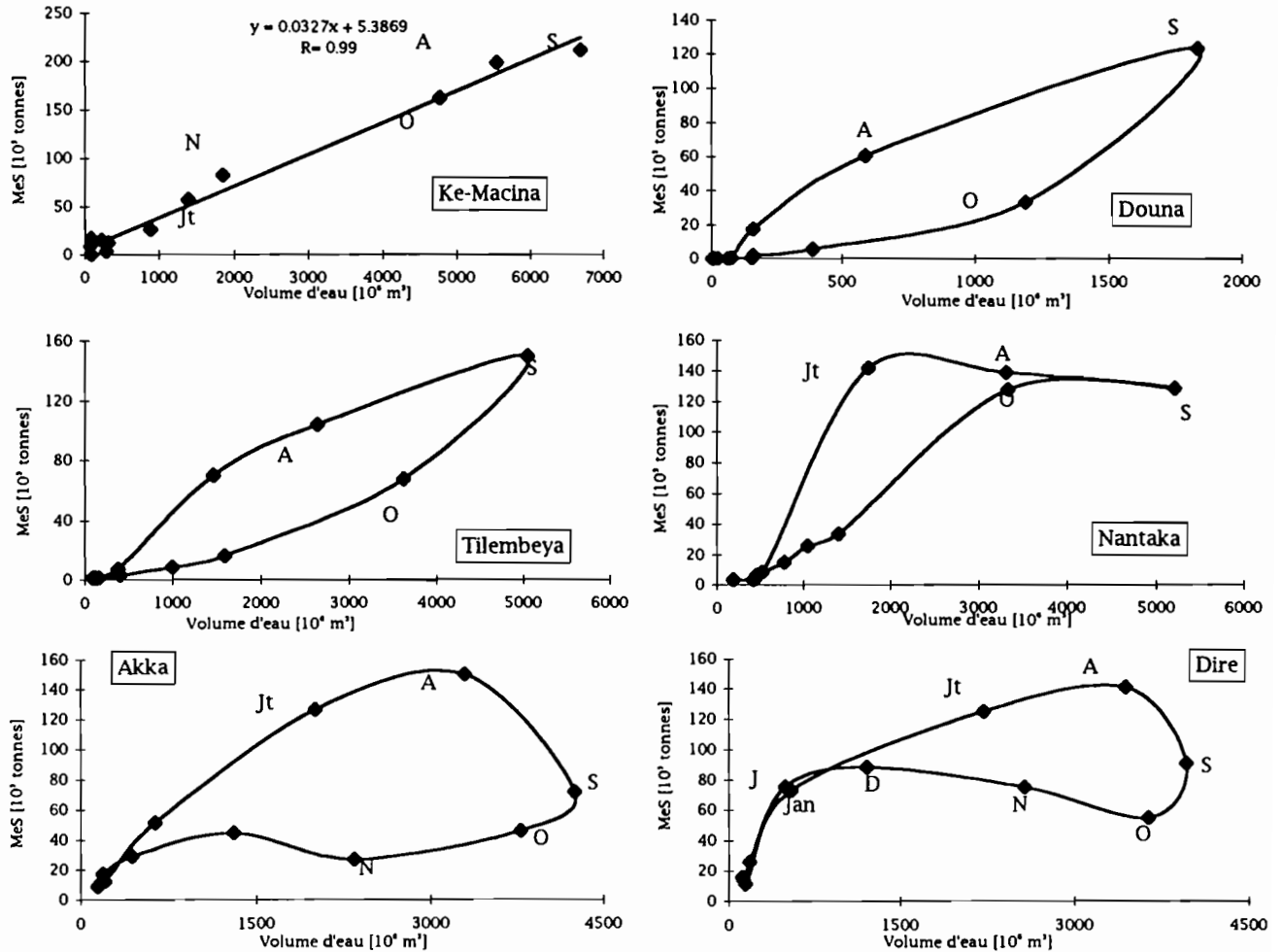


Fig.9.3.3 : Relation entre le flux mensuel de matière et le volume d'eau écoulé en 1992-1993

9.3.2.3 Evolution du transport de matière en fonction des volumes d'eau écoulés

La figure 9.3.3. reprend, sur les mêmes stations que précédemment, l'analyse du transport mensuel (10^3 tonnes) en fonction des volumes d'eau écoulés (10^6 m³).

Pour la station de Ke-Macina, il est intéressant de relever la relation linéaire qui existe entre ces deux paramètres. L'amplitude des variations des concentrations de MeS est suffisamment faible par rapport à celle des débits pour que la relation soit bonne ($R=0,99$). Le transport de matière est lié à l'écoulement et donc directement à l'érosion du bassin versant.

En basses eaux, il n'est pas possible de relier simplement le volume d'eau et les flux de matières en suspension. Le transport a lieu par à-coups successifs. La part relative de matières transportées durant les basses eaux est inférieure à 8 % et l'extrapolation du tonnage exporté en fonction des volumes d'eau est valable. Ce calcul a été fait pour l'année 1991-1992 et donne des valeurs plus faibles pour tous les mois de crue. Le bilan de cette année est très élevé par rapport aux autres années et semble donc erroné. Une très grande variabilité hebdomadaire au début de la crue 1991 est responsable de ces écarts.

A Douna et Tilembeya, l'hystérésis souligne des apports plus importants au début de la crue par rapport à la décrue. Sur ces stations, les variations de concentration des MeS sont relativement plus importantes par rapport aux variations du débit.

A Nantaka, le transport est le même durant quatre mois. En juillet, le maximum précoce peut être dû à la reprise des bancs de sable et dépôts de fond nombreux entre Tilembeya et Mopti.

Les boucles de l'évolution du transport de matière en fonction du volume d'eau écoulé sont semblables à Akka et à Dire. Entre août, septembre et octobre, les volumes d'eau sont maximums mais le transport de matières est de plus en plus faible. Le transport se fait au début de la montée des eaux de mai à août et une reprise s'observe d'octobre à janvier.

9.3.2.4 Bilan mensuel de matières en suspension dans la cuvette lacustre

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la cuvette, nous avons choisi trois régions significatives. La première concerne le Niger en aval de la cuvette. Ke-Macina représente l'entrée et l'ensemble Kara-Tilembeya les sorties à 50 km en aval.

La deuxième région comporte tout le delta amont et le lac Debo. Les entrées sont enregistrées à Ke-Macina et Douna et les sorties à Akka, Awoye et Korientze.

La troisième partie étudiée est en zone sahélienne, entre les sorties du lac Debo et la station de Dire.

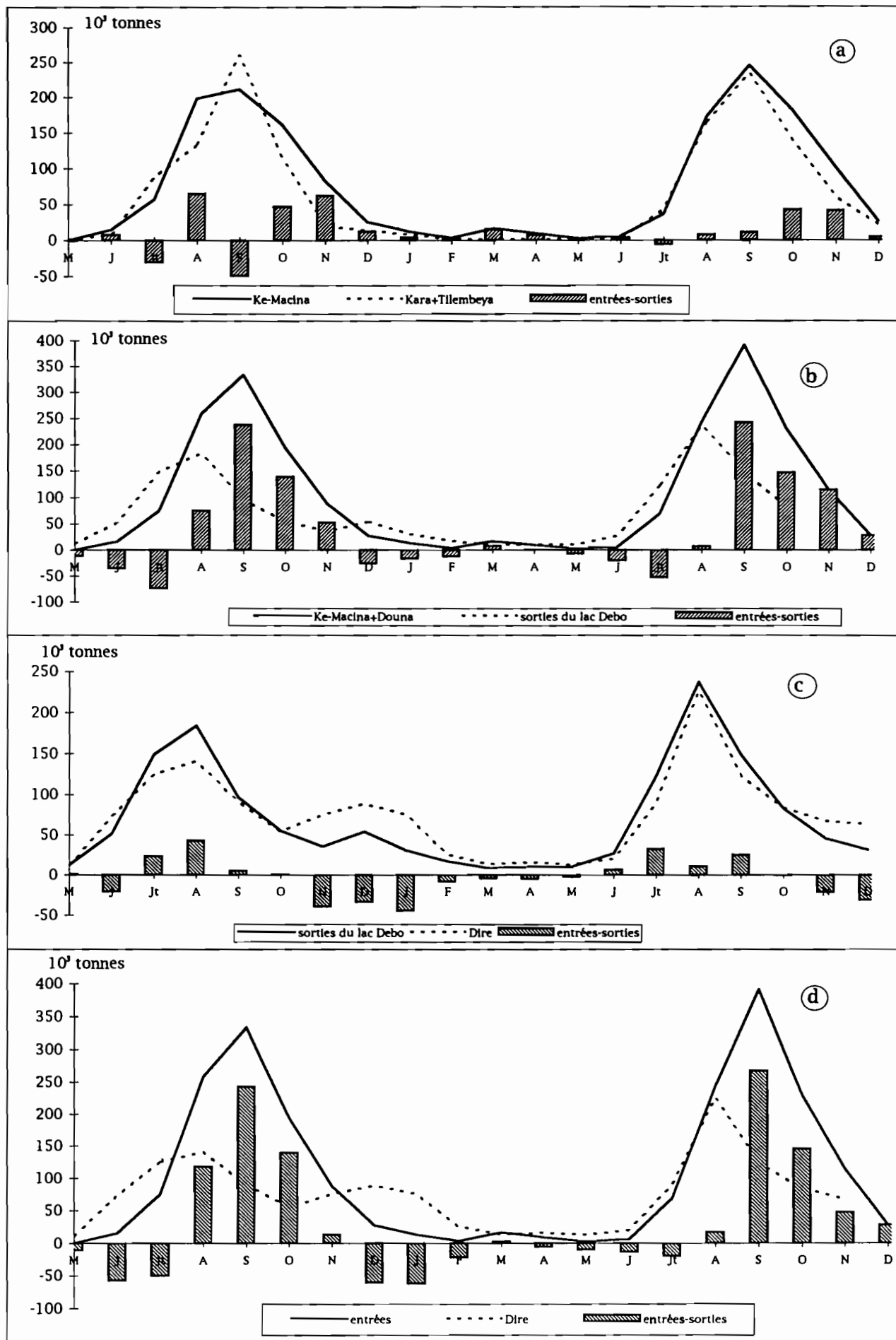


Fig. 9.3.4: Bilan mensuel du transport particulaire sur le delta en 1992-1993 et 1993-1994

*** Le Niger en amont de Mopti**

Bien que située à quelques kilomètres seulement de Ke-Macina, la zone de séparation du Niger et du Diaka montre des particularités déjà soulignées lors de l'étude des transports cumulés de MeS. La figure 9.3.4 (a) montre que les variations mensuelles sur cette portion du fleuve sont au maximum de 60 000 tonnes. Il y a un excès de matière de 31 000 tonnes en juillet 1992. Celui-ci est dû uniquement au transport sur le Niger. Le Diaka ne transporte, en juillet, que 20 % du total mensuel. Cet excès est dû sans doute à une surestimation des concentrations moyennes de la section durant ce mois du début de la crue. La géomorphologie de la zone de séparation des deux défluent entraîne cette particularité. Gallais (1967) a dressé un croquis de cette zone (fig.9.3.5) où l'on constate que le fleuve vient buter sur une langue de sable dressée au devant d'un toggere.

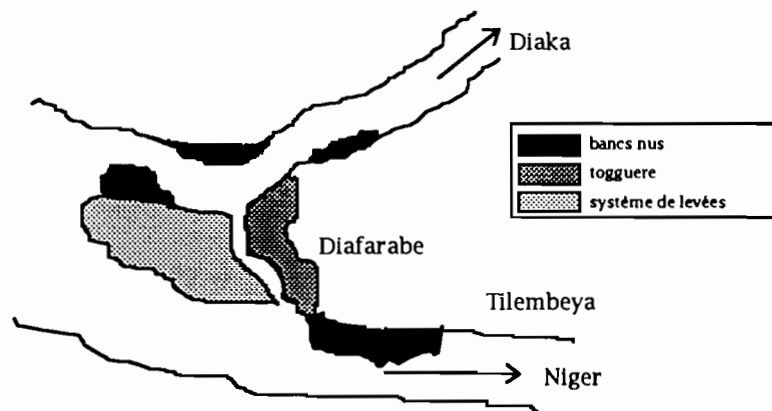


Fig.9.3.5 : Croquis de la séparation du Diaka et du Niger (d'après Gallais, 1967)

Le village de Diakarabe est perché au-dessus des rives escarpées entre le Diaka et le Niger et plusieurs cases s'effondrent chaque année, prouvant ainsi que l'érosion est forte.

Le passage de l'eau sur cette zone entraîne la formation d'un panache de particules qui va se déposer un peu plus loin. En hautes eaux, ces bancs de sables n'apparaissent plus et l'érosion locale est moins forte. Les écarts dus à un prélèvement juste en aval de Diakarabe sont moins importants.

En septembre, c'est le transport sur le Diaka qui est responsable d'un excès de matière de plus de 50 000 tonnes par rapport à Ke-Macina. A cette période, le niveau du fleuve est maximum et l'érosion des bancs nus entraîne une remise en suspension de grandes quantités de matières qui se déposeront ensuite.

Pour les autres mois, ce sont les pertes qui dominent sur cette section du fleuve.

*** *Le delta en amont du lac Debo***

Cette région représente actuellement la majeure partie des surfaces inondées. Son rôle est donc déterminant dans le bilan global.

Durant les mois d'août, septembre, octobre et novembre, les pertes sont proches des 500000 tonnes (fig.9.3.4.b). Durant le mois de septembre, ce sont plus de 237000 et 268000 tonnes de particules qui restent piégées dans la cuvette en 1992 et 1993.

Une restitution est possible durant les mois de basses eaux mais elle est maximum au début de la crue en juin et juillet. A ce moment, l'érosion des berges et fond de lit et les reprises des sédiments fins déposés l'année précédente sur les vastes régions inondées expliquent un excédent de particules en suspension à la sortie du lac Debo.

*** *Le delta en aval du lac Debo***

Les variations dans cette région concernent des quantités de matières inférieures à 45000 tonnes (fig.9.3.4.c.) Les zones inondées du nord du lac Debo ne représenteraient actuellement qu'une faible partie de l'inondation moyenne. Les pertes et les gains de matières semblent s'équilibrer. Il y a dépôt des particules en juillet, août et septembre. A la crue, l'eau envahit les régions inondées et les lacs, y déposant les argiles et silts fins qui constituent la majeure partie du transport particulaire.

L'excès de matière enregistré à Dire à la décrue est dû pour une bonne part à la vidange des plaines inondées. Les « gains » relevés durant toute la période d'étiage ne peuvent s'expliquer par une vidange des zones inondées qui, d'après le modèle hydrologique est nulle dès le mois de mars. Une érosion des berges et fonds du lit est possible mais les faibles vitesses du courant ne permettent pas une érosion importante. Un apport extérieur est alors nécessaire pour expliquer ces variations dans le transport en aval du lac Debo. Les poussières atmosphériques soulevées et transportées par l'Harmattan sont dominantes durant la saison froide au nord du pays. La production biologique (algues, diatomées) joue également un rôle dans cette augmentation du transport en aval du lac Debo.

*** *Bilan général des flux de matières entre Ke-Macina+Douna et Dire***

Le bilan entre Ke-Macina et Dire (fig.9.3.4.d) englobe les variations des zones amont et aval du lac Debo. Les évolutions locales dont celles observées au niveau de la défluence du Diaka ne jouent un rôle que sur quelques kilomètres. Le bilan global n'en tient pas compte.

A Dire, les pertes de matière en suspension durant le mois de septembre sont de 243000 tonnes en 1992 et 268000 tonnes en 1993. Durant huit mois de l'année ce sont les reprises des dépôts et l'apport de lithométéores qui dominent le bilan de matières en suspension dans le delta.

9.3.2.5 Estimation des apports atmosphériques

Les études comparées des transports de matière dans le delta laissent penser qu'un apport extérieur par lithométéores est responsable du deuxième pic de MeS observé en décembre, janvier et février (fig.9.3.4c,d). Ainsi, nous nous sommes intéressés aux aérosols susceptibles de se déposer dans la cuvette.

Nous avons vu que ces poussières atmosphériques proviennent essentiellement des régions sahariennes et de la remise en suspension dans l'air des sables et argiles déposés sur les terres exondées. L'absence d'un couvert végétal rend les particules plus facilement remobilisables (Coude-Gausson et Rognon, 1983). Le principal agent de transport de ces poussières est l'Harmattan, qui souffle surtout de décembre à mai.

Les pièges à poussières placés à Batamani et Youvarou de novembre 1992 à décembre 1993 donnent une indication de l'importance des dépôts particuliers d'origine atmosphérique. Les capteurs ne sont nettoyés qu'une fois par semaine et les variations journalières ne peuvent pas être mises en évidence.

Plusieurs auteurs (Orange et Gac, 1990, Nickling et Gillies, 1993) ont noté la prédominance du transport de poussière durant la saison sèche. Ce phénomène ne s'observe pas ici où les apports de lithométéores sont maximums durant la saison des pluies.

De juin à début septembre, les dépôts moyens hebdomadaires de poussières dans les pièges de Batamani et Youvarou sont respectivement de 8450 mg m^{-2} et 15852 mg m^{-2} . Les coefficients de variations sont très élevés puisqu'ils dépassent 85 %. La valeur maximale (fig.9.3.6) est relevée à Batamani la semaine du 1 au 6 juin 1992 lors de la première pluie de la saison. Cette pluie, comme beaucoup dans ces régions est précédée par un vent violent qui apporte alors des particules autochtones vers le capteur. Pour la station de Youvarou, les plus forts apports ont été notés entre le 17 août et le 6 septembre. Durant la saison des pluies, les masses d'air humide apportées par la mousson entrent en contact avec les particules transportées par le vent. La vapeur d'eau tend alors à se fixer sur les particules hygroscopiques telles que les argiles et à faciliter leur dépôt (Coude-Gausson et Rognon, 1983).

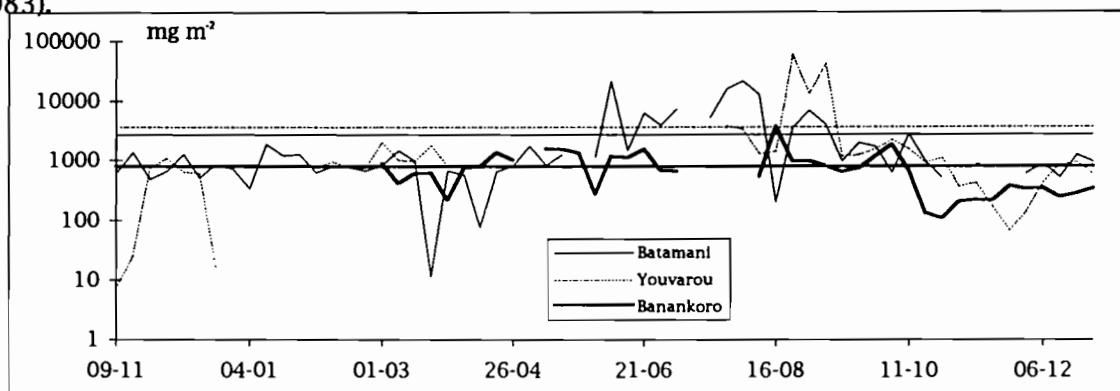


Fig.9.3.6 : Valeurs hebdomadaires des concentrations de poussières et valeur moyenne pour les trois pièges installés au Mali en 1992

A Banankoro, au sud du pays, l'écart moyen entre les relevés de la saison des pluies et de saison sèche est réduit. Le dépôt moyen hebdomadaire de mai à octobre est de 1157 mg m^{-2} . Cette différence laisse penser que le taux de poussière dans l'air est plus important au-dessus des régions sahéliennes. Ce taux est compris entre 0,6 et $10,5 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ d'air sur la côte ouest Africaine (Chester et Johnson, 1971) et atteint temporairement $13735 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ au Mali (Nickling et Gillies, 1993). Ces taux sont maximum durant les épisodes de brume sèche en saison froide mais les particules transportées sont très fines et leur condition de dépôt n'est pas toujours atteinte.

Ces apports sont sans doute plus importants encore entre Youvarou et Dire durant les quelques pluies de la saison. Ceci peut expliquer qu'il y ait équilibre, en septembre et octobre, entre les particules en suspension sur le fleuve sortant du lac Debo et les MeS à Dire. La crue n'a alors pas atteint son maximum et l'inondation des plaines continue, entraînant un dépôt de particules. Ces dépôts seraient compensés par les apports atmosphériques accentués par les précipitations.

On peut considérer le dépôt direct des particules sur les plans d'eau et le dépôt sur les terres exondées. Ces poussières seront facilement remobilisables lors du lessivage des terres par les pluies.

Les dépôts de poussières sont plus faibles durant le reste de l'année. Les moyennes pour les deux stations du delta sont analogues; 1052 mg m^{-2} à Batamani et 978 mg m^{-2} à Youvarou. Ces valeurs de concentrations sont deux fois moins grandes à Banankoro (470 mg m^{-2}). Ceci confirme l'importance des régions nord dans l'apport de poussières lithométéoriques. Les variations de concentrations observées d'une semaine à l'autre ne sont pas synchrones à Batamani et Youvarou. Les conditions locales climatologiques (vents, pluies) influencent les apports lithométéoriques.

Il est intéressant de noter la similitude des valeurs avec celles obtenues au Sénégal avec la même méthode (Orange et Gac, 1990). Les concentrations moyennes journalières en 1986 à Dakar étaient de $0,54 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Pour l'année 1992, à Batamani et Youvarou, les valeurs moyennes journalières s'élèvent à 0,38 et $0,53 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Les concentrations moyennes à Banankoro sont de $0,11 \text{ g m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. La proximité de forêts permet de retenir une grande partie des poussières atmosphériques.

Dans la cuvette lacustre, on ne note pas de différences significatives de concentrations moyennes au début de la saison froide. On ne peut donc pas démontrer que le pic de matières en suspension sur le fleuve en décembre, janvier et février soit dû à un apport direct de poussières atmosphériques comme l'ont montré diverses études (Martins, 1988, Gallaire, 1994, Olivry et al, 1994c).

Mais, le fait que de grandes quantités de matières facilement mobilisables se soient déposées sur les plaines inondées durant la saison des pluies explique que, lors de la vidange de ces zones (de décembre à mars), les concentrations de matière en suspension soient très fortes. Pour la région de l'Erg de Niafunke, en considérant que la station de

Youvarou soit représentative des apports atmosphériques moyens de cette zone, les apports atmosphériques représentent, en quatre mois, 135 g m². Pour une superficie moyenne touchée par l'inondation de 3000 km², ce sont 405000 tonnes qui sont ainsi mis à la disposition du transport direct du fleuve.

Parmi ces apports lithométéoriques recueillis dans les capteurs, une partie vient de la région proche et ne doit pas être considérée comme un apport extérieur nouveau. Une petite partie seulement des poussières déposées restera piégée dans les plaines inondées. Malgré cela, les poussières atmosphériques expliquent à elles seules le gain enregistré entre les sorties du lac Debo et la station de Dire et on peut considérer que cette région nord du delta joue également le rôle de piège de matières en suspension.

9.4 BILAN ANNUEL DU TRANSPORT DE MES

Le bilan à l'échelle mensuelle a montré la tendance générale de l'évolution du transport des matières particulaires. Le bilan annuel nous permettra de comparer deux années complètes d'étude et de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la cuvette lacustre. Nous avons souligné les problèmes d'hétérogénéités locales au niveau de la défluence du Diaka. Le bilan de matière dissoute montrera le mauvais mélange des eaux du Niger et du Bani au niveau de Nantaka. Pour ces raisons, il n'est pas possible de dresser un bilan annuel des matières particulaires transportées pour la partie amont du lac Debo.

La figure 9.4.1 dresse la carte synoptique du delta avec, à chaque station de mesure le bilan annuel de matières en suspension (10³ tonnes). Le comportement est assez différent d'une année sur l'autre selon la station considérée. Les changements les plus forts s'observent sur les stations amont alors que les stations en aval du lac Debo sont plus stables d'une année sur l'autre.

Pour les deux années complètes d'étude, les bilans annuels ont été faits pour les stations à l'entrée du delta (Ke-Macina et Douna), les stations à la sortie du lac Debo (Akka, Awoye et Korientze) et la station de Dire (tableau 9.4.1. et fig.9.4.2).

	année 1992-1993				année 1993-1994		
	volume d'eau 10 ⁹ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration g m ⁻³		volume d'eau 10 ⁹ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration g m ⁻³
entrées	24.3	1035	42.7	entrées	23.3	1130	48.5
sorties Debo	21.1	703	33.3	sorties Debo	20.7	735	35.5
Dire	18.2	790	43.4	Dire	17.4	777	43.4
<i>pertes amont</i>	3.2	332		<i>pertes amont</i>	2.6	395	
<i>pertes aval</i>	2.9	-87		<i>pertes aval</i>	3.3	-42	

Tableau 9.4.1 : Bilan annuel du transport de MeS et concentrations moyennes calculées à partir du bilan pour les années hydrologiques 1992-1993 et 1993-1994

BILAN DES MATIERES en SUSPENSION
 année 1992-1993 et 1993-1994

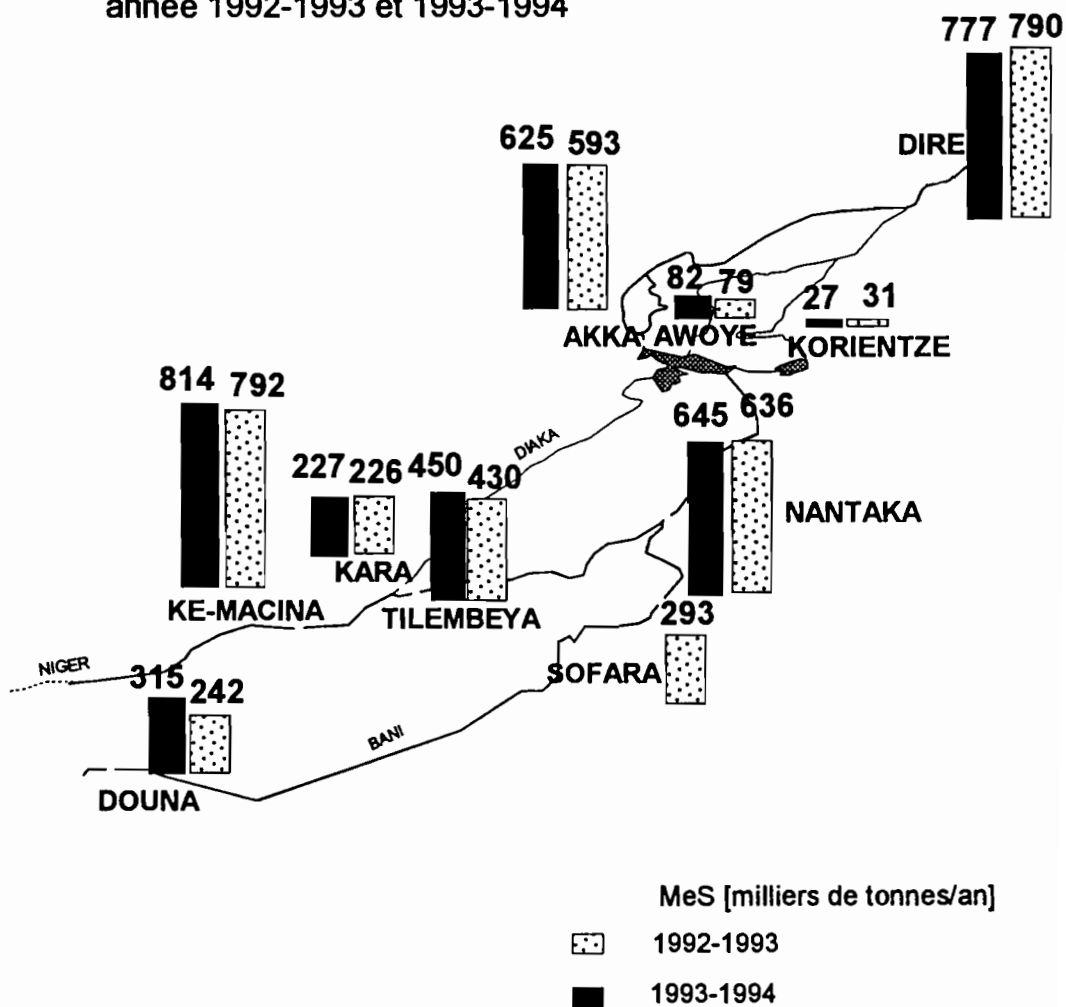


Fig.9.4.1 : Bilan annuel du transport de matières en suspension sur le delta en 1992-1993

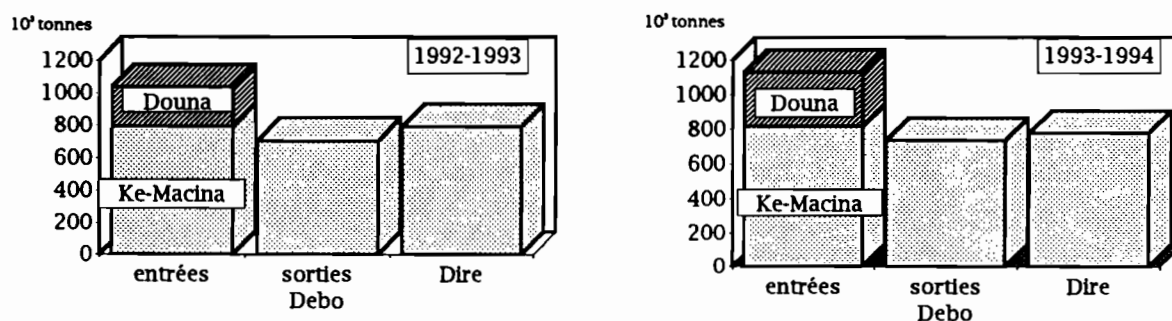


Fig.9.4.2 : Bilan annuel du transport de MeS

Pour l'année 1992-1993, les dépôts des matières en suspension dans le delta vif s'élèvent à 331000 tonnes. Les concentrations moyennes des stations de Akka, Awoye et Korientze sont inférieures aux concentrations à Ke-Macina et Douna. Le piégeage des particules suit les pertes par évaporation (Olivry et al, 1994c). La végétation dense des marais, bourgoutières doit permettre une filtration des argiles fines en favorisant leur piégeage (Gallais, 1967).

Sur le delta aval, on note une reprise entre Akka et Dire de 87000 tonnes de matières. Ces particules sont essentiellement arrachées aux berges. Le bilan des matières dissoutes montre qu'il y a précipitation possible de minéraux dérivés de la silice amorphe par suite de la concentration par évaporation au travers du delta. Cette sursaturation des eaux est maximale après le lac Debo et des particules minérales néoformées peuvent s'ajouter aux transports particuliers. Des blooms de diatomées peuvent être favorisés par la disponibilité de la silice et l'absence d'un pic de MeS à la crue.

Un enrichissement en matières organiques particulières est possible, mais il serait essentiellement dû aux zones inondées du delta amont et devrait être pris en compte sur les sorties du lac Debo.

Les lithométéores représentent, sur les 8000 km² du delta aval, un dépôt maximum possible de 1 million de tonnes. Une partie de ces particules est reprise par les vents, une autre reste piégée dans la cuvette et la troisième est transportée par le fleuve. Ces valeurs expliquent facilement l'augmentation des concentrations moyennes annuelles relevée à Dire.

En 1991, l'érosion spécifique à Banankoro est de 10,4 t km⁻² an⁻¹, elle est de 8,0 t km⁻² an⁻¹ (Olivry et al, 1994c). Avec un transport de 792000 tonnes pour une superficie du bassin versant de 147000 km², le bilan annuel spécifique du transport de matières en suspension à Ke-Macina est de 5,4 t km⁻² an⁻¹. Le gain de superficie du bassin versant à Ke-Macina concerne des régions à très faible écoulement. L'érosion n'est pas productive dans ces plaines, d'où la baisse du transport spécifique.

Pour le Bani à Douna, le transport spécifique annuel est de 1,9 t km⁻² an⁻¹. Ceci s'explique par une faible hydraulicité du Bani.

Ces valeurs sont très inférieures à celles obtenues sur d'autres fleuves africains comme le Logone à Fort-Foureau, 14,9 t km⁻² an⁻¹ (Carre, 1972), Logone+Chari à l'entrée du lac Tchad,

10,5 t km² an⁻¹ (Chouret, 1977, Gac, 1980), le Sénégal, 8,7 t km² an⁻¹ (Gac et Kane, 1986a, Kattan et al, 1987), le Congo 8,8 t km² an⁻¹ (Olivry et al, 1988, Laraque et al, 1994).

Malgré l'incertitude sur l'évaluation de la superficie du bassin versant en aval du lac Debo, le transport spécifique annuel calculé à Akka et à Dire est de 1,93 t km² an⁻¹ et 2,16 t km² an⁻¹.

9.5 ESTIMATION DE L'ÉROSION ANNUELLE

9.5.1 MESURES SUR LE NIGER A BANANKORO

Le Niger à Banankoro n'est pas soumis à l'influence des apports par le barrage de Selingue. L'étude des isotopes de l'eau à l'échelle décadaire met en évidence la période où les eaux proviennent exclusivement des nappes souterraines du bassin versant. L'étude du tarissement aurait mené aux mêmes résultats. Si l'on place les concentrations de matières en suspension sur ce même graphique (fig.9.5.1), on peut constater pendant les mois de janvier à avril que l'écoulement de base est généré par l'eau des nappes et les matières en suspension sont dues à l'érosion des berges et du lit du fleuve (cf chapitre 8.1.2).

Le bilan du transport de matières en suspension a été calculé pour les mois de avril 1992 à mars 1993 (tableau 9.5.1). La figure 9.5.2a et b représente les relations entre le volume d'eau mensuel (10⁶ m³) et les transports de MeS (10³ tonnes) en hautes eaux et pour les eaux de la nappe.

La relation calculée pour les hautes eaux est :

$$T = 0,0024 * V^{1,2616} \quad (R:0,96)$$

Pour les mois de janvier à avril, la relation obtenue est :

$$T = 0,0094 * V \quad (R:0,97)$$

ou V : volume d'eau mensuel (10⁶ m³)

T : transport de MeS mensuel (10³ tonnes)

Les apports dus à l'érosion des berges et du lit sont considérés ici comme étant en proportion constante au cours du cycle hydrologique. Ceci est une hypothèse nécessaire au calcul de l'érosion. Si l'arrivée de l'onde de crue permet l'augmentation des reprises de berge, fond de lit et mares, en revanche, en hautes eaux et surtout en décrue, ce type d'érosion est beaucoup moins important.

On peut considérer également que les eaux des nappes sont responsables de l'écoulement de janvier à avril chaque année.

Pour chaque mois, on peut ainsi faire le calcul du transport par érosion du bassin versant et par érosion du lit, berges. Le calcul pour l'année 92-93 a été résumé sur le tableau.

Le total transporté calculé par l'addition des deux types d'érosion est de 486300 tonnes. Ce flux est très proche du total calculé par intégration qui s'élève à 487500 tonnes.

Le transport annuel par érosion des berges et du lit du fleuve est de 157500 tonnes, soit 32% du total transporté.

mois	apport bassin 10 ³ tonnes	apport berges 10 ³ tonnes	mois	apport bassin 10 ³ tonnes	apport berges 10 ³ tonnes
avril	0	0,12	octobre	76,1	34,7
mai	0,1	0,18	novembre	24,6	14,2
juin	2,9	2,6	décembre	6,9	5,1
juillet	23,5	13,7	janvier	0	2,0
août	68,5	31,8	février	0	0,68
septembre	126,2	51,9	mars	0	0,45

Tableau 9.5.1 : Estimation des apports de MeS provenant du bassin versant et du lit du fleuve Niger à Banankoro en 1992-1993

Cette contribution relative au transport total est forte en comparaison des estimations faites sur le fleuve Sénégal par Kattan et al (1987) qui sont de 13 à 22 %. Il convient de rester prudent quant à ces résultats. En effet, le poids des mois où l'érosion des berges est connue (janvier à avril) est faible devant les mois extrapolés.

La section de mesure choisie à proximité du village de Banankoro est très large et plane. En basses eaux, l'écoulement se fait sur plusieurs chenaux qui serpentent entre de nombreux bancs de sable. Cette morphologie favorise les reprises ponctuelles de sédiments et amène sans doute à une surestimation en hautes eaux des apports par érosion du lit.

Pour la saison 1992-1993, l'érosion du bassin versant a apporté au fleuve quelques 328800 tonnes de matière. L'érosion spécifique est donc de 4,58 t km² an⁻¹.

Le terme érosion utilisé ici est relatif car il ne faut pas oublier que les dépôts des berges et lits proviennent également d'une érosion plus ancienne du bassin versant.

9.5.2 MESURES SUR LE BANI A DOUNA

Comme pour le Niger, c'est l'étude des isotopes de l'eau qui a permis de définir la période pour laquelle l'écoulement est dû à l'eau des nappes souterraines et les MeS à l'érosion des berges. Ainsi de décembre 1990 à avril 1991, l'érosion des berges et du lit du Bani apporte très peu de matières en suspension (fig.9.5.3). Les bilans mensuels ont été calculés pour la période de avril 1992 à mars 1993. Les mois sans écoulement n'ont pas été retenus pour l'élaboration des graphiques (fig. 9.5.4 a et b).

Sur l'ensemble des mois de crue, la relation entre les volumes d'eau écoulés et le transport des matières en suspension est :

$$T = 0,0196 * V^{1,126} \quad R:0,87$$

Pour les mois de décembre à avril uniquement, cette relation est de la forme :

$$T = 0,0081 * V \quad R:0,97$$

ou V : volume d'eau mensuel (10⁶ m³)

T : transport de MeS mensuel (10³ tonnes)

Le calcul du transport mensuel par érosion du bassin versant et par érosion du lit a été fait pour l'année 1992-1993 (tableau 9.5.2). Pour les mois de décembre à avril, les apports du bassin ont été, par hypothèse de départ, considérés comme négligeables bien que l'équation mathématique ne les donne pas nulles.

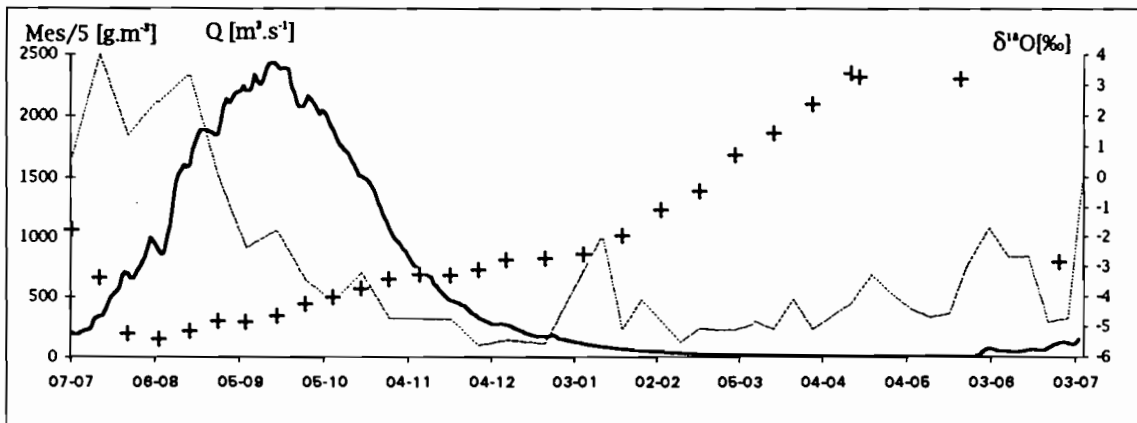


Fig.9.5.1 : Evolution de l'O-18 et MeS à Banankoro au cours de la crue 1990-1991

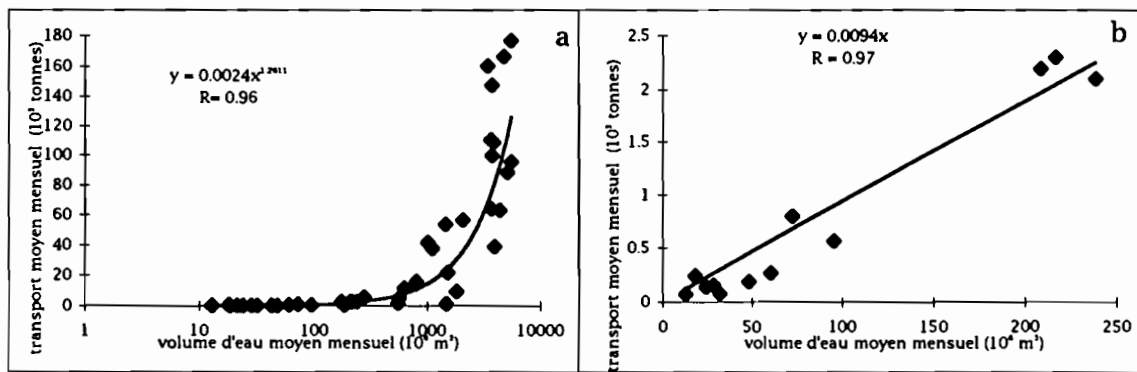


Fig.9.5.2: Relation entre les volumes d'eau et le transport mensuel de MeS durant les hautes eaux (a) et les basses eaux (b) à Banankoro

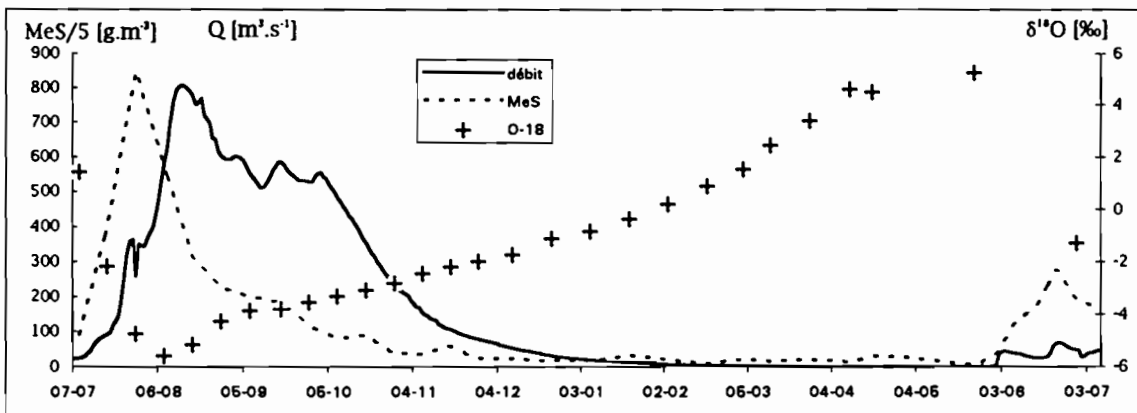


Fig.9.5.3 : Evolution de l'O-18 et des MeS à Douna au cours de la crue 1990-1991

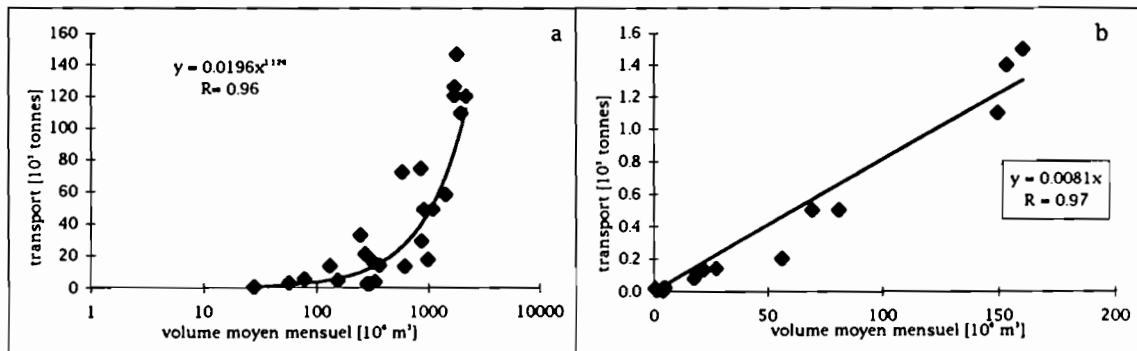


Fig.9.5.4: Relation entre les volumes d'eau et le transport mensuel de MeS durant les hautes eaux (a) et les basses eaux (b) à Douna

mois	apport bassin 10 ³ tonnes	apport berges 10 ³ tonnes	mois	apport bassin 10 ³ tonnes	apport berges 10 ³ tonnes
avril	0	0	octobre	57,0	9,7
mai	0	0	novembre	16,5	3,2
juin	2,8	0,7	décembre	0	1,3
juillet	6,0	1,3	janvier	0	0,6
août	25,7	4,8	février	0	0,2
septembre	92,3	14,8	mars	0	0

Tableau 9.5.2 : Estimation des apports du bassin versant et du lit du fleuve Bani à Douna en 1992-1993

Le transport total annuel est de 236910 tonnes alors qu'il s'élève à 242300 tonnes avec la méthode de l'intégrale. Cet écart de 2 % permet de valider l'équation obtenue en hautes eaux et dont le coefficient de corrélation était inférieur à 0,9.

L'érosion du lit du fleuve représente seulement 36610 tonnes soit 15,5 % du transport total annuel. Ceci correspond aux estimations faites sur le fleuve Sénégal. Les très basses concentrations en MeS mesurées durant l'étiage mettent en évidence la faiblesse du transport durant cette période durant laquelle l'eau provient des nappes.

L'érosion spécifique du bassin versant de la rivière Bani est de 1,96 t km² an⁻¹. Cette valeur extrêmement faible ne peut s'expliquer que par la qualité des roches et l'abondance de la végétation en amont de cette station.

9.6 CONCLUSION

L'étude des variations annuelles de concentration de matières en suspension fait apparaître un comportement différent entre les stations en amont et en aval du lac Debo. Pour les stations amont, un pic de MeS se produit légèrement avant le maximum de la crue. Ces matières transportées proviennent directement de l'érosion du bassin versant. Les remises en suspension des sédiments des berges et fond de lit des rivières sur la partie amont de la cuvette lacustre sont localement très fortes et entraînent un excès de matières en suspension au début de la crue en juillet.

En basses eaux, le transport est négligeable. Seules les matières reprises du fond du lit et des berges sont mises en suspension.

En aval du lac Debo, le maximum de concentration de MeS se produit dès le début de la crue. Les concentrations à l'étiage sont soutenues avec un apport non négligeable durant les mois de novembre, décembre et janvier. Ce sont alors les poussières atmosphériques apportées par l'Harmattan qui soutiennent le transport et l'érosion des berges par l'effet des vagues créées par le vent.

Sur la partie amont du delta, ce sont plus de 300000 tonnes de matières qui sont piégées dans la cuvette. Un transport spécifique annuel faible permet de limiter le comblement de la cuvette. A la décrue, une partie des particules déposées sur les terres exondées est soulevée par les vents forts et réguliers, ce qui limite également d'importants dépôts. Les comblements se font sans doute en majorité sur les zones périphériques et favorisent la diminution des surfaces inondées et l'uniformisation de la topographie. Durant ces trois années de sécheresse, il apparaît que les entrées de matières ont été largement plus importantes que les sorties. Des années plus favorables permettraient une substantielle reprise des dépôts anciens. Les transformations dynamiques de la région sont actives avec des déplacements de bancs de sables, comblement d'entrées de mayos, surcreusement de berges...

Dans les régions nord, il semble qu'un équilibre soit atteint entre les apports par le fleuve, les apports de poussières atmosphériques et les exportations fluviales. L'évolution spatio-temporelle est moins conséquente.

Le transport et l'érosion spécifique du Niger au niveau de la cuvette lacustre sont très faibles par rapport aux autres fleuves de l'Afrique de l'Ouest et l'impact de ce fleuve sur le bilan mondial des apports à l'océan est limité. L'importance des matières en suspension est surtout régionale.

10. LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES

INTRODUCTION

On considère comme éléments dissous les ions et anions obtenues après filtration à 0,22 μm . Seuls les éléments majeurs comme les cations calcium, magnésium, sodium, potassium et les anions bicarbonate, chlorure, nitrate, sulfate et phosphate ont été pris en considération, ainsi que la silice. La présence significative de phosphate n'a été décelé dans aucun des échantillons.

La variation de composition chimique des eaux est contrôlée par des facteurs lithologiques, tectoniques, géomorphologiques ou climatiques. Les éléments dissous dans le fleuve Niger dépendent essentiellement des apports issus du lessivage des roches du bassin versant (hydrolyse), des apports atmosphériques, des végétaux, de la dissolution du CO_2 de l'atmosphère dans la zone non saturée (Fontes et al, 1991) et de la dissolution d'une partie des MeS et poussières atmosphériques. Au contraire, une diminution du transport peut être due à la néoformation de minéraux, à la consommation de la végétation (végétaux supérieurs, algues) et des coquillages (formation des test), à l'infiltration possible vers la nappe superficielles.

La première partie traite de la composition chimique des apports atmosphériques à Bamako. Les observations faites pourront être étendues à l'ensemble du bassin grâce à l'analyse chimique de pluies recueillies lors des tournées entre Mopti et Dire.

La deuxième partie de l'étude porte sur la qualité chimique moyenne des eaux du Niger et du Bani et de l'équilibre chimique de ces eaux.

L'évolution annuelle et spatiale des concentrations fait l'objet de deux autres chapitres. Les relevés hebdomadaires sont complétés par les prélèvements ponctuels fait lors des campagnes. Des études statistiques classiques d'ACP centrée réduite ont été utilisées pour aider à l'interprétation des données.

Le bilan mensuel de l'ensemble des éléments dissous est traité de façon détaillée pour les stations amont, les stations intermédiaires de Kara, Tilembeya et Nantaka et les stations aval des sorties du lac Debo jusqu'à la station de Dire (fig.10.3.9).

Au vu de ces premiers résultats, le bilan du transport de cations et du bicarbonate sera traité pour les entrées au delta et les stations aval. Ce bilan est comparé avec le total des éléments transportés par les pluies sur l'ensemble de la saison 1992-1993.

Le bilan annuel permet d'évaluer l'importance de l'érosion chimique, des précipitations et des dépôts dans le delta central du fleuve Niger.

L'évaluation du fonctionnement hydrobiogéochimique des éléments dissous majeurs et de la silice complète ce chapitre.

10.1 HYDROCHIMIE DES EAUX DE PLUIE A BAMAKO

Les précipitations atmosphériques ont des compositions chimiques variables car elles sont soumises à l'influence de diverses sources : les aérosols océaniques, les poussières continentales, la végétation et les apports anthropiques (Stallard et Edmond, 1981, Meybeck, 1984). On peut estimer que les perturbations anthropiques sont négligeables pour les pluies de Bamako vu la faiblesse de l'activité industrielle en Afrique occidentale.

Les précipitations ont été recueillies durant l'année 1993 à Bamako et les résultats pourront être extrapolés pour les régions deltaïques grâce à l'appui de quelques mesures faites au cours de la campagne de novembre 1992 dans le delta.

10.1.1 COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES EAUX DE PLUIES

L'eau de pluie est relevée dans le pluviomètre le plus rapidement possible après l'événement pluvieux. L'eau est ensuite filtrée à 0,22 μm . Ces précautions sont nécessaires car la concentration moyenne des eaux de pluie est faible et les eaux mal tamponnées. La composition moyenne des eaux de pluie de l'année 1993 est donnée dans le tableau 10.1.1.

Variable	Moyenne	Ecart-type	CV	minimum	maximum
Cond. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	28.3	23.4	83.0	2,6	105,5
H ⁺	$8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	377	$2 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-8}$
Ca ²⁺	1.6	1.6	103.4	0,1	6,6
Mg ²⁺	0.3	0.3	102.0	0,02	1,2
K ⁺	1.4	1.6	117.6	ND	7,0
Na ⁺	0.5	1.1	234.5	ND	6,4
HCO ₃ ⁻	4.5	6.0	131.9	ND	25,6
Cl ⁻	1.4	1.5	107.0	ND	6,6
NO ₃ ⁻	1.7	3.3	190.8	ND	21,1
SO ₄ ²⁻	1.0	1.5	143.6	ND	6,9
H ₄ SiO ₄	0.8	1.8	238.9	ND	8,6

Tableau 10.1.1 : Composition chimique moyenne (en mg l⁻¹) des eaux de pluie de Bamako en 1993

Etant donné les faibles concentrations, certaines balances ioniques dépassent 10 %. La plupart sont négatives. L'absence de dosage de l'ion ammonium peut expliquer une partie de ce déséquilibre ionique, mais la limite de détection des appareils de mesure et de possibles transformations entre la filtration et l'analyse sont également en cause. Ainsi les coefficients de variation sur l'année sont supérieurs à 80 % sauf pour le pH.

De fortes valeurs de pH et potassium sont considérées comme de bons indicateurs de contamination secondaire (Seyler et al, 1993). Les analyses chimiques présentant des maximums de K⁺ et Cl⁻ non corrélés aux pics de TDS n'ont pas été retenues (soit 4 analyses).

La minéralisation moyenne annuelle (ensemble des majeurs + silice) est de $18,7 \text{ mg l}^{-1}$, ce qui est bien inférieur aux eaux du fleuve. Toutefois, les concentrations moyennes des chlorures, nitrates et sulfates dans les eaux de pluies sont supérieures à celles des eaux de rivières.

La concentration moyenne pondérée en TDS est de $7,3 \text{ mg l}^{-1}$, ce qui est faible par rapport à celle des eaux de pluies du Sénégal de 16 mg l^{-1} (Travi et al, 1987, Orange, 1992) ou de la moyenne des pluies tropicales (Lacaux et al, 1992) et très inférieur à la moyenne des eaux de pluie du nord du Negev (Israël) qui est de 61 mg l^{-1} (Yair et al, 1991).

Les eaux recueillies à Bamako sont de minéralisation proche de la moyenne mondiale des eaux de pluies des régions continentales qui est estimée à $3,6 \text{ mg l}^{-1}$ sans les teneurs en bicarbonates (Meybeck, 1983).

Le coefficient de corrélation entre la somme des cations et des anions et la conductivité est de 0,93 (fig.10.1.1).

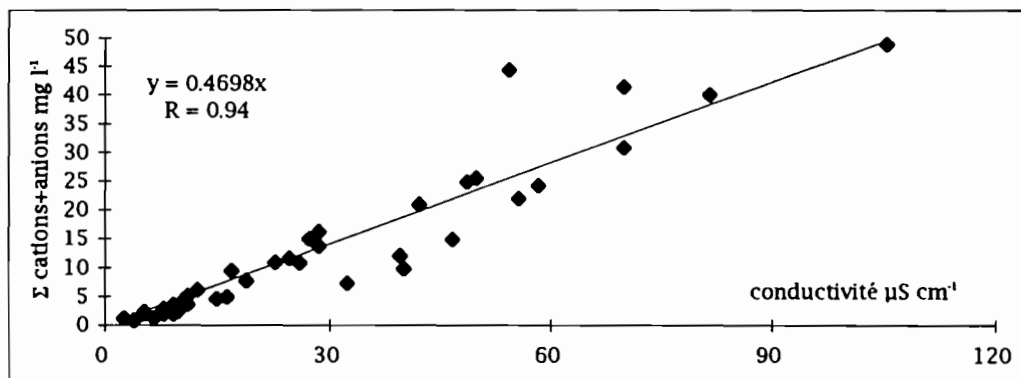


Fig.10.1.1 : Relation conductivité/TDS pour les eaux de Bamako

Le pH des eaux varie de 4,7 (octobre) à 7,3 (mai). Les valeurs les plus basiques ont toutes été enregistrées au début de la saison des pluies. Ces eaux de tendance alcaline ont des pH proches de la moyenne de 6,4 relevée au Cameroun sur le bassin versant de Ngoko (Sigha-Nkamdjou, 1993), ou 6,5 relevée au Sénégal à Kédougou (Orange, 1992) et compatible avec la fourchette 5,37 - 6,89 donnée par Lacaux et al (1992) pour l'ensemble des précipitations équatoriales. Les eaux de pluie restent, en général, mal tamponnées et évoluent rapidement au moindre contact (Mathieu et Monnet, 1971).

Les précipitations de Bamako ne sont pas considérées comme des pluies acides selon la classification de Galloway et al (1975) qui se base sur le pH d'une eau pure dans laquelle l'équilibre avec le CO_2 est atteint et qui est de 5,6.

L'acidité est due principalement à des dégagements de H_2SO_4 , HNO_3 et d'acides organiques (Galloway et al, 1987). Les pluies de Bamako sont riches en nitrates et sulfates mais la pCO_2 atmosphérique permet de tamponner les eaux qui sont ainsi moins acides. Un pH de 6,1, proche du pH naturel des eaux de pluie indique l'absence de pollution de l'air.

Il est difficile de discuter des éléments individuellement car les concentrations moyennes sont proches de l'erreur de mesure. Au milieu de la saison des pluies, la plupart des concentrations en sodium et chlorures sont inférieures à la limite de détection.

Le calcium et le bicarbonate sont les principaux éléments dissous dans les eaux de pluies. Pour des pH inférieurs à 6, le carbone inorganique se trouve sous forme de H_2CO_3 et HCO_3^- principalement. Le bicarbonate provient surtout du CO_2 atmosphérique mais de la dissolution des poussières atmosphériques. Les eaux de pluie de Bamako sont moins riches en bicarbonates que les eaux du Sénégal dont cet anion représentent 46 % de la minéralisation (Orange, 1992). Le calcium est essentiellement d'origine continentale.

Les chlorures sont relativement importants en début et en fin de saison des pluies. Ce résultat est étonnant car cet élément est en règle générale exclusivement d'origine océanique. Stallard et Edmond (1981), Meybeck (1983), montrent que les concentrations en chlorures diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte jusqu'à devenir négligeables à plus de 2000 km à l'intérieur des terres. Il est possible toutefois que les poussières atmosphériques venant du nord du Sahara transportent une quantité non négligeable de chlorures provenant de l'érosion des grands bassins salins (Drees et al, 1993). Les chlorures peuvent également provenir du dégagement de CH_3Cl du fait des feux de biomasse (Yoboue, 1991).

Na^+ et Mg^{2+} sont les cations les moins abondants dans les eaux de pluies. Leur origine est océanique mais la végétation joue un rôle non négligeable sur le magnésium et il existe quelques rares sources de sodium d'origine continentale (Meybeck, 1983).

La silice provient de sources continentales (poussières atmosphériques) et est peu abondante.

Le sulfate est également important par rapport aux autres éléments dissous. Les feux de brousse (ou d'hydrocarbures) peuvent être une source de sulfate par décomposition bactérienne de la matière organique (Galloway et al, 1982, Yoboue, 1991) comme les poussières continentales venant des zones évaporitiques et arides. Le sulfate peut provenir des bassins nord riches en gypse (Coude-Gaussen, 1983).

Le nitrate est l'élément chimique le plus abondant après le bicarbonate. Ce composé chimique a une origine bactérienne ou de feux de brousses qui dégagent NH_3 , NO , NO_2 (Yoboue, 1991). Son abondance, ainsi que celle du chlore et du sulfate laisse penser que les feux de brousses agissent sur le cachet chimique des eaux de pluies à Bamako (Galloway et al, 1982, Lacaux et al, 1992).

10.1.2 EVOLUTION ANNUELLE DE LA COMPOSITION MOYENNE DES EAUX DE PLUIES

Durant l'année, les concentrations moyennes sont liées selon une fonction logarithmique inverse à la hauteur des précipitations (fig.10.1.2).

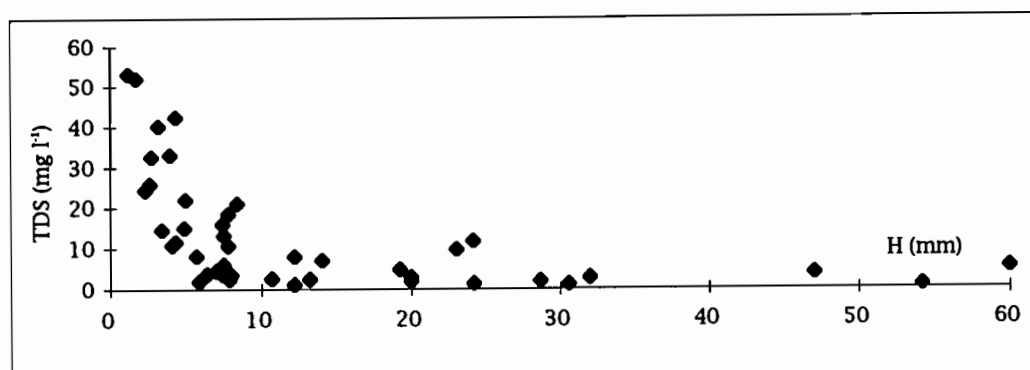


Fig.10.1.2: Relation hauteur des précipitations/total dissous

Lors des très faibles précipitations, les concentrations relevées sont fortes (fig.10.1.3a). La colonne d'air n'étant pas saturée, une reprise et un enrichissement par évaporation sont possibles. Ce phénomène se retrouve également dans l'analyse des isotopes et a été souligné au chapitre 8.1.2.2. L'importance de l'évaporation est d'autant plus forte que les pluies sont espacées dans le temps.

En début et en fin de saison, les concentrations sont élevées car l'air n'est pas saturé en humidité. L'humidité relative de l'air est de 32 % en avril. Elle passe à 53 % en mai après les premières pluies puis reste à 80 % environ durant les mois de juin à septembre. Les reprises évaporatoires sont alors moins fortes. De plus, le lessivage des aérosols et des particules dans l'air (rain-out et wash-out) entraîne une augmentation en éléments dissous. Il y a donc deux sources d'enrichissement chimique des eaux de pluies, le lessivage des particules et sels et l'évaporation.

Au coeur de la saison des pluies, on note deux pics le 22/7 et le 12/10. Ces pluies correspondent à des hauteurs inférieures à 3,2 mm. En octobre, la pluie survient après 15 jours secs. L'humidité relative de l'air est alors plus faible.

Le pH est plus élevé en début de saison, au moment où les poussières sont plus abondantes et le wash-out plus fort (fig.10.1.3b). Le pH acide du 12/10 est corrélé avec de fortes teneurs en NO_3^- et est sans doute dû à des dégagements de HNO_3 .

Tous les éléments suivent la même évolution que celle de la conductivité. Les graphiques 10.1.3. c à f montrent la relation entre les hauteurs des précipitations et la concentration moyenne en minéraux dissous (majeurs et silice).

Il s'avère donc utile, pour pouvoir comparer les compositions moyennes mensuelles de pondérer les concentrations par les hauteurs des précipitations. C'est l'équation exposée au

chapitre 8.1.4 qui a été utilisée. Les pluies présentant un pic de K⁺ et Cl⁻ n'ont pas été prises en compte.

mois	H mm	Ca g m ⁻³	%	Mg g m ⁻³	%	K g m ⁻³	%	Na g m ⁻³	%	HCO ₃ ⁻ g m ⁻³	%	Cl g m ⁻³	%	NO ₃ g m ⁻³	%	SO ₄ g m ⁻³	%	Si g m ⁻³	%	M
M	22	3.8	14	0.5	2	1.9	7	1.2	4	13	46	1.7	6	2.3	8	2.4	9	1.2	4	28.1
J	81	0.9	9	0.1	1	2.4	23	0.1	1	3.1	30	2	20	0.9	10	0.6	6	ND	0	10.5
Jt	180	0.6	11	0.2	3	0.6	10	0.2	3	2.1	40	0.6	11	0.3	6	0.4	7	0.5	9	5.3
A	135	0.3	16	0.1	4	0.1	4	ND	0	1.1	54	0.2	9	0.2	10	0.1	3	ND	0	2.1
S	135	0.5	17	0.1	3	0.1	3	ND	0	1	34	0.4	13	0.7	23	0.2	7	ND	0	2.9
O	31	2.6	14	0.5	3	0.6	4	0.7	4	6	33	1.1	6	3.5	19	1.5	8	1.6	9	18
T		0.8	13	0.2	3	0.7	11	0.2	3	2.4	38	0.7	11	0.7	11	0.4	6	0.3	4	6.3

Tableau 10.1.2 : Moyennes mensuelles et annuelle pondérées par les hauteurs d'eau pour les pluies 1993 de Bamako et part relative de chacun des éléments (%)

Le bicarbonate est largement dominant mais son importance relative varie de 30 à 54 % de juin à août. C'est au milieu de la saison des pluies qu'il est le plus abondant alors que le sulfate, le sodium et la silice ont une part relative plus importante en début et en fin de la saison des pluies.

En juin, alors que les premières pluies sont déjà tombées mais que les concentrations moyennes sont encore élevées, on constate que la part de chaque élément dans la composition chimique moyenne diffère notablement par rapport aux autres mois. Le potassium et l'ion chlore dominant au détriment des autres éléments.

La différence de composition chimique de ces pluies mensuelles peut être liée à l'origine des masses nuageuses. On a vu que les pluies, sur le Mali, proviennent des masses d'air ayant transité par l'océan Atlantique mais les courants JEA et JET amenant de l'air de l'Afrique centrale ou de l'océan Indien peuvent s'allier avec ces flux de mousson provenant du Golfe de Guinée.

Les pluies de mai sont faibles. Par contre, durant les autres mois, il y a un mélange d'événements pluvieux intenses et d'autres amenant peu d'eau. Les compositions chimiques ne sont pas réellement différentes en mai par rapport au reste de la saison. Il est difficile de définir l'origine des pluies surtout que l'évaporation joue un grand rôle en début de saison.

Un autre facteur semble important dans la différenciation chimique des eaux de pluies ; le taux de poussières atmosphériques dans l'air. Son influence a été soulignée par Petrenchuk et Selezneva (1970) pour les régions semi-désertiques de l'URSS et confirmée pour le Sénégal par Orange et Gac (1990). Ceci sera discuté plus loin dans ce chapitre.

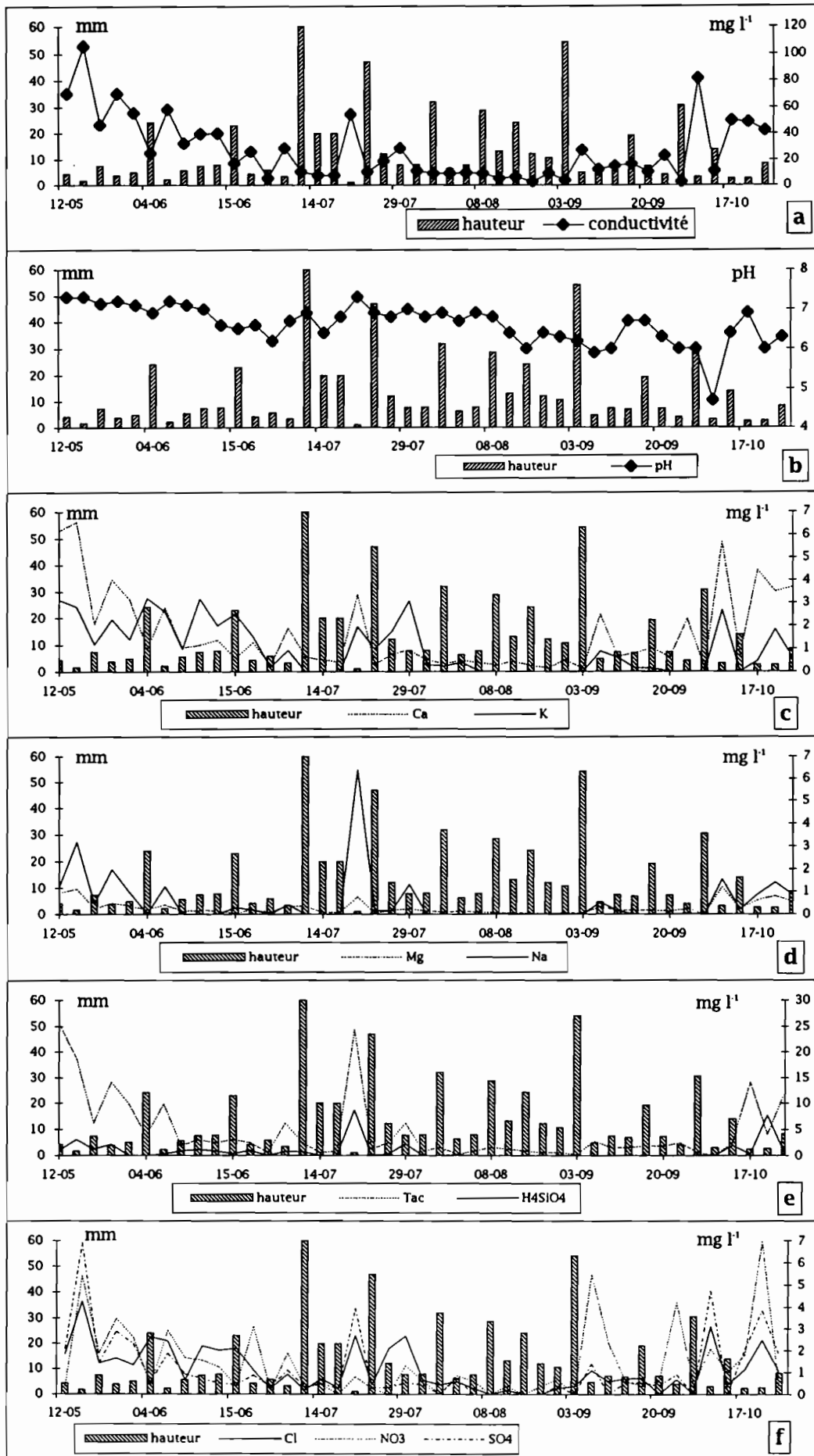


Fig. 10.1.3 : Evolution au cours de l'année de la composition chimique des pluies

Les feux de brousse sont activés principalement de janvier à avril. Si une grande partie des chlorures, du nitrate et du sulfate provenait de la combustion de la biomasse (Galloway et al, 1982, Lacaux et al, 1992), leur part relative devrait être plus élevée au début de la saison des pluies en mai. Ceci ne se vérifie pas et l'hypothèse émise au chapitre 10.1.1 n'est pas confirmée.

10.1.3 CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS DISSOUS

La matrice de corrélation, faite sur les 42 pluies de la saison 1993 montre une bonne relation linéaire entre la conductivité moyenne et les ions calcium, magnésium, sulfate et silicium. Il existe également de bonnes corrélations entre $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$, K^+/Cl^- et $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$. Un pic de Ca^{2+} et NO_3^- le 12 octobre et un pic de Na^+ et HCO_3^- gêne les relations mais, si l'on ne tient pas compte de ces points, il existe d'autres corrélations entre $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$.

La silice et le pH ne sont pas corrélés aux autres éléments. Le calcium, le sulfate et le magnésium sont les éléments qui sont les mieux corrélés à l'évolution minéralogique moyenne des eaux de pluies.

Le rapport des dissous majeurs en fonction des ions chlore a été fait sur la moyenne annuelle pondérée. Le chlore est pris en général comme référence car il est considéré comme un apport d'origine océanique uniquement. Tous les éléments dissous dans l'océan sont présents dans les aérosols dans les mêmes proportions (Stallard et Edmond, 1981, Negrel, 1992). Un rapport différent indique une autre source pour les composés dissous présents.

Les rapports ioniques océaniques (en $\text{m}^{\text{eq}} \text{l}^{-1}/\text{m}^{\text{eq}} \text{l}^{-1}$) donnés par Meybeck (1983) et les rapports moyens annuels des pluies de Bamako (tableau 10.1.3) montrent un effet de continentalité important. Le rapport sulfate/chlorure est le plus important. Il augmente normalement en fonction de la distance avec la mer. Un rapport supérieur à celui de l'océan peut être attribué à une pollution anthropique ou aux poussières atmosphériques. Ce rapport est supérieur à 0,3 pour l'ensemble de l'année. L'impact des poussières atmosphériques sur la chimie des eaux de pluie est donc important. Ainsi, tous les rapports calculés sont supérieurs à ceux des pluies océaniques sauf celui de Na^+/Cl^- . Les eaux de pluie de Bamako ont « récupéré » au cours de leur trajet du calcium, du magnésium, du potassium et du bicarbonate. Ces éléments d'origine terrestre (végétaux ou roches) sont plus abondants dans les eaux recueillies à Bamako que dans les eaux océaniques.

Comme l'a montré Meybeck (1983), les ions chlore sont de moins en moins abondants au fur et à mesure que l'on s'éloigne des côtes, ce qui entraîne également une hausse des rapports. Cette diminution s'explique par un mélange de l'air avec l'air continental recyclé pauvre en chlore et par le « rain-out » qui entraîne le lessivage du chlore à chaque précipitation, ce qui appauvrit le réservoir.

Le sodium et le chlore sont tous deux d'origine océaniques. Une diminution du chlore devrait être suivi d'une diminution du sodium. Or, le rapport des pluies océaniques est plus grand que celui des pluies de Bamako sauf en début et fin de saison. On peut supposer que les teneurs en sodium diminuent plus rapidement à l'intérieur des terres où qu'un apport par rain-out est plus important pour le chlore. Pour 100 % de sodium lessivé, le taux de lessivage des chlorures est de 160 %. En allant vers les continents, les pluies appauvrissent la réserve en chlorures plus rapidement que le sodium. Au final, la composition chimique des eaux de pluies à Bamako devrait être moins riche en chlorures sauf s'il y a un apport extérieur de cet anion. Les fortes concentrations en chlorures relevés vont également dans le sens d'une autre origine que celle des eaux océaniques.

L'étude isotopique de ces pluies a montré qu'un des facteurs les plus important agissant sur la qualité des eaux est la reprise évaporatoire au-dessus des terres humides et des régions inondées. Si le cachet isotopique est changé, la concentration moyenne en éléments dissous des eaux de pluies peut l'être également.

L'évolution mensuelle des rapports dans l'année permet de définir l'origine des différentes masses d'air qui apportent la pluie (tableau 10.1.3).

	Ca ²⁺ /Cl ⁻	Mg ²⁺ /Cl ⁻	K ⁺ /Cl ⁻	Na ⁺ /Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻
mai	4,0	0,8	1,0	1,0	4,3	1,0
juin	0,8	0,1	1,0	0,1	0,9	0,2
juillet	1,5	0,8	1,0	0,5	1,7	0,5
août	1,5	0,8	0,3	-	1,8	0,2
septembre	2,5	0,8	0,3	-	1,6	0,4
octobre	4,3	1,4	0,5	1,0	3,3	2,4
année	2,0	1,0	0,9	0,4	2,0	0,4
pluies océaniques	0,16	0,24	0,021	0,86	0,05	0,30

Tableau 10.1.3 : Evolution mensuelle des rapports Xi/Cl⁻ (még l⁻¹/még l⁻¹) pour les eaux de pluie de Bamako

Les rapports sont plus élevés en mai et en octobre sauf pour le potassium. Au début et en fin de saison des pluies, l'origine marine des précipitations est masquée par des apports différents attribuables au « self-cleaning » ou wash-out. Un comportement analogue a été observé sur la station de Bakel au Sénégal par Orange et Gac (1990).

En fait, les pluies qui diffèrent le plus des autres sont celles du mois de juin. L'ion chlore, voit sa part relative doubler par rapport aux autres mois. Le rapport SO₄²⁻/Cl⁻ inférieur à celui des pluies océaniques laisse penser que les apports océaniques durant ce mois sont importants. Pourtant, les teneurs en sodium sont très faibles. En août, le rapport SO₄²⁻/Cl⁻ est proche de celui de juin et les teneurs en sodium négligeables. Si l'ion chlore était alors s'origine océanique, le rapport Na⁺/Cl⁻ devrait être proche de 0,86. On peut supposer qu'un apport important de chlorures d'origine non océanique entraîne une diminution des autres rapports sauf celui du potassium qui, lui aussi augmente en juin. Les deux ions chlore et potassium sont responsables de l'écart observé en juin. Quatre analyses chimiques montrant

des taux élevés de K^+ et Cl^- ont déjà été éliminées. Cette pollution a été également observée pour les eaux du fleuve. Elle peut provenir du laboratoire mais une origine naturelle est envisageable. En effet, les bassins évaporitiques associent de la sylvite (KCl) à la halite. Dans ce cas, le taux de potassium devrait être au moins égal à celui du sodium, ce qui n'est pas vérifié. L'origine naturelle de cet excès de K^+ et Cl^- paraît donc improbable.

D'après les rapports Na^+/Cl^- , il paraît évident que les chlorures des eaux de pluies sont liés aux apports océaniques en début et fin de saison des pluies. La figure 10.1.4a montre la relation Na^+/Cl^- . Alors que le rapport entre ces deux composés est de 0,86 dans les pluies océaniques, il est estimé ici à 0,9 pour les pluies les plus minéralisées ($\Sigma\text{cations+anions} > 10\text{mg l}^{-1}$). Les pluies importantes de très faibles concentrations en éléments dissous sont enrichies en chlore. Une comparaison entre le sodium, le chlore et le magnésium, éléments considérés comme d'origine océanique est notée sur la figure 10.1.4 a, b et c. Les relations sont médiocres. Pour aucun des graphiques on note un effet de saison. Les concentrations en magnésium et chlore sont enrichies par des apports terrigènes (émission de végétation, poussières atmosphériques et feux de biomasse). Le sodium paraît, pour les pluies de Bamako, moins affecté que le chlore par des apports terrigènes durant le coeur de la saison des pluies.

La relation entre le sodium et le calcium (fig.10.1.4 d) souligne que le Ca^{2+} est d'origine terrigène principalement. La droite des eaux océaniques est confondue avec l'axe des x.

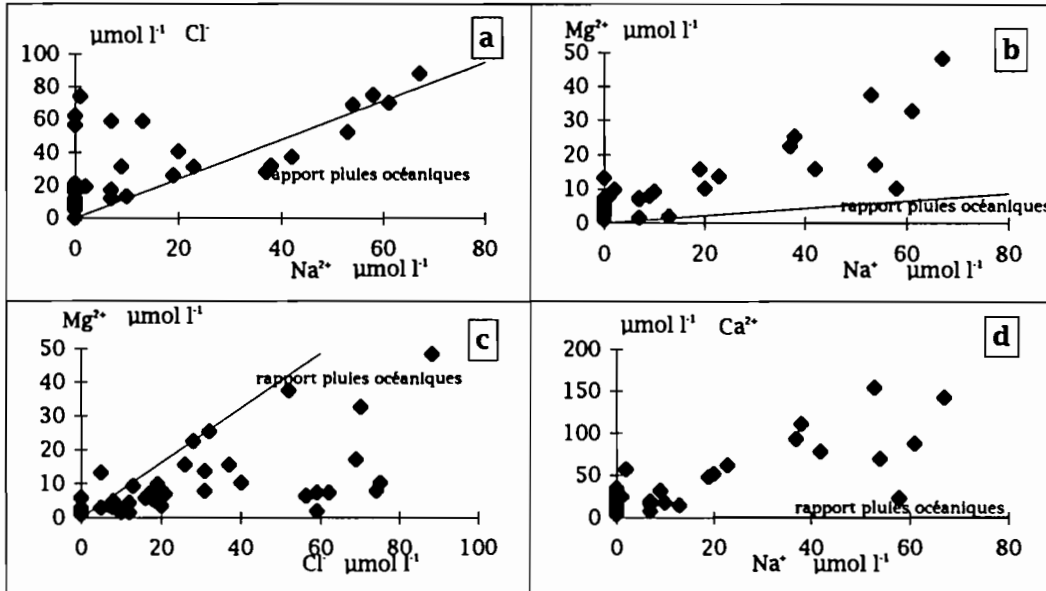


Fig.10.1.4 : Relation entre différents éléments chimiques des eaux de pluies 1993 à Bamako

Une correction des apports terrigènes dans les eaux de pluie de Bamako peut donc être faite en utilisant le sodium comme référence. Toutefois, plusieurs origines sont possibles pour cet élément. Les rapports molaires K^+/Na^+ varient sur l'année de 0 à 10,9 alors qu'ils sont de 0,08 pour les pluies océaniques. Les rapports Mg^{2+}/Na^+ vont de 0,1 à 1,1 pour un rapport océanique de 0,129. De même le rapport Cl^-/Na^+ varie de 0,4 à 13. Si cet élément est le cation

le moins facilement échangeable, on verra au paragraphe 10.1.4 qu'un apport par les poussières atmosphériques est possible.

En mai et en octobre, les concentrations ($\mu\text{eq l}^{-1}$) de sodium et chlorures sont élevées et voisines. L'air est saturé de poussières et la part des apports terrigènes pour ces deux éléments est importante. L'estimation des apports terrigènes et océaniques dans les eaux de pluies n'est pas possible.

Pour les autres mois, on peut supposer que le sodium est uniquement d'origine océanique. Plusieurs pluies ont des concentrations en sodium inférieures à la limite de détection. Les autres composés chimiques sont alors essentiellement d'origine terrigène. Pour les pluies où le sodium est présent, on peut calculer la part terrigène pour chaque cation et pour les chlorures. Pour cela, les rapports mesurés dans les pluies océaniques sont utilisés. Stallard et Edmond (1981) donnent les rapports ioniques suivant: $\text{K/Na}=0,025$; $\text{Mg/Na}=0,129$; $\text{Ca/Na}=0,022$; $\text{Cl/Na}=1,188$.

Il apparaît, en juin, que 99 % du calcium, 99 % du potassium, 71,3 % du magnésium et 60,8 % du chlore sont d'origine terrigène. En juillet, les rapports sont les mêmes sauf pour le magnésium dont 82,5 % sont d'origine terrigène. En août, les teneurs en sodium sont toujours inférieures à la limite de détection. En septembre, moins de 0,5 % du calcium, 3 % du potassium, 14 % du magnésium et 40 % des chlorures sont considérés comme d'origine océanique.

Au cours de la saison des pluies, la part des apports terrigènes augmente pour le magnésium et diminue pour le chlore.

La détermination de l'origine des pluies peut aussi être déterminée par les rapports $\delta^{18}\text{O}/\text{Cl}^-$ et d/Cl^- où d est l'excès en deutérium par rapport à la valeur théorique $\delta^2\text{H}_{\text{théorique}} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$.

Pour le premier graphique (fig. 10.1.5), il ne ressort aucune relation entre les deux facteurs.

Pour la figure 10.1.6, lorsque « d » est inférieur à 0, il y a une forte influence de l'évaporation. C'est le cas pour les pluies du 22/6, 29/7 et 28/8 dont les hauteurs précipitées sont inférieures à 10,7 mm. Pour les pluies évaporées ou non, il n'y a pas de relation nette avec la concentration en chlorures. Il paraît donc difficile de différencier l'effet de continentalité du recyclage de la vapeur à partir des sols.

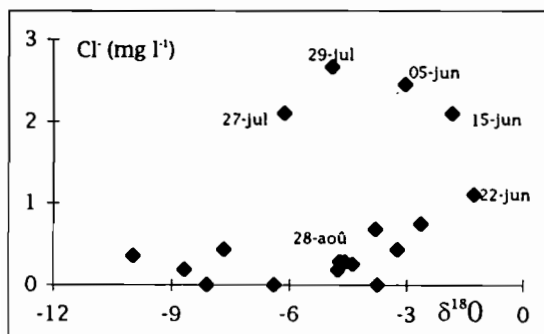


Fig.10.1.5 : Relation $\delta^{18}\text{O}/\text{Cl}^-$ à Bamako

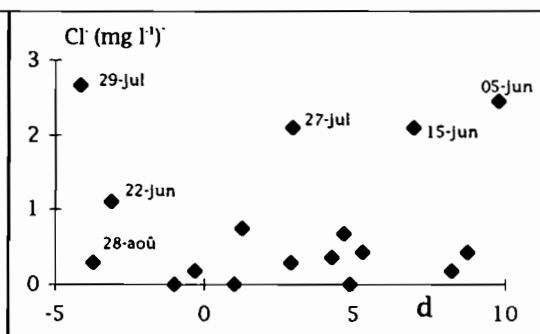


Fig.10.1.6 : Relation d/Cl^- pluies de Bamako

10.1.4 INFLUENCE DES POUSSIÈRES ATMOSPHERIQUES SUR LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE PLUIES

Les matériaux sont transportés principalement par les pluies ou indirectement par les poussières atmosphériques dont l'Harmattan est le principal fournisseur. Ainsi, la composition chimique des poussières et la capacité d'échange des cations influencent le chimisme des eaux de pluies.

L'importance des poussières atmosphériques sur la qualité chimique des eaux de pluie a été soulignée lors du paragraphe 10.1.3. La charge moyenne de l'atmosphère en particules permet d'expliquer une partie des variations de concentrations moyennes des éléments dissous dans les eaux de pluies et notamment en début de saison humide.

Les gouttelettes de pluies incorporent les fines particules de poussières et permettent un « nettoyage » de l'air (Coude-Gaussen et Rognon, 1983). Ce phénomène est appelé « Self-Cleaning » (ou wash-out) et a été mis en évidence pour la première fois par Petrenchuk et Selezneva (1970) qui soulignent que ce lessivage est alors la principale source de minéralisation dans les précipitations.

Les poussières atmosphériques agissent sur la chimie des eaux par dissolution des cations échangeables.

Pour lever les incertitudes sur les apports possibles d'éléments dissous par les poussières atmosphériques, nous avons mélangé de la poussière atmosphérique prélevée en octobre dans le pluviomètre de Bamako à une eau préalablement filtrée (Douna le 16/09/1993). Après 24 heures, l'eau a de nouveau été filtrée. Les résultats sont reportés dans le tableau 10.1.4.

station	unité	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄
DOUNA	mg l ⁻¹	2.2	1.1	1.9	2.1	19.5	0.3	ND	ND	23.8
+poussière	mg l ⁻¹	4.8	1.5	2.6	2.7	31.1	0.9	ND	0.7	25.0
	Ecart-type	1.9	0.3	0.5	0.5	8.2	0.5	-	-	0.9
	%	53.4	22.3	22.0	19.0	32.4	75.2	-	-	3.5

Tableau 10.1.4 : Comparaison de la composition chimique d'une eau avant et après le mélange avec des poussières atmosphériques recueillies à Bamako en octobre 1993

Les concentrations de nitrates sont trop faibles pour être significatives. L'écart obtenu pour la silice n'est pas non plus significatif. Le quartz se trouve en grande quantité dans les poussières atmosphériques mais se dissout difficilement dans les conditions in-situ.

Les plus importantes variations concernent les chlorures et le calcium. Les poussières peuvent alors être responsables du doublement des teneurs chimiques moyennes. Le bicarbonate se dissout également bien.

Pour les autres cations et le sulfate, il y a un apport de matière dissoute évident mais son importance est difficile à estimer car proche de l'erreur de mesure.

Si l'on considère que les poussières atmosphériques recueillies à Bamako sont, pour une part d'origine autochtone et d'autre part de l'Harmattan, il paraît donc certain que les ions

chlores analysés dans les eaux de pluie ne proviennent pas de l'océan mais bien de la dissolution de poussières sahariennes riches en sels d'origine évaporitique.

Le calcium est le cation le plus facilement échangeable, le potassium et le magnésium viennent ensuite. Le cation dont la capacité d'échange est la plus faible est le sodium (Drees et al, 1993). Cette caractéristique peut expliquer les faibles taux de Na^+ trouvés dans les eaux de pluies malgré la part importante de cet élément dans les poussières amenées par l'Harmattan (Pye, 1987).

Un taux important de matière organique dans les poussières atmosphériques apporte un enrichissement des eaux en nitrates. Les taux d'azote organique sont élevés dans les poussières de l'Harmattan au nord du Nigeria (Wilke et al, 1984). Ceci explique des concentrations relativement fortes dans les eaux de pluies.

10.1.5 LES PLUIES SUR LE DELTA CENTRAL

Quelques analyses chimiques de pluies du delta sont disponibles pour l'année 1993. Les pluies de Batamani de juin sont relevées dans un pluviomètre dans lequel l'eau est surmontée d'une fine pellicule d'huile afin d'éviter tout échange avec l'atmosphère.

Les autres pluies sont prélevées lors des campagnes de juillet et août 1993 et filtrées immédiatement. Nous avons vu que les hauteurs influencent la concentration des eaux de pluie. Pour cette raison, il est difficile de comparer la composition minérale de ces eaux de pluies avec celles de Bamako.

STATION	DATE	H	C	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	H_4SiO_4	TDS
		mm	$\mu\text{S cm}^{-1}$		mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}	mg l^{-1}
Batamani	juin		132.9	7.0	7.9	2.5	12.4	1.7	48.2	3.3	0.8	9.3	11.3	97.3
Batamani	06-07	3	142.0	7.9	9.1	2.3	7.0	7.6	52.5	6.7	7.6	3.3	4.9	101.1
Mopti	03-08	4	96.2	8.0	10.1	0.4	4.9	5.0	51.9	4.0	0.0	0.0	2.0	78.3
Youvarou	05-08	24	32.3	7.6	4.0	0.3	0.8	0.2	14.6	1.1	0.6	0.9	0.7	23.3
Youvarou	10-08	26	29.7	7.2	2.2	0.3	0.2	0.6	11.6	1.0	0.7	0.3	0.5	17.3
Dire	08-08	1	69.1	7.4	5.9	0.9	4.7	2.7	30.5	3.1	2.2	1.8	2.2	53.9

Tableau 10.1.5 : Composition chimique moyenne des eaux de pluies recueillies dans le delta en 1993

Les pluies de juin sont riches en éléments dissous, beaucoup plus que les pluies de Bamako en mai. Même en tenant compte du décalage de temps qui existe entre ces deux régions, il semble que les pluies du delta sont plus concentrées que celles de Bamako. Ceci se confirme avec les pluies de juillet et d'août. Pour une même hauteur (~24mm), la pluie de Youvarou du 5 août est près de vingt fois plus concentrées en éléments dissous que la pluie de Bamako du 23 août.

Les pluies sont beaucoup plus espacées et les poussières atmosphériques autochtones sont abondantes. Ainsi l'atmosphère a le temps de se salir entre deux épisodes pluvieux. Comme le confirment les études sur les matières en suspension (chapitre 10), les pluies du delta apportent de grandes quantités de lithométéores.

Les pH observés sont tous légèrement basiques. L'abondance des nitrates et sulfates, responsable de l'acidité des pluies (Galloway et al, 1982) n'est pas aussi grande que pour les pluies de Bamako. D'autre part, la température moyenne de l'air agit sur les coefficients de solubilité du CO₂ atmosphérique. Plus les températures de l'air sont élevées et plus les taux de gaz carbonique sont faibles. L'acidité des pluies serait alors moindre (Mathieu et Monnet, 1971). La température moyenne de l'air dans le delta en juillet est plus élevée de 3°, ce qui peut également expliquer la différence de pH.

La part relative de chaque élément et les rapports Xi/Na⁺ permettent une étude comparée des précipitations sans tenir compte de l'influence des hauteurs d'eau.

STATION	date	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Tac	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₄ SiO ₄
Batamani	juin	8	3	13	2	50	3	1	10	12
Batamani	06-07	9	2	7	8	52	7	8	3	5
Mopti	03-08	13	1	6	6	66	5	0	0	3
Youvarou	05-08	17	2	4	1	63	5	3	4	3
Youvarou	10-08	13	2	1	4	67	6	4	2	3
Dire	08-08	11	2	9	5	57	6	4	3	4

Tableau 10.1.6 : Part relative de chacun des éléments dans les eaux de pluies du delta

Ces résultats soulignent l'abondance de la silice qui représente plus de 10 % au mois de juin à Batamani. Le bicarbonate est important en août. Les aérosols provenant de la végétation sont riches en potassium et la dissolution des poussières et les feux de brousse entraîne, dans les régions arides un enrichissement en Ca²⁺, SO₄²⁻, Na⁺ et Cl⁻ (Meybeck, 1983, Yoboue, 1991). Dans les eaux de pluies recueillies au coeur de la zone inondée, les anions chlore, nitrate et sulfate sont moins abondants comme les cations potassium. La végétation ne joue donc pas un rôle important sur la caractérisation des eaux de pluie.

Les rapports Xi/Na⁺ sont, en général, plus élevés, ce qui laisse supposer que le sodium est moins abondant (tableau 10.1.7). Ceci est vraisemblable compte tenu du fait que ces anions diminuent en importance en s'éloignant des côtes.

	Ca ²⁺ /Na ⁺	Mg ²⁺ /Na ⁺	K ⁺ /Na ⁺	Cl ⁻ /Na ⁺	HCO ₃ ⁻ /Na ⁺	SO ₄ ²⁻ /Na ⁺
Batamani	2,7	1,3	4,3	1,3	10,6	2,6
Batamani	0,7	0,3	0,5	0,6	2,6	0,2
Mopti	1,2	0,1	0,6	0,5	3,9	-
Youvarou	9,9	1,4	2,1	3,2	24,0	1,8
Youvarou	2,1	0,5	0,2	1,0	7,3	0,3
Dire	1,3	0,3	1,0	0,8	4,4	0,3

Tableau 10.1.7 : Evolution mensuelle des rapports ioniques Xi/Na⁺ pour les eaux de pluie du delta

Le rapport HCO₃⁻/Na⁺ est grand par rapport aux eaux de mer et par rapport aux eaux de pluies de Bamako. On relève des taux de bicarbonates plus élevés sur le delta qui expliquent aussi des pH basiques. La pluie du début juillet à Batamani présente des rapports chimiques

bicarbonate/sodium proche de ceux de Bamako en début de saison des pluies. Ceci peut s'expliquer par une origine identique des précipitations avec un décalage dans le temps.

Les mesures faites sur une seule pluie avec des teneurs faibles ne permettent pas l'analyse détaillée des autres rapports qui semblent assez variables.

L'évolution latérale entre Mopti et Dire n'est pas régulière. Les eaux échantillonnées ne sont sans doute pas originaires des mêmes masses nuageuses et la comparaison latérale n'est pas significative.

10.2 HYDROCHIMIE DES EAUX DU FLEUVE A TRAVERS LE DELTA

10.2.1 PRESENTATION GENERALE DE LA QUALITE DES EAUX

10.2.1.1 Composition chimique moyenne des eaux du Niger

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre sur les méthodes de mesure, le mode de conservation des échantillons d'eau entraîne une dérive des concentrations en anions chlore, nitrate et sulfate. Les valeurs obtenues pour ces trois éléments chimiques permettent l'étude des éléments totaux dissous mais non une analyse spatio-temporelle détaillée.

Pour certaines analyses, des valeurs très élevées sont trouvées pour les ions potassium et chlore. Ces quelques points n'ont pas été retenus.

L'ensemble des résultats des analyses chimiques est reporté en annexe 7.

Les concentrations moyennes en éléments dissous sont faibles (fig.10.2.0). Le tableau 10.1.1 rassemble les statistiques élémentaires de l'ensemble des stations pour les quatre années de mesure.

VARIABLE	MOYENNE	ECART-TYPE	CV
Ca ²⁺	3.6	1.8	48.6
Mg ²⁺	2.0	1.0	49.9
K ⁺	3.3	1.3	38.1
Na ⁺	4.1	1.7	40.4
HCO ₃ ⁻	33.4	14.1	42.3
Cl ⁻	1.2	1.0	76.6
NO ₃ ⁻	0.4	0.9	209.8
SO ₄ ²⁻	0.4	0.4	123.9
H ₄ SiO ₄	20.7	5.4	26.2
H ⁺	5.47 10 ⁻⁸	3.57 10 ⁻⁸	65.4
conductivité	64.7	24.4	37.7

Tableau 10.2.1 : Moyenne (mg l⁻¹), écart-type et coefficient de variation des éléments majeurs, H⁺ et conductivité (µS cm⁻¹) sur toutes les stations depuis 1990 (n=523)

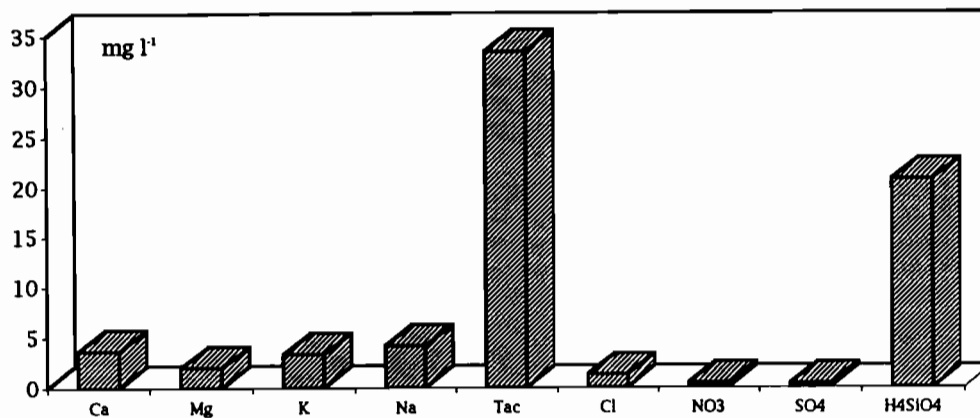
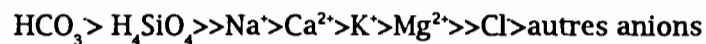


Fig.10.2.0 : Composition chimique moyenne des eaux du delta

Pour un pH moyen de 7,3 ($H^+=5,5 \cdot 10^{-8}$), l'acide carbonique dissous se trouve essentiellement sous la forme bicarbonate HCO_3^- . De même, à des pH inférieurs à 9,75, la forme de la silice qui domine dans les eaux est H_4SiO_4 (Michard, 1989). Les composés H_4SiO_4 et HCO_3^- représentent plus de 78 % des éléments dissous (TDS) et le bicarbonate près de 70 % des ions. Parmi les cations, le sodium est légèrement plus abondant que le calcium et le potassium. Les coefficients de variation de tous les cations et du bicarbonate sont voisins de 40 % comme la conductivité moyenne. Des coefficients de variation élevés pour les ions chlore, nitrate et sulfate soulignent la sensibilité de la mesure de ces anions en très faibles quantités dans les eaux du fleuve. Les pH varient de quelques dixièmes d'unités pH, ce qui représente de forts coefficients de variation pour les H^+ (>65 %).

Le paramètre le plus stable dans le temps est la silice dont le coefficient de variation est inférieur à 30 %.

L'ordre d'importance des minéraux dissous est donc :



La composition moyenne de l'eau est bicarbonatée sodique avec une dominance des bicarbonates et de la silice.

Les concentrations moyennes annuelles du total dissous ($\Sigma \text{cation} + \Sigma \text{anions}$) pondérées par les débits de quelques grands fleuves sont données sur le tableau 10.2.2. Le Niger apparaît comme un fleuve faiblement minéralisé par rapport aux autres grands fleuves d'Afrique.

Fleuve	lieu	concentration(mg l ⁻¹)
Niger ⁽³⁾	Siguiri	33,3
Niger ⁽¹⁾	Banankoro	49,3
Niger ⁽¹⁾	Dire	47,8
Sénégal ⁽³⁾	Bakel	43,0
Chari+Logone ⁽²⁾	entrée du lac Tchad	59,4
Oubangui ⁽⁸⁾	Bangui	59,0
Congo ⁽⁴⁾	Brazzaville	53,1
Afrique soudano-sahélienne ⁽⁵⁾		68,4
eaux africaines moy. ⁽⁶⁾		58,1
Bhramapoutre ⁽⁶⁾		124,0
Béni, Mamore et Madera ⁽⁷⁾	Bolivie	60,0

1: cette étude, 2: Roche, 1968, Gac, 1980, 3: Orange, 1992 4: Moukolo et al, 1992, 5: Biot, 1980, 6: Meybeck, 1979, 7: Roche et Jauregul, 1988, 8: Laraque et al, 1994

Tableau 10.2.2 : Concentrations moyennes annuelles pondérées de quelques grands fleuves

Il est intéressant de connaître le fonctionnement général du fleuve Niger selon son équilibre ionique et les mécanismes contrôlant la chimie des eaux. Gibbs (1970) a fait une classification générale des grands fleuves d'après le rapport $(Na^+/Na^++Ca^{2+})/TDS$, reprise ensuite par Kilham (1990). Le Niger se situe dans le domaine où le mécanisme principal est le lessivage des roches (hydrolyse). Les eaux sont alors en équilibre avec les matériaux géologiques du bassin. Ceci est confirmé par Stallard et Edmond (1983) pour qui un bassin est dominé par le lessivage de roches siliceuses lorsque la somme des cations est comprise entre 200 et 450 $\mu\text{eq l}^{-1}$.

Le processus d'altération consiste en réaction de dissolution des roches les plus abondantes. La valeur du rapport RE permet de préciser le type d'altération dominante dans un bassin (Gac, 1980).

$$RE = \frac{6K_2O + 6Na_2O + 2CaO - SiO_2}{K_2O + Na_2O + CaO}$$

Dans le cas des eaux du fleuve Niger, ce rapport est très élevé (4,6) et indique une altération de type bisiallisation. Ce type d'altération favorise la formation d'argiles riches en silice de type 2:1 (surtout la smectite) avec coexistence de la kaolinite dans des formations latéritiques (ferrallitiques). Le bassin du haut Niger dans le Fouta Djallon est dominé par la présence de sols ferrallitiques (Orange, 1992).

10.2.1.2 Etat d'équilibre des eaux du delta

L'équilibre chimique d'une eau traduit la coexistence de plusieurs espèces et est régi par une constante. Pour la relation $AnB(\text{sel}) \leftrightarrow nA^+ + B^{n-}$, l'équilibre s'écrit : $(A)^n (B^{n-}) = K_s$. Les réactions de dissolution-précipitation n'atteignent pas toujours l'état d'équilibre. C'est la solubilité des minéraux qui détermine les concentrations possibles en éléments dissous dans l'eau. Le facteur limitant la dissolution est le produit de solubilité K_s .

Le produit d'activité ionique (PAI) résulte du produit de l'activité du cation et de celui de l'anion d'un même élément en solution. Ainsi, $\log \frac{PAI}{K_s} < -1$, il y a une mise en solution dominante, $\log \frac{PAI}{K_s}$ est compris entre -1 et +1, ceci correspond à un état d'équilibre où la précipitation et la redissolution agissent mais sans qu'aucun des deux phénomènes ne domine et $\log \frac{PAI}{K_s} > 1$, la précipitation est prépondérante.

Les facteurs susceptibles de modifier la solubilité sont : la température, l'évaporation, l'effet d'ion commun, le pH, la formation d'un complexe, la formation d'un autre précipité. Etant donné les caractéristiques du bassin, les facteurs les plus favorables pour le cas du delta du Niger sont la température ou l'évaporation de la solution.

On peut calculer, pour le fleuve Niger et pour le Bani, l'équilibre chimique de l'eau à partir des concentrations de chaque élément chimique, du pH et de la température de la solution. Le calcul du produit de solubilité des minéraux susceptibles de précipiter ou de se dissoudre a été fait avec le programme PCWATEQ© (version 1984 du programme Wateqf établi par Plummer et al, 1976) pour toutes les stations durant quatre périodes significatives, l'étiage, la montée de la crue, le maximum de l'inondation et la décrue (tableau 10.2.3). Seules les valeurs de $\log PAI/K_s$ supérieures à -1, indiquant une possible précipitation ont été retenues.

station	date	log PAI/Ks			
		calcédoine	gel	quartz	verre
Banankoro	étiage	0.09	-0.72	0.60	-0.41
	crue	-0.09	-0.92	0.28	-0.59
	maximum	-0.12	-0.95	0.35	-0.63
	décru	-0.01	-0.84	0.46	-0.51
Douna	étiage	-0.07	-0.88	0.43	-0.58
	crue	-0.30	-	0.17	-0.80
	maximum	-0.12	-0.95	0.35	-0.63
	décru	-0.10	-0.93	0.37	-0.61
Ke-Macina	étiage	0.03	-0.78	-0.53	-0.48
	crue	-0.12	-0.95	0.35	-0.62
	maximum	-0.14	-0.97	0.33	-0.65
	décru	-0.18	-1.02	0.29	-0.69
Tilembeya	étiage	-0.03	-0.84	0.48	-0.53
	crue	-0.16	-0.99	0.31	-0.67
	maximum	-0.16	-0.99	0.31	-0.67
	décru	-0.17	-0.99	0.31	-0.67
Kara	étiage	-0.17	-0.83	0.49	-0.53
	crue	-0.14	-0.96	0.34	-0.64
	maximum	-0.17	-1.00	0.34	-0.67
	décru	-0.11	-0.94	0.36	-0.61
Nantaka	étiage	-0.20	-	0.27	-0.70
	crue	-0.16	-0.99	0.30	-0.66
	maximum	-0.15	-0.98	0.32	-0.65
	décru	-0.18	-1.00	0.29	-0.68

Akka	étiage	-0.12	-0.82	0.49	-0.52
	crue	-0.10	-0.94	0.36	-0.61
	maximum	-0.07	-0.89	0.41	-0.57
	décru	-0.11	-0.94	0.37	-0.61
Awoye	étiage	0.60	-0.75	1.00	-0.56
	crue	-0.18	-1.00	0.29	-0.68
	maximum	-0.15	-0.98	0.32	-0.66
	décru	-0.26	-1.10	0.20	-0.77
Korientze	étiage	0.09	-0.72	0.59	-0.41
	crue	-0.17	-1.00	0.30	-0.67
	maximum	-0.39	-	0.08	-0.90
	décru	-0.30	-	0.18	-0.80
Dire	étiage	-0.09	-0.90	0.42	-0.60
	crue	-0.18	1.00	0.29	-0.68
	maximum	-0.15	-0.98	0.32	-0.65
	décru	-0.16	-1.00	0.30	-0.66

Tableau 10.2.3 : Etat de saturation de l'eau vis à vis des différentes formes solides de la silice

Ces calculs permettent de constater que l'eau est en état d'équilibre chimique vis à vis du quartz et de différentes formes amorphes de la silice durant toute l'année. La dissolution cristalline ou des précipitations siliceuses (quartz, calcédoine, silice amorphe) sont ainsi possibles.

Pour les autres éléments, l'eau « libre » n'atteint pas l'état de saturation dans le cours principal du fleuve. Par contre, l'eau de la zone non saturée ou des nappes peut, elle, être enrichie sous l'effet de l'évaporation et permettre des dépôts de type halins ou gypseux dans les régions périphériques du delta qui ne sont inondées que temporairement (Gallais, 1967).

Il est possible de représenter les eaux dans des diagrammes d'équilibre qui résument les séquences de minéraux qui peuvent se présenter dans les eaux en fonction des teneurs en cation, en silice et du pH (Garrels et Christ, 1967). Dans un système standard $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ à 25° et 1 atmosphère, les eaux du fleuve sont en état d'équilibre vis à vis du quartz et de différentes formes de la silice amorphe. Sur ces diagrammes (fig.10.2.1), les eaux du Niger sont en équilibre avec la montmorillonite calcique, l'albite et la microcline. Il n'y a ni évolution latérale, ni évolution annuelle.

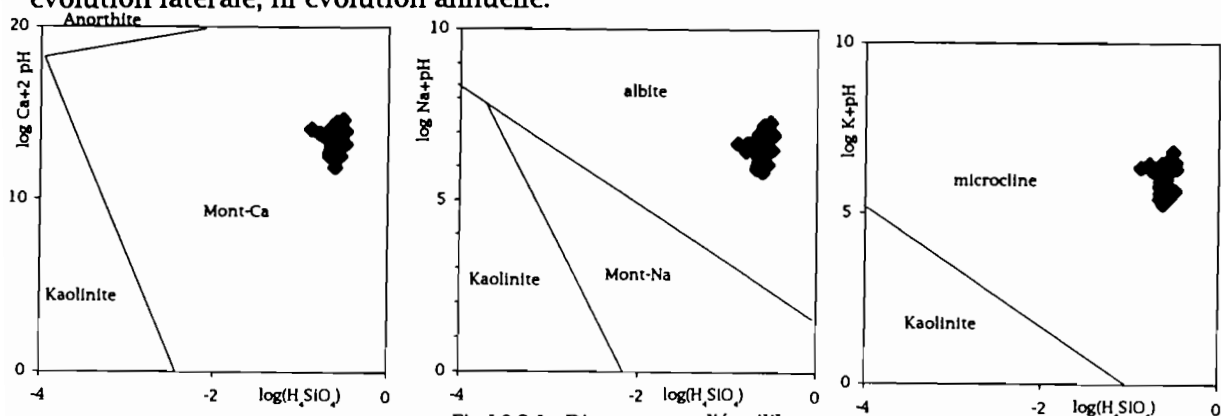


Fig.10.2.1 : Diagrammes d'équilibre

10.2.2 COMPORTEMENT DES ELEMENTS CHIMIQUES AU COURS DE L'ANNEE

10.2.2.1 Evolution annuelle des conductivités et du pH

Dans les eaux des fleuves, la conductivité est directement liée à la concentration en cations ou en anions et permet une estimation rapide et simple sur le terrain de la minéralisation moyenne. La relation entre les ions dissous (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) a été établie pour l'année 1990-1991 (fig.10.2.2).

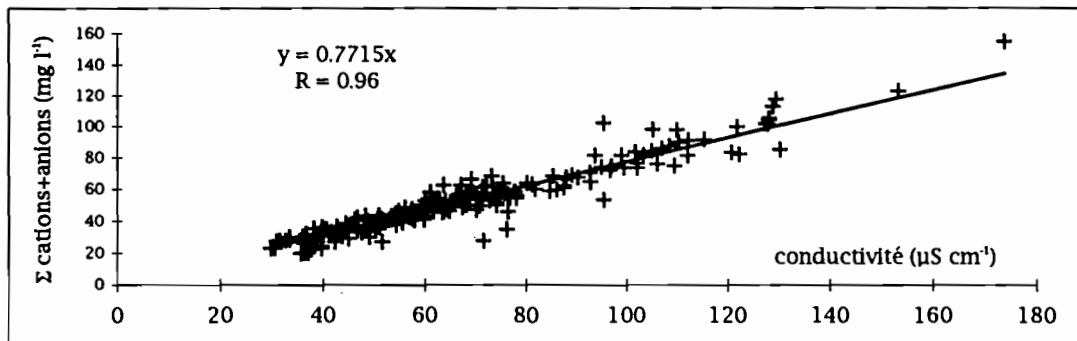


Fig.10.2.2: Relation conductivité/concentrations des éléments dissous

Les 230 analyses chimiques donnent une relation linéaire avec un coefficient de corrélation élevé ($R=0,96$).

$$\Sigma \text{ anions + cations (mg l}^{-1}\text{)} = 0,77 * C (\mu\text{S cm}^{-1})$$

Le pH des eaux est de 7,3 avec un coefficient de variation de 65,4 %. Les valeurs extrêmes observées vont jusqu'à 8,3 à l'étiage (Nantaka) et 6,7 en crue (Koulikoro). Ces valeurs sont toutefois exceptionnelles et ponctuelles. Sur chaque station, la moyenne est proche de 7,4 et l'écart entre les valeurs maximales et minimales est de 1 unité pH. Les pH les plus élevés s'observent en période d'étiage. La concentration de H^+ est fonction du pouvoir tampon des eaux et est aussi influencée par la végétation. Les valeurs minimums sont relevées en fin de crue lorsque l'activité biologique est la plus forte. L'action des végétaux des marais, humus de l'horizon superficiel crée une légère acidification des eaux du fleuve. La part relative du bicarbonate par rapport à la silice est également maximale en basses eaux. L'effet tampon de cet anion permet de diminuer l'acidité des eaux.

10.2.2.2 Variations des concentrations de juillet 1990 à décembre 1991

Pour les stations de Banankoro, Ke-Macina, Douna, Sofara et Akka, des analyses hebdomadaires ont été faites entre janvier 1990 et décembre 1991. Ce sont ces cinq stations qui sont conservées pour l'étude des variations annuelles des concentrations (figure 10.2.3). Seul le mois de juillet est manquant pour quelques stations.

Les concentrations sont fonction de l'évolution des débits. Ceci signifie que les éléments sont liés au cycle de l'érosion chimique (Kattan et Probst, 1986). Les variations d'une semaine sur l'autre, en dehors de la période du début de la crue, sont faibles.

Dès le début de la crue, les concentrations chutent. Cette diminution des concentrations est nettement plus rapide que l'augmentation. Les différences de concentration entre la fin de l'étiage et le début de la crue sont plus marquées à Douna et Sofara où il y a arrêt de l'écoulement durant plus d'un mois. La baisse des concentrations correspond à l'effet classique de dilution avec les eaux de ruissellement des pluies faiblement minéralisées.

Au début de la crue, en plus des eaux de ruissellement, on note l'arrivée des eaux de nappes et de l'horizon de surface des sols. Les nappes phréatiques, la zone non-saturée et les mares stagnantes subissent une évaporation intense durant la saison sèche qui permet un enrichissement des eaux en éléments dissous. Dès les premières pluies, il y a évacuation par effet piston de cette eau qui arrivera plus tardivement dans le fleuve. Ceci a été observé par Martins et Probst (1991) dans des régions où des flaques enrichies en sels étaient responsables de l'augmentation du TDS plus tôt que le maximum de la crue. La présence des nappes comme apport au fleuve a été montré par l'étude de l'oxygène-18 à Banankoro et à Douna. Si l'impact de cet apport sur la composition chimique moyenne de l'eau du Niger ne se fait pas sentir ou est plus tardive, il est responsable, sur le Bani de l'augmentation des concentrations des principaux éléments majeurs avant le maximum de la crue.

A la décrue, l'augmentation des concentrations à Ke-Macina est moins importante qu'à la station de Banankoro. Ceci est dû au fait que les volumes d'eau sont faibles à l'étiage à Banankoro alors que pour Ke-Macina, les eaux provenant du barrage de Selingue et stockées pendant la crue du Sankarani soutiennent les étiages du Niger; leurs faibles minéralisations freinent d'autant l'augmentation des concentrations à Ke-Macina.

Durant l'étiage, il y a une augmentation des concentrations des éléments majeurs sous l'effet de l'évaporation et sans doute de l'évapotranspiration (Mc Carthy et Metcalfe, 1991).

Pour les stations de Banankoro, Ke-Macina et Akka, les concentrations restent stables durant les hautes eaux puis augmentent lentement et régulièrement à la décrue.

Les concentrations en potassium continuent à diminuer à la décrue et les eaux ne s'enrichissent à nouveau que lorsque les débits sont plus faibles. Cet élément peut provenir de la végétation et donc de la composante ruissellement.

La silice suit l'évolution des cations majeurs avec une amplitude moindre toutefois. La faible augmentation des concentrations s'explique par le fait que l'eau du fleuve atteint rapidement son état d'équilibre vis à vis de cet élément et par la production de diatomées (micro-organismes essentiellement siliceux).

On a un système à deux sources. Durant l'étiage, l'eau vient des nappes phréatiques (cf chapitre 8.2.2). Le temps de contact avec la roche fraîche a été long et a permis un enrichissement chimique des eaux. Durant la crue, la composante du ruissellement « dilue » l'écoulement souterrain.

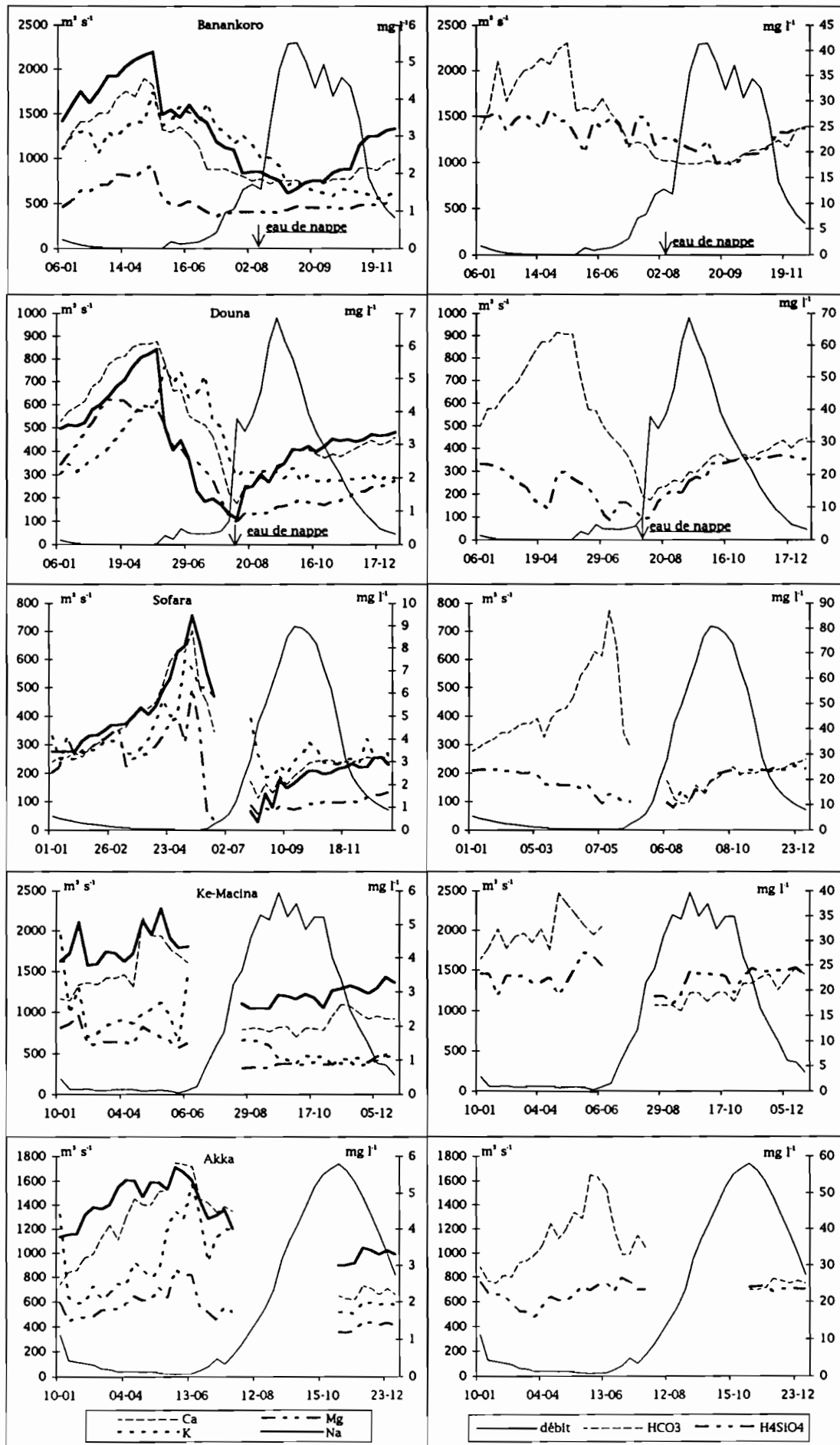


Fig. 10.2.3: Evolution des éléments majeurs en 1991 sur quelques stations du delta

Les rapports entre les éléments majeurs sur la station de Douna varient au maximum de 40 % au cours d'un cycle hydrologique (fig.10.2.4).

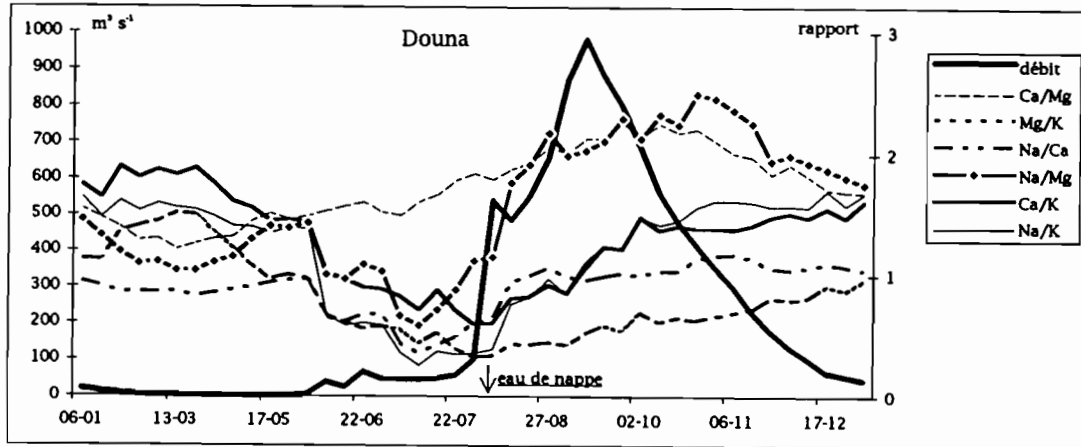


Fig.10.2.4 : Evolution annuelle des rapports entre éléments majeurs

Les rapports $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$, Na^+/K^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ montrent un minimum au début de la crue. Une augmentation du rapport se produit parallèlement à l'augmentation des débits et continue alors que la décrue est amorcée. Pour les rapports $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, le maximum est atteint au milieu de la décrue puis il y a une diminution du rapport durant l'étiage. Le calcium et le sodium augmentent rapidement à la décrue puis restent stables alors que le magnésium continue d'augmenter, ce qui crée un décalage.

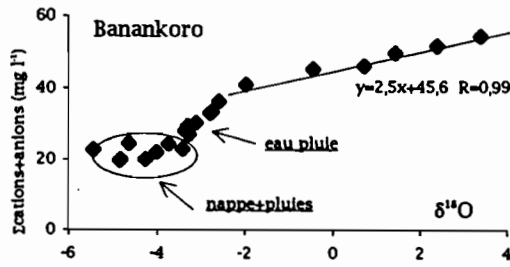
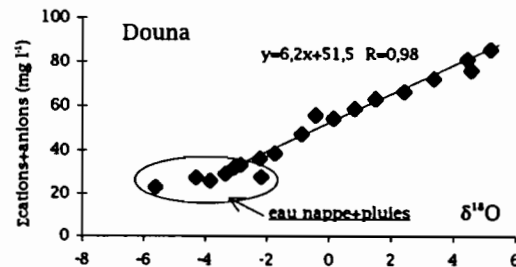
Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ suit une évolution inverse des autres puisque qu'il n'y a pas de diminution au début de la crue. A partir d'octobre, le rapport baisse régulièrement jusqu'au coeur de l'étiage, en mars, et augmente régulièrement ensuite. Cette évolution souligne le décalage du magnésium dont la diminution des concentrations commence au début de la crue. Ceci est dû au fait que le magnésium est très rapidement mobilisé dans les sols dès la montée des eaux (Pierson et Taylor, 1994).

Le rapport $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ est élevé et reste stable (CV=7 %) toute l'année.

L'évolution des concentrations qui semblait synchrone sur la figure 10.2.3 montre des particularités dues essentiellement au magnésium dont le comportement est particulier car apporté par la végétation par ruissellement.

10.2.2.3 Relation TDS/isotopes stables

La relation entre la somme des cations et anions et les teneurs en oxygène 18 à Douna et à Banankoro (figure 10.2.5 et 10.2.6) est médiocre pour les faibles concentrations correspondant au début de la crue et à la période des hautes eaux. Il y a un mélange entre les eaux des nappes et du ruissellement. Par contre, pour les conductivités plus élevées, en décrue et basses eaux, la corrélation est meilleure ($R=0,98$). Ceci signifie que la minéralisation des eaux est alors liée uniquement à l'évaporation uniquement (Fontes, 1976). Cette évaporation agit tout au long du trajet mais surtout, pour le Niger, en Guinée où il existe quelques zones d'inondations importantes (Brunet-Moret et al, 1986).

Fig.10.2.5 : Relation TDS/ $\delta^{18}\text{O}$ à BanankoroFig.10.2.6 : Relation TDS/ $\delta^{18}\text{O}$ à Douna

10.2.2.4 Relation entre la charge chimique totale dissoute et les débits

La relation entre la charge chimique totale dissoute (TDS) et le débit suit une tendance semi-logarithmique (fig.10.2.7). Réalisée pour toutes les stations et sur plusieurs cycles hydrologiques, la relation est toutefois bonne pour les stations amont de Banankoro, Douna, Sofara, Tilembeya, Nantaka. Pour les stations où le débit moyen annuel est faible, Kara, Awoye et Korientze, la relation est mauvaise. La relation est médiocre pour les deux stations majeures du bassin aval et la station de Ke-Macina. En allant vers le delta, l'évaporation enrichit inégalement l'eau. Toutes les pointes de crues des multiples mayos sont décalées et expliquent la dispersion des points sur les stations aval.

La relation entre les différents éléments majeurs dissous et le débit a été recherchée pour les stations de Banankoro de janvier à décembre 1991, de Douna, Ke-Macina et Akka de juillet 1990 à juillet 1991 (figure 10.2.8).

Les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et le bicarbonate suivent une évolution logarithmique pour les trois stations du Niger. Ceci est dû à l'origine commune de ces éléments principaux : les processus d'altération. On note à Ke-Macina et à Akka une accélération de l'augmentation des concentrations durant les basses eaux, qui explique les médiocres coefficients de corrélation calculés.

A Douna, comme pour les stations du Niger, les concentrations augmentent selon une loi logarithmique lorsque les débits diminuent. A partir d'un débit inférieur à $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, les concentrations restent constantes ou diminuent légèrement. Lorsque les concentrations sont élevées, l'eau arrive à saturation vis à vis de certains sels qui peuvent alors précipiter. Ce processus permet un arrêt de l'enrichissement des eaux en Ca^{2+} , Mg^+ et HCO_3^- en fin d'étiage. Seuls des phénomènes biologiques (photosynthèse, formation de coquilles...) peuvent expliquer une diminution des concentrations.

Le potassium a un comportement plus complexe car il provient de plusieurs sources. Il évolue avec le débit en formant une boucle (Davis et Keller, 1983). Les concentrations sont plus fortes en période de crue que pendant la décrue. Un enrichissement secondaire en K^+ par les végétaux permet une surconcentration de la zone non saturée dont l'eau sera drainée par effet piston un peu après le début de la crue. Le potassium est un élément qui est rapidement mis en solution par lessivage des sols (Pierson et Taylor, 1994). Il convient toutefois de relativiser les variations de potassium puisque les concentrations restent toute l'année proche de l'erreur relative de la mesure.

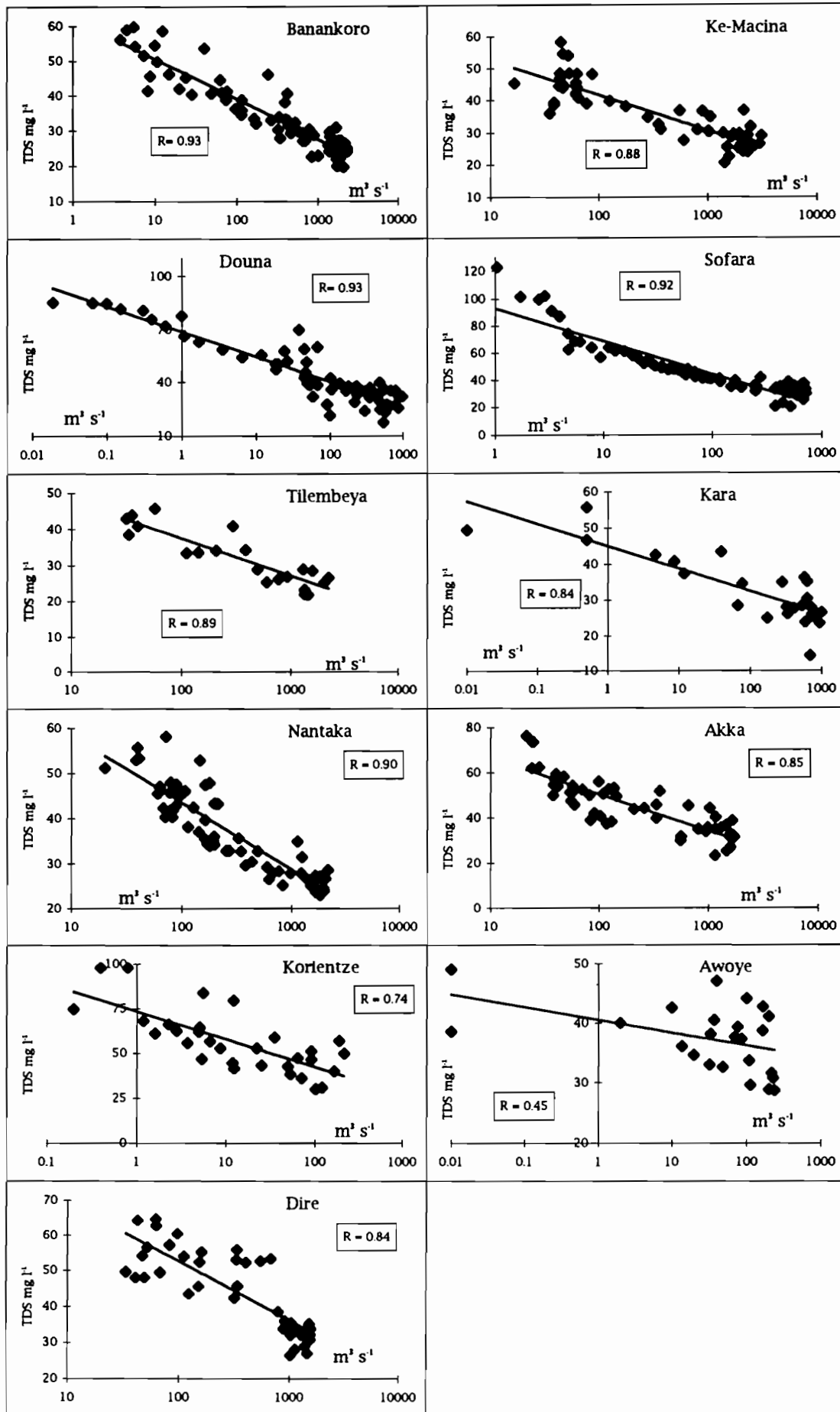


Fig.10.2.7: Relation entre la charge totale dissoute et le débit sur chaque station du delta

L'évolution de la silice ne suit pas la crue. Les concentrations de H_4SiO_4 sont stables durant la crue et la décrue et maximales à l'étalement de la crue et à l'étiage. Comme pour le magnésium, la silice peut avoir une origine terrestre, atmosphérique ou végétale. Elle provient des nappes et des eaux de ruissellement car les sols sont riches en silice amorphe recyclée par la végétation.

On peut remarquer que d'autres éléments, sodium et bicarbonate à Douna, sodium à Akka, forment des « boucles » en période de forts débits. Contrairement à l'évolution en boucle évoquée par Kattan et Probst (1986), les concentrations sont ici plus élevées à la décrue. Il y a un apport local par lessivage de la couche superficielle des sols enrichie par évaporation durant l'année précédente. Dans les sols subtropicaux, la réaction de type $\text{NaSiAlO}_8 + 8\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + 3\text{Si(OH)}_4 + \text{Al(OH)}_3$ peut apporter bicarbonate et sodium (Fontes et al, 1991).

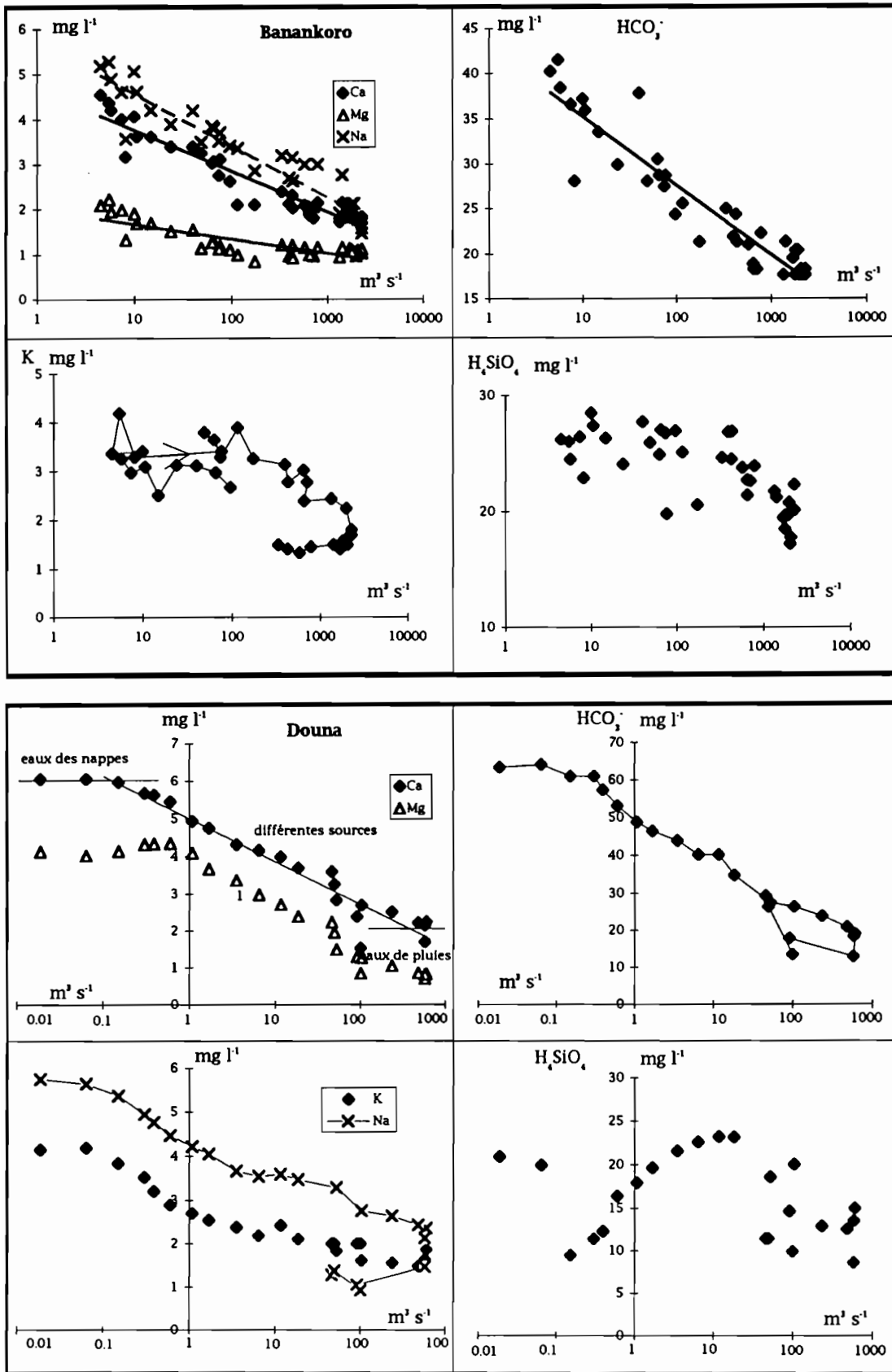


Fig. 10.2.8a : Relations entre les cations, le bicarbonate et la silice en fonction des débits en 1990-1991

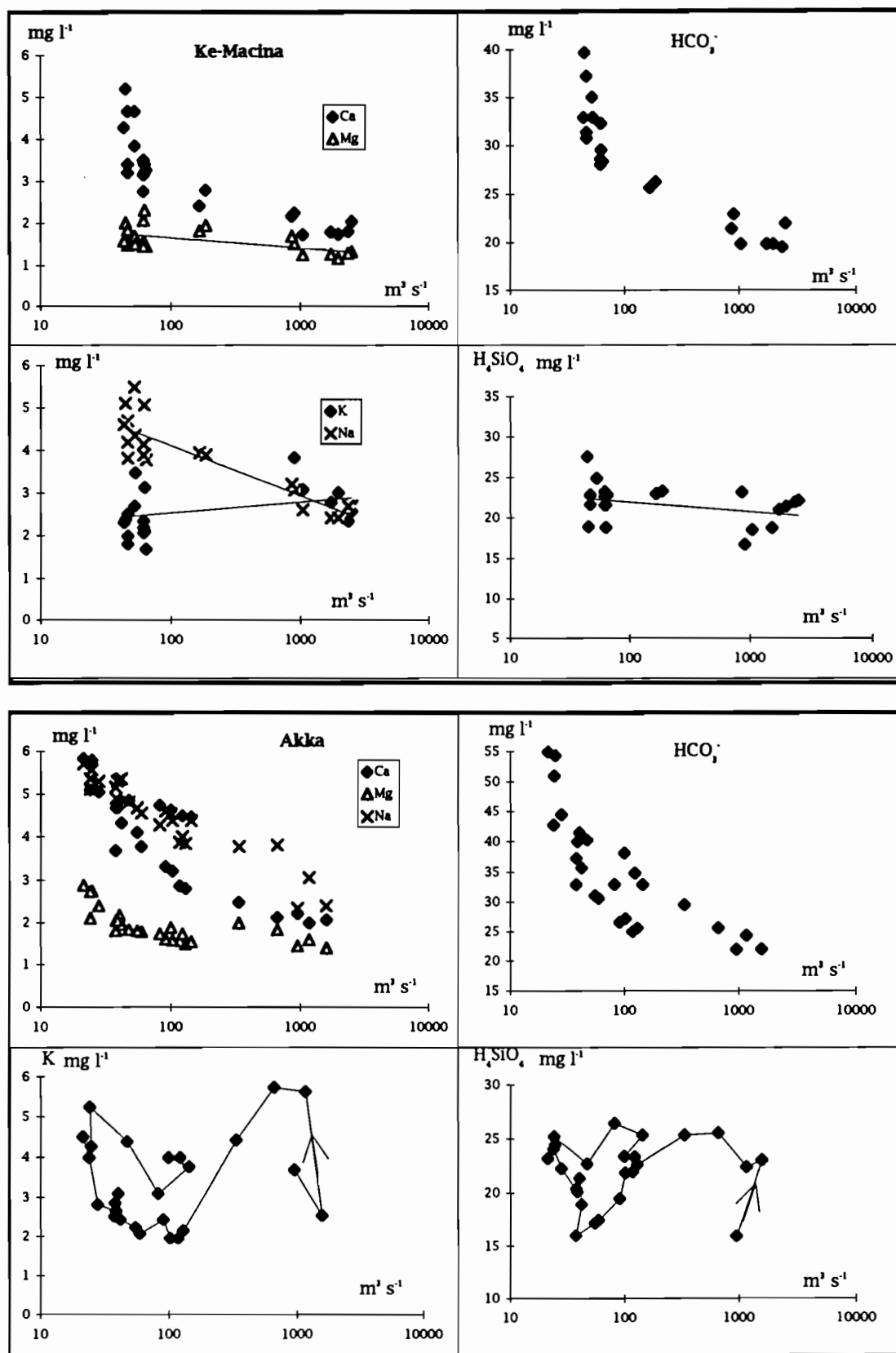


Fig. 10.2.8b : Relations entre les cations, le bicarbonate et la silice en fonction des débits en 1990-1991

10.2.2.5 Analyse en composante principale

Une analyse en composante principale centrée réduite a été effectuée à partir d'une base de données regroupant les eaux de 1990 à 1993 de toutes les stations du delta. Les analyses chimiques faites sur des eaux « stagnantes » n'ont pas été retenues, ni celles dont la balance ionique dépassait 10 %. L'analyse statistique porte sur 485 unités statistiques et 10 variables. Comme on pouvait s'y attendre, le tableau 10.2.4 montre de bonnes corrélations pour la conductivité et le Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- ainsi que pour le HCO_3^- et Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ .

	Q	MeS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	H_4SiO_4	pH	Cond
Q	1									
MeS	-0,02	1								
Ca^{2+}	-0,43	0,04	1							
Mg^{2+}	-0,46	-0,05	0,69	1						
K^+	-0,41	0,27	0,49	0,60	1					
Na^+	-0,45	0,15	0,64	0,58	0,45	1				
HCO_3^-	-0,50	-0,04	0,90	0,86	0,60	0,80	1			
H_4SiO_4	-0,16	-0,16	0,00	-0,11	-0,02	0,18	0,02	1		
pH	-0,29	0,00	0,46	0,29	0,19	0,37	0,44	0,02	1	
Cond.	-0,52	0,12	0,77	0,71	0,61	0,65	0,83	-0,09	0,41	1

Tableau 10.2.4 : Matrice des corrélations établie pour 10 variables physico-chimiques

Pour l'ACP centrée réduite, le premier axe (F1) représente 54,1 % de variance exprimée, le deuxième (F2) 12,8 %, le troisième 11 % et le quatrième 8 %. Les deux premiers facteurs sont représentés sur la figure 10.2.9.

L'axe 1, le plus représentatif, oppose les cations, le bicarbonate et la conductivité aux débits. La concentration des eaux en éléments dissous est donc en relation inverse avec les débits. Les teneurs en potassium sont moins liées à la crue. Les trois autres variables, pH, silice et MeS ne sont pas significatives dans ce plan F1.

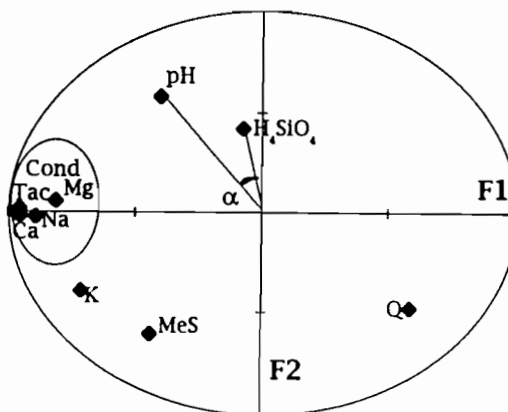


Fig.10.2.9 : Cercle des corrélations pour les variables selon le plan F1*F2

Le deuxième axe ne représente que 12,8 % des valeurs exprimées mais il est intéressant car il oppose le pH aux matières en suspension. La silice, bien que peu représentative sur l'axe F2 (<0,6) est liée aux pH. De fortes concentrations en silice se font au détriment du bicarbonate. Ainsi les eaux moins tamponnées sont légèrement plus acides. Ceci explique la légère corrélation entre ces deux facteurs ($\cos\alpha=0,75$).

Les variations de matières en suspension organiques et inorganiques règlent plus ou moins la transparence de l'eau. Les diatomées peuvent mourir en grand nombre selon les conditions physico-chimiques de l'eau du fleuve. Comme l'eau est en état d'équilibre vis à vis de différentes formes de la silice, les frustules de ces micro-organismes ne sont pas dissous mais repartent sous forme particulaire (MeS). Ainsi une augmentation des MeS peut être due à une augmentation de la silice sous forme particulaire, au détriment de la forme dissoute. Ces variables sont bien en opposition sur le graphique 10.2.9. Une augmentation des MeS correspondrait à une diminution de la silice dissoute et du pH. Pourtant, l'observation des variations de pH en fonction des MeS ne montre pas de corrélation (figure 10.2.10).

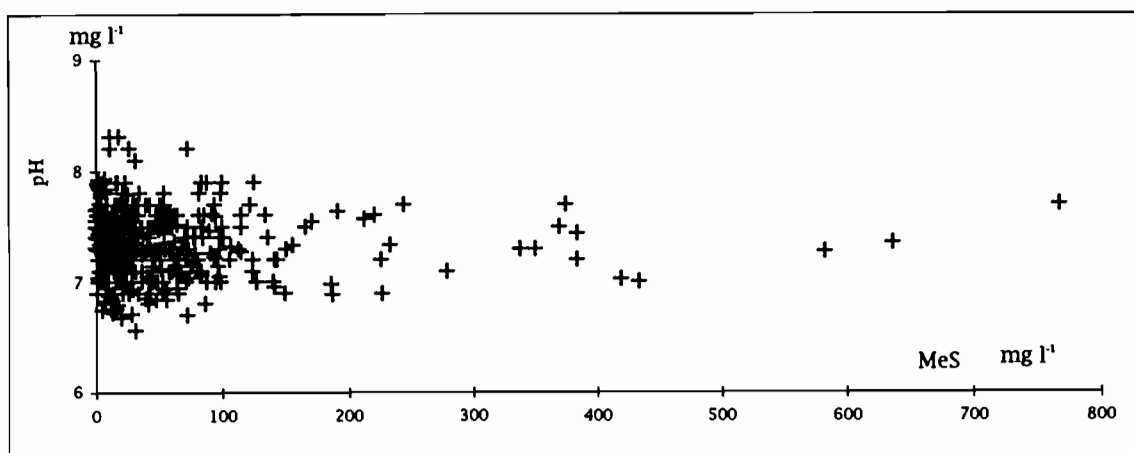


Fig.10.2.10 : Evolution du pH en fonction des MeS sur le delta de 1990 à 1993

L'hypothèse la plus logique est que l'axe F2 tienne compte des coefficients de variation des paramètres. Ainsi, la silice et le pH sont des variables qui évoluent peu sur le cycle hydrologique alors que les MeS et les débits ont des coefficients de variation très élevés (175 et 149 %).

Les autres axes (F3, F4 et F5) ne sont définis que par une seule variable et sont donc aléatoires.

Une étude statistique simple réunissant toutes les stations, sans distinction des cycles hydrologiques souligne l'importance des débits sur la concentration en éléments dissous des eaux. Le potassium suit un régime légèrement différent.

10.2.3 EVOLUTION SPATIALE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES EAUX

10.2.3.1 Comparaison de la composition chimique du Niger, du Bani et des eaux du delta

Le Niger et son affluent le Bani sont les grands fournisseurs d'eau pour la cuvette lacustre. L'origine géographique différente de leurs eaux et les différences morphologiques et géologiques de leurs bassins versants sont à l'origine d'une minéralisation légèrement différente.

Les deux cours d'eau présentent toutefois un aspect bicarbonaté sodique (tableau 10.2.5).

station	Ca mg l ⁻¹	Ca %	Mg mg l ⁻¹	Mg %	K mg l ⁻¹	K %	Na mg l ⁻¹	Na %	HCO ₃ ⁻ mg l ⁻¹	HCO ₃ ⁻ %	H ₂ SiO ₄ mg l ⁻¹	H ₂ SiO ₄ %
Banankoro	2.5	5	1.2	2	2.2	4	3.2	6	24.2	48	15.3	30
Ke-Macina	2.6	5	1.1	2	1.8	4	3.5	7	23.9	48	14.5	29
Tilembeya	2.3	5	1.1	2	1.4	3	3.2	7	23	49	14	30
Kara	2.2	5	1.2	2	2.2	4	3.3	7	22.7	47	14.7	30
Douna	3.9	6	2.2	4	2.9	5	3.3	5	35.5	58	11.5	19
Sofara	3.6	6	2.2	4	3.8	6	3.7	6	32.7	55	12.6	21
Nantaka	2.5	5	1.3	3	2	4	3.5	7	24.6	48	14.7	29
Akka	3.6	6	1.6	3	2.6	4	4.2	7	31.9	53	14.2	24
Awoye	4.6	7	1.8	3	3.4	5	5	7	37.6	54	14.3	20
Korientze	4.2	6	2.1	3	4.7	6	5.2	7	38.1	52	13.9	19
Dire	3.6	6	1.7	3	2.5	4	4.5	8	32.2	54	12.7	21

Tableau 10.2.5 : Composition chimique moyenne des eaux de Banankoro et du delta de 1990 à 1993 et part relative de chacun des éléments principaux par rapport au total dissous

Le Niger a des eaux relativement plus riches en silice et plus pauvre en bicarbonates. La pression de CO₂ atmosphérique est plus forte sur le bassin du Bani du fait de la végétation plus dense. Ainsi, le pH moyen des eaux du Bani sera plus basique que celui du Niger amont et aval. Le magnésium dans les eaux du Bani est un peu plus abondant (figure 10.2.11). L'on a vu que c'est le lessivage des roches qui donne le cachet chimique des eaux du Niger et du Bani. L'hydrolyse est le principal moteur de la chimie du fleuve Niger et Bani, le substratum rocheux entraîne donc cette légère différenciation observée sur les deux cours d'eau, excès de sodium et silice pour le bassin du Niger composé de roches granitoïdes et excès de calcium et bicarbonate pour le Bani situé sur des roches de type gréseux.

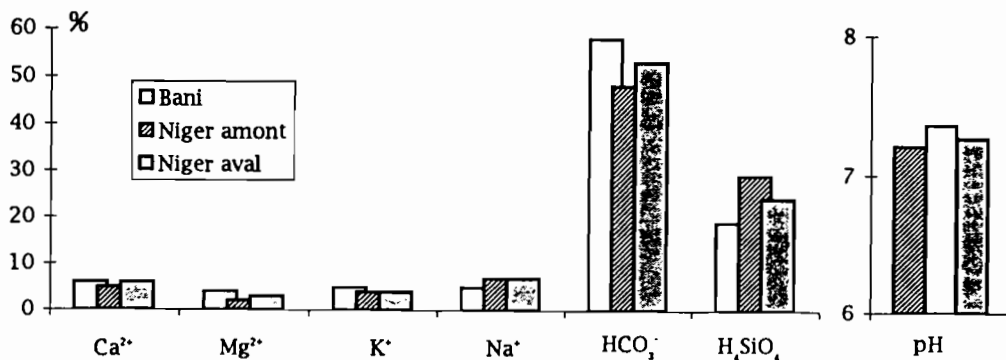


Fig.10.2.11 : Comparaison de la part relative (%) des principaux éléments dissous et du pH en amont et en aval du Niger et sur le Bani

A Nantaka, en aval de la confluence, la composition chimique moyenne est plus proche de celle du fleuve Niger. Etant donné le rapport de volume d'eau entre ces deux cours d'eau (2,6 pour 1), il est logique que les eaux de Nantaka reflètent le chimisme des eaux de l'affluent principal. D'autre part, il apparaît que, jusqu'à plusieurs kilomètres en aval de la zone de confluence, le Bani reste distinct du Niger en raison de la morphologie des lits et de la différence de température.

Pour les stations situées en aval du lac Debo, la proportion de bicarbonate et de silice est la même que celle du Bani. Pourtant, étant donné le rapport des volumes d'eau apportés par le Niger et le Bani, le cachet chimique ne peut pas être celui du plus petit affluent. C'est en traversant les plaines inondées que les eaux du fleuve acquièrent leur caractère propre, différent de celui du Niger en amont de Mopti. La silice diminue en importance relative de 10 % alors que tous les autres composés augmentent. Au fur et à mesure que l'eau s'écoule, elle acquiert un cachet de plus en plus évaporé et devient plus concentrée. A partir d'une certaine concentration, les précipitations de différentes formes de silice (quartz, silice amorphe, calcédoine) sont possibles, ce qui explique la stabilité de la silice dans le delta. D'autre part, la consommation par les diatomées, très abondantes dans ces régions lacustres, permet une diminution des concentrations de H_4SiO_4 .

Durant les diverses campagnes, des prélèvements ont été faits à intervalles réguliers le long de la branche principale du Niger de Nantaka à Dire. Les paramètres de conductivité, pH et température ont été mesurés systématiquement (fig.10.2.12, 10.2.13 et 10.2.14). Une analyse chimique des majeurs et de la silice a complété les mesures lors des campagnes de novembre 1992 et juillet 1993. Les valeurs des échantillons hebdomadaires ont été ajoutées à celles de la campagne de juillet 1993.

L'évolution de la conductivité montre à chaque période une augmentation régulière de l'amont vers l'aval (fig.10.2.12). Sous l'effet de l'évaporation les eaux s'enrichissent en éléments dissous. Cet enrichissement s'accélère à partir du lac Debo. En août et en septembre, il y a une diminution des conductivités après Niafunke.

Le pH évolue peu. Les eaux sont légèrement plus acides au niveau du lac Debo (fig.10.2.13). L'abondante végétation des marais entraîne la production de matière organique qui permet une baisse du pH. Les pH plus basiques relevés en juillet peuvent être dus au fait que les débits sont plus faibles, la température plus élevée et donc la pCO_2 atmosphérique plus forte. Au km 150, c'est à dire au niveau de Attara, il y a, au contraire, un pic de pH plus basique.

Les températures de surface ont également été mesurées (fig.10.2.14) car elles interviennent sur les conditions de précipitation-dissolution des minéraux. Le mois de mars se détache des autres mois avec des valeurs moyennes de 23°. A ce moment le lac Debo est plus froid que les autres sites. A la crue, de juillet à novembre, les températures moyennes tournent autour de 28° avec une hausse vers le lac Debo. Cette masse d'eau permet de retenir la chaleur et de diminuer les écarts journaliers.

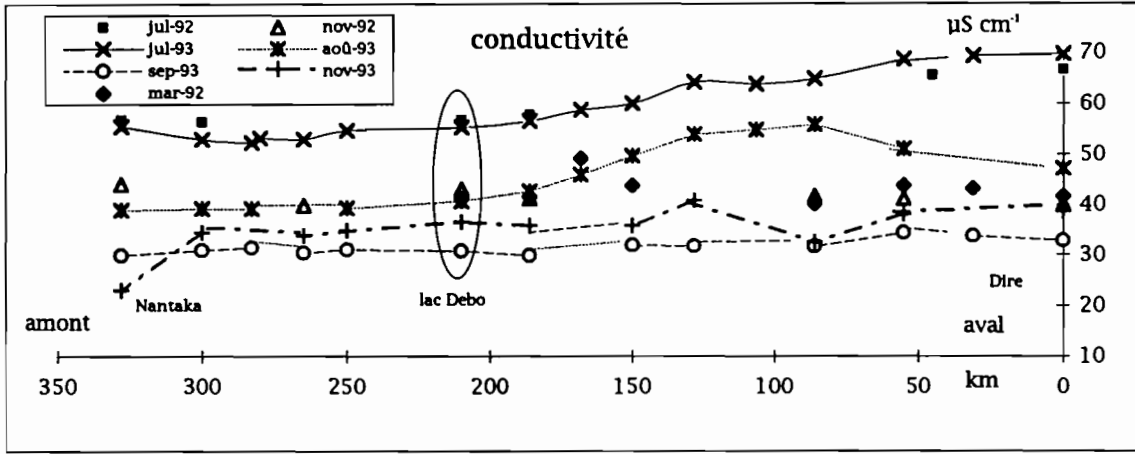


Fig.10.2.12 : Evolution spatiale des conductivités mesurées lors des campagnes

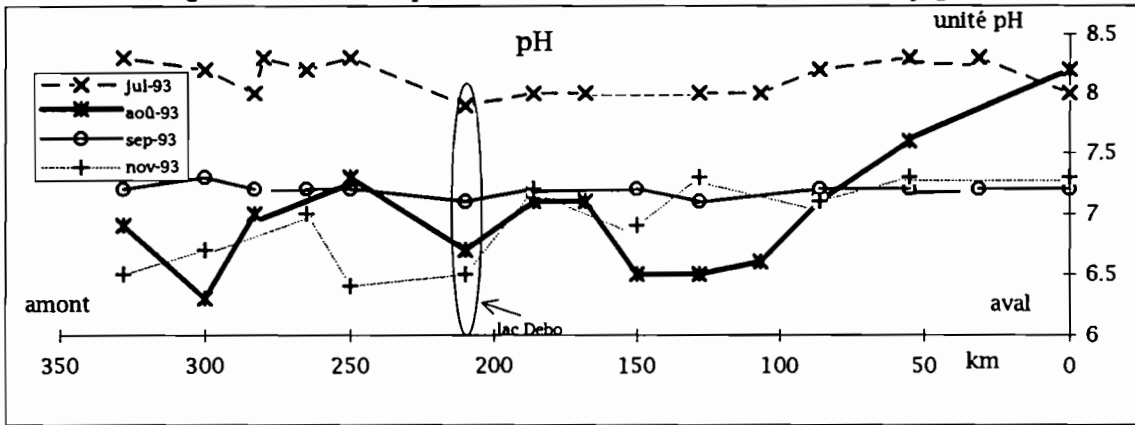


Fig. 10.2.13: Evolution spatiale du pH des eaux mesuré lors des campagnes

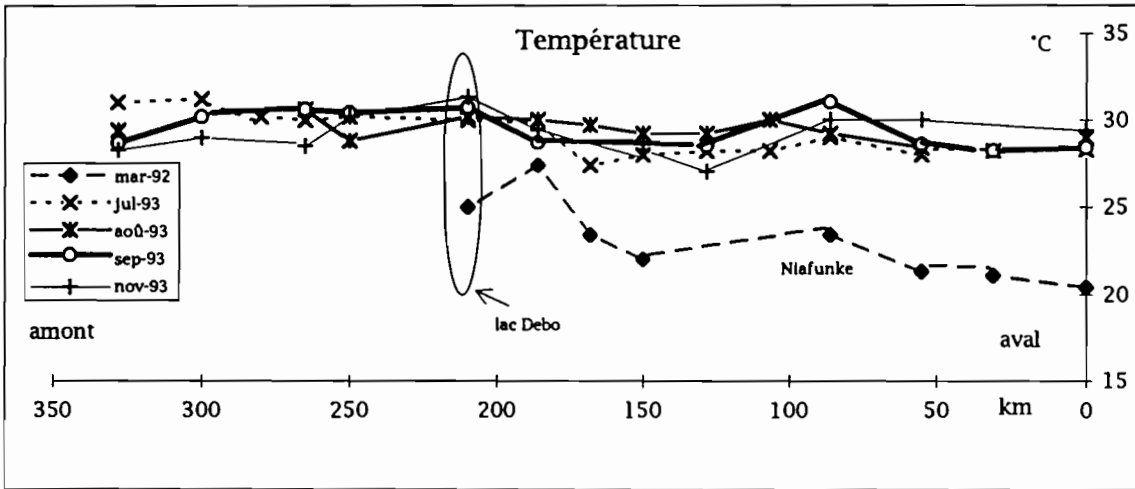


Fig.10.2.14 : Evolution spatiale des températures relevées lors des campagnes

Il y a également un pic de température au niveau de Niafunke dû peut-être à l'activité anthropique (troupeaux) de cette ville de près de 10000 habitants.

Les eaux de Nantaka sont les plus froides car il y a un mauvais mélange entre les eaux du Niger et du Bani dont les températures moyennes ne sont pas identiques. Les faibles températures enregistrés ce mois pourraient expliquer une diminution de sels, phénomène thermodépendant.

Une analyse chimique complète a été faite pour les échantillons recueillis lors des campagnes de novembre 1992 et de juillet 1993. En novembre, une grande partie des prélèvements a été réalisée sur le Diaka. Ces résultats sont interprétés parallèlement à ceux du fleuve Niger (fig.10.2.15).

En novembre 1992, sur le Niger, les concentrations augmentent de Nantaka à Dire. Le sodium et le magnésium sont les éléments les plus stables. Le potassium a un comportement particulier puisqu'il augmente de Nantaka à Niafunke et diminue ensuite en allant vers l'aval. A ce moment de l'année, la couverture végétale est maximum et la production biologique des plaines inondées permet l'apport de potassium.

Pour tous les éléments, les variations sont faibles car le lac Debo joue un rôle tampon et ne subit pas, au moment où les volumes d'eau sont les plus grands, un effet sensible de l'évaporation. Le phénomène d'hydrolyse régit les concentrations des eaux. Le diagramme de stabilité fait en figure 10.2.1. a montré que les éléments n'évoluent ni dans le temps ni dans l'espace car la solution reste à l'équilibre avec les minéraux présents.

Sur le Diaka, les volumes d'eau écoulés sont moindres et l'augmentation des concentrations sous l'effet de l'évaporation est donc plus importante entre les stations de Kara (séparation du Niger et du Diaka) et du Walado (partie sud-ouest du lac Debo).

L'évolution des concentrations est très irrégulière le long du cours d'eau. La région concernée subit actuellement les inondations les plus notables. En novembre, les mares et mayos sont en décrue et les eaux qui ont stagné pendant quelques mois se déversent alors dans le Diaka. Ce sont ces affluents qui marquent la qualité chimique des eaux du « bras principal collecteur ». Chaque point de concentration supérieur aux autres marque l'arrivée en amont d'un mayo ayant irrigué des plaines ou des champs.

En juillet, sur le Niger, les variations ne sont pas nettes. Il y a un décalage de l'onde de crue qui a apporté une eau « nouvelle » sur les régions amont qui reste peu influente dans le delta aval. Il y a une rupture de pente entre le lac Debo (pK 210) et Sebi (pK130). Après le lac, il y a une accélération de l'augmentation des concentrations. Cette région joue un rôle majeur car c'est, à cette saison, la seule zone inondée. Le potassium ne varie pas car la végétation y est peu abondante. Le magnésium reste également constant.

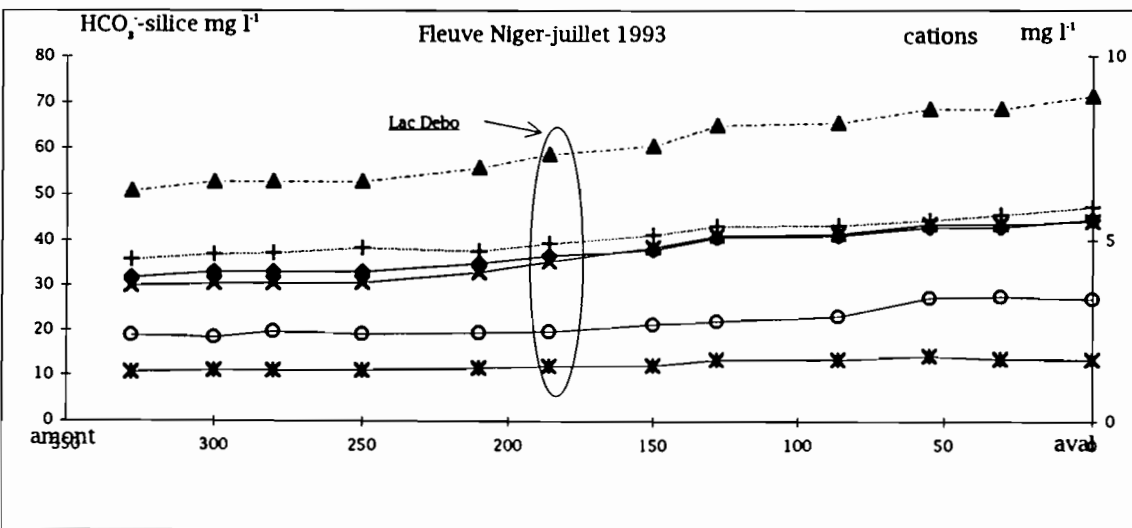
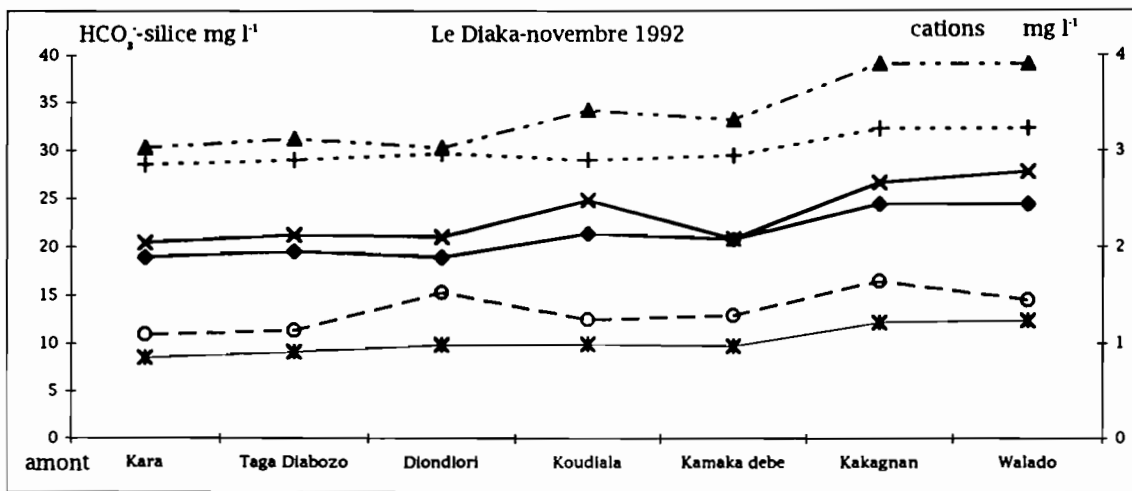
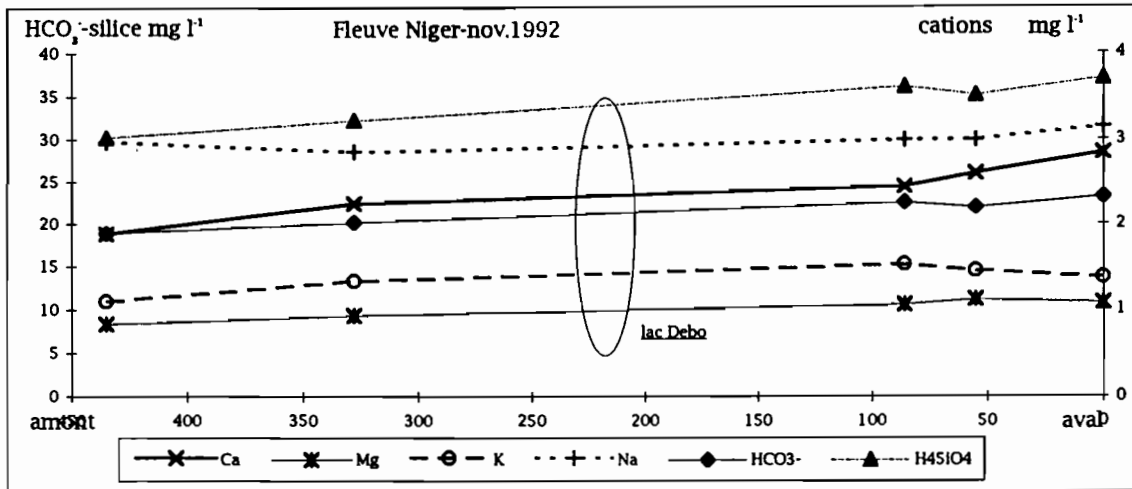


Fig.10.1.15 : Evolution spatiale des cations, bicarbonate et silice en nov.1992 et juillet 1993

10.2.3.2 Analyse statistique de données multitableaux

Nous avons étudié au paragraphe 10.2.2.5 une analyse en composante principale à partir de toutes les données disponibles. Cette étude a l'inconvénient de ne pas tenir compte des éventuelles particularités des stations et de l'état du système hydrologique (période de hautes eaux, étiage...). Une autre étude statistique a été inspirée de l'analyse multitableaux telle que celle évoquée par Doledec et Chessel (1987) puis Thioulouse et Chessel (1987). Le tableau de contingence initial réunit, pour chaque station (10 groupes), quatre lignes correspondant à la période d'étiage, la montée des eaux, le maximum de la crue et la décrue et 9 colonnes correspondant aux variables physico-chimiques (tableau 10.2.6).

STATION	DATE	débit	Ca	Mg	K	Na	Tac	H ₂ SiO ₄	pH	conduc
Akka	étiage	58	4.9	1.4	2.4	4.5	37.5	24.7	7.6	65.3
	crue	1040	2.6	0.4	1.8	3.2	20.4	24.5	7.1	43.7
	max.	1660	2.2	1.2	2.1	4.5	27.8	27.0	7.7	51
	décrue	362	3.5	1.3	2.1	6.2	37.8	25.0	7.8	56.8
Awoye	étiage	0	8.2	2.1	5.3	9.7	61.0	29.1	7.7	111.0
	crue	201	2.4	0.9	1.6	2.7	18.9	20.8	7.0	42.0
	max.	219	2.8	1.1	1.3	2.3	22.6	21.8	6.9	43.3
	décrue	33.3	2.7	1.3	2.3	3.6	27.5	17.0	7.5	49.0
Banankoro	étiage	12	4.4	1.5	2.6	6.5	42.1	31.6	7.5	77.9
	crue	898	2.0	0.6	1.5	3.3	19.8	25.6	7.3	41.3
	max.	2180	2.0	0.7	0.9	3.0	19.2	23.7	7.3	37.2
	décrue	530	2.4	0.8	1.0	4.1	23.2	30.7	7.3	45.5
Dire	étiage	83	4.9	2.1	2.7	5.2	41.5	20.8	7.4	75.2
	crue	1020	2.3	0.8	1.3	2.6	18.3	20.6	6.9	39.5
	max.	1560	2.6	1.0	1.8	2.9	20.7	22.3	7.0	44.6
	décrue	318	2.9	1.4	2.4	4.5	29.9	21.8	7.7	51.0
Douna	étiage	11	6.9	3.5	4.5	4.0	57.7	21.6	7.4	102.0
	crue	26	4.7	2.3	4.3	2.6	37.2	15.6	7.4	68.9
	max.	846	2.8	0.8	2.0	3.3	23.2	23.7	7.1	44.8
	décrue	225	3.0	1.0	1.8	3.4	24.7	24.6	7.2	48.2
Kara	étiage	5	3.5	1.3	2.1	3.9	30.2	24.4	7.4	57.3
	crue	335	2.0	0.7	1.4	2.6	18.0	22.9	7.1	38.2
	max.	946	2.1	0.8	1.1	2.3	17.1	21.3	7.0	35.0
	décrue	67	2.1	0.9	1.2	3.0	20.7	24.5	7.6	36.1
Korientze	étiage	0	1.4	0.4	5.5	9.9	26.8	31.2	7.4	72.3
	crue	50	3.1	1.2	3.0	4.5	27.8	21.2	7.3	58.6
	max.	72	3.1	1.3	2.2	2.7	25.6	12.7	7.6	44.5
	décrue	0	3.5	1.6	3.1	3.9	32.3	15.9	7.5	53.6
Macina	étiage	39	3.3	0.9	1.9	4.1	26.2	27.2	6.8	54.2
	crue	1440	1.0	0.3	1.6	2.9	14.0	23.9	6.8	37.8
	max.	3000	1.4	1.0	1.6	2.8	18.9	22.4	7.3	37.2
	décrue	285	2.8	1.0	1.2	3.8	25.3	20.5	7.3	41.9
Nantaka	étiage	79	3.7	1.4	2.3	4.5	30.0	19.8	7.5	58.6
	crue	831	2.0	0.8	1.4	2.9	17.1	21.7	6.9	38.2
	max.	2060	2.3	0.9	1.0	2.7	18.9	22.2	6.9	38.2
	décrue	380	2.2	1.0	1.1	3.1	22.0	20.9	7.5	35.5

Tilembeya	étiage	58	3.9	1.4	2.1	3.9	33.3	23.8	7.2	62.4
	crue	932	1.9	0.8	1.5	2.6	18.0	21.5	7.3	35.7
	max.	2240	2.2	0.8	1.5	2.6	18.6	21.5	7.1	36.2
	décrue	498	2.1	0.9	0.9	3.2	21.4	21.5	7.6	34.9

Tableau 10.2.6 : Données physico-chimiques (débit en $m^3 s^{-1}$; dissous en $mg l^{-1}$; cond en $\mu S cm^{-1}$) utilisées pour l'analyse statistique

L'analyse classique de ces données amène à la construction de graphiques tels que ceux exposés sur la figure 10.2.16. L'étude est complexe et les liens entre les facteurs temps (période de crue), espace (distance entre les stations) et variables physico-chimiques sont difficiles à mettre en valeur. C'est pour cette raison que l'on a été amené à faire une analyse statistique multitableaux.

Pour la première analyse, les variables centrées réduites sont réorganisées de manière à avoir en colonne les dates d'échantillonnages et en lignes les neufs variables. Cette analyse permet de différencier chaque période d'étude. L'ACP fait ressortir un axe F1 représentant 76,3 % des échantillons, l'axe 2 prend 20,5 % de la variance et l'axe 3 2,7 % (figure 10.2.17).

L'axe 1 permet donc d'expliquer plus des 2/3 des résultats obtenus. Cet axe représente un effet taille qui met en évidence la stabilité annuelle des données. La spécificité chimique de chaque station est conservée au cours du cycle hydrologique.

Le deuxième axe met en valeur la spécificité des mois d'étiage. C'est donc au niveau de la période de basses eaux que se font les particularités chimiques, notamment la concentration des eaux, de chaque station.

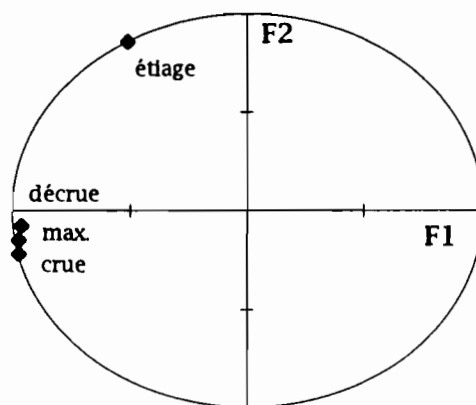


Fig.10.2.17 : Cercle des corrélations des quatre périodes selon les facteurs 1 et 2 de l'ACP

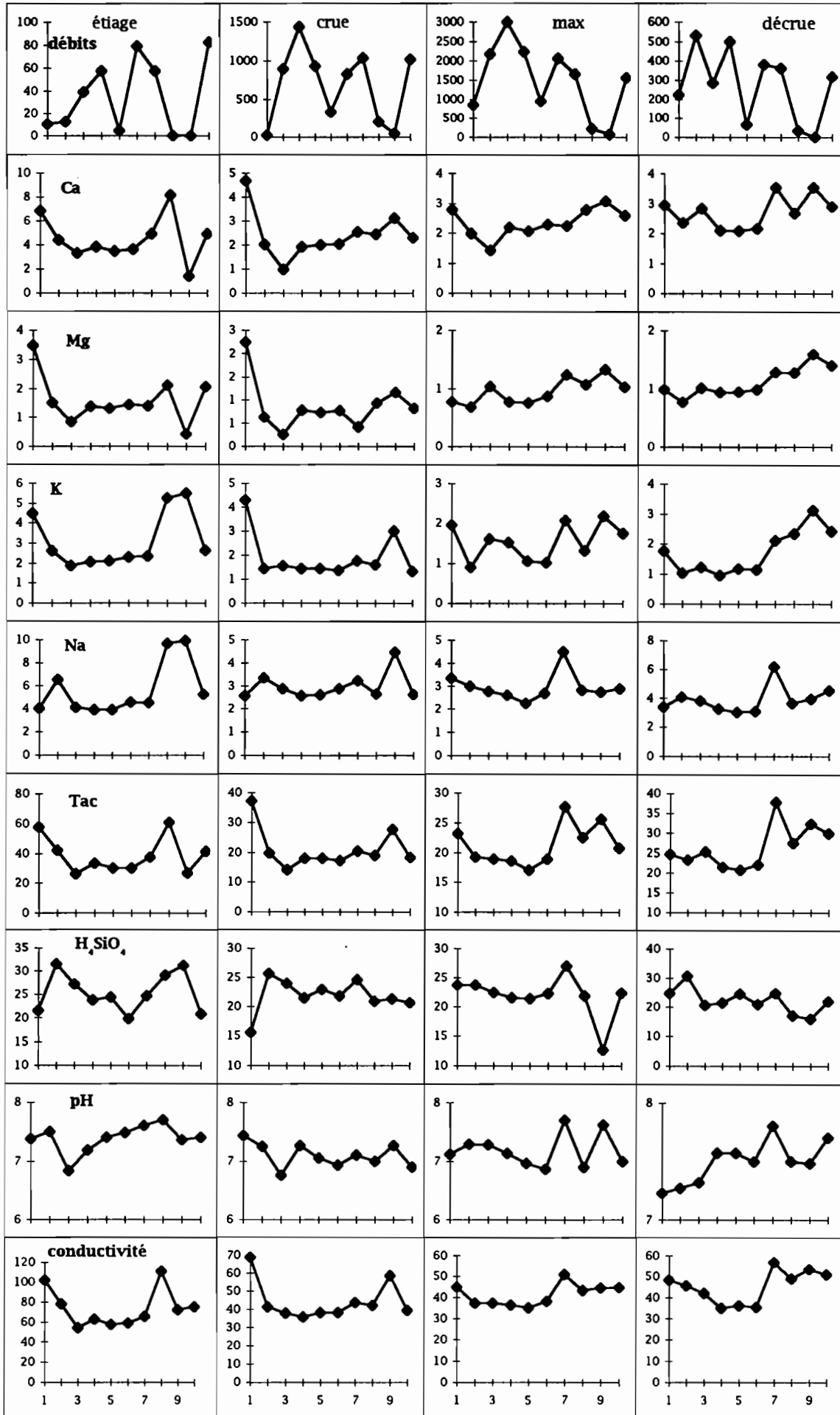


Fig.10.2.16 : Evolution des paramètres physico-chimiques (pH, éléments dissous (mg l⁻¹), conductivité (µS cm⁻¹) et débit (m³ s⁻¹), en période d'étiage, montée des eaux, maximum de crue et décrue sur 10 stations

(1:Douna 2:Banankoro 3:Macina 4:Tilembeya 5:Kara 6:Nantaka 7:Akka 8:Awoye 9:Korlentze 10:Dire)

Nous avons séparé l'espace des individus en fonction de chacun des paramètres physico-chimiques et représenté graphiquement ces données selon le plan factoriel F1*F2 (fig.10.2.18).

Les débits sont bien représentés sur l'axe 1 avec une séparation nette entre les stations qui ont un débit faible ou nul en basses eaux comme Korientze, Awoye, Kara et Douna et les stations à écoulement plus régulier.

L'axe 2 oppose les stations de Dire et Nantaka aux stations de Banankoro et Ke-Macina. Si l'on relie les points correspondant au bras principal du Niger, on observe une évolution régulière selon l'axe 2 avec des valeurs plus négatives à Banankoro et plus positives à Dire et un écart à Nantaka. Cet écart est dû au mélange des eaux du Bani. De l'amont vers l'aval, les écarts de débit entre l'étiage et la crue s'atténuent.

Le facteur 2 met en évidence des variations dues à l'évolution spatiale du débit alors que le facteur 1 ne tient compte que du débit absolu moyen sur l'année.

Les variables chimiques ont une évolution identique. L'enrichissement se fait en fonction du débit et en fonction de l'évolution spatiale. Le facteur 2 représente mieux les variables physico-chimiques. Les forts débits n'ont donc pas d'influence majeure sur la composition chimique moyenne. Par contre il existe une différenciation chimique légère entre les différentes stations du delta.

Les quatre stations très proches géographiquement de Ke-Macina, Tilembeya, Kara et Nantaka sont toujours regroupées sur les graphiques b à i alors que Kara a un module moyen plus faible que les trois autres stations. Le facteur 2, qui permet d'expliquer une augmentation des concentrations sous l'effet de l'évaporation durant l'étiage regroupe, en général, les stations de Korientze, Awoye et Douna. Si les eaux de la station de Kara ne se retrouvent pas dans ce groupe c'est que la chimie des eaux est proche de celle du bras principal du Niger. Il y a, à cette station, un apport constant d'eau du fleuve mais qui ne s'écoule que très faiblement. L'eau retourne alors vers le Niger puisque l'écoulement est nul en fin d'étiage. Il y a donc, en basses eaux dans le Diaka inversion probable d'une partie du courant.

Le sodium est très peu exprimé sur l'axe 1, son importance relative ne dépend pas ou peu du débit moyen. Les stations aval à faible débit, Awoye et Korientze, se singularisent sur ce graphique. Les concentrations en sodium sur ces deux stations sont très fortes en période d'étiage. Awoye est la station qui subit le plus l'effet de l'évaporation en basses eaux. Par contre, les eaux de Korientze se concentrent relativement peu en calcium, magnésium, bicarbonates en l'absence d'écoulement réel. Des observateurs ont noté sur cette station une inversion du sens de l'écoulement en basses eaux.

Le graphique du pH ne permet pas de distinctions entre les différentes stations, ce paramètre varie peu spatialement et annuellement.

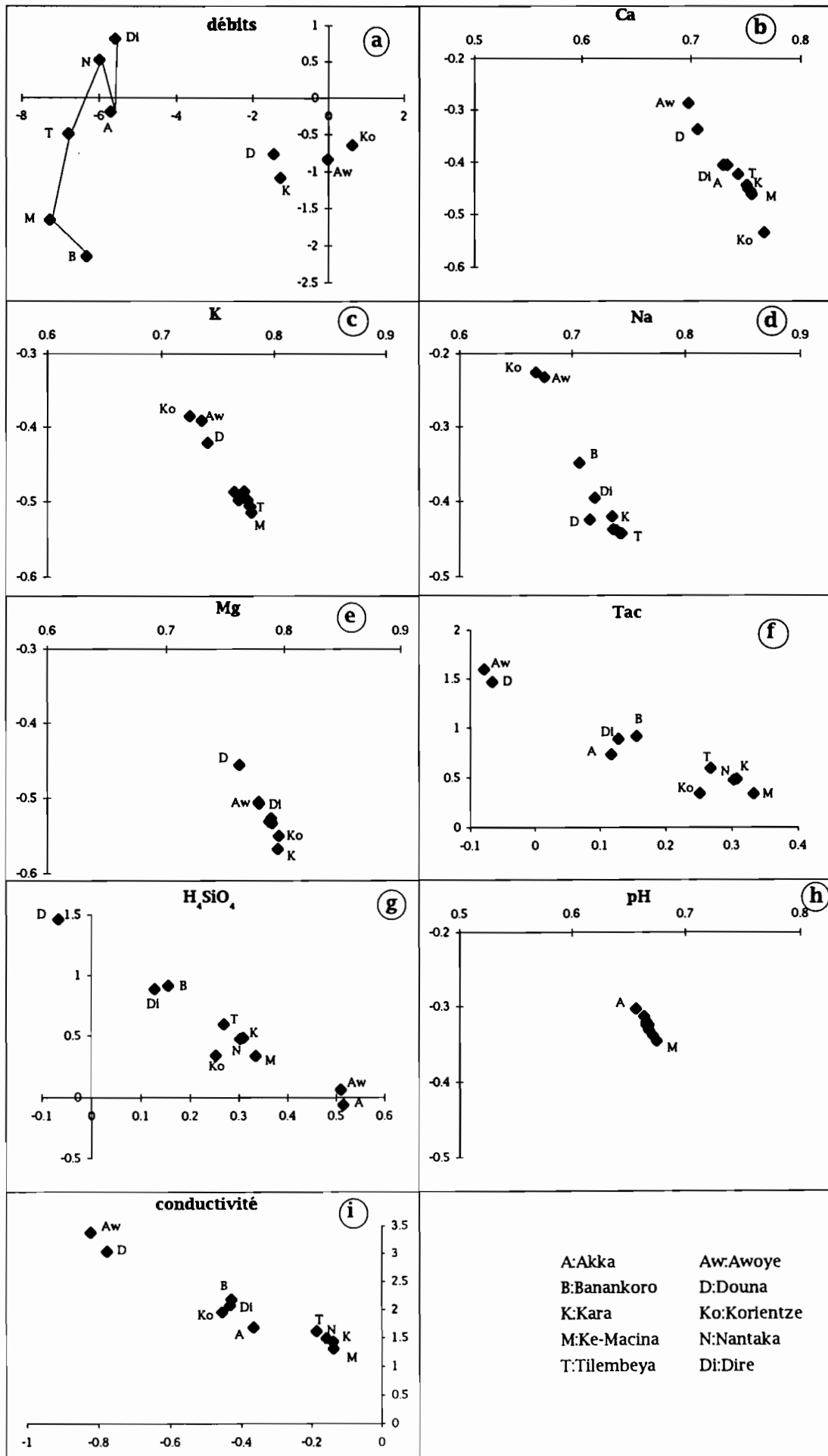


Fig.10.2.18 : Représentation de chaque variable physico-chimique de l'ACP

La station de Douna se détache des autres sur le graphique de la silice et du bicarbonate. Cette station est bien représentée sur l'axe 2 et l'axe 1. La station de Awoye montre également un déficit moyen par rapport aux autres stations en bicarbonates.

Le graphique général (fig.10.2.19) souligne que le facteur 1 est surtout représenté par les débits. Les variables physico-chimiques s'expriment plus sur l'axe 2 qui met en valeur l'augmentation des concentrations en période d'étiage. La conductivité, les bicarbonates et la silice sont les variables les plus représentatives. Il convient de noter que les autres variables chimiques sont moins significatives dans ce plan F1*F2.

En résumé, il ressort que la différence de débit moyen aux stations ne permet pas une différenciation chimique. C'est durant l'étiage que les écarts de concentrations des eaux sont les plus importants entre les stations à faible ou fort débit moyen.

Pour mettre en valeur les différences chimiques à chaque saison, une ACP centrée réduite a été calculée à toutes les périodes en utilisant les stations comme individus et les paramètres physico-chimiques comme variables. Le résultat de chaque ACP a été rassemblé dans un graphique réunissant à la fois l'espace des variables et l'espace des unités statistiques (figure 10.2.20). Ces quatre groupes permettent d'exprimer les relations inter-station pour chaque période du cycle hydrologique.

Le facteur 1 de l'ACP centrée réduite prend en compte 50 % des variations en période d'étiage et plus de 70 % en crue. Le facteur 2 est surtout bien exprimé en période d'étiage (30 %) alors qu'il est de 15 % en période de crue.

Durant la période de crue, l'axe 1 sépare le débit et les teneurs en silice des autres variables. Les concentrations en éléments dissous sont plus élevées sur la station de Douna uniquement. Les teneurs en silice augmentent parallèlement au débit.

L'axe 2 représente des écarts de composition chimique de quelques stations qui sont dus à une spécificité de ces stations ou à une pollution locale. Durant la montée des eaux, la station de Korientze est enrichie en sodium.

Durant l'étalement maximum des eaux, les stations suivent un comportement chimique identique et ne sont représentatives ni sur l'axe 1, ni sur l'axe 2. Les éléments dissous (sauf la silice) sont opposés. C'est toujours le débit, et par conséquent les concentrations moyennes en éléments dissous, qui explique la différenciation chimique aux stations. Pour les stations amont de Banankoro et Douna, c'est la géologie des aquifères qui explique la différence de Ca^{2+} et Na^+ notamment. Les deux stations de Akka et Korientze ont les concentrations moyennes les plus élevées.

Le facteur 2 (26 %) met en opposition le calcium et le sodium. Korientze est responsable de l'écart de calcium alors que Akka se situe près du sodium. Ceci se résume à des pics sur le graphique 10.2.16.

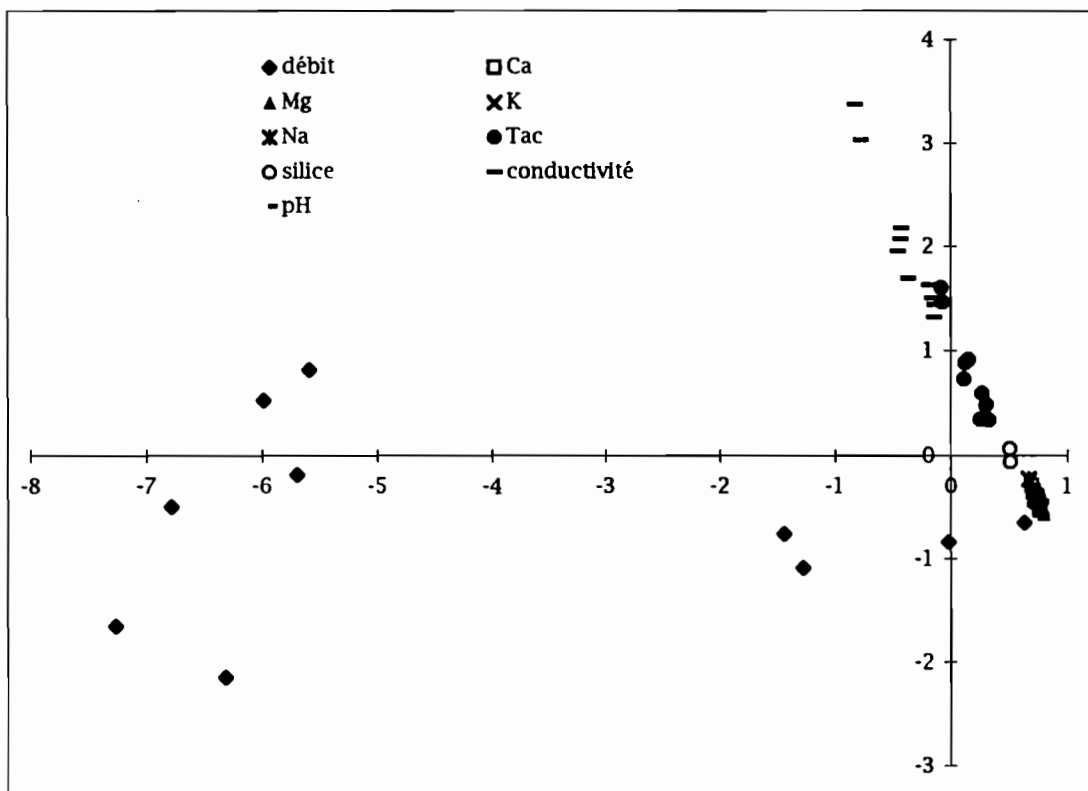


Fig. 10.2.19: Représentation de l'espace des unités statistiques pour l'ACP selon les facteurs F1 et F2

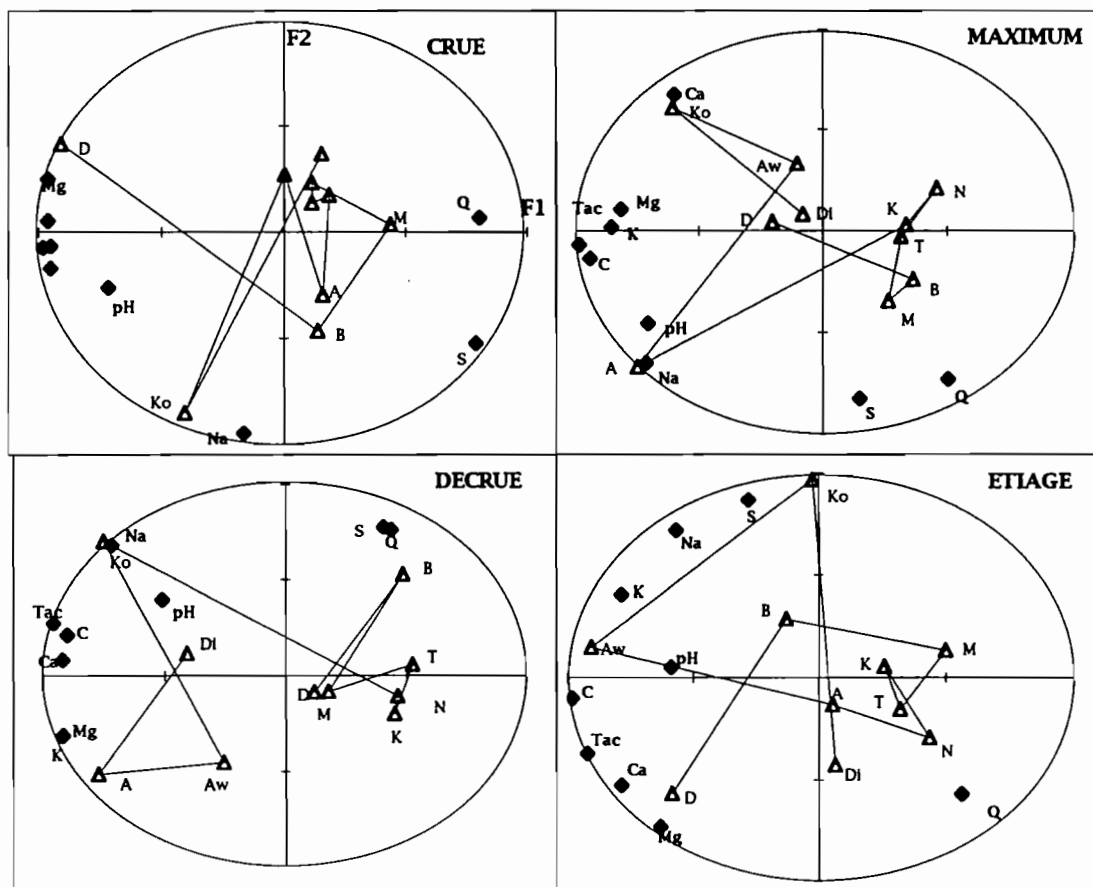


Fig.10.2.20 : Représentation simultanée du cercle de corrélation des variables et de l'espace des unités statistiques

En décrue, l'axe 1 représente toujours la relation entre les volumes écoulés et les concentrations en éléments chimiques. Le débit est peu représenté sur l'axe 1. Durant la phase de décrue, les concentrations en éléments dissous ne sont plus en relation directe avec le débit. On a vu qu'il peut se produire un décalage qui est dû au drainage de la zone non saturée en basses eaux et mise en charge lors des premières pluies et dont les eaux interstitielles sont plus concentrées. C'est l'écoulement hypodermique qui apporte de nouveaux éléments dissous ou le drainage de zones inondées pour les stations aval. Banankoro et les stations amont du delta se situent à l'opposé des stations aval.

Le sodium, le débit et la silice s'expriment sur l'axe 2. Banankoro, Korientze ont alors un comportement opposé à celui de Akka et Awoye. Banankoro s'approche du pôle sodium alors qu'en décrue, Douna s'approche du pôle calcium. Ceci permet la différenciation des bassins versants. Le socle granitique, plus riche en sodium, domine sur le haut Niger alors que les grès plus calciques sont majoritaires sur le bassin amont du Bani.

Durant l'étiage, les éléments chimiques suivent un fonctionnement identique opposé aux débits. La silice, la magnésium, le pH et le sodium ne sont toutefois pas significatifs dans ce plan factoriel. Awoye et Douna sont les stations dont l'enrichissement chimique est le plus fort. Korientze se détache des autres sur l'axe 2.

L'axe 1 prend en compte les variations de concentrations selon le débit moyen de chaque station. Ce comportement a déjà été souligné dans les paragraphes précédents. L'originalité de cette ACP est de montrer une augmentation des concentrations de la silice au moment de la montée des eaux. A la décrue, l'arrivée de l'écoulement hypodermique peut être une explication à l'absence de relation entre les concentrations moyennes en TDS et le débit.

Le deuxième facteur permet de définir des points « anormaux » par rapport à la composition chimique moyenne de la station considérée.

Il existe une part de subjectivité dans le choix des analyses en période de montée des eaux et de décrue. Ceci peut entraîner un mauvais choix qui se reflète, par exemple, par de faibles concentrations à la station de Awoye par rapport à la station de Akka en période de décrue.

Nous arrêtons l'analyse statistique multitableaux car on constate que peu de facteurs agissent sur la qualité des eaux. Le comportement annuel face à la variation de l'écoulement est important ainsi que des enrichissements chimiques locaux.

L'analyse en composante principale a été faite avec les concentrations de MeS (chapitre 10.2.2.5) mais les variations hebdomadaires de concentrations masquent alors les autres phénomènes. C'est pourquoi ce facteur n'a pas été pris en compte dans cette analyse.

10.3 BILAN MENSUEL DU TRANSPORT D' ELEMENTS DISSOUS

Le calcul du transport mensuel de matières dissoutes a été fait sur toutes les stations selon la même méthode que celle utilisée pour les matières en suspension. Le décalage observé entre les stations et qui correspond au décalage de l'onde de crue est celui résumé sur le tableau 9.2.1. Les dates utilisées tout au long de ce paragraphe sont celles du passage de l'eau à Ke-Macina.

10.3.1 TRANSPORT SAISONNIER D'ELEMENTS DISSOUS DE 1990 A 1994

Le transport annuel de TDS suit l'évolution des débits pour les stations amont pour les années 1990 à 1993 (fig.10.3.1). Le rapport entre les volumes d'eau écoulés et les concentrations est très élevé ce qui limite les variations de concentration.

Pourtant, sur la station de Douna, le décalage est net en 1991-1992 avec un maximum de TDS plus tardif que le maximum de débit.

Ce décalage ne se confirme pas pour les autres années. Pour les années 1992-1993 et 1993-1994, le nombre d'analyses chimiques ne permet pas une étude très détaillée de l'évolution du transport.

A Akka, Awoye et Korientze, le pic du transport d'éléments dissous se produit plus tard que le pic du débit en 1992-1993.

Pour Dire, le transport n'est pas régulier, ceci plus particulièrement en 1993. Le total dissous n'est pas, pour les stations aval, en relation directe avec les débits. L'arrivée plus tardive d'éléments dissous peut être due à la vidange des zones inondées ou à l'écoulement retardé de l'eau des sols.

Si l'importance du transport dépend de la taille de la crue en général, il y a quelques exceptions. A Ke-Macina en 1992-1993, le transport est supérieur à celui des autres années comme à Nantaka en 1993-1994. Au contraire, le transport de TDS à Dire en 1993-1994 est faible.

La mesure des éléments dissous est difficile du fait des faibles concentrations et de la difficulté de conservation des eaux, et la multiplication des valeurs par des volumes d'eau importants accentue les écarts de mesure. Il convient de relativiser les différences de transport éléments dissous lorsque l'on ne dispose que d'un seul point de mesure.

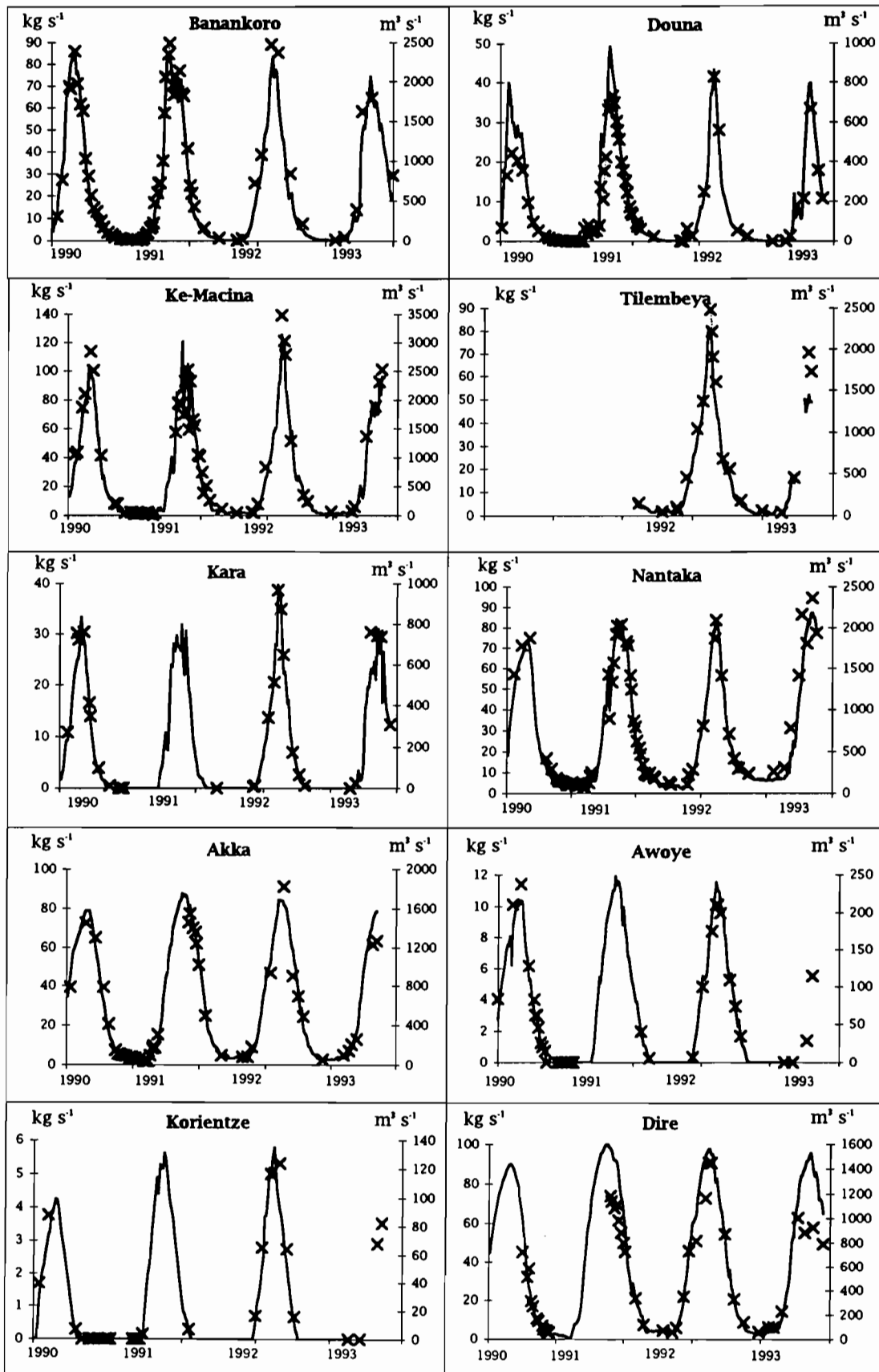


Fig.10.3.1: Evolution annuelle du transport de TDS et du débit de 1990 à 1993

10.3.2 BILAN MENSUEL DU TRANSPORT DISSOUS TOTAL

10.3.2.1 Evolution annuelle du flux mensuel de TDS en fonction des volumes écoulés

Le calcul du flux de matière transporté se fait selon une intégrale du type :

$$F = \int_0^t C_j * Q_j * dt$$

F : Flux (tonnes par unité de temps)

C_j : concentration journalière de matière dissoute (mg l⁻¹)

Q_j : débit journalier (m³ s⁻¹) t : unité de temps choisie (mois ou année)

Le bilan mensuel des éléments majeurs dissous ($\Sigma\text{cations} + \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$) a été établi pour la période d'avril 1992 à mars 1993 pour toutes les stations (tableau 10.3.1).

date	Banan	Macina	Kara	Tilem	Douna	Nantaka	Akka	Awoye	Korientze	Dire
A	2	5	0	14	1	12	13	0	0	11
M	1	5	0	14	0	13	13	0	0	13
J	25	25	0	25	8	30	42	1	0	61
Jt	88	90	18	71	16	61	102	8	1	113
A	137	159	41	133	47	142	154	17	7	151
S	270	333	82	254	106	254	210	30	11	204
O	243	258	71	208	71	209	196	25	13	189
N	159	187	26	148	28	154	131	14	8	108
D	95	90	8	83	12	79	91	8	2	67
J	18	22	0	23	5	32	35	0	0	41
F	6	4	0	5	2	26	14	0	0	18
M	1	5	0	5	0	24	8	0	0	10

Tableau 10.3.1 : Bilan mensuel (10³ tonnes) sur l'année 1992-1993 des éléments majeurs dissous ($\Sigma\text{cations} + \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$)

L'évolution mensuelle du transport cumulé aux stations principales (fig.10.3.2) souligne le fait que la crue s'étale dans le temps en allant vers l'aval du delta. Le transport de matières dissoutes suit le comportement de l'eau et on note une différence minimale entre les stations Ke-Macina, Douna, Tilembeya, Nantaka et celles de Akka et Dire.

Pour les stations de l'entrée du delta, 90 % du transport se produit durant les mois de juillet à novembre. A Tilembeya, le transport en hautes eaux ne représente que 83 % du transport annuel. A Nantaka, Akka et Dire les mois de juillet à novembre représentent 79 % du total annuel. Nantaka a un comportement particulier puisque le transport reste important (16 %) pour les mois de décembre à mars alors qu'il est inférieur à 12 % du total annuel pour la station de Tilembeya.

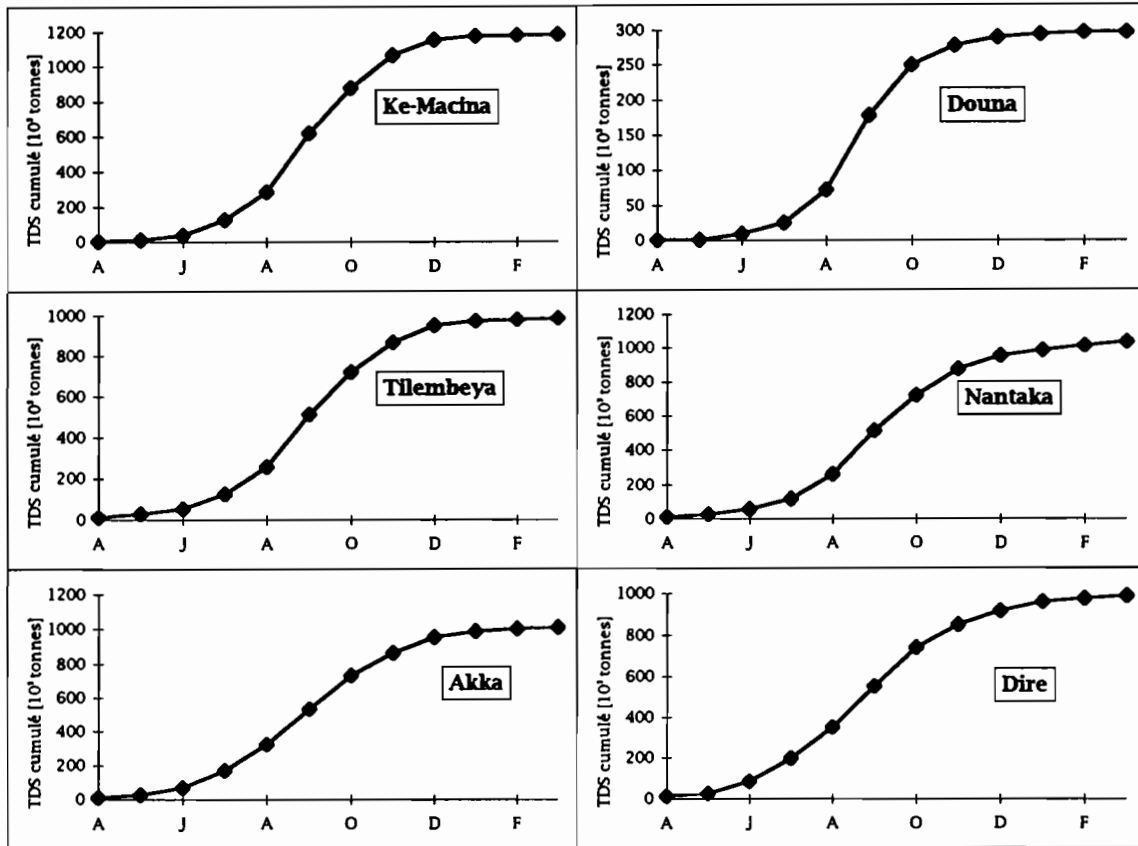


Fig.10.3.2 : Transport mensuel cumulé de matières dissoutes en 1992-1993

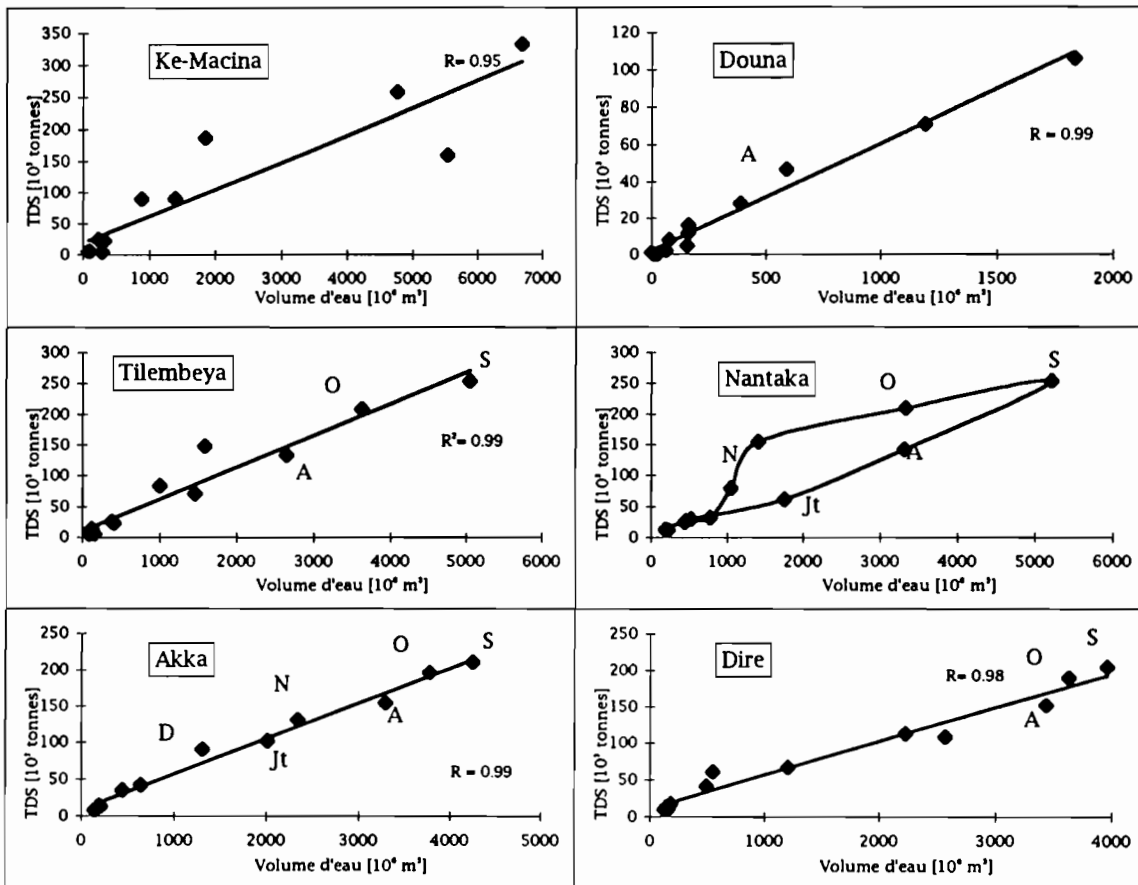


Fig.10.3.3 : Relation entre le flux mensuel de matière et le volume d'eau écoulé en 1992-1993

Pour l'évolution du transport mensuel en fonction des volumes d'eau écoulés (fig.10.3.3), il apparaît une homogénéité dans l'évolution liée au fait que l'évolution des concentrations est synchrone de celle des débits. De plus, les variations de concentrations sur l'année se font dans un rapport 1 à 3 alors que les variations de débits sont supérieures à 1 pour 28. La relation est donc linéaire pour toutes les stations avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,98. A Ke-Macina, il y a de faibles transports durant le mois d'août et le coefficient de corrélation est donc plus faible. La relation est moins bonne également pour les eaux de Nantaka où le transport pendant la montée des eaux est plus faible que celui des mois de décrue. Cette évolution en boucle existe, dans une moindre mesure, pour les stations de Tilembeya, Akka et Dire. Il est certain que le transport de matière est plus important durant les mois de décrue. Ceci est lié à la vidange des zones inondées qui se seraient enrichies en matières dissoutes durant les basses eaux.

Au contraire des autres stations, le mois d'août présente un excès de matière à Douna. Plus haut sur le bassin, l'écoulement hypodermique arrive plus tôt et permet un enrichissement avant le maximum de la crue. Ceci confirme les observations faites au chapitre 10.1 et qui soulignaient en 1990-1991 une augmentation des concentrations avant la pointe de crue.

10.3.2.2 Bilan mensuel de TDS pour le Niger amont et le delta

** De Banankoro à Ke-Macina*

Pour le fleuve Niger, le gain d'éléments dissous entre les stations de Banankoro et Ke-Macina est de 13,2 % alors que la différence de débit est de 18,7 %. Si l'on regarde l'évolution mensuelle, on constate que le transport mensuel sur ces deux stations est le même de novembre à juillet (fig.10.3.4). Il y a un gain de matières dissoutes de mars à mai car, à l'étiage, les débits enregistrés à Banankoro sont très faibles. La retenue du barrage de Selingue se vidange et fournit la grande partie des apports liquides et, par conséquent, dissous.

De juillet à septembre, la part du Sankarani est minimum car le lac de barrage se remplit. Un apport direct par la rivière est toutefois toujours présent. La station de Ke-Macina reçoit alors un taux de matière supérieur à celui de Banankoro. Le Sankarani n'étant pas en cause, il y a bien un gain de matière qui n'est pas dû à un apport d'eau supplémentaire. L'érosion chimique du bassin versant entre ces deux stations séparées de 460 km est forte.

D'octobre à décembre, le transport de matière s'arrête sur cette portion du Niger. Le lac a atteint sa cote maximum et l'évacuation de l'eau par le Sankarani augmente. Cette eau est peu minéralisée, ce qui explique en partie les faibles transports à Ke-Macina.

Ensuite, à partir de janvier, le Sankarani domine et l'enrichissement en matières dissoutes à Ke-Macina est dû aux apports de cet affluent.

Sur cette portion de fleuve, les variations observées semblent être dues au seul fait des apports par le Sankarani et on peut estimer que l'équilibre chimique domine.

*** De Ke-Macina à Tilembeya**

A 50 km en aval de Ke-Macina se trouve la déflueuse du Diaka. A ce niveau, la station de Tilembeya enregistre le transport sur le bras principal et Kara mesure la part prise par le Diaka. La somme du transport sur ces deux points devrait correspondre au transport à Ke-Macina. Il apparaît en basses eaux un léger décalage (fig.10.3.5). Il y a un excès de matière à Tilembeya en avril et mai. On a démontré, au chapitre 8.1.1 qu'un apport d'eau se produit entre les stations de Ke-Macina et Tilembeya. Cette eau provient du Bani et, ayant transité au travers des régions inondées de la « mésopotamie », est sans doute riche en éléments dissous repris des dépôts de la décrue précédente. Cet apport qui est estimé annuellement à 9 % devient négligeable lorsque les débits augmentent.

L'écart maximum de matières dissoutes entre Ke-Macina et Tilembeya+Kara ne dépasse pas les 21000 tonnes. Ce chiffre représente toutefois près de 4 % du flux annuel à Ke-Macina. Il y a équilibre entre ces deux sites qui s'explique par l'absence de zones d'inondations sur ces 50 km de fleuve dont seul le lit majeur est inondé actuellement en période de crue.

*** De Tilembeya à Nantaka**

A Nantaka, le Bani rejoint le Niger. On peut estimer que l'addition des flux du Niger à Tilembeya et du Bani à Douna est proportionnelle au flux à Nantaka.

En fait, le graphique 10.3.6 montre un écart important entre ces deux zones. Le bilan de flux est négatif à Nantaka durant toutes les hautes eaux. Le transport est par contre important en étiage comme nous l'avons souligné au paragraphe 10.3.1. Entre ces deux sites, il existe des zones d'inondations. La mésopotamie est la plus importante, alimentée principalement par le Bani. Ainsi une partie du flux est détournée entre Douna et Nantaka et ne se retrouve, dans le Niger, que plus tard à la décrue. La vidange de cette zone entraîne donc un excès dans le bilan de matières dissoutes de janvier à mars. D'autre part, on a observé une légère différence dans la composition chimique des deux fleuves. Le fait que les prélèvements se fassent dans une région où le mélange entre les deux cours d'eau n'est pas homogène entraîne une erreur dans le calcul du bilan puisque les débits utilisés sont bien ceux de l'ensemble des deux fleuves.

*** De Ke-Macina+Douna aux sorties du lac Debo**

Les paragraphes précédents nous ont montré qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs stations en aval de Ke-Macina qui représente la totalité de l'écoulement du Niger. Pour l'étude des flux en aval du lac Debo, les stations de Ke-Macina et Douna ont donc été retenues comme référence pour les entrées du delta.

Les pertes entre les entrées et les sorties du lac Debo sont maximales durant les mois d'août à octobre. A ce moment de la montée de la crue, une partie du flux liquide et dissous se perd dans les plaines inondées, mayos et lacs. La restitution se fait durant les mois de novembre et décembre au moment de la vidange des zones inondées.

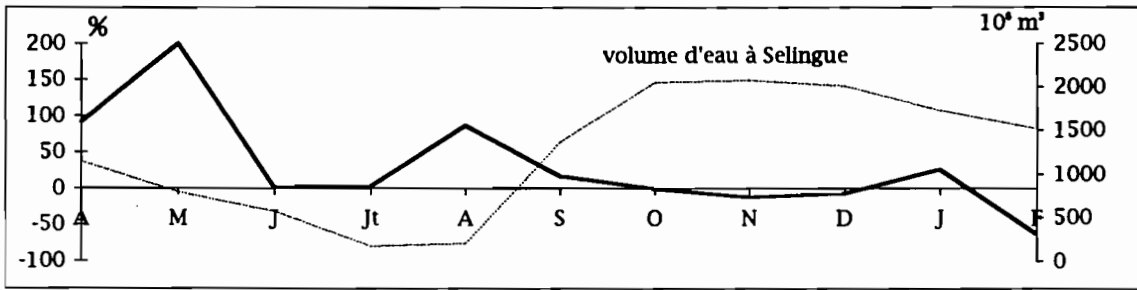


Fig.10.3.4 : Gains (%) de matières dissoutes enregistrés à Ke-Macina en 1992-1993 et évolution du volume d'eau dans la retenue de Selingue

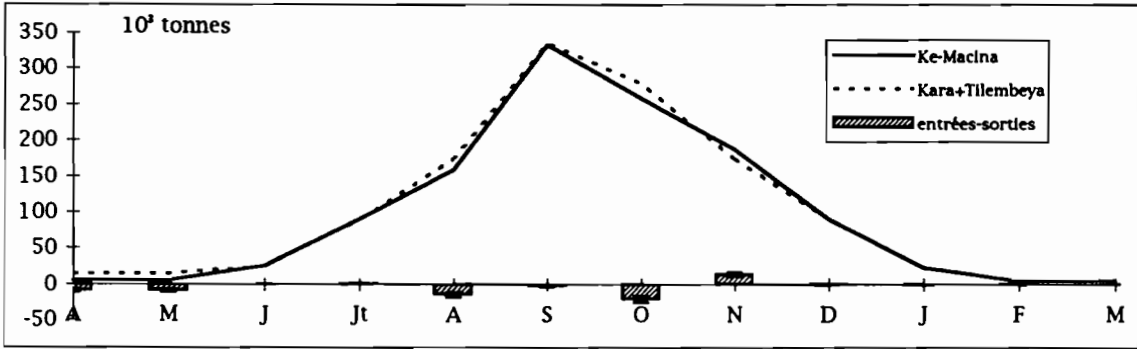


Fig.10.3.5 : Bilan du transport entre Ke-Macina et Kara+Tilembeya

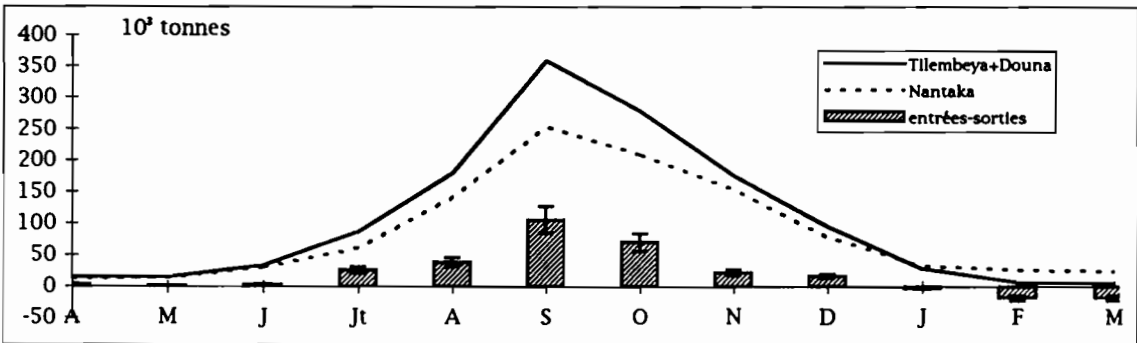


Fig.10.3.6 : Bilan du transport entre Tilembeya+Douna et Nantaka

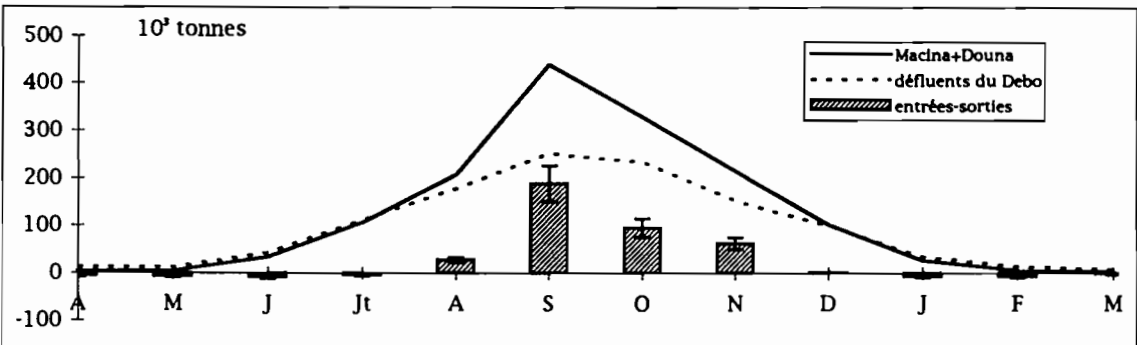


Fig.10.3.7 : Bilan mensuel du transport d'éléments dissous entre les entrées et les sorties du lac Debo

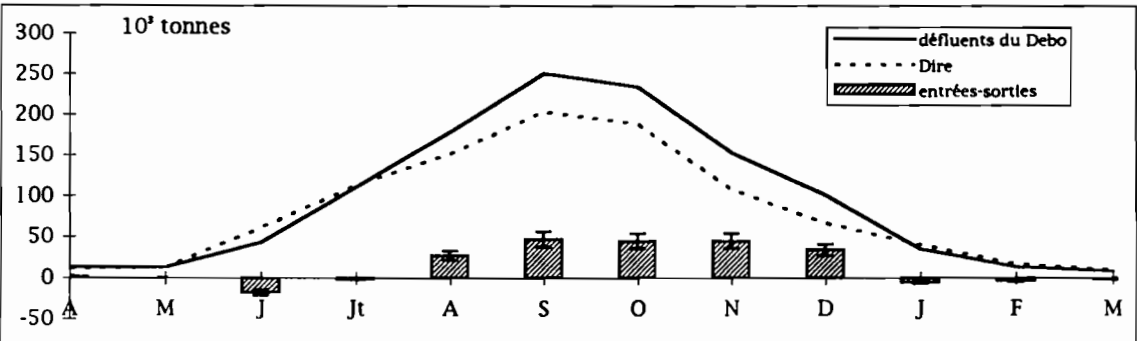


Fig.10.3.8 : Bilan mensuel du transport d'éléments dissous entre les sorties du lac Debo et Dire

Le déficit mensuel le plus important s'élève à 188000 tonnes alors que le mois de janvier ne permet une restitution maximum que de 8000 tonnes.

*** Des sorties du lac Debo à Dire**

Sur la partie aval du delta, les écarts mensuels ne dépassent pas les 47000 tonnes (fig.10.3.8). Les faibles variations par rapport à la partie amont du delta s'expliquent par la faible étendue des zones inondées. Actuellement, l'inondation dans ces zones nord est confinée au lit majeur des mayos et au remplissage naturel ou artificiel de quelques lacs.

Les diminutions de flux entre les défluent du lac et la station de Dire sont constantes durant les mois d'août à décembre. Il y a une très faible restitution à la décrue qui ne compense pas les pertes observées durant la crue. C'est au cours du mois de juin que le flux dissous à la sortie du delta est notablement plus fort qu'à la sortie du lac Debo. On peut estimer que l'eau restituée au fleuve au début de la crue est très surconcentrée sous l'effet de l'évaporation. L'eau de la crue remet en solution des dépôts minéraux de l'année ou des années précédentes.

10.3.3 BILAN DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

Dans le bilan mensuel, il convient de ne pas négliger les apports atmosphériques qui se résument ici aux pluies et à la dissolution des poussières atmosphériques.

Pour les précipitations, les enregistrements sont continus sur la station de Bamako mais plus rares dans le delta. Les quelques pluies recueillies dans le delta ne sont pas réparties régulièrement sur l'année et ne concernent que quelques points géographiques. Le bilan des apports atmosphériques ne peut se faire qu'à partir des pluies de Bamako. Pourtant, il semble que ces pluies sont moins chargées que les eaux de pluies du delta et il convient d'être prudent quant aux résultats. Les résultats des analyses chimiques des pluies concernent l'année 1993 et doivent être prises en compte pour le calcul du bilan chimique du fleuve 1993-1994. Ces deux années ont reçu des hauteurs de précipitations semblables et il est possible de faire un parallèle entre elles.

On peut considérer que, dans le delta central, il y a peu de ruissellement des eaux précipitées. Les pluies de début et de fin de saison s'évaporent rapidement et ne participent que de manière infime à la recharge du fleuve. Les précipitations des régions périphériques s'évaporent également et s'infiltrant dans les sols sableux. Par conséquent, le bilan mensuel des apports est calculé à partir des compositions chimiques moyennes pondérées extrapolées à la superficie des surfaces inondées et multipliées par les hauteurs d'eau précipitées sur le delta (tableau 8.2.2.). La surface moyenne inondée de mai à octobre est estimée à 6000 km².

mois	Précipitations 10 ⁶ m ³	Ca ²⁺ tonnes	Mg ²⁺ tonnes	K ⁺ tonnes	Na ⁺ tonnes	Tac tonnes	Cl ⁻ tonnes	NO ₃ ⁻ tonnes	SO ₄ ²⁻ tonnes	H ₂ SiO ₄ tonnes	dissous tonnes
M	111	420	60	210	130	1440	190	260	270	130	3110
J	221,4	200	20	530	20	690	440	200	130	ND	2230
Jt	733,2	440	150	440	150	1540	440	220	290	370	4040
A	792,6	240	80	80	ND	870	160	160	80	ND	1670
S	285,6	140	30	30	ND	290	110	200	60	ND	860
O	17,4	50	10	10	10	100	20	60	30	30	320
Total	2177,4	1490	350	1300	310	4930	1360	1100	860	530	12230

Tableau 10.3.2 : Bilan des apports atmosphériques mensuels sur le delta en 1993

Ces apports varient sur l'année de 36 % pour le nitrate, 60 à 80 % pour le calcium, bicarbonate, chlore, sulfate et ions dissous et de 90 à plus de 100 % pour le potassium, la silice, le magnésium et le sodium. En comparaison des tonnages exportés sur l'ensemble des stations de la sortie du lac Debo en 1992-1993, la part des apports mensuels par précipitations d'ions dissous est plus importante au mois de mai. Durant ce mois, les éléments dissous dans les eaux de pluies représentent l'équivalent de 1/4 des éléments transportés par le fleuve. En fait, l'eau précipitée sur les terres exondées étant très rapidement reprise par l'évaporation et il serait plus exact, en mai, de ne considérer que les zones inondées en relation avec le réseau hydrologique principal (les mares sont le plus souvent déconnectées du réseau) qui représentent moins de 4000 km². Le volume d'eau apporté au fleuve n'est alors plus que de 55,5 10⁶ m³ soit la moitié de l'estimation précédente, ce qui réduit d'autant l'impact des pluies sur la chimie du fleuve pour ce mois de mai. De juin à octobre, le total des éléments dissous dans les eaux de pluies représente moins de 5 % du transport par le fleuve.

La dissolution, par l'eau du fleuve, des particules atmosphériques apporte des quantités non négligeables d'éléments, notamment les cations facilement échangeables et doit être considérée avec l'ensemble de l'érosion chimique autochtone. L'absence de données précises sur les apports chimiques possibles ne permet pas une détermination quantitative de l'importance de cette source.

10.3.4 FLUX MENSUELS DE CATIONS, BICARBONATE ET SILICE EN 1992-1993

Le paragraphe 10.3.2. a mis en valeur l'absence de changements notables entre Ke-Macina et Kara ainsi que les problèmes liés aux calculs de bilans sur la station intermédiaire de Nantaka (Gourcy et Sondag, 1994). Pour l'étude individuelle des éléments chimiques, le bilan portera donc uniquement sur le delta amont entre Ke-Macina+Douna et les défluences du lac Debo et le delta aval des défluences du lac Debo à Dire.

Pour le potassium, l'erreur de mesure est supérieure à 6 % et les conditions de conservation des prélèvements sont influentes. D'autre part, plusieurs pics de K⁺ et Cl⁻ sont observés durant les trois années d'étude. Le bilan n'a été fait qu'à l'échelle annuelle.

*** le bicarbonate**

Cet anion abondant dans les eaux du Niger subit les variations mensuelles les plus importantes. Sur le delta amont (fig.10.3.9.a) et le delta aval (10.3.9.b), les pertes sont maximales durant le mois de septembre, ce qui correspond aux superficies inondées les plus importantes. Durant cette période, on enregistre à la sortie du lac Debo une perte de 59000 tonnes de bicarbonates. Durant les trois mois de la montée des eaux, il y a un déficit aux sorties pour le delta aval et le delta amont.

La restitution, qui se produit lors de la vidange des zones inondées entre les entrées (Ke-Macina +Douna) et Dire s'élève au maximum, en juin, à 14000 tonnes. Durant cette saison, les précipitations apportent au delta plus de 1500 tonnes de bicarbonate. Ceci ne représente toutefois que 10 % de la restitution. Bien qu'elle dure huit mois environ, la décrue ne permet pas le transport de beaucoup de matières dissoutes par rapport aux entrées.

*** la silice**

Le comportement de H_4SiO_4 sur l'ensemble de l'année est le même que celui du bicarbonate (fig.10.3.9 c,d). Le mois de septembre enregistre à la sortie du Debo un déficit de 61000 tonnes et à Dire un déficit de 34000 tonnes. Les « pertes » sur le delta aval sont plus importantes pour cet élément que pour d'autres. En octobre, la différence de transport entre les entrées et les sorties est plus grande sur le delta aval (36000 tonnes contre 33000 tonnes).

Alors que les pertes en éléments dissous et en bicarbonates diminuent rapidement en octobre, elles restent fortes pour la silice. Ce mois correspond au début de la décrue. La végétation du delta est alors très développée. On sait que les végétaux utilisent de grandes quantités de H_4SiO_4 dissous pour synthétiser leur structure interne (phytolithes). Les plantes aquatiques unicellulaires, les diatomées, les plantes monocotylédones et quelques protozoaires sont les principaux utilisateurs de silice (Evans, 1990, Trudinger et al, 1979).

La restitution de la silice peut se faire, à la mort des plantes, sous forme de silice dissoute, qui participe alors à l'excédent de matières dissoutes durant le mois de novembre.

En effet, on constate, sur le bassin amont qui comprend l'ensemble du lac Debo, un excès de silice à la sortie de 24000 tonnes. Etant donné le décalage adopté, le mois de novembre dans le calcul du bilan correspond au mois de décembre au niveau du lac Debo. La décrue est déjà bien amorcée et les plantes dégénèrent et meurent, relâchant de grandes quantités de phytolithes. Une mise en solution de cet élément est possible lorsque l'eau du Niger est sous-saturé vis à vis du quartz.

Entre les sorties du lac Debo et la station de Dire, on enregistre un excédent de matière dissoute durant les seuls mois d'avril et mai.

Sur le delta amont, la restitution de silice est maximale en juin où elle dépasse 14000 tonnes. Les apports atmosphériques sont alors négligeables. La montée de la crue entraîne une augmentation de la turbidité des eaux qui peut entraîner la mort massive de diatomées.

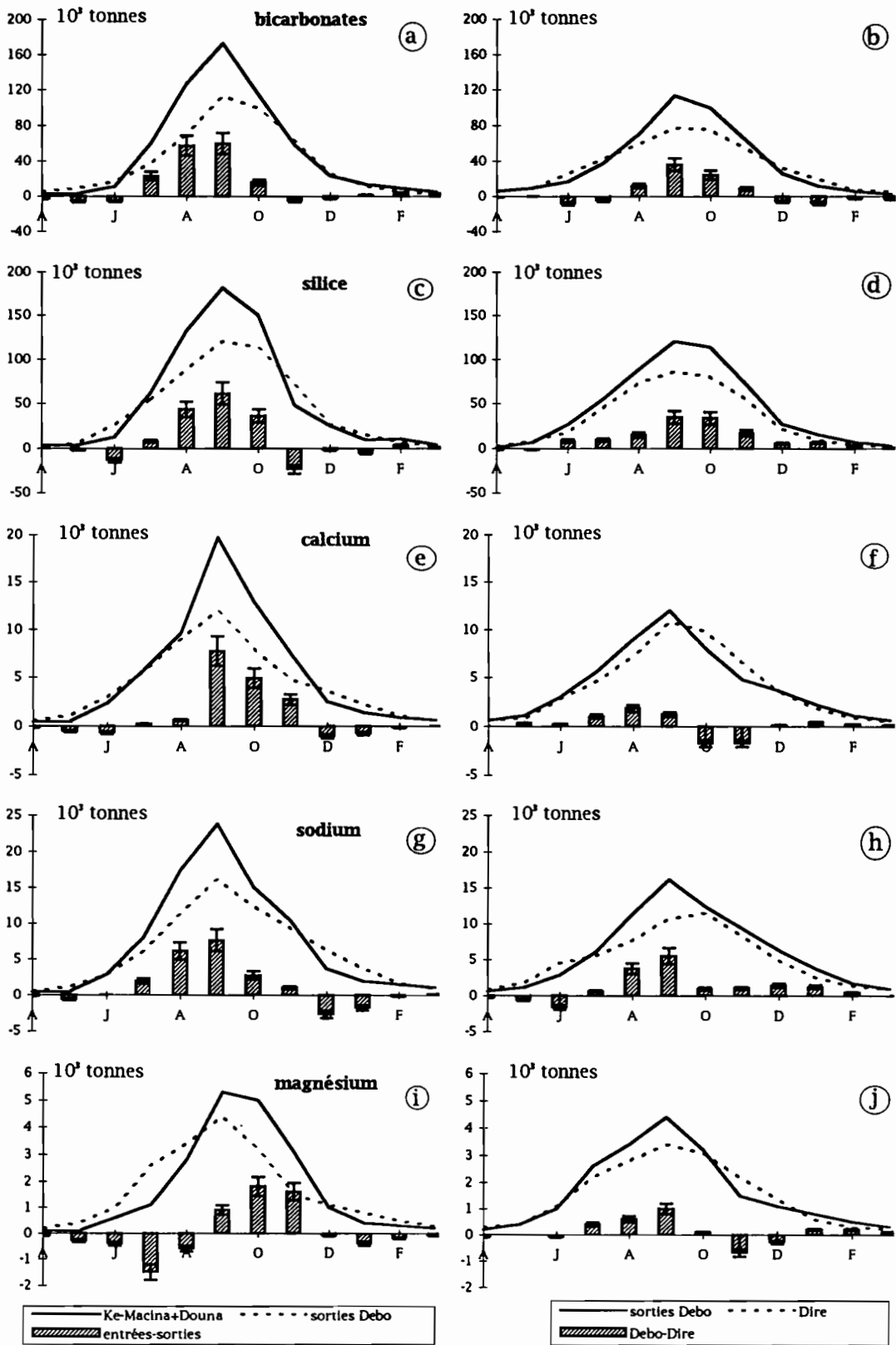


Fig.10.3.9 : Bilan mensuel des éléments dissous principaux en 1992-1993 de Ke-Macina+Douna aux sorties du lac Debo et des sorties du lac à Dire

Celles-ci relâchent alors de fortes quantités de silice dont une partie se dissout rapidement dans les eaux si celles-ci ne sont pas saturées. L'étude multitableaux a montré une augmentation des concentrations de silice sur les stations amont au moment de la crue.

*** le calcium**

Les quantités transportées sont faibles par rapport aux bicarbonates et à la silice et le calcium ne participe que peu au bilan global des éléments dissous. Pour cet élément, le comportement sur le delta amont est différent de celui de HCO_3^- et H_4SiO_4 . Les pertes sont maximales en septembre, octobre et novembre, ce qui correspond à la fin de la montée des eaux.

Même si le rapport des pertes n'est pas le même pour les deux parties du delta (1 pour 7), les pertes dans le delta aval sont maximales durant les mois de début de crue (juillet à septembre). Il y a restitution en octobre et novembre puis équilibre le reste de l'année. Le bilan montre de faibles variations qui ne permettent pas de conclusions définitives.

Par contre, les pertes de 15000 tonnes sur le delta amont durant trois mois en fin de montée des eaux surprennent car le bilan d'eau montre un équilibre.

*** le sodium**

Le sodium se comporte comme le bicarbonate ou la silice avec des pertes importantes entre les entrées et les sorties pour les mois d'août, septembre et octobre. En septembre, la différence entre les entrées et les sorties est de 8000 tonnes sur le delta amont et 6000 tonnes sur le delta aval. L'amplitude des pertes est donc voisine pour les deux bassins durant ce mois. La restitution sur le bassin aval se fait en décembre et janvier. Sur le bassin aval, la restitution est nulle. Il y a pseudo-équilibre pour toute la saison sèche.

*** le magnésium**

Les flux mensuels correspondent au quart des flux de sodium. Etant donné les relativement faibles quantités de matières mises en jeu par rapport aux volumes d'eau, il convient de rester circonspect quant à l'interprétation des variations.

Le plus intéressant est que cet élément évolue comme le calcium. Les pertes maximales (2000 tonnes) s'observent en fin de montée des eaux sur le delta amont. Le delta aval montre un équilibre entre les entrées et les sorties.

En juillet et en août, alors que la crue commence, on observe un excès de matière dissoute aux sorties du lac Debo. Les végétaux des régions inondées permettent l'enrichissement en magnésium de la zone non-saturée des sols et des mares stagnantes. Au début de la montée des eaux, ces éléments sont amenés par ruissellement et par effet piston aux sorties du lac Debo. L'enrichissement de l'horizon de surface des sols et de ces mares coupées du réseau hydrique une partie de l'année se fait pour tous les éléments dissous. Il est toutefois plus marqué pour le magnésium dont les concentrations varient fortement sur l'année.

A Douna, les concentrations de magnésium diminuent dès avril et l'apport du Bani en début de crue est alors faible.

Les apports atmosphériques sont relativement importants en juillet puisqu'ils représentent 13 % de la somme des entrées qu'il conviendrait de rajouter au bilan.

10.4 BILAN ET FLUX ANNUELS AU TRAVERS DE LA CUVETTE LACUSTRE

10.4.1 BILAN ET TRANSPORT ANNUELS DE MATIERE DISSOUE

10.4.1.1 Bilan annuel de TDS dans le delta central

Le bilan annuel a été établi pour Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , H_4SiO_4 en 1992-1993 et 1993-1994 en différenciant deux grandes régions; le delta amont et le delta aval (fig.10.4.1). La somme des éléments précités est considérée dans ce chapitre comme le total dissous.

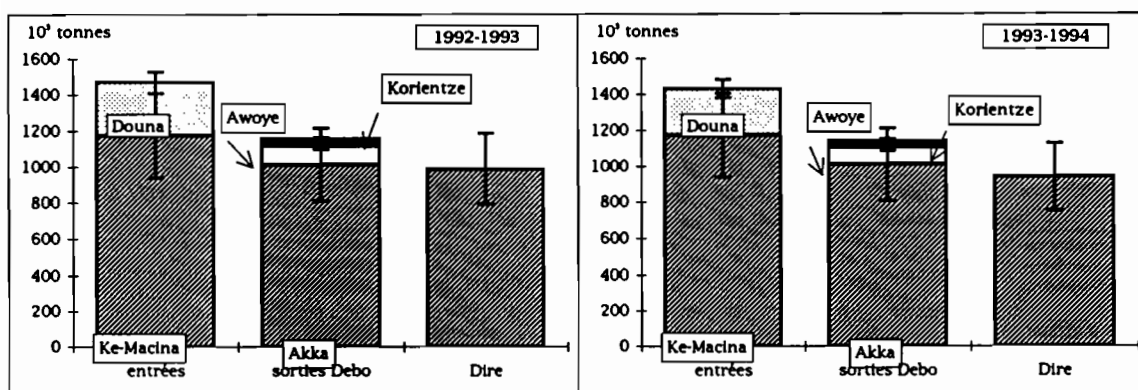


Fig.10.4.1 : Bilan annuel du transport d'éléments dissous (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , H_4SiO_4) pour les années 1992-1993 et 1993-1994

Le transport sur le Koli-Koli et le Bara-Issa est négligeable devant celui de l'Issa Ber enregistré à Akka. L'inondation dans le delta nord se fait essentiellement à partir de ce bras principal. Le Bani apporte annuellement au delta 20 % des éléments dissous.

Le total des pertes entre les entrées de Ke-Macina+Douna et les sorties à Dire est de 483000 tonnes dont 315000 tonnes dans le delta amont. Le delta aval ne retient qu'un peu plus de 1/3 des éléments dissous transportés.

De grandes quantités de sels restent piégées chaque année dans le delta et, plus particulièrement, dans le delta amont entre Ke-Macina+Douna et la sortie du lac Debo. Grove, en 1972, signalait que c'était l'équivalent des apports dissous du Bani qui « disparaissait » dans le delta. Le bilan 1992-1993 montre que c'est 1,6 fois l'équivalent de la rivière Bani qui se perd dans le delta.

L'ETP dépasse les précipitations d'un facteur 6,6. Il apparaît évident que c'est l'évaporation, l'évaporation capillaire et l'évapotranspiration (McCarthy et Metcalfe, 1991) qui sont les facteurs dominants de l'équilibre chimique dans le delta. Comme on observe un appauvrissement significatif des concentrations de TDS entre les entrées (60,4 mg l⁻¹) et les sorties (54,2 mg l⁻¹), il est certain que des quantités importantes de sels pénètrent dans la nappe. La transpiration de la végétation facilite la concentration des eaux dans le sol et la pénétration des sels dans les nappes superficielles (McCarthy et al, 1993). Ceci est confirmé par la conductivité moyenne des nappes au niveau de la cuvette lacustre qui est supérieure à celle des régions voisines (fig.10.4.2). Il est intéressant de noter les très fortes concentrations (de 2000 à 5000 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$) au niveau de l'Office du Niger. Ces régions au sud du delta subissent actuellement des problèmes importants de salinisation des sols (Bertrand et al, 1994).

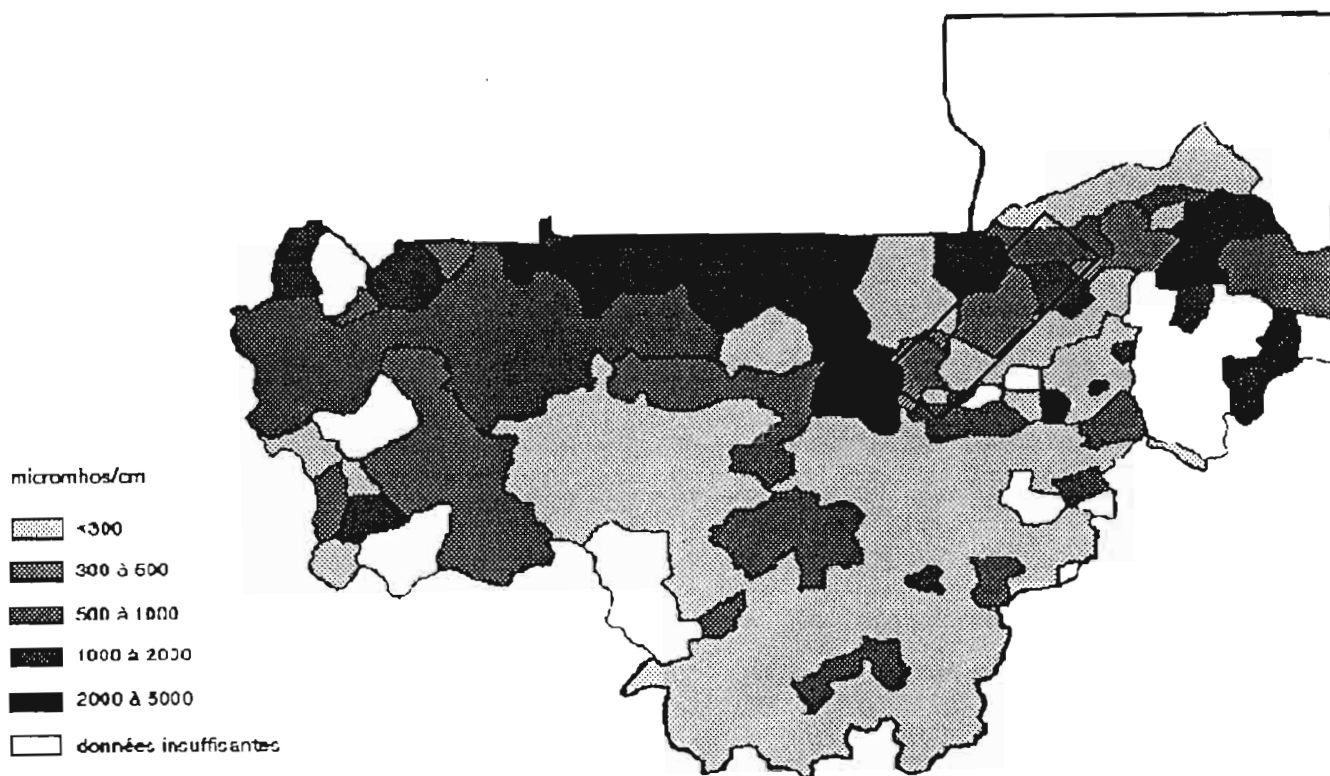


Fig. 10.4.2 : Carte des conductivités moyennes des aquifères dans le sud du Mali (d'après synthèse hydrogéologique, 1990)

Les apports atmosphériques représentent moins de 2 % des pertes d'éléments dissous dans le delta. Leur rôle est d'autant plus faible, qu'une partie des pluies non évaporées est immédiatement reprise par les végétaux (Mathieu et Monnet, 1971).

L'enrichissement chimique des eaux pendant la période d'étiage se fait surtout dans les régions périphériques et les mares isolées. Les calculs d'équilibre des eaux du fleuve Niger et de ces principaux affluents ont révélé une possible saturation vis à vis du quartz et de différentes formes de la silice amorphe. Dans les régions les plus excentrées, les bras morts,

les mares isolées, il est possible que d'autres minéraux précipitent lorsque la concentration des eaux par évaporation est importante.

L'absence du fer et de l'aluminium dans les mesures ne permet pas de calculer les constantes d'équilibre vis à vis d'autres minéraux contenant du fer ou de l'aluminium comme les micas, la montmorillonite, la kaolinite ou l'illite.

10.4.1.2 Le transport spécifique d'éléments dissous par le fleuve Niger et le Bani

Le transport des éléments dissous exportés à Dire s'élève à $1,0 \cdot 10^6$ tonnes. Zoska (1985) a évalué le transport à $1,2 \cdot 10^6$ tonnes.

Le transport spécifique d'éléments dissous est de $8,0 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Niger à Ke-Macina, $2,9 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Bani à Douna et $2,7 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Niger à Dire. Le transport spécifique de matière dissoute est de $9,0 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Nyong au Cameroun (Sigha-Nkamdjou, 1993), $1,9 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le fleuve Sénégal à Bakel (Orange 1992), $3,6 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Chari (Gac, 1980), $19,1 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le fleuve Congo à Brazzaville (Moukolo et al, 1992), $46 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'Amazone (Gibbs, 1972), $136 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le Brahmapoutre (Ramanathan et al, 1994). La moyenne du transport de TDS qui a été faite sur 490 rivières est de $38,8 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Walling et Webb, 1983).

La faiblesse du transport dissous spécifique pour le Bani confirme l'originalité géologique de son bassin versant. L'érosion chimique dépend du climat, de la végétation, de la topographie et surtout de la géologie du bassin versant (Bluth et Kump, 1994). Les roches prédominantes sur le haut du bassin versant du Niger et du Bani sont les granites. Pour le Niger, l'écoulement sur des formations gréseuses et latéritiques est important. Le taux d'érosion sur les roches sédimentaires détritiques est 5 fois plus grand que sur les roches cristallines (Seimbille, 1986).

Le transport spécifique d'éléments dissous est plus élevé que le transport spécifique de matières en suspension d'un facteur 1,47 pour le Niger à Ke-Macina et 1,42 pour le Bani à Douna (cf chapitre 9).

10.4.2 BILAN ET FLUX DES CATIONS, DU BICARBONATE ET DE LA SILICE

Les cations, le bicarbonate et la silice suivent le même comportement général que le total des éléments dissous avec, toutefois, des particularités notables dans le fonctionnement biogéochimique.

Le tableau 10.4.1 rassemble les données du flux annuel à chaque station pour les années 1992-1993 et 1993-1994.

STATION	Ca ²⁺		Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		HCO ₃ ⁻		H ₄ SiO ₄	
	92-93	93-94	92-93	93-94	92-93	93-94	92-93	93-94	92-93	93-94	92-93	93-94
Ke-Macina	49	50	68	72	17	20	33	32	466	466	540	533
Douna	13	11	16	15	5	5	10	10	135	113	117	105
Entrées	62	61	84	87	22	25	43	42	601	579	657	638
Akka	46	48	55	55	16	17	35	33	396	406	465	452
Awoye	6	5	6	5	2	2	3	3	45	40	42	37
Korientze	3	2	3	2	1	1	2	2	20	20	13	13
sorties Debo	55	55	64	62	19	20	40	38	461	466	520	502
Dire	48	46	61	58	18	18	39	33	413	408	406	386

Tableau 10.4.1 : Bilan du transport annuel (10⁶ tonnes) pour l'année 1992-1993 et 1993-1994 pour le delta amont et le delta aval

Les apports du Niger sont 4,6 fois plus élevés que ceux du Bani pour la silice, 4 fois plus élevés pour le calcium et le sodium. Pour le magnésium et surtout le bicarbonate et le potassium la part des apports du Bani est relativement plus importante. Le lessivage des formations granitoïdes et gneissiques riches en sodium est plus actif sur le bassin versant du fleuve Niger et/ou les formations gréseuses riches en silice traversées par ce fleuve sont plus nombreuses.

Pour les défluent du lac Debo, l'Issa Ber représente 85 % du transport total, le Bara Issa 10 % et le Koli-Koli seulement 5 %. Ceci correspond bien au rapport de débit de ces trois cours d'eau. Les variations de concentrations sur ces stations, si elles existent, sont négligeables devant les volumes exportés.

Il est intéressant de replacer le bilan annuel des pertes sur les deux parties principales du delta en parallèle avec les pertes annuelles d'eau par évaporation (fig.10.4.3).

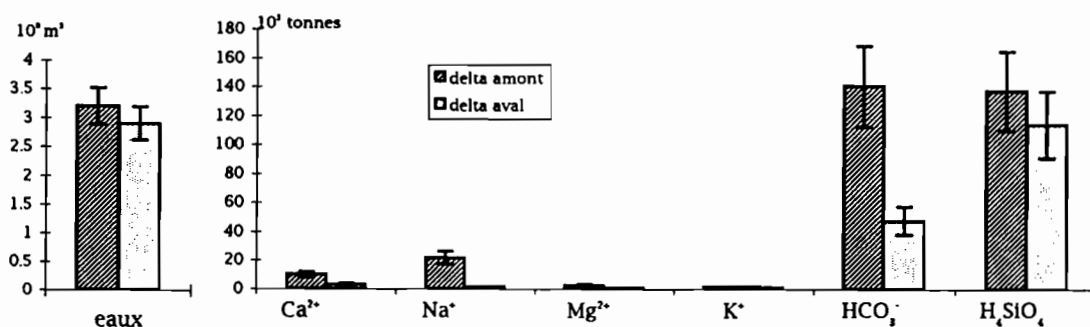


Fig. 10.4.3 : Bilan des entrées-sorties pour le delta amont et le delta aval en 1992-1993

Si la part des pertes en eau est presque la même entre les bassins amont et aval, il en est autrement pour les éléments dissous. Les pertes sur le bassin amont sont toujours plus importantes que les différences enregistrées sur le delta aval.

Il apparaît que les pertes en eau par évaporation ne sont pas suivies par un enrichissement des concentrations (tableaux 10.4.2a à f). Il y a principalement une précipitation de minéraux et/ou infiltration des sels dans la nappe superficielle.

*** le bicarbonate**

BICARBONATES année 1992-1993				BICARBONATES année 1993-1994			
	volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	601	24.7	entrées	23.3	579	24.8
sorties Debo	21.1	461	21.8	sorties Debo	20.7	466	22.5
Dire	18.2	413	22.7	Dire	17.4	408	22.8
<i>pertes amont</i>	3.2	140		<i>pertes amont</i>	2.6	113	
<i>pertes aval</i>	2.9	48		<i>pertes aval</i>	3.3	58	

Tableau 10.4.2a : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en bicarbonates pour le delta amont et le delta aval

L'élément dissous HCO_3^- est le deuxième en importance dans le bilan global. Ces pertes sont de 140000 tonnes sur le delta amont et de 48000 tonnes sur le delta aval.

Le bicarbonate ne provient pas de la dissolution de roches carbonatées rares sur le bassin versant. C'est le CO_2 atmosphérique et le produit de l'oxydation de la matière organique qui favorisent un enrichissement des eaux en bicarbonates (Seimbille, 1986, Gac et Kane, 1986a, Fontes et al, 1991, Herczeg et al, 1993).

Au niveau du transport, les pertes peuvent être dues à un dégazage de CO_2 , la précipitation d'alcali, de carbonates de sodium, de carbonates de calcium. La calcite est, dans la série évaporitique, un élément qui précipite rapidement. On observe des dépôts en croûtes efflorescentes de carbonate de sodium (Na_2CO_3), de calcite (CaCO_3), calcite magnésienne et dolomite. Des dépôts de carbonates de calcium ont été observés à Kouroumari (Valles et al, 1989). La présence de nodules de calcaire a été notée dans les sables du delta périphérique (Gallais, 1967). L'accumulation de bicarbonate dans les sols amène la formation de sols alcalins qui libéreront ensuite du carbonate (Fontes et al, 1991).

L'eau finale après évaporation d'une masse d'eau comporte Na^+ et HCO_3^- (Appelo et Postma, 1993).

Après les dépôts, à la crue suivante, le carbonate de sodium se redissout rapidement alors que les autres dépôts sont plus difficilement remis en solution (Eugster, 1980). Les sels les plus solubles, Na^+ , K^+ et HCO_3^- se situent au-dessus des profils de sol, ce qui explique qu'ils soient facilement repris lors des crues suivantes (McCarthy et Metcalfe, 1990).

Une part du carbonate est utilisée dans la formation des coquilles de mollusques, nombreux dans le fleuve (Carmouze, 1976).

* la silice

	H ₄ SiO ₄ année 1992-1993				H ₄ SiO ₄ année 1993-1994		
	volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	657	27.0	entrées	23.3	638	27.4
sorties Debo	21.1	520	24.6	sorties Debo	20.7	502	24.3
Dire	18.2	406	22.3	Dire	17.4	386	21.6
pertes amont	3.2	137		pertes amont	2.6	136	
pertes aval	2.9	114		pertes aval	3.3	116	

Tableau 10.4.2b : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en silice pour le delta amont et le delta aval

Cet élément est le plus important et subit des pertes de 137000 et 114000 tonnes dans le delta amont et aval. C'est le seul élément dissous qui enregistre des pertes aussi grandes sur les deux parties du delta. Les pertes dans la partie aval du delta sont deux fois plus élevées que pour le bicarbonate alors que les pertes en amont sont équivalentes pour ces deux éléments.

Le cycle de la silice est complexe car il y a des interactions avec la végétation, les roches et l'atmosphère.

La silice provient du lessivage des roches silicatées et des argiles principalement (Sigg et al, 1992). Sous les climats tropicaux, les feldspaths sont les premiers lessivés, puis la kaolinite (Gac et Pinta, 1973, Meybeck, 1979, Appelo et Postma, 1993).

Les apports atmosphériques de poussières sont importants et une partie de cette silice passe en solution, comblant ainsi une partie des pertes du delta. Les pluies apportent des quantités minimales de silice.

Lors de l'évaporation d'une mare sans apports extérieurs, il apparaît que le quartz est le premier élément à précipiter. Un silicate hydraté, la sépiolite, suit cette série d'évaporation (Appelo et Postma, 1993). Une expérience consistant à amener de l'eau du lac Tchad à sursaturation a montré une néoformation de montmorillonite magnésienne et la transformation d'argiles actuelles. Il y aurait dans ce cas destruction de la kaolinite et de la goéthite pour fabriquer de la montmorillonite (Gac et al, 1977).

Un développement de croûtes siliceuses a été observé par Jacobberger (1987) dans les parties périphériques du delta.

La formation de montmorillonite, une argile de la forme $[(Si_4Mg_3O_{10}(OH)_2]$ a également été observée dans une plaine endoréique composée des dépôts du Niger (Valles et al, 1989). Des dépôts de montmorillonite ont été notés dans le delta par Cogelset Gac (1986), dans une mare, en bordure de delta et dans des lits mineurs par Gallais (1967) et Blanck (1986).

La dissolution de la silice est conduite par la production biologique de carbone et d'acide carbonique (Stallard et Edmond, 1986, Ghosh, 1991, Brady et Carroll, 1994). Pour la silice, les reprises des dépôts ne sont pas complètes car le quartz est une forme stable qui résiste au lessivage et se situe dans la couche inférieure des profils de sol (Ghosh, 1991).

Une partie des dépôts minéraux peut être emportée par le vent mais également utilisée par les végétaux (Grove, 1972). Le cycle de la silice est, en effet, fortement lié à la production végétale. Les macrophytes, mais également les algues et le phytoplancton utilisent la silice (Meybeck, 1984) sous sa forme dissoute pour la fabrication de leur structure interne. A la mort des plantes, les phytolithes se trouvent sous forme d'opale déshydratée. Ces phytolithes et les spicules d'éponges repartent dans le fleuve sous forme particulaire et dissoute. L'observation microscopique de matières en suspension du fleuve ne révèle pas la présence de phytolithes mais ces éléments peuvent être de très petite taille et, malgré leur résistance, ne gardent pas leur forme originale et sont rendus ainsi difficilement reconnaissables (Alexandre et al, 1994).

Une estimation de la composition de *Vossia cuspidata* a été faite sur le lac Tchad (Lévêque, 1972, in:Maglione, 1976). Les tiges et les feuilles contiennent essentiellement de la silice (88 % des éléments). Les plantes permettent également de retenir la silice secondaire dans les sols, limitant ainsi sa reprise par érosion (Drever, 1994).

La prolifération de diatomées entraîne une diminution de H_4SiO_4 . Les diatomées sont abondantes dans le fleuve Niger (Zoska, 1985) où le genre *Melosira* représente 98,5 % de la population (Gasse et al, 1989).

Une partie de ces diatomées demeure intacte dans le fleuve et est exportée sous forme particulaire (Censier et al, 1994).

Un aspect mineur du cycle de la silice concerne son adsorption sur la matière particulaire (Meybeck, 1979, Soska, 1985) ou sur les sesquioxides (Al_2O_3 , Fe_2O_3) et sur les minéraux argileux (Heinen et Oehler, 1979).

*** le calcium**

CALCIUM année 1992-1993				CALCIUM année 1993-1994			
	volume d'eau 10 ⁹ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁹ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	62	2.5	entrées	23.3	61	2.6
sorties Debo	21.1	52	2.4	sorties Debo	20.7	55	2.7
Dire	18.2	48	2.7	Dire	17.4	46	2.7
pertes amont	3.2	10		pertes amont	2.6	6	
pertes aval	2.9	4		pertes aval	3.3	9	

Tableau 10.4.2c : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en calcium pour le delta amont et le delta aval

Le bilan du calcium sur les deux parties du delta est très déséquilibré avec 3 fois plus de pertes sur le delta amont. Dans le delta aval, l'évaporation entraîne une augmentation des concentrations de 2,4 à 2,7 mg l⁻¹.

Les apports en calcium varient beaucoup selon les faciès géologiques (feldspath, pyroxène, amphiboles). Il provient du lessivage des roches et également des sols enrichis en matières organiques (Pierson et Taylor, 1994). Une partie du calcium précipite sous forme de calcite. La présence de cet élément sous forme précipitée a été évoquée pour le bicarbonate.

Des organismes calcaires peuvent également absorber Ca²⁺ (Trudinger, 1979). Les coquilles des mollusques du lac Tchad sont composées pour 37 % de cet élément, essentiellement sous forme aragonite. La demande de calcium pour les mollusques est très forte et la plus grande partie des apports provient des coquilles des animaux morts. Les mollusques forment leur propre cycle de calcium qui peut toutefois interagir sur le bilan annuel si les conditions physico-chimiques affectent le taux de renouvellement (Carmouze, 1976). Dans le cours d'eau du Niger, les mollusques les plus abondants sont notamment *Aetheria elliptica* (Poncet, 1994).

La reprise par les végétaux est possible. Cet aspect du cycle du calcium est important dans le delta de l'Okavango au Botswana (McCarthy et al, 1993).

*** le sodium**

	SODIUM année 1992-1993				SODIUM année 1993-1994		
	volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	85	3.5	entrées	23.3	87	3.7
sorties Debo	21.1	63	3.0	sorties Debo	20.7	62	3.0
Dire	18.2	61	3.4	Dire	17.4	58	3.2
perles amont	3.2	22		perles amont	2.6	25	
perles aval	2.9	2		perles aval	3.3	4	

Tableau 10.4.2d : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en sodium pour le delta amont et le delta aval

Les pertes dans la partie amont du delta sont de 22000 tonnes, soit le double des pertes en calcium. Par contre, une différence entre les défluent du lac Debo et Dire de 2000 tonnes n'est pas très significative par rapport aux écarts de mesure. Les concentrations moyennes entre les entrées et les sorties sont presque identiques.

La couche superficielle du sol riche en matière organique, les feldspaths et l'atmosphère apportent du sodium au fleuve Niger (Seimille, 1986). Cet élément ne précipite pas facilement. Le sodium peut toutefois être piégé dans la montmorillonite sodique (Maglione, 1976) ou, dans les conditions extrêmes, précipiter sous forme de carbonate de sodium.

La reprise par la végétation est estimée à 35 kg/ha/an (Appelo et Postma, 1993). Etant donné l'abondance de la végétation, ces reprises sont influentes sur le bilan annuel et peuvent expliquer une partie des pertes dans le delta aval, au niveau du lac Debo.

*** le magnésium**

MAGNESIUM année 1992-1993				MAGNESIUM année 1993-1994			
	volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	22	0.9	entrées	23.3	25	1.1
sorties Debo	21.1	19	0.9	sorties Debo	20.7	21	1.0
Dire	18.2	18	1.0	Dire	17.4	18	1.0
<i>pertes amont</i>	3.2	3		<i>pertes amont</i>	2.6	4	
<i>pertes aval</i>	2.9	1		<i>pertes aval</i>	3.3	3	

Tableau 10.4.2e : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en magnésium pour le delta amont et le delta aval

Le magnésium provient de la couche organique des sols qui accumule cet élément et du lessivage des roches du bassin versant (mica, pyroxène, amphiboles...). Le magnésium alterne précipitation et dissolution au contact des sols avec un stockage dans les nappes phréatiques qui explique de faibles variations avec gains et pertes qui s'équilibrent dans le bassin. Les précipitations de calcite magnésienne (McCarthy, 1993) et de montmorillonite magnésienne (Valles et al, 1989) expliquent une partie des pertes. La néoformation de montmorillonite magnésienne est un piège à silice mais également de magnésium (Maglione, 1976).

L'utilisation de Mg²⁺ par les végétaux est faible (Lévêque 1972 in: Carmouze, 1976).

*** le potassium**

POTASSIUM année 1992-1993				POTASSIUM année 1993-1994			
	volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹		volume d'eau 10 ⁶ m ³	transport 10 ³ tonnes	concentration mg l ⁻¹
entrées	24.3	43	1.8	entrées	23.3	42	1.8
sorties Debo	21.1	41	1.9	sorties Debo	20.7	38	1.8
Dire	18.2	39	2.2	Dire	17.4	33	1.8
<i>pertes amont</i>	3.2	2		<i>pertes amont</i>	2.6	4	
<i>pertes aval</i>	2.9	2		<i>pertes aval</i>	3.3	5	

Tableau 10.4.2f : Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en potassium pour le delta aval et le delta amont

Des pertes de 2000 tonnes indiquent que le bilan du potassium est en équilibre dans le delta. Cet élément provient du lessivage des sols riches en matières organiques, des argiles et feldspaths (orthoclase, microcline). Les cultures (riz essentiellement) du delta utilise peu ou pas d'engrais propres à enrichir les eaux en potassium. Les apports par les eaux de pluies

représentent 1000 tonnes, ce qui est peu par rapport aux apports par le fleuve Niger et Bani de 43000 tonnes mais l'équivalent des pertes sur le delta aval. Ces apports doivent être rajoutés principalement au delta amont, ce qui augmente l'écart entre les entrées (Bani, Niger et pluies) et les défluent du lac Debo.

La précipitation de feldspath potassique et autres minéraux contenant K^+ est possible mais ce cation est difficile à précipiter (McCarthy et al, 1991) et les reprises par lessivage sont rapides (Pierson et Taylor, 1994). C'est toutefois, les reprises par les végétaux qui dominent le cycle du potassium (Foster et al, 1983). Le potassium est en effet un nutriment important pour les macrophytes. Les plantes libèrent rapidement, à leur mort, cet élément (Martin, 1983) sous forme particulière notamment (Seimbille, 1986).

Le stock de potassium est d'autant plus important dans les végétaux que cet élément est peu abondant dans les eaux du fleuve.

10.5 FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU DELTA

En amont du delta, la qualité chimique des eaux du Niger et du Bani montre une différence qui reflète la particularité des bassins versants. Les taux de silice sont plus élevés dans les eaux du Niger que dans celles du Bani, ce qui est dû au lessivage des grès et formations latéritiques affleurantes le long du fleuve Niger.

Durant l'étiage, les mares, mayos, lacs s'assèchent. La concentration minérale des eaux augmente sous l'effet de l'évaporation. Les végétaux facilitent la pénétration des eaux dans les sols et les nappes souterraines et l'évapotranspiration comme la croissance des macrophytes permettent une consommation de sels minéraux.

Sous l'effet des fortes évaporations dans les plaines inondées en hautes eaux et coupées du réseau hydrographique à la décrue, il y a précipitation de quartz, montmorillonite sodique et magnésienne, nodules calcaires, sépiolite (Gallais, 1967, Blanck, 1973, McIntosh et McIntosh, 1980, Cogels, 1986, Valles et al, 1989).

Lors de la crue suivante, les premières eaux, issues des pluies faiblement minéralisées tombées sur la Dorsale Guinéenne et le Fouta Djallon, entraînent une dilution des eaux du fleuve. Mais, les eaux sursaturées des plaines, de la zone non saturée des sols et des nappes sont en partie remises en circulation, apportant, sur le Bani, un enrichissement minéral en hautes eaux et, sur le delta aval, une augmentation des concentrations au début de la décrue.

L'eau du Niger s'étale sur les plaines, redissout les minéraux précipités les plus facilement mobilisables comme le potassium, magnésium. Dans les zones périphériques les plus éloignées et rarement inondées, les seules reprises possibles sont dues aux vents qui remettent en suspension les sels sous forme particulière.

C'est durant la montée des eaux et la dilution des dépôts anciens et des mares stagnantes que les précipitations atmosphériques sont les plus abondantes. Pourtant, de juillet à

septembre, les pluies n'apportent que peu d'éléments dissous. En mai et juin, les eaux de pluies sont plus concentrées mais les reprises par évaporation ou par les végétaux sont fortes. En octobre, les superficies inondées sont maximales et les pluies efficaces mais ces apports ne représentent alors que 0,01 % des apports par le Niger et le Bani.

La vidange des plaines se fait durant la décrue créant durant deux mois un excédent de matières dissoutes aux sorties du delta central.

Ce sont donc la superficie des plaines inondées et l'abondance de la végétation qui sont les facteurs les plus influents dans l'évolution de la qualité chimique des eaux du delta. C'est donc principalement dans le delta amont, de Ke-Macina+Douna aux sorties du lac Debo que se font les changements majeurs. Seule la silice subit, de Akka à Dire, une évolution notable. Ceci est dû au produit de solubilité de cet élément qui permet un dépôt sous forme de quartz principalement et à la prolifération de diatomées capables de transformer H_4SiO_4 en silice particulaire.

Les pertes globales d'éléments dissous, en 1992-1993, entre les entrées du delta et Dire s'élèvent à 483000 tonnes, ce qui représenterait un dépôt régulier sur les 14000 km² inondés de 3/100 de mm.

En résumé, les éléments dissous proviennent des bassins versants amont du Niger et du Bani. Le fleuve a acquis son caractère chimique propre dès l'entrée du delta.

La silice et le magnésium proviennent des apports amont mais également du ruissellement sur les sols deltaïques.

11. LES FLUX DE DIFFERENTES FORMES NON-MINERALES DU CARBONE

INTRODUCTION

Les gaz contenant du carbone comme CH_4 et CO_2 primaire se retrouvent à la surface du globe sous différentes formes de carbone : carbonate des roches, carbonate total dissous dans les eaux, composés du carbone organique du monde biologique et des sols (Bolin et al, 1979). Ces deux composés, CO_2 et CH_4 sont les principaux fournisseurs de l'atmosphère en carbone.

Le dioxyde de carbone à une origine crustale, volcanique et de décarbonatation.

Le dégagement de méthane est le produit de la décomposition bactérienne anaérobie de la matière organique. Le carbone organique dissous est également un support important du développement bactérien des rivières (Findley et al, 1991).

Ces deux composés du carbone sont donc des dérivés de la matière organique et c'est cette similitude de fonctionnement qui nous a amené à en discuter dans un même chapitre.

Le carbone organique se trouve sous forme dissoute et particulaire alors que le méthane est un gaz qui peut diffuser à travers l'interface eau-atmosphère lorsque les conditions de saturation sont atteintes.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la détermination des flux de carbone organique particulaire et dissous du début de la crue (juillet) au maximum de l'inondation (novembre) à travers le delta. Cette partie du cycle du carbone sera mise en parallèle avec celle concernant le carbone inorganique. L'estimation du flux annuel de carbone organique total pourra être comparée aux bilans annuels mondiaux des exportations vers l'océan.

Des mesures de méthane ont été réalisées, en toute saison, sur le delta de Mopti à Dire. L'analyse de la variabilité spatiale et temporelle des flux, la comparaison du comportement des différents biotopes pourra amener à l'estimation d'un dégagement annuel de méthane sur la totalité des zones inondées de la cuvette lacustre.

11.1 LE CARBONE ORGANIQUE

Au départ, tout le carbone est d'origine atmosphérique (fig.11.1.1). Celui des roches provient du pompage du CO_2 par les organismes et/ou précipitation chimique (discuté en chapitre 9) et celui des plantes est transformé par photosynthèse.

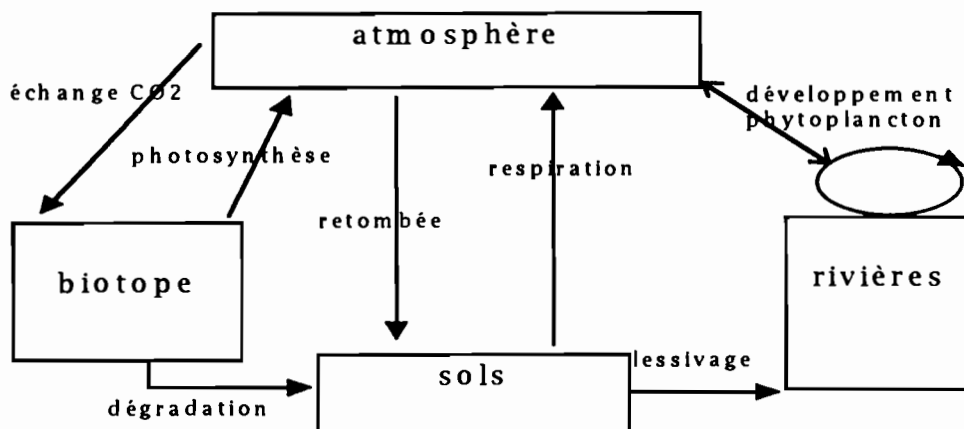


Fig.11.1.1 : Schéma du cycle du carbone organique

Le carbone organique est fortement dépendant du biotope (végétation et sols) et du cycle végétal alors que le carbone inorganique provient essentiellement des minéraux des roches. Le carbone inorganique est presque exclusivement sous forme dissoute. Les bilans du transfert des continents vers les océans montrent que le flux de carbone organique représente un peu plus de la moitié du flux total de carbone transporté par les fleuves (Meybeck, 1993).

Le carbone organique se trouve transporté par les rivières sous deux formes; le carbone organique dissous (COD) et le carbone organique particulaire (COP). Cette limite théorique se fait à $0,45 \mu\text{m}$ par filtration de l'eau.

Le COD et le COP proviennent, d'une part, de l'érosion de la matière organique des sols et d'autre part de la production du phytoplancton dans les rivières et des plantes des marécages. Cette différenciation entre apports allochtones et autochtones est difficile à faire mais elle existe toujours dans les rivières.

La matière organique est composée d'environ 50 % de carbone organique (Bolin et al, 1979, Schlesinger et Melack, 1981, Meybeck, 1984) et leurs évolutions sont donc liées. Dans les sols, les grosses particules de matière organique sont lessivées puis dégradées en fines particules, en COD et enfin en CO_2 dans les rivières ou les sols. Si la dégradation se poursuit, une partie du COD se transforme en composés réfractaires, notamment les acides fulviques (Schlesinger et Melack, 1981).

La production primaire (phytoplancton, algues unicellulaires, plantes des marécages) est un grand fournisseur de matière organique (Degens, 1979, Ajtay et al, 1979).

Les principales phytocénoses rencontrées dans le delta sont les bourgoutières, les vétiveraies, les oryzaies et les mares à nénuphars (Wuillot, 1994). L'abondance des nutriments (P, N, C) et l'état de l'inondation règle le développement du phytoplancton, des algues, la prolifération des micro-organismes et des végétaux et donc les apports de matière organique dans les eaux et les sols. L'intensité de la lumière (ou transparence de l'eau), la turbulence, la température de l'eau sont des facteurs limitants du développement des micro-organismes de l'eau (de Vooy, 1979, Ittekkot, 1988).

11.1.1 LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE

11.1.1.1 Concentration de COP dans le delta au début et au maximum de la crue

Au début de la crue, en juillet, cinq prélèvements ont été faits depuis Saya jusqu'à Dire. La station de Saya a été préférée à celle de Nantaka car le mélange entre les eaux du Niger et du Bani y est réalisé. En août, les mesures concernent les eaux de Saya et du lac Debo.

C'est au maximum de la crue que les huit autres échantillons ont été prélevés.

Il existe deux unités pour exprimer les quantités de carbone organique particulaire ; la masse de carbone particulaire par unité de volume d'eau (mg C l^{-1}) ou le % de COP par rapport aux suspensions totales (TS). Le terme TS est utilisé ici plutôt que le terme MeS du fait d'une filtration différente expliquée au paragraphe 11.1.1.2. Le TS comporte toujours les particules organiques et inorganiques.

Les eaux du delta ont des teneurs relatives en COP qui varient de 1.2 à 14.7 % (tableau 11.1.1).

date	station	TS mg l^{-1}	COP mg l^{-1}	COP %
29/06/1993	SAYA	6.4	0.28	4.36
30/06/1993	KONA	10.9	0.27	2.41
30/06/1993	DEBO	11.9	0.21	1.71
02/07/1993	DIRE	13.2	0.24	1.8
04/08/1993	SAYA	13.5	0.26	1.91
05/08/1993	DEBO	12	0.26	2.17
28/10/1993	NANTAKA	46	1.22	2.65
29/10/1993	SAYA	27	0.73	2.69
30/10/1993	KONA	27.2	0.67	2.45
30/10/1993	DEBO	16.8	0.66	3.91
31/10/1993	SAH	13.5	0.5	3.72
02/11/1993	DIRE	15.2	0.55	3.61
04/11/1993	AKKA	8.7	0.35	3.98
29/10/1993	BATAMANI	5.7	0.84	14.68
01/07/1993	ATTARA	66.7	0.83	1.24

Tableau 11.1.1 : Résultats des analyses de COP exprimés en % et en mg C l^{-1}

Les résultats donnés dans ce chapitre correspondent environ à la moitié des valeurs obtenues par attaque à l'eau oxygénée (cf chapitre 9.2.1). Ceci est dû au fait que la méthode

tient compte de l'ensemble de la matière organique (soit 2*COP) alors que l'étude actuelle porte sur le carbone organique uniquement. Mais il est difficile de comparer ces valeurs car les prélèvements n'ont pas été fait à la même époque (température différente).

Les concentrations inférieures à 2,00 % correspondent environ à un COP allochtone provenant des sols du bassin.

L'eau la plus riche en COP a été recueillie sur une mare (Batamani) alors que les autres prélèvements proviennent du fleuve Niger. L'échantillon de Batamani permet de constater que les mares du delta sont relativement plus riches en carbone organique. Les concentrations relevées correspondent à des teneurs de 29,4 % de MO, soit presque 1/3 des particules en suspension. Par rapport au fleuve, de faibles vitesses d'écoulement accentuent les dépôts de matières minérales alors que le développement planctonique est important.

L'eau prélevée à Attara en juillet présente une concentration de matière en suspension qui n'est pas en accord avec les concentrations mesurées sur le Niger amont et aval. Ceci peut être dû à une erreur de mesure, de prélèvement ou à un phénomène local. Cette valeur a donc été écartée.

Pour les eaux du fleuve Niger, la moyenne des mois de juillet et août est de $2,39 \pm 1,00$ %. Pour la période de crue, la moyenne est de $3,29 \pm 0,66$ %. Ces moyennes correspondent à des concentrations, respectivement, de 0,25 et 0,67 mg C l⁻¹. Ces valeurs sont très inférieures à la moyenne des régions semi-arides calculées par Meybeck (1984).

Ces premières données 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.

11.1.1.2 Relation entre le COP et les particules en suspension

En ce qui concerne l'évolution des concentrations du COP et des TS, il existe deux mécanismes qui agissent en opposition. L'augmentation des MeS 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.

La figure 11.1.2 met en relation la concentration en TS (mg l⁻¹) et les teneurs relatives de COP (%) par rapport aux TS. Il apparaît une relation inverse entre ces deux facteurs. Pour la période de juillet-août, le coefficient de corrélation est de -0,96. Il est un peu moins bon pour la période des hautes eaux ($R=-0,87$). Pour la période des hautes eaux, la relation est logarithmique alors qu'elle est linéaire durant les moyennes eaux. Les deux courbes se rejoignent en un même point qui représente la composition moyenne des eaux entrant dans le delta. Il y a un palier durant les hautes eaux car la production locale de matière organique est plus importante lorsque la végétation est abondante.

L'évolution observée en «basses» eaux est peu importante car la variation des matières totales en suspension est faible à cette période de l'année. De plus, les taux de particules organiques mesurés sont celles des sols du bassin versant et ne représenterait qu'un apport allochtone.

Une évolution inverse entre les TS et le COP est également observée sur plusieurs grands fleuves mondiaux par Schlesinger et Melack (1981), Meybeck (1982), Wasson et al (1991), Guyot et al (1993). C'est l'arrivée de matières minérales provenant du bassin amont et transportées par le fleuve qui conduit à une dilution des particules organiques autochtones. Nous avons représenté sur la figure 11.1.3 la relation entre le COP exprimé en mg l^{-1} et les concentrations de TS (mg l^{-1}). On peut définir une régression linéaire de la forme :

$$\text{COP} = 0,025 * \text{TS} + 0,045 \quad (R = 0,93)$$

La relation obtenue sur la fig.11.1.2. et 11.1.3, nous a montré que l'évolution du COP et TS est liée mais que l'origine du carbone est double alors que les matières en suspension proviennent essentiellement du bassin versant avec, le plus souvent, moins de 10 % d'origine autochtone.

Le CO provient aussi de la dégradation de la matière organique des végétaux aquatiques et du phytoplancton dans les zones inondées qui sont le plus abondant en période de crue. Il y a une mise en solution et/ou une remise en suspension de matière organique d'origine phytoplanctonique à l'arrivée de l'onde de crue (Findlay et al, 1991). Ceci est un des phénomènes qui entre en jeu dans le delta central.

C'est la crue qui apporte ces matériaux inorganiques et qui permet également la remise en suspension de la matière organique accumulée dans les bas fonds durant la saison sèche. La source de COP allochtone fournit de la matière toute l'année en concentration constante (en terme de % de COP).

Il est important de noter que les concentrations de TS sont celles mesurées sur les filtres GF/C. Il existe un écart important entre ces valeurs et celles mesurées parallèlement sur les filtres en nitrate de cellulose (MeS). Au cours des mois de juillet et août, la valeur de concentration sur les filtres en fibre de verre est 4,4 fois plus faible que celle sur filtres en nitrate de cellulose. La différence de porosité ($\approx 0,70 \mu\text{m}$ pour GF/C et $0,22 \mu\text{m}$ pour ceux en nitrate de cellulose) expliquerait que près de 20 % des matières en suspension passent au travers d'un filtre en fibre de verre. Une étude faite par Lewis et Saunders (1989) met en évidence un écart entre ces deux méthodes de filtration de 6 % au maximum.

Un si grand écart s'explique par le fait que les particules transportées au début de la crue sont extrêmement fines. Une partie des particules colloïdales peuvent passer au travers des filtres en fibre de verre (Meybeck, 1982). L'analyse des diagrammes de granulométrie montre que plus de 30 % des particules ont une taille comprise entre $0,22$ et $0,70 \mu\text{m}$ durant la montée de la crue (fig.11.1.4). Les deux courbes sont parallèles jusqu'au diamètre de $0,5 \mu\text{m}$ environ. En hautes eaux, l'importance des très fines particules est moindre.

La différence n'est que de 6 % au mois de novembre où les concentrations moyennes sont faibles et les particules très fines moins abondantes.

La relation entre la concentration de MeS ($> 0,22 \mu\text{m}$) et le COP (mg l^{-1}) est bonne. Les plus fortes valeurs de COP (mg C l^{-1}) se retrouvent sur des eaux où la concentration en MeS est forte. Ceci indique que les apports de matières du bassin amont sont à la fois minérales et organiques.

11.1.1.3 Evolution spatiale du COP

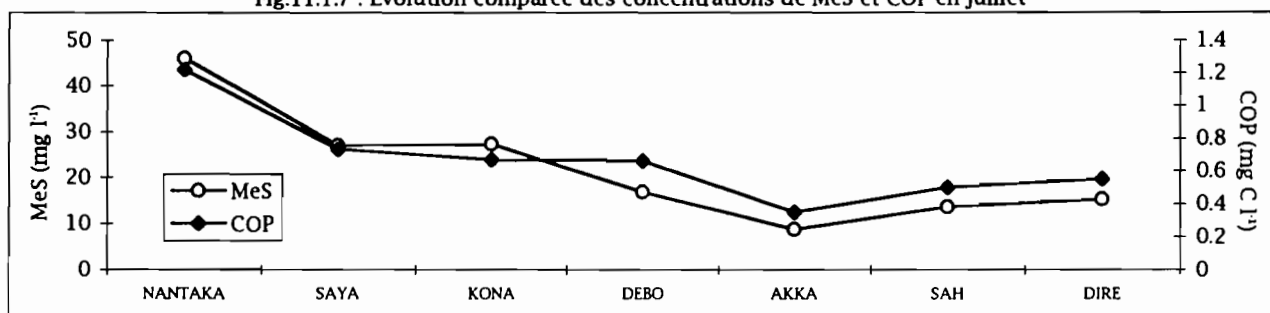
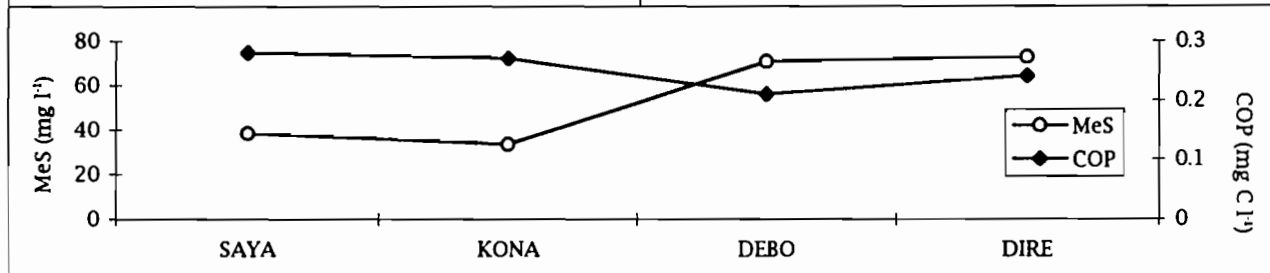
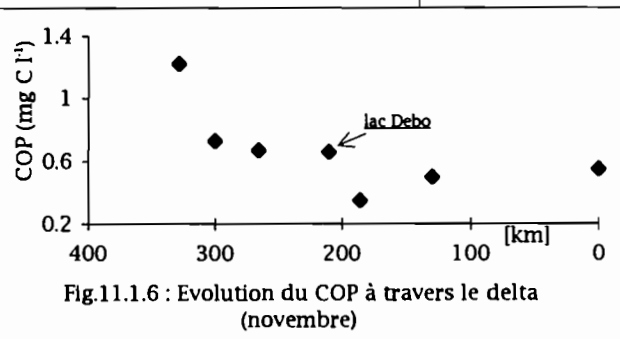
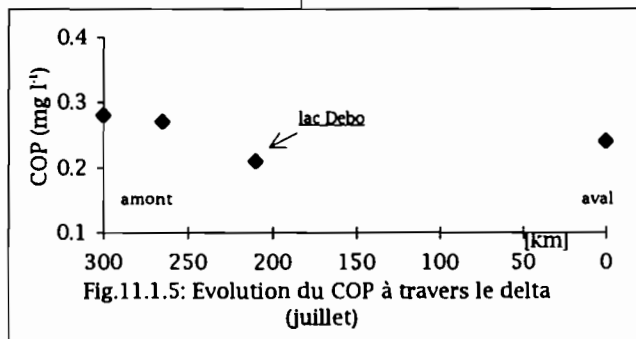
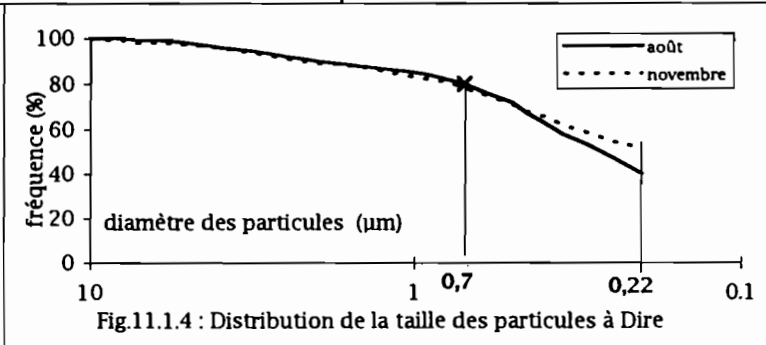
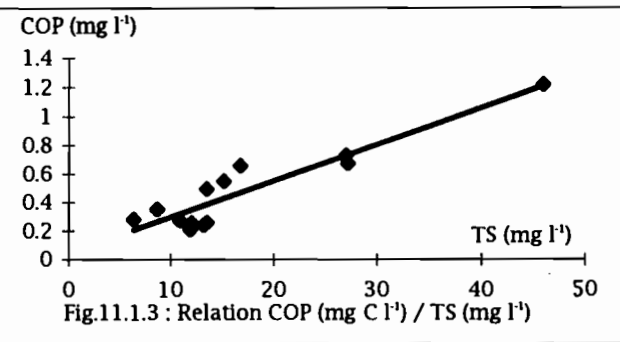
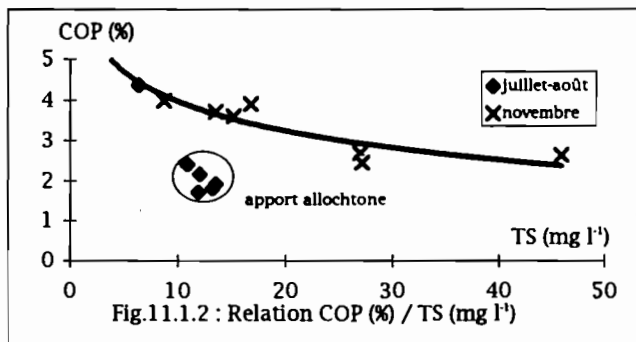
Les figures 11.1.5 et 11.1.6 représentent les concentrations de carbone organique particulaire sur les différentes stations au mois de juillet et au mois de novembre. On observe une diminution des concentrations du COP en amont du lac Debo. Entre Akka et Dire, il y a une reprise du transport de la MO particulaire. Le COP peut être apporté par la remise en suspension de la MO benthique, la production primaire in situ ou des apports par le lac Debo. En basses eaux, la région du lac Debo est la seule inondée et le développement de la végétation y est permanent. Le lac Debo permet donc un dépôt des matières en jouant le rôle de barrage. En amont, les fortes teneurs en carbone organique de novembre sont dues aux apports des forêts tropicales dans les régions de la dorsale Guinéenne.

Les figures 11.1.7 et 11.1.8 représentent l'évolution des concentrations de COP et de MeS ($0,22 \mu\text{m}$) sur chaque station. En juillet, la baisse de COP au niveau du lac Debo coïncide avec une hausse de la MeS. La part de la production autochtone de carbone organique est moindre au niveau du lac Debo alors que la matière inorganique augmente. L'étude des MeS a montré que les concentrations moyennes de MeS en basses eaux sont plus fortes en aval qu'en amont du lac Debo.

En novembre, l'évolution à travers les zones inondées des concentrations de MeS et COP est parallèle. Cette évolution parallèle signifie que la partie organique des MeS a une origine similaire aux particules minérales. La proportion de carbone organique (en %) est plus importante au niveau et en aval du lac Debo. La sédimentation de matières minérales à ce niveau est plus forte que la sédimentation de carbone organique en raison des caractéristiques différentes de ces deux types de particules.

Pour résumer, on peut souligner quatre points:

- * Le comportement du COP diffère fortement en fin d'étiage et en période de hautes eaux.
- * Le cycle du COP est en relation avec le cycle des TS mais le COP a une origine double alors que les particules inorganiques viennent principalement du lessivage du bassin versant.
- * C'est, sans doute, la propagation de l'onde de crue qui entraîne les matières minérales et permet la remise en suspension de la MO autochtone.
- * La charge en COP de la rivière est diluée par les matières en suspension du bassin versant moins riche en matières organiques.



11.1.1.4 Extrapolation au calcul du flux annuel

Malgré la complexité du fonctionnement du COP et le peu d'information, il est intéressant d'évaluer le total du carbone organique particulaire exporté afin de comparer avec les bilans mondiaux établis par Schlesinger et Melack (1981) ou Meybeck (1982). Nous ne pouvons pas utiliser la bonne relation obtenue entre l'évolution des TS et des COP pour extrapoler les valeurs sur le cycle hydrologique complet car nous ne possédons pas les concentrations de TS sur filtres GF/C pour l'année entière. Ce sont donc les concentrations moyennes de MeS sur l'année qui seront considérées pour l'estimation du bilan de COP.

La station de Dire a été échantillonnée en juillet et novembre et est représentative des sorties du delta. A cette station, les concentrations de MeS sont faibles de décembre à juillet. Le mois de juillet est donc représentatif de l'étiage. D'août à novembre, les concentrations de MeS sont fortes mais sans pic marqué. Le mois de novembre est représentatif de l'ensemble des hautes eaux.

Nous avons estimé que la concentration moyenne de COP est de 0,55 mg C l⁻¹ durant les trois mois de hautes eaux et 0,24 mg C l⁻¹ en basses eaux.

Le calcul est le suivant :

$$C_m = \frac{C_{m_{\text{ét}}} * V_{\text{ét}} + C_{m_{\text{cru}}} * V_{\text{cru}}}{V_{\text{annuel}}}$$

$C_{m_{\text{ét}}}$ et $C_{m_{\text{cru}}}$: concentration moyenne de COP en période d'étiage et de crue (g C m⁻³)

$V_{\text{ét}}$: volume d'eau écoulée pendant les 8 mois de basses eaux (m³)

V_{cru} : volume d'eau écoulée pendant la crue (m³)

La concentration moyenne annuelle du COP à la sortie du delta en 1993-1994 est de 0,39 mg C l⁻¹.

Avec un débit moyen annuel pour cette même année de 540 m³ s⁻¹ et une superficie totale approximative de 280000 km², le flux annuel est de 6640 tonnes, soit un flux spécifique de 0,024 t km⁻² an⁻¹. Cette valeur reste très approximative du fait du manque de données.

Ce flux estimé est extrêmement faible. Les flux spécifiques dans les régions semi-arides vont de 0,3 à 0,6 t km⁻² an⁻¹ (Wasson et al, 1991). La valeur obtenue au Congo par Probst (1994) est de 0,8 t km⁻² an⁻¹, alors que celle de l'Amazonie est de 2,2 t km⁻² an⁻¹.

Ce transport spécifique de matières organiques en suspension pour le fleuve Niger concorde avec les faibles valeurs moyennes de MeS calculées au chapitre 10. La concentration annuelle de COP correspond à 0,34 % des concentrations des MeS.

Les faibles transports s'expliquent par les nombreuses zones qui jouent le rôle de barrage pour les matières particulaires. Le lac Debo est le principal piège à particules mais les levées, les barrages de pêcheurs, les marais permettent aussi le dépôt des éléments en suspension.

11.1.2 LES POLYSACCHARIDES ET LES COMPOSES PHENOLIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION

Les composés phénoliques de la matière en suspension donnent des informations sur la part allochtone de la matière organique, les proportions de ligneux et permettent de définir les conditions du milieu (température, degré d'oxydation).

Deux types d'analyses ont été faites ; celle des polysaccharides et celle des composés phénoliques. La première série concerne quatre stations échantillonnées à la fin du mois de juin, début du mois de juillet et réparties régulièrement de l'amont vers l'aval du delta. La deuxième série a été prélevée durant le début du mois d'août.

11.1.2.1 les polysaccharides

Les polysaccharides peuvent traduire soit la présence d'algues dans les rivières soit l'état de décomposition (\neq fraîcheur) des plantes.

Les résultats exprimés en mg l^{-1} montrent des valeurs plus élevées en août qu'en juin-juillet (fig.11.1.9).

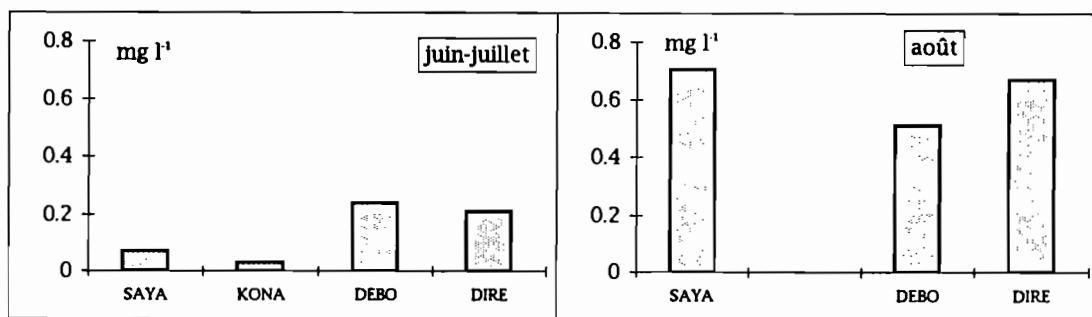


Fig.11.1.9 : Concentrations de polysaccharides dans le fleuve Niger

La montée rapide de début juillet à août des teneurs en polysaccharides peut être attribuable au renouvellement de la végétation dès le début de la montée des eaux et surtout de l'arrivée des premières pluies. Au contraire, si la dégradation végétale est forte, les composés biodégradables (comme les polysaccharides) disparaissent.

Les écarts entre deux stations ne dépassent pas $0,2 \text{ mg l}^{-1}$. Durant le mois de juin-juillet, les deux stations situées sur et en aval du lac Debo sont les plus enrichies en polysaccharides. L'augmentation des valeurs peut être due à une origine spécifique. Les algues contiennent beaucoup de polysaccharides. A la fin de l'étiage, le développement d'algues peut être favorisé par les conditions physico-chimiques et surtout la présence d'eau dans la région du lac Debo.

11.1.2.2 Les composés phénoliques

Les phénols viennent des plantes. Les composés les plus abondants dérivent des ligneux. L'analyse fine permet de différencier les Angiospermes (monocotylédones et dicotylédones) et les Gymnospermes.

Plusieurs méthodes de représentation des phénols ont été adoptées (fig.11.1.10 et 11.1.11).

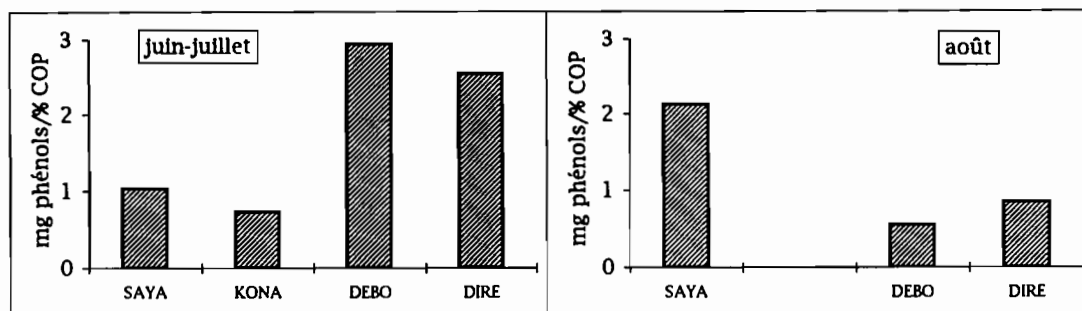


Fig.11.1.10 : Phénols totaux exprimés en fonction de la masse de l'échantillon

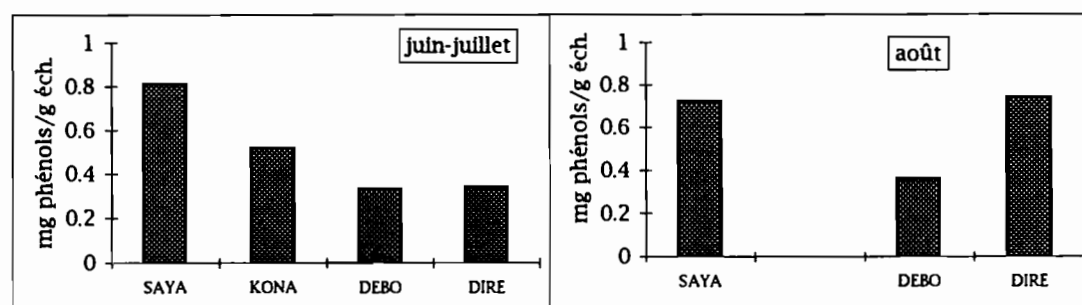


Fig.11.1.11 : Phénols totaux exprimés en fonction de la teneur en carbone organique

Les variations spatiales et temporelles ne montrent pas d'évolution systématique.

En juin-juillet, l'abondance relative du rapport phénols/COP sur le lac Debo peut refléter le captage de poussières allochtones. Ces dépôts d'origine ligneuse seraient d'autant plus importants que les surfaces inondées seraient grandes. Il apparaît, au contraire, une diminution des teneurs en août sur le lac Debo et à Dire qui est due à l'augmentation des concentrations de carbone organique particulaire.

Le rapport phénols/masse de l'échantillon évolue, en juin, vers une diminution en aval qui est bien en relation avec l'augmentation des matières minérales et organiques en suspension mesurée.

Les différences de valeurs entre les phénols exprimés en fonction du carbone organique et les phénols exprimés en fonction de la masse de l'échantillon traduisent des différences dans la composition de la matière organique aux différentes stations. Ces différences peuvent s'expliquer par des apports de petits affluents (le Yame) ou des apports éoliens.

Une analyse fine des phénols de la lignine fait ressortir les séries syringil (S), vanillin (V) et cinnamil (C). Pour ces composants, les syringils sont plutôt représentatifs des Angiospermes

de type feuillus, les vanillins des gymnospermes et les cinnamils des Angiospermes de type graminées.

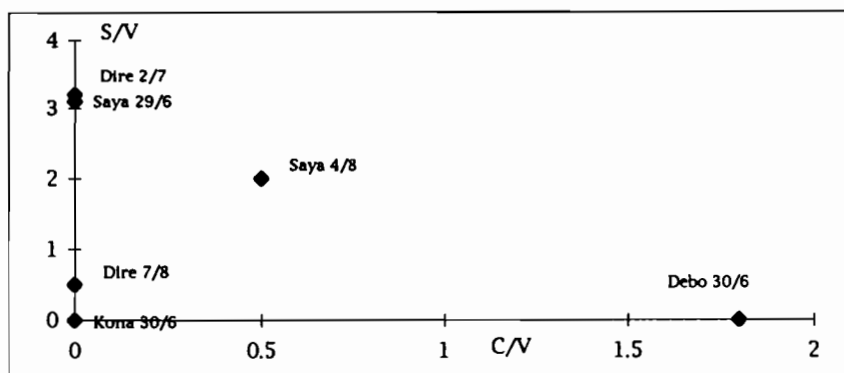


Fig.11.1.12 : Rapports entre les séries syringil (S), vanillin (V) et cinnamil (C)

Les rapports C/V et S/V ont été reportés, pour l'ensemble des stations, sur la figure 11.1.12. La station du lac Debo du 30/6 est la seule qui se place vers le pôle représentatif des graminées. Le développement important d'*Echinochloa stagnina* (monocotylédone) explique cette relative abondance en acides cinnamiques.

À Dire le 2/7 et à Saya le 29/6, c'est la présence des angiospermes (feuillus) qui dominerait alors qu'à Dire le 7/8 et à Kona le 30/6 leur influence serait moindre. Le manque d'information sur le cycle photosynthétique des plantes du delta ne nous permet pas d'expliquer ces différences. Une étude plus poussée de la végétation ligneuse locale abondante (vétivers, mimosa, palmiers divers...) est nécessaire.

Entre début juillet et début août, Dire montre une évolution depuis le pôle gymnosperme vers le pôle angiosperme. Il n'y a pourtant pas d'effet saisonnier puisque des prélèvements de juin et d'août se situent vers de faibles rapports S/V.

Au vu de ces premiers résultats succincts, il paraît nettement que le lac Debo « fournit » une part importante de matières organiques. Par contre, tout au long du fleuve, les fortes hétérogénéités laissent penser que la part allochtone des composés phénoliques et polysaccharides est plus grande.

Le nombre restreint d'échantillons et l'absence d'hétérogénéités nettes dans le temps ne permettent pas d'aboutir à des conclusions évidentes. Il serait intéressant d'avoir les rapports polysaccharides/phénols de MO d'origine bien typée pour voir l'efficacité de ces marqueurs.

11.1.3 LE CARBONE ORGANIQUE DISSOUS

11.1.3.1 Evolution spatiale des concentrations en basses eaux et hautes eaux

Le carbone organique dissous (COD) a été mesuré sur les échantillons d'eau prélevés lors des campagnes de juillet, août et novembre 1993 de Nantaka à Dire (tableau 11.1.2). Ces points correspondent aux sites choisis pour les analyses du carbone organique particulaire à quelques exceptions près, dues à des légères fuites sur les tubes de prélèvements du COD rendant impossible sa mesure.

date	station	COD mg l ⁻¹
29/06/1993	SAYA	3,70
30/06/1993	KONA	2,20
30/06/1993	DEBO	4,35
04/08/1993	SAYA	3,70
05/08/1993	DEBO	3,50
28/10/1993	NANTAKA	4,30
30/10/1993	KONA	3,10
30/10/1993	DEBO	3,45
31/10/1993	SAH	3,95
04/11/1993	AKKA	4,90
29/10/1993	BATAMANI	3,55

Tableau 11.1.2 : Valeurs ponctuelles de carbone organique dissous au travers du delta central

La concentration moyenne est de $3,69 \pm 0,7$ mg l⁻¹ est inférieure à la moyenne des fleuves tropicaux (6 mg l⁻¹) et la moyenne mondiale de 5,75 mg l⁻¹ (Meybeck, 1982). La valeur moyenne de 3 mg l⁻¹ calculée pour les régions semi-arides (Schlesinger et Melack, 1981) est proche de la concentration moyenne de COD du fleuve Niger. C'est en général la combinaison de la production primaire de matière par les plantes et du taux de décomposition qui règle les quantités de COD dans les rivières (Thurman, 1986). Le bassin versant amont peu boisé ne libère pas d'aussi grandes quantités de carbone que les forêts de la zone tropicale Africaine. De plus, dans le delta central, l'abondance de phytoplancton qui se nourrit de carbone organique dissous autochtone et de nutriments provenant du bassin versant explique également de faibles concentrations.

Des mesures faites en 1981 sur le fleuve Niger au Nigeria par Martins (1988) fournissent des valeurs allant de 2 à 6,5 mg l⁻¹ avec les plus fortes teneurs juste avant le pic de crue. Cette augmentation est alors attribuée à la remise en solution de l'eau interstitielle contenue dans les sols et dont les concentrations en matière organique sont élevées (Lewis et Saunders, 1989).

Le coefficient de variation pour l'ensemble des valeurs de 19 % souligne une relative stabilité spatio-temporelle de ces concentrations de COD (fig.11.1.13). Il n'y a pas de relation entre le

carbone organique dissous et le débit du fleuve contrairement à ce qui a été observé sur d'autres grands systèmes fluviaux. C'est le lessivage par les pluies du carbone organique soluble accumulé dans les sols qui entraîne alors une augmentation des concentrations de COD lors de la crue (flushing effect).

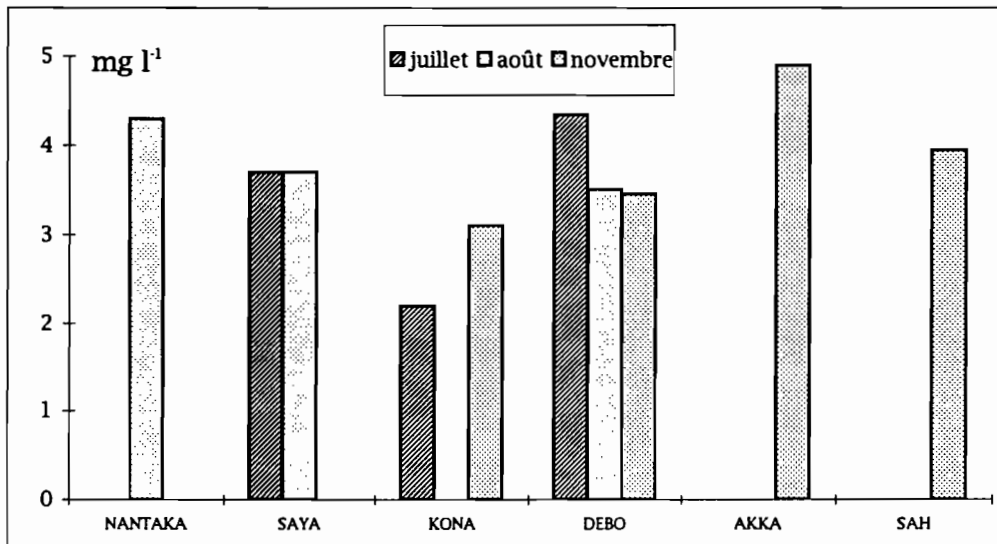


Fig.11.1.13 : Concentrations de COD dans le delta durant trois périodes, juillet, août et novembre

Durant la campagne de novembre, si l'on excepte la station de Sah située sur le Bara Issa, l'évolution des concentrations de COD sur le bras principal du Niger se fait vers de plus fortes teneurs en aval. L'augmentation peut être attribuée à une libération par le phytoplancton et les macrophytes ou par un apport des zones périphériques des plaines inondées (Findlay et al, 1991). La végétation du delta central étant fortement développée en novembre, un enrichissement en COD à la sortie de la cuvette est possible.

Le COD représente plus de 78 % du carbone organique total ($\Sigma \text{COD} + \text{COP}$) et plus de 90 % en période de hautes eaux. Les valeurs du paramètre R ($R(\%) = \frac{\text{COD}(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})}{\text{COT}(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})}$), sont très différentes d'un système hydrique à l'autre avec une variation de 10 à 90 % pour une moyenne mondiale de 60 % (Meybeck, 1982).

Pour le Niger, hormis la station de Nantaka, les plus forts rapports entre COD et COP sont observés en basses eaux (fig.11.1.14). Les points se situent tous au-dessus de la droite 1:1 mais ne montrent pas une relation directe entre ces deux formes du carbone organique.

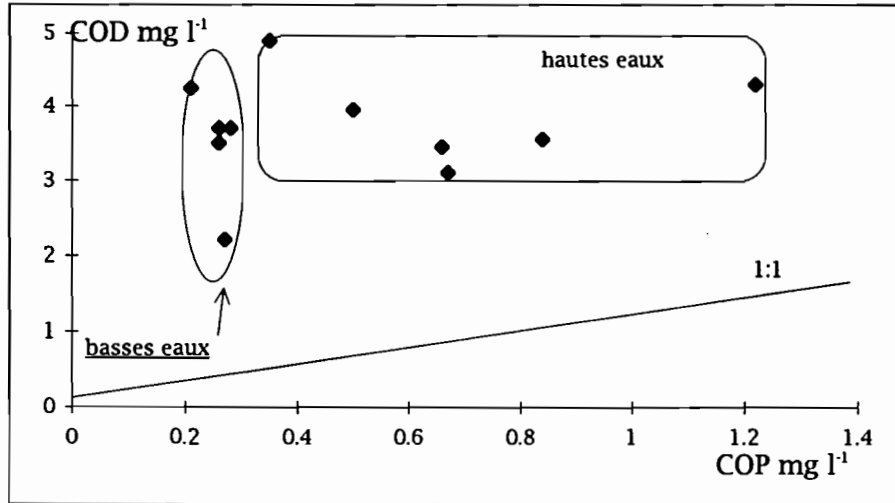


Fig.11.1.14 : Relation entre COD et COP pour les prélèvements faits lors de trois campagnes à travers le delta

11.1.3.2 Transport spécifique et bilan annuel

Malgré le peu de valeurs disponibles, il est possible d'estimer le transport moyen annuel du fait de la relative stabilité des concentrations de COD.

La moyenne calculée (3,69) est considérée comme représentative de la concentration moyenne annuelle des eaux de la cuvette lacustre du fleuve Niger.

Le flux annuel en 1993 à la sortie de la cuvette est donc de $6,42 \cdot 10^{10} \text{ g an}^{-1}$ soit un flux spécifique de $0,25 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Les valeurs mondiales moyennes extrapolées par Meybeck (1982) sont de $130 \cdot 10^{12} \text{ g an}^{-1}$ et $0,2$ à $14 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Le Niger se situe donc parmi les fleuves dont l'apport annuel de COD aux océans est le plus bas.

En ajoutant le bilan annuel de COP calculé au paragraphe 11.1.14, on arrive à un bilan annuel de carbone organique total de $6,95 \cdot 10^{10} \text{ g an}^{-1}$ soit un transport spécifique de $0,25 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Le COP représente alors à peine 10 % du flux annuel de COT. L'extrême faiblesse de ces flux par rapport aux valeurs mondiales ($0,4 \cdot 10^{15}$ selon Schlesinger et Melack, 1981) est due essentiellement au transport de COP.

11.2 LE METHANE

11.2.1 ROLE DES REGIONS HUMIDES SUR LE CLIMAT MONDIAL

Le méthane contribue pour 1 % au cycle du carbone atmosphérique (Ehhalt, 1974) et est le composant organique chimique le plus abondant dans la troposphère.

Le CH₄ dans la troposphère a une action « effet de serre » 25 fois (en taux molaire) plus importante que l'oxyde de carbone (Cicerone et Oremland, 1988).

Actuellement, le taux de méthane dans l'air est environ de 1,7 ppmv (*partie pour million volumique*) (Ehhalt, 1974, Lal et al, 1988, Tyler et al, 1994, Blake et Rowland, 1988). Depuis 200 ans, ce taux a augmenté de 1 % chaque année (Khalil et Rasmussen, 1987, Isaksen et Hov, 1987, Steele et al, 1987, Blake et Rowland, 1988, Marenco et al, 1989, Zander et al, 1989, Hirota, 1989, Dianov-Klokov et Yurganov, 1989), à cause de l'augmentation de la population, l'intensification des activités humaines comme la consommation d'énergies fossiles ou l'agriculture (Rasmussen et Khalil, 1981). On observe, pour la première fois en 1992, une diminution de l'augmentation annuelle du taux de méthane à 4,7 ppbv qui est due au ralentissement de la consommation d'énergie fossile et aussi à l'augmentation possible des radicaux OH (Rudolph, 1994, Khalil et Rasmussen, 1994).

Si l'activité anthropique est actuellement responsable de l'augmentation des flux de méthane sur la planète, les variations de teneurs de CH₄ de l'air ont été observées depuis plusieurs millénaires. L'étude des gaz contenus dans les bulles d'air de carottes de glace provenant de l'Arctique et du Groenland a permis d'observer de très fortes variations du taux de méthane dans l'air. Ces variations sont en relation avec les changements de températures au cours du Quaternaire (Pearman et al, 1986, Cicerone et Oremland, 1988, Chappellaz et al, 1990, Lorius, 1991, Raynaud et al, 1993, Boissavy-Vinau, 1994, Wefer et al, 1994).

Il semble que les variations climatiques sont liées aux plus forts producteurs « naturels » de méthane que sont les plaines inondées notamment dans les zones tropicales humides (Petit-Maire et al, 1991, Chappellaz et al, 1993, Freeman et al, 1993, Boissavy-Vinau, 1994).

L'augmentation de CH₄ agit sur l'effet de serre qui entraîne un réchauffement de la planète et ainsi un changement de la teneur en vapeur d'eau atmosphérique (à effet de serre important), de l'albédo, de la distribution des nuages...(Raynaud et al, 1993).

Actuellement, les sources naturelles représentent 25 à 50 % du dégagement de méthane global (Devol et al, 1990) dont les grandes zones inondées sont responsables à elles seules d'environ 10 à 20 % du flux (Cicerone et Oremland, 1988, Servant, 1991, Delmas et al, 1992a, Stevens et Engelkemeir, 1988).

Le delta central du fleuve Niger, lors des phases humides de l'Holocène, avait des superficies sans doute bien supérieures à 50000 km² et son apport en CH₄ a dû jouer un rôle important sur l'évolution du climat mondial au cours du Quaternaire.

11.2.2 LE CYCLE DU METHANE

11.2.2.1 Formation du méthane dans les sédiments

L'unique source biologique de méthane est bactérienne. Ce sont des bactéries méthanogènes de la famille des *Archaeobacteria* qui, dans un milieu strictement anaérobie, permettent la formation de méthane dans les milieux ouverts comme les marais, zones inondées ou par l'intermédiaire des tubes digestifs des ruminants et des termites (Wilson et al, 1989, Rouland et al, 1993). Le flux de méthane est le résultat de la méthanogénèse, produit terminal de la reminéralisation bactérienne de la matière organique sous conditions anaérobies (Wilson et al, 1989, Devol et al, 1990). Ainsi, la production de méthane dans les sols dépend des communautés bactériennes et de leur environnement. La production primaire, les taux de matière organique, la qualité et la quantité du substrat et certains paramètres physico-chimiques (le potentiel Redox, la température de l'air et des sols, les teneurs en sulfates, le taux de matière organique, le pH, la lumière, le vent et le niveau de la nappe souterraine) influencent le développement des bactéries méthanogènes (Trudinger et al, 1979, Crill et Martens, 1983, Delaune et al, 1983, Cicerone et Oremland, 1988, Keller et Stallard, 1994, Roulet et al, 1994, Valentine et al, 1994, Yagi et al, 1994).

Il existe également une bactérie, *Methylobacterium organophilum*, ou d'autres du genre *Nitrosomonas* (Minami et Neue, 1994), capables d'oxyder le méthane. L'action de ces bactéries, aérobies ou anaérobies, limite considérablement les flux de CH₄ (Seiler et al, 1984, Cicerone et Oremland, 1988, Prieme,1994). Les sols riches en bactéries méthanotrophes, comme les sols des savanes, parois des termitières, etc... constituent un "puits" pour ce gaz. L'importance des biotopes à bactéries capables d'oxyder le méthane réduit considérablement le flux global des régions humides (King, 1990, Delmas et al, 1991, Delmas et al, 1992a).

11.2.2.2 Transfert du méthane vers l'atmosphère

Le méthane produit dans les sédiments peut s'échapper dans l'atmosphère de 3 manières: diffusion à travers la couche air-eau de surface, injection directe dans l'air par des bulles, flux à travers les plantes (Barber et al, 1988).

La diffusion a lieu lorsque l'eau et le sédiment sont sursaturés par rapport à l'atmosphère (De Angelis et Scranton, 1993). Ce phénomène oblige le passage du gaz par la couche oxydante située à la limite eau-sédiment. Une grande partie du CH₄ n'arrive pas dans l'atmosphère (Harriss et al, 1982, Devol et al, 1990, De Angelis et Scranton, 1993, Roulet et al, 1993).

Dans les sédiments, lorsque la production de méthane est trop importante, il y a libération du gaz sous forme de bulles (Rouland et al, 1993). L'oxydation du méthane par des bactéries a surtout de l'effet sur le méthane dissous dans les eaux mais a une faible influence sur les gaz émis sous forme de bulles, l'échange avec l'atmosphère étant rapide.

La figure 11.2.1 reprend le schéma de la diffusion du méthane des sédiments vers l'atmosphère à travers la tranche d'eau.

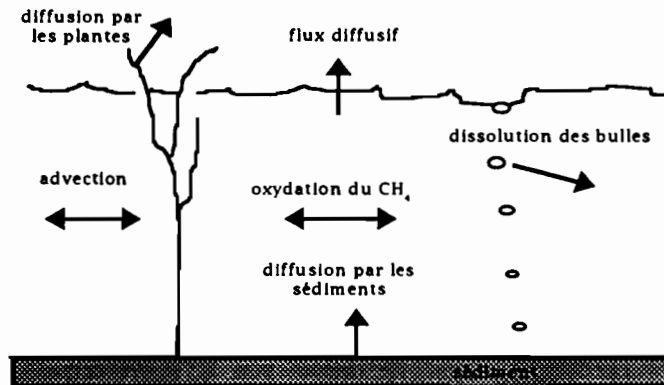


Fig.11.2.1 : Sources et piégeage du méthane dans la colonne d'eau (d'après De Angelis et Scranton, 1993)

Un grand nombre d'études a montré que l'importance de l'un ou de l'autre de ces modes de transport dépend du milieu considéré. Dans les milieux de plaines inondées, le transport par «bulles» représente de 50 à 90 % du transport total (Barber et al, 1988, Crill et al, 1988, Bartlett et al, 1988, Bartlett et al, 1990, Devol et al, 1990, Wassmann et al, 1992, Whiting et Chanton, 1992, Keller et Stallard, 1994).

Le transfert par les plantes vasculaires se fait au travers la tige et par l'intermédiaire des stomates. La diffusion est déterminée par le gradient de concentration entre la plante et l'atmosphère. Au niveau des feuilles des plantes, c'est la conductance stomatique qui détermine les échanges gazeux (Cicerone et al, 1992, Knapp et Yavitt, 1992, Frye et al, 1994). Différents paramètres physiologiques agissent sur la conductance stomatique et permettent une diminution ou augmentation du flux de gaz libéré (fig.11.2.2).

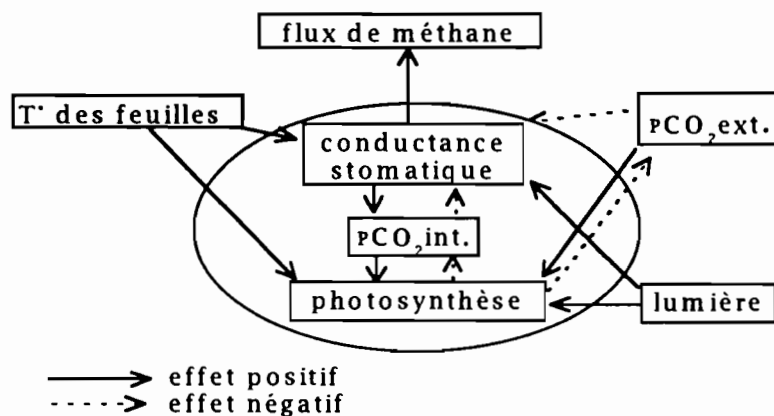


Fig.11.2.2 : Relation entre le flux de méthane de la plante, de son environnement et de quelques variables physiologiques (d'après Knapp et Yavitt, 1992)

Pour Chanton et al (1992), le transfert du méthane dans les plantes se fait à travers les tiges selon plusieurs modes; effusion ou flux de Knudsen, transpiration, diffusion selon la loi de Fick. Ces transferts de gaz dépendent des conditions climatiques et surtout du type de plante (Frye et al, 1994). Ainsi le rôle des stomates serait peu important par rapport à d'autres modes de transport et de dégagement du méthane (Chanton et al, 1992, Whiting et Chanton, 1992).

Selon les milieux, le rôle des plantes dans le transport du CH_4 a été considéré comme négligeable devant l'«ébullition» (Wassmann et al, 1992). En Amazonie, le fait que les macrophytes ne soient pas enracinées dans le sédiment semble être la raison des très faibles dégagements mesurés (Devol et al, 1990).

En revanche, certains auteurs soulignent que le transport par les plantes prend la place du transport par « bulles » et représente 50 à 95 % du total émis dans les marais (Bartlett et al, 1988, Bartlett et al, 1992, Knapp et Yavitt, 1992, Keller et Stallard, 1994).

11.2.2.3 Comportement du méthane dans la stratosphère

Dans la stratosphère, environ 85 % du CH_4 émis est détruit par les radicaux OH pour produire CO , H_2O , CO_2 et H_2 (Ehhalt, 1974, Khalil et Rasmussen, 1983, Cicerone et Oremland, 1988, Delmas et al, 1992b). L'évolution du méthane dans l'atmosphère et la stratosphère est schématisée sur la figure 11.2.3.

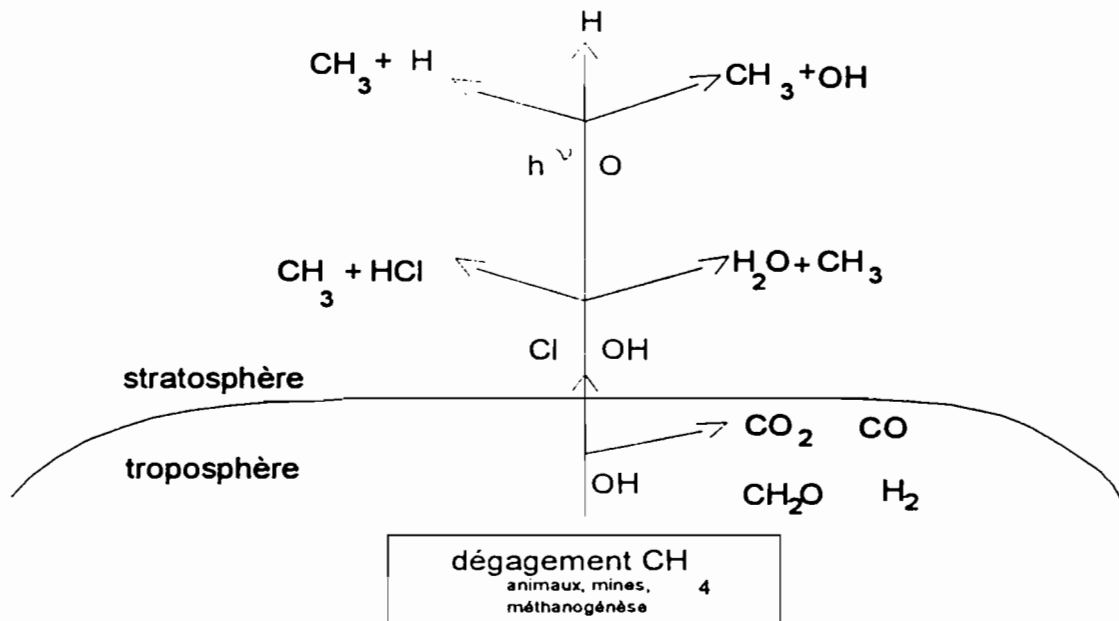


Fig.11.2.3 : Evolution du méthane dans l'atmosphère et la stratosphère (d'après Cicerone et Oremland, 1988)

L'oxydation de CH_4 produit du CO qui sera converti en CO_2 . La production atmosphérique de CO_2 par le CH_4 atmosphérique est de 6 % plus importante que l'apport direct de CO_2 par les diverses sources anthropiques. L'autre effet important est la production de O_3 par oxydation avec les radicaux NO_x dans la troposphère et l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique (Cicerone et Oremland, 1988, Den Elzen et Rotmans, 1993, Thompson et al, 1993). Ainsi, par réaction directe ou indirecte, le méthane est une des sources majeures des gaz à effet de serre.

11.2.3 VARIATIONS SAISONNIERES DES CONCENTRATIONS DE METHANE AU-DESSUS DES ZONES INONDEES

Sur l'ensemble du delta vif, quarante séries de 7 mesures ont été faites entre septembre 1992 et novembre 1993. Les bourgoutières sont les plus représentées. Dans le sens propre du terme, le bourgou est *Echinochloa stagnina*. En raison de la similitude des plantes et de leur proximité, nous parlerons de bourgoutières pour des mares abritant selon leur hauteur d'eau, *Echinochloa stagnina* et *Vossia Cuspidata* en plus ou moins grand nombre. Ces deux plantes sont de type biologique Héliophytes herbacées. Le développement des bourgoutières dépend essentiellement des hauteurs d'eau, des sols et du courant. Les sols argileux et sans courant sont nécessaires à l'implantation de cette végétation. Le long du fleuve, elle est peu abondante alors qu'elle occupe près de 80 % des mares peu profondes. Cette plante est inexistante sur les sols secs. La surface moyenne d'inondation du delta peut être estimée à 6000 km² dont 10 % sont couverts par les bourgoutières.

Vu la diversité des milieux biologiques, des facteurs physico-chimiques intervenant dans la diffusion du méthane, c'est la phytocoenose la plus représentative qui a été le centre d'intérêt de l'étude. Les quelques rares autres mesures sur des rizières, des champs de graminée et des plans d'eau libre s'ajoutent aux valeurs afin de permettre une estimation du flux global. Les sols dénudés et secs, les sables des dunes éoliennes n'ont pas été l'objet de mesure alors que ces milieux sont susceptibles de réoxyder le méthane dégagé par les régions inondées et ainsi diminuer le flux global annuel.

L'échantillon prélevé au temps 0, c'est à dire au moment où la «chambre statique» est placée sur le site, représente la concentration moyenne de l'air en CH_4 entre 0 et 20 cm au-dessus de la surface de l'eau. Ces concentrations sont le reflet de l'intensité des dégagements de méthane dans les zones inondées.

Ce sont ces valeurs qui seront dans un premier temps commentées. Les résultats des analyses de méthane sont donnés en % par volume d'air (tableau 11.2.1).

La concentration moyenne annuelle est de 0,21 %v \pm 0,03. Ces valeurs sont beaucoup plus importantes que celles obtenues dans les champs de riz (Yagi et al, 1994), tourbières de l'hémisphère nord ou végétation flottante dans les plaines inondées d'Amazonie (Devol et al, 1990).

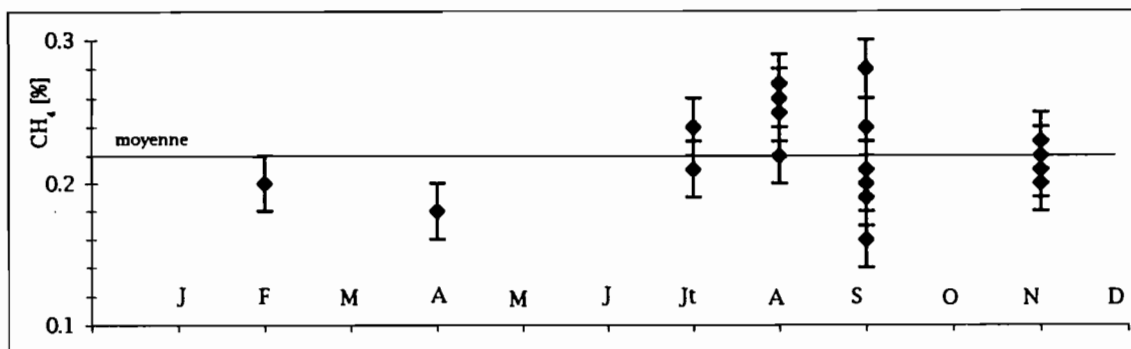


Fig.11.2.4 : Variation saisonnière du taux de méthane dans l'air

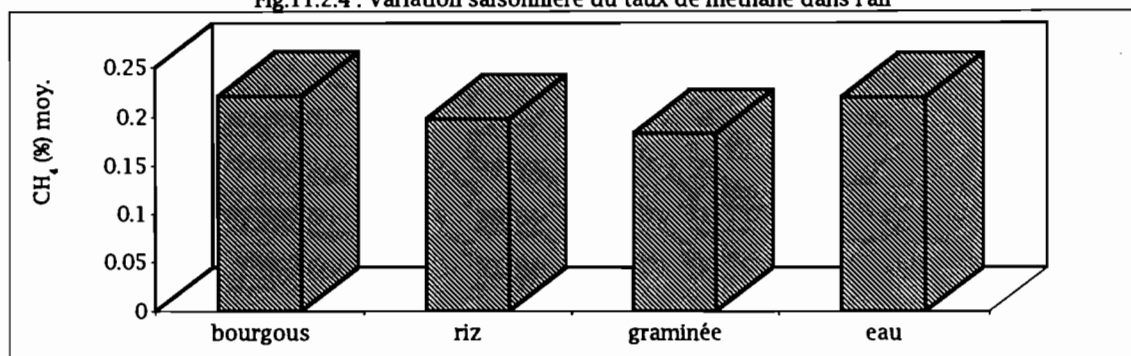


Fig.11.2.5 : Variation du taux de CH₄ au-dessus de plans d'eau occupés par différents types de végétation

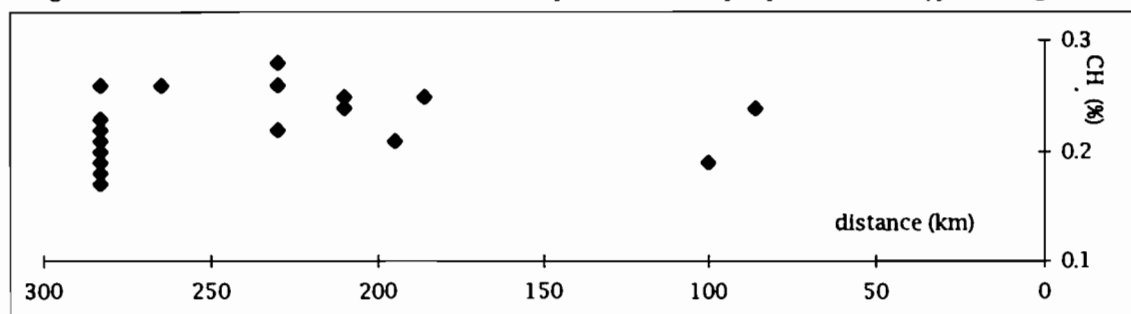


Fig.11.2.6 : Evolution des concentrations de CH₄ dans l'air de Batamani à Niafunke

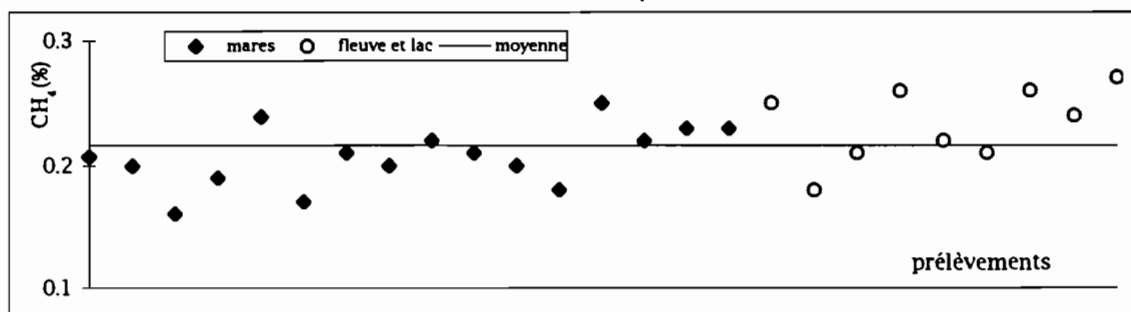


Fig.11.2.7 : Etude des teneurs en méthane de l'air au-dessus des bourgoutières selon le type hydrologique

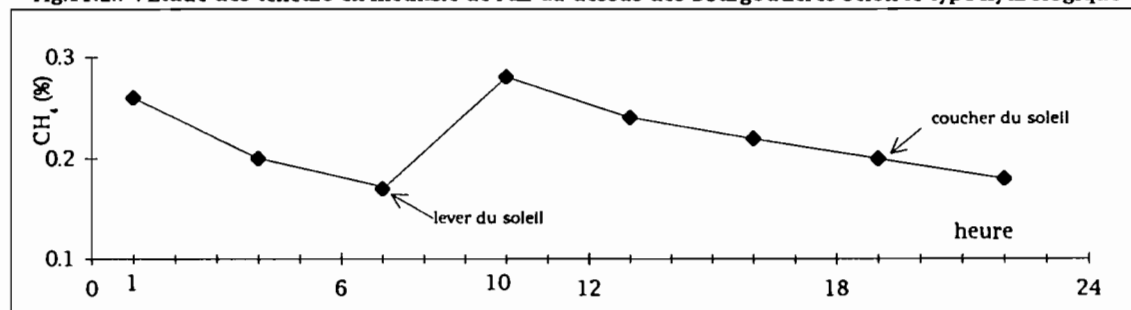


Fig.11.2.8 : Suivi journalier des concentrations en méthane à Batamani

milieu	heure	date	végét.	densité	plant	h. eau	temps	Tair	Teau	cond	pH	redox	Tac	teneur CH4
de prélèvement				[%]	[cm]	[cm]		°C	°C	µS/cm		mV		%v
mare	11h15	06/09/92	bourgou	60	30	72	calme	33.4	32.4	72.3				0.21
mare	11h49	06/09/92	bourgou	40	40	102	nuageux	30.8	32.8	29.3				0.20
mare	15h33	06/09/92	bourgou	80	50	124	calme	32.4	35.3	26.2				0.16
mare	16h07	06/09/92	bourgou	60	50	152	vent	32	35.2	26.5				0.19
mare	16h42	06/09/92	bourgou	40	40	170	vent	31.2	34.6	25.6				0.24
mare	17h25	06/09/92	eau	20		30	couvert	25.4	23.4	113.4				0.25
mare	14h58	06/09/92	nénuphar	80	4	135	calme	29.2	35.8	77.5				0.21
mare	8h00	07/09/92	riz	40	20	22	orage	27.2	27.4	29.3				0.19
mare	16h44	07/09/92	riz	30	20	21	calme	34	32.6	28				0.17
mare	7h00	07/09/92	bourgou	90	30	28	aube	27	29.6	98.1				0.17
mare	10h00	07/09/92	bourgou	90	30	28	vent	32.8	29.4	98.1				0.28
mare	13h00	07/09/92	bourgou	90	30	28	calme	38	32.1	98.1				0.24
mare	16H00	07/09/92	bourgou	90	30	28	calme	37	34.2	98.1				0.22
mare	19h00	07/09/92	bourgou	90	30	28	crépuscule	30.6	32	98.1				0.20
mare	22h00	07/09/92	bourgou	90	30	28	nuit	24.2	31.6	98.1				0.18
mare	1h00	08/09/92	bourgou	90	30	28	nuit	24.2	27.6	98.1				0.26
mare	4h00	08/09/92	bourgou	90	30	28	nuit	23.2	26.4	98.1				0.20
mare	10h33	04/11/92	bourgou	95	30	213	calme	23	26	44.8				0.21
mare	11h10	04/11/92	bourgou	60	40	90	calme	23	27	45.2				0.20
Bara Iss	13h22	05/11/92	bourgou	95	70	189	calme	21	26	43.4				0.22
Walado	10h55	10/11/92	bourgou	90	40	145	calme	24	26.5	42.8				0.21
mare	15h30	25/02/93	bourgou	50	19	36	calme	28	24.3	82.8	7	-270		0.20
mare	17h33	25/04/93	eau			10	calme	28	33	220.8	7.5	-180		0.16
mare	absent	26/04/93	bourgou	20	5	5	calme	21	22	244.1	6.6	-72		0.18
lac Debo	12h53	30/06/93	bourgou	50	10	20	calme	27	29	44.4				0.21
lac Debo	15h43	30/06/93	bourgou	1	30	35	débit	36	31	45.4				0.26
Issa Ber	13h25	04/07/93	bourgou	80	30	30	calme	36	32	65.9				0.24
Niger	15h45	04/08/93	bourgou	50	30	25	calme	26.2	30.6	37.4	6.8	-188		0.27
mare	8h53	05/08/93	bourgou	70	20	12.5	calme	26	28	55.8	6.6	-155	21	0.25
lac Debo	11h08	05/08/93	bourgou	70	40	115	calme	29.6	30.2	47.6	6.7	-185	19	0.26
lac Debo	9h15	06/08/93	bourgou	40	30	50	calme	26.2	27.2	72.3	7.2	-103	34	0.22
rizière	8h30	07/08/93	bourgou	80	18	6	calme	24.8	25.8	115.7	6.6	-28	41	0.22
rizière	9h08	07/08/93	riz	50	15	5.3	calme	25.2	26.2	72.4	7	84		0.24
Issa Ber	17h10	08/08/93	bourgou	50	40	57	vent	26	29.6	46	7.4	-132		0.25
Rizière	8h50	09/08/93	riz	5	30	15	calme	24	27	56.9	7.4	185	26	0.24
mare	14h38	29/10/93	bourgou	90	75	230	calme	35	34.3	63	6			0.23
mare	15h14	29/10/93	bourgou	70	40	230	calme	35	34.3	56	6			0.23
mare	17h00	29/10/93	riz	50	45	5	calme	34.4	32	45	5.5			0.15
lac Debo	15h25	30/10/93	bourgou	100	70	290	calme	33	31.3	51	6.5			0.21
mare	14h00	31/10/93	fonio	50	40	8	calme		33.7	98	6.7			0.22
mare	13h35	01/11/93	herbes	50	15	20	calme		35	54	7.5			0.20
mare	6h13	04/11/93	fonio	90	150	3	calme	18.3	21.7	64	7.1			0.13

Tableau 11.2.1 : Analyse des concentrations de méthane dans l'air sur le delta

*** Variations saisonnières sur les bourgoutières**

Les sites choisis pour l'analyse des différents facteurs susceptibles d'influencer les dégagements de méthane sont des mares et fleuves envahis par le bourgou. Pour chacune des séries de mesures, une ou plusieurs tiges d'*Echinochloa stagnina* ou *Vossia cuspidata* ont été enfermées dans la chambre statique.

On note une différence de concentration de méthane selon les saisons (près de 25%). Les moyennes les plus basses s'observent en période de basses eaux avec des concentrations de $0,18 \pm 0,02$ en février et avril. Au maximum de l'inondation, les concentrations moyennes sont de $0,21 \pm 0,03$ en septembre, $0,21\%v (\pm 0,01)$ en novembre 1992 et $0,20 (\pm 0,04)$ en novembre 1993. C'est au début de l'inondation et pendant la saison des pluies que les teneurs sont les plus fortes. Elles atteignent $0,24 \%v (0,03)$ en juillet et août (fig.11.2.4).

Malgré une disparité des sites et du nombre de mesures, ces résultats nous montrent que ce n'est pas la crue (hauteur d'eau) mais bien le développement végétal qui est le facteur déterminant dans l'importance des dégagements de méthane à partir des bourgoutières.

Les variations saisonnières sont régulées par le cycle des plantes. Les plus fortes teneurs en CH_4 correspondent à la période de floraison des plantes. En hautes eaux, pendant la saison des pluies, l'abondance et l'activité biologique des plantes sont maximales (Barber et al, 1988).

*** Etude de différents phytocoenoses, milieux et sites géographiques**

Les mesures ont été faites sur des bourgoutières, des oryzaies, des champs de fonio, des lacs et des mares ayant une végétation aquatique peu abondante (quelques nénuphars, algues...).

Il est important de noter que, pour toutes les eaux stagnantes, la végétation s'implante rapidement (notamment le bourgou) et qu'il est rare de trouver dans le delta un plan d'eau exempt de végétation. L'homme peut créer de tels environnements nécessaires à ses activités (chenal pour les pirogues, lieux de pêche...). Dans ces conditions, les racines des plantes restent présentes et l'activité des rhizomes est susceptible de favoriser les dégagements de méthane (Whiting et Chanton, 1992, Bartlett et al, 1992).

A partir d'une certaine hauteur d'eau, les plantes ne peuvent plus s'ancrer et les mares et lacs profonds ont des zones d'eau avec quelques rares algues et nénuphars. C'est en raison de la faible représentativité de ce type de milieu qu'aucune eau libre sans végétation n'a été retenue pour notre étude.

Parmi les quatre grands types de végétation étudiés, ce sont les champs de fonio qui sont les moins riches en CH_4 . La moyenne annuelle est de $0,18 \%v \pm 0,05$ pour ce type de végétation, $0,20 \%v \pm 0,04$ pour le riz, $0,22 \%v \pm 0,05$ pour l'eau et $0,22 \%v \pm 0,03$ pour le bourgou (figure 11.2.5). Ces différences sont peu significatives. Le fonio, le riz et le bourgou sont des graminées de type C4 (Martin et al, 1992). Les variations observées sont dues aux

caractéristiques propres des plantes comme l'anatomie des feuilles (épaisseur des cuticules, nombre de stomate), leur teneur en chlorophylle ou leur cycle végétatif.

Il apparaît une homogénéité de la concentration de méthane au-dessus de ces régions.

Il en est de même pour les variations spatiales (fig.11.2.6). De Batamani à Niafunke, les teneurs relatives de méthane dans l'air au-dessus des bourgoutières sont comprises entre 0,17 et 0,27 %v sans évolution latitudinale.

Deux types de milieu hydrologique sont considérés : les mares alimentées indirectement et saisonnièrement par le fleuve et les zones sans écoulement du bras principal du fleuve ou du lac Debo et Walado. Dans les mares, la biomasse et la production primaire sont importantes. La moyenne des mares est de $0,21 \pm 0,03$ %v et celle des fleuves de $0,23 \pm 0,03$. Cette différence n'est pas significative (fig.11.2.7).

** Suivi journalier sur le site de Batamani*

Sur les bords de la mare de Batamani, au milieu du bourgou, un site a été échantillonné toutes les trois heures durant 24 heures. Les résultats montrent une forte augmentation à 10h00 et à 1h00 (fig.11.2.8). A 10h00, un vent fort s'est levé. Plusieurs auteurs relèvent l'importance du vent sur les coefficients d'échange entre l'eau et l'atmosphère (Barber et al, 1988, Keller et al, 1990). Le pic relevé à 1h00 peut également s'expliquer par une reprise de courte durée du vent ou par une activité photosynthétique qui serait influencée la nuit. Cette dernière hypothèse n'a pas été confirmée par d'autres études.

Les stomates se referment à la tombée du jour. Le taux de méthane dans les plantes augmente alors au cours de la nuit. Au lever du soleil (06h00), les stomates s'ouvrent et libèrent brusquement le méthane en excès dans les feuilles (Knapp et Yavitt, 1992). Le résultat de ce rapide dégagement est une deuxième hypothèse pour expliquer le pic que l'on observe à 10h00. Les taux moyens diminuent ensuite car le flux de méthane dégagé par les plantes n'est pas aussi important qu'au lever du jour. Le brassage de l'air avec les sites environnants moins producteur permet une diminution du taux moyen. Au cours de la journée, et avec l'augmentation des températures les stomates se referment et limitent aussi les dégazages.

D'autre part, la diffusion moléculaire qui permet l'échange de gaz avec l'atmosphère n'est pas sensible à la lumière. Par contre, l'activité photosynthétique est liée à l'émission de méthane (Whiting et Chanton, 1992) et à la lumière.

Les variations journalières observées par différents auteurs sont surtout liées aux variations de température du substrat qui influencent directement la méthanogénèse (Harriss et al, 1982, Wilson et al, 1989, Devol et al, 1990, Cicerone et al, 1992, Morrissey et Livingston, 1992, Whiting et Chanton, 1992, Dise, 1993, Dise et al, 1993).

11.2.4 COMPORTEMENT DU MILIEU

Ces mesures représentatives d'une concentration moyenne de l'air à 20 cm de la surface de l'eau font nettement ressortir l'importance de la végétation sur les dégagements de méthane. Il est certain également que cette végétation flottante abondante est à l'origine de teneurs en méthane très supérieures aux valeurs mesurées sur d'autres plaines inondées de climat tropical et continental.

En supposant que les concentrations de matière organique dans les sols au fond des marais soient toujours suffisantes à la méthanogénèse, les différences observées entre les mois de février-avril et juillet-août peuvent s'expliquer par une variation de la température des sédiments, de l'état physiologique des plantes (floraison) (Morrissey et Livingstone, 1992, Whiting et Chanton, 1992, Cicerone et al, 1992, Roulet et al, 1993, Freeman et al, 1993, Roulet et al, 1994). La saturation des sols en eau est nécessaire pour permettre le développement de l'activité bactérienne. Elle est toujours atteinte dans les bourgoutières.

Par contre, les terres exondées sont « consommatrices » de méthane par oxydation.

Différents facteurs climatiques et physico-chimiques ont été enregistrés durant les mesures de flux (fig.11.2.9).

Pour un même milieu, les bourgoutières, il n'apparaît aucune relation entre les teneurs en méthane et les différents paramètres que sont la densité de végétation, la hauteur des plantes, la hauteur d'eau, la conductivité et le pH de l'eau. Il semble que les plus faibles taux de méthane s'observent lorsque le vent est nul. Les plus forts taux sont relevés alors que la température de l'eau est comprise entre 27 et 32°C. Les dégagements gazeux dans les plantes sont maximums autour de 30° puis l'excès de température entraîne la fermeture des stomates, ce qui limite alors les échanges. A 30°, les dégagements étant favorables, la majeure partie du réservoir de méthane se vide. Au-delà de cette température, le taux de gaz disponible est moindre.

On a vu précédemment que la hauteur d'eau n'était pas un facteur limitant car la saturation des sols est toujours atteinte.

Un potentiel Redox très négatif favorise la production de gaz.

Il semble que ce soit davantage les paramètres physico-chimiques du sédiment où prolifèrent les bactéries que l'état de l'eau qui influencent les dégagements de méthane. Les milieux réducteurs (potentiel Redox très négatifs) sont favorables à la prolifération des bactéries méthanogènes ainsi que des températures élevées. Ceci explique la bonne relation entre la température de l'eau et le taux de méthane relevé.

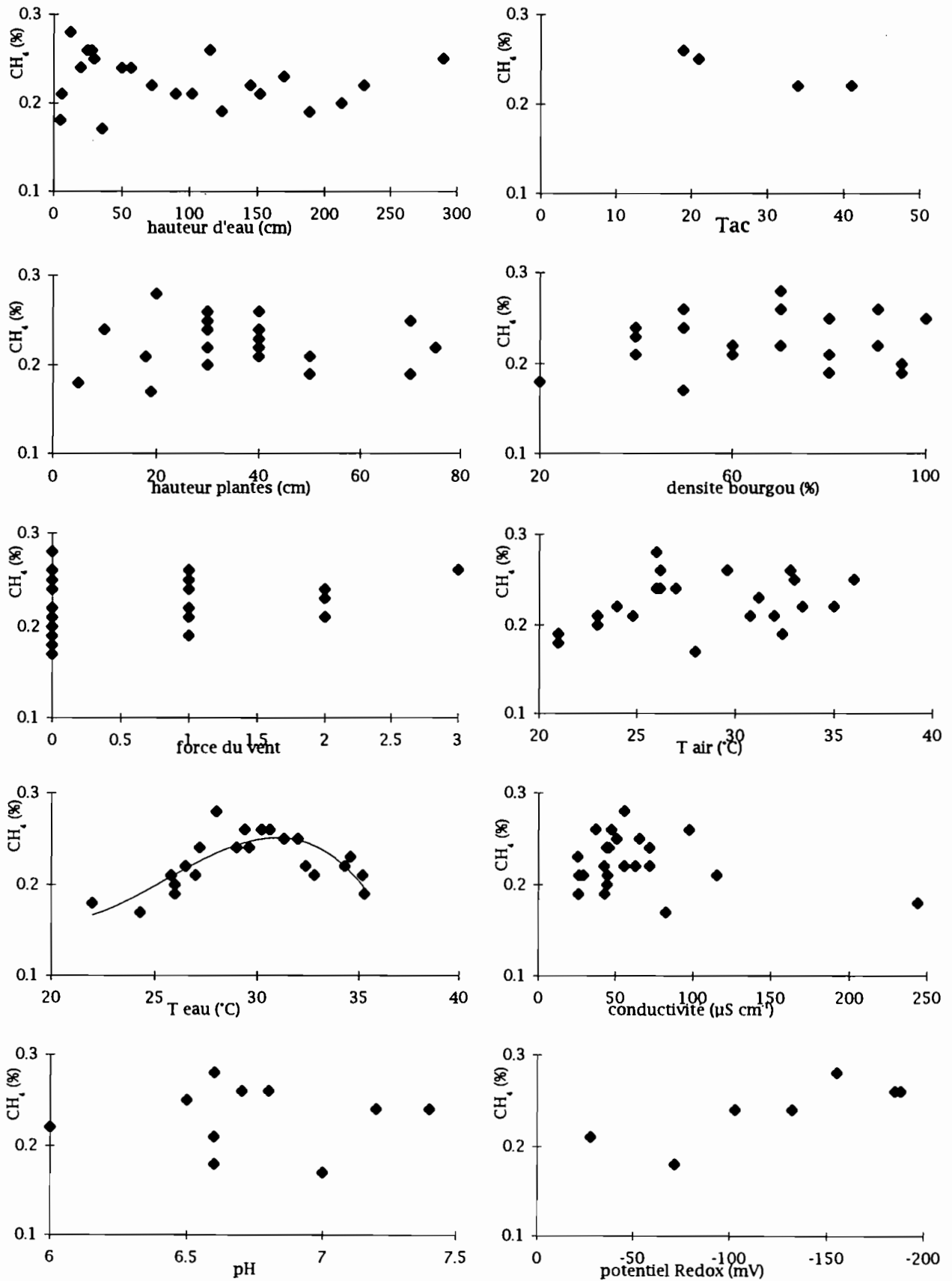


Fig.11.2.9 : Etude du taux de méthane au-dessus des bourgoutières pour différents paramètres physico-chimiques

11.2.5 ACTION DU MILIEU SUR LES DEGAGEMENTS DE METHANE

Il apparaît que les variations d'un milieu à l'autre sont faibles du fait du mélange du méthane au-dessus des plaines inondées.

- * il n'y a pas de variations nettes entre les différents milieux du delta
- * il n'y a pas de variations saisonnières importantes
- * de faibles variations sont dues aux cinétiques de diffusion (vent)
- * les dégagements sont corrélés à la densité bactérienne du substrat, elle-même liée au potentiel rédox, température...

11.2.6 EVALUATION DES FLUX DE METHANE

Les valeurs du taux de méthane piégé dans la « chambre statique » fluctuent irrégulièrement. Durant les 10 ou 15 premières minutes, les variations de teneurs sont constantes puis il y a perturbation du milieu. Des brusques hausses peuvent être attribuées à l'arrivée en surface de bulles d'air.

Etant donné les forts dégagements, il y a rapidement surpression dans la chambre statique et, par conséquent, possibilité de redissolution des gaz dans l'eau après l'arrêt de la diffusion.

Après l'installation de la boîte étanche sur les plantes, il y a rapidement saturation de l'air en vapeur d'eau, augmentation de la température de l'air et des feuilles, augmentation de la pression de vapeur. Tous ces paramètres interagissent et perturbent le comportement physiologique des plantes en moins de 5 minutes (Knapp et Yavitt, 1991). Le flux maximum de méthane dans ce type de piège se situe dans les premières minutes. Ce temps dépend du taux de dégagement des plantes, du volume d'air de la boîte et du nombre de plantes enfermées (Knapp et Yavitt, 1991, Whiting et Chanton, 1992).

Pour le calcul des flux, nous avons pris en considération l'évolution des teneurs sur les 10 ou 15 premières minutes. Le flux est toujours calculé à partir du premier point qui est considéré comme la teneur relative au temps 0 et selon la formule:

$$F_{CH_4} = \frac{(C_{iCH_4} - C_{oCH_4}) * V}{t * S}$$

C_{oCH_4} : concentration de méthane dans l'air au temps 0 [mg m⁻³]

C_{iCH_4} : concentration de méthane dans l'air au temps t [mg m⁻³]

V : volume d'air dans la chambre statique [m³]

S : surface couverte par la chambre statique [m²]

F_{CH_4} : flux de méthane [mg m⁻² j⁻¹]

t : temps entre les deux prélèvements [j]

L'estimation moyenne du flux de méthane dégagé par diffusion, bulles et effusion à travers les plantes, dans les bourgoutières est de $5870 \text{ mg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ (± 5230). Ce qui représente un dégagement annuel de $2142 (\pm 1900) \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Ce flux est très important et peut être comparé avec quelques flux mesurés sur la végétation flottante de la plaine inondée de l'Amazonie qui atteignent $3674 \text{ mg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ (Devol et al, 1990) ou des plaines inondées de la Floride de $1700 \text{ mg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ (Schipper et Reddy, 1994).

Les bourgoutières apportent à l'atmosphère $1,28 \pm 1,14 \text{ Tg an}^{-1}$ (10^{12}g) dont une grande partie est oxydée rapidement. Les champs de riz, fonio et la végétation aquatique autre que *Echinochloa stagnina* sont également de forts producteurs de gaz. Le nombre d'observation restreint ne nous permet pas d'établir un flux moyen fiable pour ces milieux. L'oxydation se fait au niveau des sols argileux, des régions périphériques plus sableuses du delta aval.

Des mesures faites dans la région de Djenne avec la même méthode ont montré des flux de méthane de $0,86 \text{ mg m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ (Delmas et al, 1992a). Ces taux sont attribués à une faible abondance de bactéries méthanogènes, la non saturation des sols en eaux et les faibles teneurs en carbone disponible. On peut supposer que ce taux est celui des zones exondées durant l'étiage.

Les plantes peuvent transporter de l'oxygène vers la rhizosphère et ainsi favoriser l'oxydation du méthane (Whiting et Chanton, 1992). Chappellaz et al (1993) estiment que 10 Tg de CH_4 par an sont repris par les sols secs des milieux semi-désertiques.

Malgré la difficulté pour estimer le flux, les teneurs moyennes de l'air très élevées toute l'année et au-dessus de milieux différents montrent que le delta central du fleuve Niger fait parti des grands producteurs mondiaux parmi les régions inondées.

Pour permettre la comparaison, le tableau 11.2.2 rassemble les estimations de CH_4 rejetés dans divers milieux naturels. Les émissions dues au gaz, charbon et riz sont d'origines anthropiques et n'ont pas été intégrées au tableau ci-dessous.

MILIEU	PRODUCTION GLOBALE
	Tg an^{-1}
total des sources naturelles (5)	185
<i>dont</i>	
termitières (6)	3
animaux (4)	6
forêts brûlées (7)	8
divers	58
terres inondées (7)	110
<i>dont</i>	
Afr.tropicale aride (7)	2,9-32,1
>40°N (2)	66
forêts trop.humides (7)	32
Amazonie (3)	3-18
Delta Central Niger (1)	6,7

1: cette étude, 2: Roulet et al, 1993, 3: Devol et al, 1990, 4 : Rudolph, 1994 (flux donné par Husted, 1994 en $\text{g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$), 5: Servant, 1991, 6: Seller et al, 1984, 7:Delmas et al, 1992b

Tableau 11.2.2 : Inventaire de la production mondiale de méthane de quelques milieux naturels

La production des bourgoutières du delta estimée à $1,3 \pm 1,1 \text{ Tg an}^{-1}$ représente donc en moyenne 1,4 % des apports par l'ensemble des terres inondées et plus de 5 % des apports des régions africaines tropicales arides et semi-arides.

Malgré l'incertitude sur le calcul des flux de CH_4 par les autres types de milieux du delta central, l'exploitation des quelques données disponibles, l'eau libre, les champs de riz et les autres graminées peut amener à l'estimation du flux annuel sur le delta.

Le flux de CH_4 des champs de riz+autres graminées est en moyenne de 1900 avec des pointes à $7600 \text{ mg m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, et pour l'eau libre, le flux moyen est de 1000 à $3000 \text{ mg m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'eau libre. Les champs de riz couvrent 5 % de la plaine inondée, l'apport annuel à l'atmosphère est donc de $0,7 \text{ Tg an}^{-1}$. L'eau occupe les 3/4 du delta central, ce qui représente un dégagement annuel de $4,7 \text{ Tg an}^{-1}$.

L'ensemble de ces trois « formations » qui constitue la majeure partie de la cuvette lacustre dégage $6,7 \text{ Tg an}^{-1}$. Le delta participe pour plus de 10 % aux dégagements naturels mondiaux. Ce chiffre, très élevé, ne tient pas compte de la part de gaz « consommée » dans le delta et qui n'atteint pas la stratosphère.

Ces dégagements sont directement proportionnels aux surfaces inondées. Si les surfaces inondées sont importantes actuellement, elles l'étaient encore plus durant l'Holocène supérieur. A l'optimum lacustre, entre 8300 et 6700 ans BP, l'inondation atteignait les régions nord de la cuvette d'Araouane (Fabre et Petit-Maire, 1988). Les aires lacustres étaient beaucoup plus étendues qu'actuellement. L'importance de ces surfaces inondées et leur variation au cours des temps géologiques a pu influencer le taux de méthane dans l'atmosphère et ainsi contribuer aux changements globaux du climat du fait de l'effet de serre de ce gaz.

4ème partie

CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

** cadre de l'étude*

Le delta central du fleuve Niger est actuellement soumis à de faibles crues. Les années d'étude 1990-1994 sont représentatives d'années « moyennes » sur la période déficitaire 1980-1990. Sur la longue chronique des débits à la station de Koulikoro, le module moyen des quatre années d'étude représente une période sèche de fréquence de retour vicennale. Les crues sont de plus en plus précoces et les superficies inondées plus faibles. Les maximum d'inondation s'élèvent à plus de 40000 km² dans les années 1954-1955 et 14000 km² de nos jours.

Une diminution des précipitations est réelle mais elle est difficile à expliquer. L'étude isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) des pluies de 1991 à 1993 permet de distinguer plusieurs sources d'humidité dans ces régions, le flux de mousson venant du Golfe de Guinée et les JEA et JET amenant l'eau de l'Afrique Centrale ou de l'océan Indien. L'importance des lignes de grains, des reprises de l'air par le JET ou de l'existence d'advection d'air polaire d'altitude explique une partie des différences isotopiques.

Depuis le minimum minimorum, en 1984-1985, les volumes d'eau apportés à la cuvette et le volume des pertes sont constants. On peut estimer que le système hydrologique a atteint un état d'équilibre vis à vis du stockage et destockage.

Le fonctionnement hydrogéochimique du delta central du fleuve Niger est dominé par de forts taux d'évapotranspiration qui amènent la reprise de 25% des débits apportés par le Niger et le Bani. L'évolution des teneurs isotopiques de l'eau du fleuve durant son trajet souligne les fortes évaporations qui agissent en basses eaux. Les variations de stock (lacs, mares), les apports par précipitations et les pertes par infiltrations sont considérées comme négligeables pour le bilan annuel.

Les concentrations en éléments, dissous et particuliers, organiques et inorganiques, sont faibles. Les eaux sont bicarbonatées sodiques avec de relativement fortes teneurs en silice. La composition chimique moyenne indique un équilibre avec les roches et sols de type ferrallitique. Les particules transportées sont surtout inorganiques, composées majoritairement de quartz et de kaolinite.

Les transports spécifiques à la sortie de la cuvette sont, en 1992-1993 à Dire, de 1,58 l s⁻¹ km² pour l'eau, 2,70 t km² an⁻¹ pour le total dissous, 2,16 t km² an⁻¹ pour les matières en suspension et 0,024 t km² an⁻¹ pour le carbone organique particulaire.

* rôle des lits majeurs et des plaines inondées

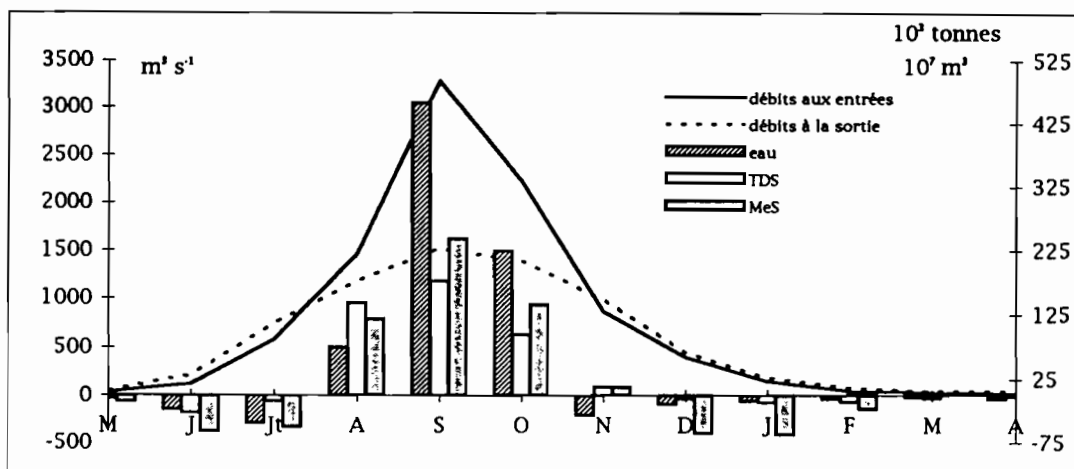
L'eau du fleuve, de ses affluents et défluent, joue le rôle d'agent de transport mais il apparaît que l'évolution spatio-temporelle dans les lits majeurs est négligeable. Les éléments dissous dans le bras principal du Niger ne sont pas suffisamment concentrés pour permettre la précipitation de minéraux sauf en ce qui concerne la silice. Les particules en suspension, très fines, ne se déposent pas pour les vitesses d'écoulement mesurées sur le fleuve. La saltation est peu importante. L'évaporation dans le lit majeur n'agit que sur de faibles surfaces. La végétation est rare ou absente dans les milieux où l'eau s'écoule. Les éléments dissous proviennent essentiellement des bassins amont.

Ce sont les mares, plaines inondées et surtout le lac Debo les principaux espaces où ont lieu les modifications hydrogéochimiques. L'évaporation est la composante essentielle à la compréhension des variations. Elle a pour conséquence une diminution notable des volumes d'eau qui porte les eaux à sursaturation et conduit à la précipitation de minéraux. L'infiltration, négligeable dans le fond de la cuvette à cause d'un colmatage limoneux, devient possible en périphérie, expliquant une partie des pertes d'éléments dissous qui rejoignent la nappe.

La végétation prolifère dans les zones d'eau calme où les hauteurs d'eau sont moindres. Les macrophytes utilisent les sels minéraux pour leur croissance et facilitent la filtration et le dépôt des argiles en suspension. Ce sont la silice, le potassium et le magnésium qui réagissent le plus avec la végétation. Les sols riches en humus libèrent la matière organique. L'Harmattan, vent dominant du NO va amener des particules organiques et minérales des régions sahariennes et remettre en suspension des dépôts de sels et particules autochtones. Les particules déposées directement sur l'eau partent en suspension dans le fleuve. L'importance des apports lithométéoriques est donc liée aux superficies inondées.

* évolution mensuelle des éléments transportés

Le comportement des éléments diffère au cours du cycle hydrologique comme le montre la figure suivante :



La majorité des échanges sur la zone inondée se fait durant les hautes eaux. D'août à octobre, la différence entre les entrées du delta et les sorties au niveau de Dire est importante du fait du remplissage des mares, lacs et plaines. Ce sont les volumes d'eau qui varient le plus sur ces trois mois. Les pertes en éléments dissous et particuliers ont une importance à peu près égale sur toute cette saison. Les précipitations, qui se produisent de juillet à septembre, sont faiblement minéralisées mais la capacité d'échange des cations et anions des poussières favorise un enrichissement de ces eaux mal tamponnées.

Après le maximum de la crue, les apports de l'amont diminuent rapidement et les plaines inondées se vidangent. Un « excès » d'eau est alors enregistré en novembre à Dire. Les éléments dissous et en suspension ne suivent pas le même comportement. L'eau qui repart des plaines inondées n'est pas enrichie en éléments dissous du fait des faibles taux d'évapotranspiration, d'un temps de stockage court et du renouvellement constant de l'eau durant les hautes eaux. Au contraire des bras majeurs où les débits sont forts toute l'année, la néoformation de minéraux dans les régions périphériques et les infiltrations expliquent que l'excès d'eau à la sortie ne soit pas suivi d'un gain en éléments dissous. Les concentrations restent constantes entre les entrées et les sorties du delta. Les MeS restent également piégées dans la cuvette. Durant les hautes eaux, la végétation est dense et permet un enrichissement en particules organiques qui s'ajoutent au carbone organique allochtone provenant du ruissellement sur les bassins versants.

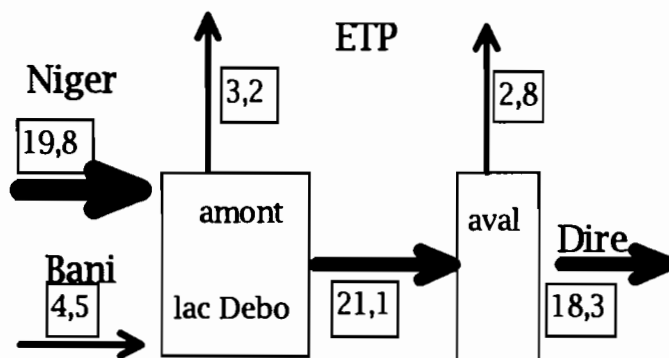
De décembre à avril, il y a pseudo-équilibre entre les entrées et les sorties d'eau et d'éléments dissous. Par contre, la restitution de MeS est importante. Elle est maximum au moment où l'Harmattan souffle le plus intensément, en décembre et janvier. A cet apport extérieur s'ajoute un apport par érosion des berges. Sur le bassin amont, l'érosion des berges a été estimée entre 15 et 30% du transport total annuel.

Les plus abondantes restitutions de matières à Dire sont enregistrées en juin et juillet au début de la crue. Lors de la montée de la crue, les premières eaux drainées sont surconcentrées. L'eau des nappes, les eaux stagnantes des mares, lacs... sont plus concentrées que les eaux de pluies. La pluie permet la mise en charge de la nappe puis, par effet de chasse, l'arrivée de l'eau ancienne vers le lit majeur du fleuve. Les conditions qui règnent sur le delta durant les basses eaux sont favorables à une forte évaporation.

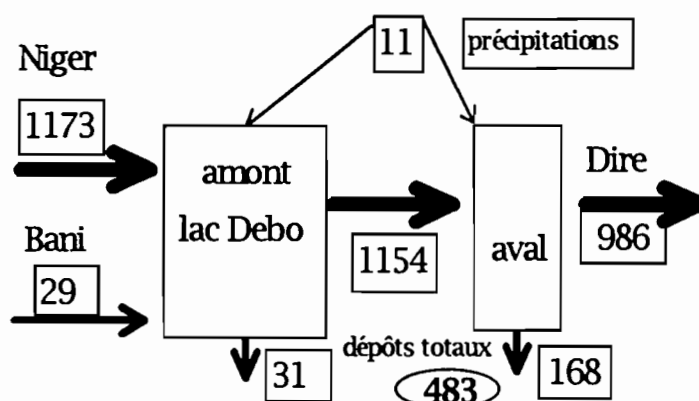
Il apparaît que plus de 80% des échanges de matières dissoutes et d'eau et 63% des échanges de matières en suspension se font durant les trois mois d'août, septembre et octobre. Par contre, le comportement des mois de crue et de décrue sont intéressants pour la compréhension du fonctionnement du système (apports des nappes, poussières, précipitation de sels minéraux...).

*** récapitulatif des bilans annuels**

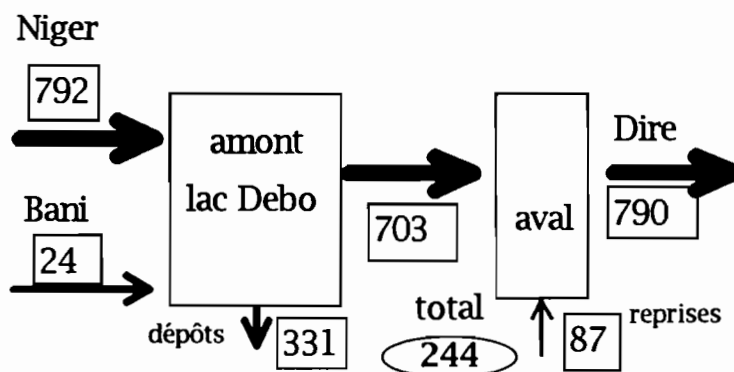
Le bilan de l'année 1992-1993 est résumé ici pour les éléments principaux étudiés.



Bilan d'eau (km³)



Bilan de matières dissoutes (10³ tonnes)



Bilan de matières en suspensions (10³ tonnes)

Le delta central du fleuve Niger est dominé par une accumulation de matériaux clastiques et par la précipitation et néoformation de minéraux. Etant donné la composition chimique moyenne des eaux du fleuve, les minéraux susceptibles de précipiter dans les plaines sont les différentes formes de la silice (quartz, sépiolite, silice amorphe), la calcite, le carbonate de sodium, la calcite magnésienne, la montmorillonite sodique, calcique ou magnésienne. Des efflorescences siliceuses, des nodules calcaires ont été observés dans les régions périphériques de la cuvette et/ou le fond des lacs aujourd'hui à sec.

Les affluents du Niger et du Bani ne contribuent pas de manière égale au bilan des matières dans le delta. Le Niger représente 4,4 fois les entrées d'eau du Bani, 3,9 fois les apports d'éléments dissous et 3,3 fois les matières en suspension.

L'étude des bilans confirme la distinction des caractéristiques des bassins versants amont du delta dont les taux d'érosion chimique et physique diffèrent.

Les isotopes stables sont un apport précieux à la compréhension du bilan d'eau. L'eau circulant dans le delta a pour origine les nappes du bassin amont, mélange des pluies annuelles et lessivage direct des pluies tombées sur la Dorsale Guinéenne et le Fouta Djalon.

Un décalage se produit également pour les deux parties du delta central, c'est à dire le delta en amont du lac Debo et le delta au nord du lac. Les régions depuis Ke-Macina+Douna jusqu'aux défluences du lac Debo sont plus actives du point de vue des tonnages et volumes échangés du fait des superficies inondées.

Les pertes en eau par évaporation pour la partie amont du bassin s'élèvent à 3,2 km³ soit 1,1 fois plus que sur le bassin aval. Pour les éléments dissous, le delta nord ne participe que pour 2/5 aux pertes totales enregistrées dans la cuvette lacustre. Parmi ces pertes aval, plus de la moitié est due à des dépôts, précipitation et transformation de la silice.

La différence de comportement pour les deux parties du delta est encore plus importante du point de vu des matières en suspensions. Sur la première moitié, on enregistre une perte représentant plus d'1/3 des entrées alors que les remises en suspension et les apports sont supérieurs aux dépôts pour la région de l'Erg de Niafunke. Les poussières atmosphériques sont responsables d'une grande partie de ce « gain » de matières en suspension dans les régions nord, les plus soumises à l'Harmattan. Le développement de diatomées, les reprises des dépôts de sels, particules minérales et organiques et l'érosion des berges participent à l'augmentation des concentrations de matières en suspension dans le fleuve.

En 1992-1993, le total annuel des pertes s'élève à 483000 tonnes de matières dissoutes et 244000 tonnes de matières en suspension. Ceci représenterait un dépôt régulier sur l'ensemble des surfaces inondées (14000 km² environ actuellement) de 1,2/100 de mm et 4,6/100 environ.

Il est important de replacer ces bilans dans le contexte actuel. Depuis plusieurs années, les conditions climatiques qui règnent sur les régions sahéliennes ne sont pas favorables à une bonne irrigation des plaines. Ainsi, si les dépôts enregistrés durant les deux années 1992-1993 et 1993-1994, en accord avec les quelques valeurs mesurées en 1990-1991 et 1991-1992, avaient été constants depuis plusieurs siècles, la dépression serait comblée et sursalinisée. Ceci s'est exacerbé dans la région exploitée, depuis un demi siècle, par l'Office du Niger, au sud-ouest de la région étudiée. L'irrigation des plaines pour l'agriculture ne permet qu'une très faible restitution de l'eau et le bassin endoréïque connaît actuellement des problèmes de comblement des canaux d'irrigation et de sursalinisation des terres cultivées.

Il est probable que les décennies plus humides permettent un « nettoyage » du delta avec de fortes exportations de sels et particules minérales.

** autres enseignements de l'étude*

L'étude des différentes formes de carbone n'a pas été abordée jusque là car les prélèvements et analyses ont débuté tardivement et le manque de données ne permet pas d'établir de bilans annuels. Pourtant les enseignements sont nombreux.

Le résultat le plus fondamental est celui obtenu pour les dégagements de méthane. Les très forts taux enregistrés laissent penser que la part du delta du Niger ($6,7 \text{ Tg an}^{-1}$) représente plus de 10% du bilan mondial de dégagement naturel de CH_4 . Il est certain que les conditions oxydantes dans les zones extérieures de la cuvette entraînent de fortes « reprises » du CH_4 échappé des bourgoutières. La multiplicité des facteurs déterminant le taux de dégagement et la méthode utilisée ne nous permet toutefois pas l'affirmation de l'importance « historique » de cette plaine inondée sur les changements de climat au cours des temps géologiques.

L'étude avait pour objet de permettre la distinction des diverses composantes du bilan. L'aspect qualitatif des matières en suspensions devait ainsi montrer des différences entre les sédiments autochtones et allochtones. Sur le bassin aval, l'érosion des berges est considérée comme un facteur déterminant étant donné que les vents, alignés dans le sens du cours d'eau principal, créent des « vaguelettes » qui pourront entraîner l'érosion des berges. Sur les échantillons de MeS analysés, aucune distinction minéralogique n'a pu être faite sur les matières transportées à l'amont et l'aval ni en hautes eaux et basses eaux.

De même, l'étude des éléments dissous devait mener à la détermination d'un cation ou anion « conservatif » dont le rapport entre les débits et concentrations aux entrées et aux sorties du delta auraient permis d'aider à déterminer la part d'eau effectivement évaporée. Il est apparu que les concentrations moyennes à la sortie du delta étaient égales ou inférieures à celles de l'entrée et que les dépôts et changements étaient donc importants.

Les méthodes isotopiques restent actuellement les seules qui puissent permettre d'évaluer le taux d'évaporation au-dessus de la cuvette lacustre. L'oxygène-18 et le deutérium sont des éléments conservatifs, c'est à dire qu'ils ne subissent pas d'échange avec les roches et sédiments du bassin versant. L'évaporation, les modifications de composition des précipitations dues à la température, humidité relative de l'air, hauteur des précipitations, les mélanges d'eau d'origine différente, gênent l'interprétation des résultats.

L'échelle adoptée est celle de l'ensemble du delta. Le suivi régulier des bras principaux devait permettre la détermination du fonctionnement de la cuvette. Il est certain maintenant que l'appréhension des échanges et des modifications dans la cuvette doit passer par une étude plus précise des plaines, mares inondées.

** perspectives*

Les perspectives futures doivent obligatoirement passer par la poursuite des mesures présentées afin d'avoir une bonne représentativité des bilans annuels dans le contexte hydro-climatique actuel. La poursuite des mesures de COP et COD pourra permettre d'établir le bilan annuel pour les matières organiques.

La réduction du nombre de stations permettra l'allègement des protocoles de mesures. Les stations intermédiaires de Kara, Tilembeya et Nantaka ne sont pas représentatives de la totalité de l'eau circulant dans le delta et des erreurs d'estimation des flux de MeS sont probables.

L'amélioration des connaissances passe par :

- la précision des transferts de matières en suspensions qui nécessite la poursuite des jaugeages en août, septembre et octobre où plus de 70% du transport annuel a lieu et un prélèvement hebdomadaire multiple à chaque station.

- l'installation d'un piège à poussière à une hauteur plus élevée pour limiter les apports autochtones ou, tout au moins, permettre une corrélation entre les deux types de pièges.

- la mesure mensuelle systématique aux entrées et à Dire de la granulométrie et de la composition des particules minérales afin de vérifier l'absence d'évolution spatio-temporelle de cette composante.

- l'observation au microscope des matières en suspension avant l'attaque à l'eau oxygénée afin d'évaluer la présence et l'importance des diatomées et phytolithes.

- de meilleures conditions de conservation des échantillons pour permettre une analyse fiable du chlore et ainsi déterminer la composante atmosphérique dans le transport des éléments dissous.

L'évolution de l'étude nécessite une meilleure connaissance de :

- la composition isotopique de la vapeur d'eau du delta afin d'estimer le taux d'évaporation réel dans le delta.

- les paramètres climatiques de la zone inondée en plus des extrémités (Mopti-Sevare et Tombouctou) par l'installation d'une station météorologique automatique.

- suivi annuel d'une mare au coeur du delta afin de comprendre le mécanisme des dépôts et reprises (chimiques et minérales) dans les régions où les transformations sont les plus importantes.

- la multiplication des mesures du méthane sur d'autres sites que les bourgoutières est nécessaire au calcul d'un flux global annuel au-dessus des surfaces inondées. En effet, actuellement on n'a pas de valeurs de flux de CH_4 selon les différents substrats (oxydés, anoxyques, riches en bactéries...).

Une meilleure connaissance des flux selon les hauteurs d'eau pourrait permettre l'extrapolation de ces résultats à des périodes anciennes. Cette voie de recherche doit être suivie pour arriver à l'estimation des dégagements en fonction des superficies inondées que l'on sait très importantes durant l'Holocène. Au maximum lacustre, des dégagements considérables ont-ils permis l'augmentation du taux mondial de CH_4 dans l'air (augmentation confirmée par l'étude des bulles d'air des carottes de glaces) et ainsi le réchauffement de la planète menant vers une phase plus humide ? La sécheresse entraînant ensuite une diminution des surfaces en eau favorables à la prolifération des bactéries méthanogènes amène-t-elle à une réduction des dégagements. Le phénomène est, en fait, plus complexe du fait des nombreux effets feed-back négatifs et positifs.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

ADETUNGI, J., ONG, C.K., 1980 : Qualitative analysis of the Harmattan haze by x-ray diffraction. *Atmospheric Environment*, vol.14, pp.857-858.

A.I.E.A., 1979: Survey of Isotope concentration in precipitation (1972-1975). Technical report series, n.192. *Environmental isotope Data* n.6. AIEA, Vienna, 187p.

A.I.E.A., 1981 : Stable isotope hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle. Technical Report series, n.210., J.R.Gat et R.Gonfiantini éd., 335 p.

A.I.E.A. 1992 : Statistical Treatment of Data on environmental isotopes in Precipitation. Technical report series, n.331. pp.332-335.

AJTAY, G.L., KETNER, P., DUVIGNEAUD, P., 1979 : Terrestrial Primary Production and Phytomass. pp.129-182. in: *The Global Carbon Cycle*, SCOPE 13, Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S., Ketner, P., éd. 491p.

ALEXANDRE, A., COLIN, F., MEUNIER, J.D., 1994 : Les phytolithes, indicateurs du cycle biochimiques du silicium en forêt tropicale. C.R.de l'Académie des Sciences, Paris de l'Académie des Sciences, série II, tome 319, n.4, pp.453-458.

ARANYOSSY, J.F., 1989 : Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. *Hydrogéologie*, n.3, pp.159-166.

ARANYOSSY, J.F., 1991 : L'apport des techniques isotopiques à l'étude de la recharge des aquifères sous contraintes techniques et climatiques extrêmes. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches en sciences, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay.

ARANYOSSY, J.F., GUERRE, A., SIDORO, M., 1989 : Etude par les isotopes de l'environnement des dépressions piézométriques : premières données sur des exemples du Mali. *Hydrogéologie*, n.3, pp.151-158.

ARANYOSSY, J.F., LOUVAT, D., MOKDAD MAKSOUDI, 1991 : Developing isotope techniques for water exploration in the Sahel. *IAEA Bulletin*, vol.4, pp.2-8.

AUTORITE DU BASSIN DU NIGER, 1982 : Modèle mathématique du fleuve Niger. Rapport de synthèse de l'état et de l'utilisation du modèle à fin 1982. SOGREAH, Grenoble, France. 35p et 8 livrets annexes.

AUVRAY, C., 1952 : Niger Cours moyen. Etude de la crue de 1951-1952. Bilan des pertes. Etude préliminaire de la zone lacustre. ORSTOM Bamako, mult. 20 p.

BACALBASA, DOBROVICI, N., 1971 : The economic importance of the burgu (*Echinochloa stagnina*) on the middle Niger in the Niger republic. *hidrobiologia Bucur*, 12, pp.41-46.

BAHR, J.-M., 1980-81 : Les ressources en eau souterraine au Mali, Afrique occidentale: quatre études régionales. *Bulletin du BRGM*, section III, n.4, pp.343-352.

BALEK, J., 1977 : Hydrology and Water resources in tropical Africa. Série "Developments in Water sciences" vol.8. Elsevier. 208 p.

BARBER, T.R., BURKE, R.A., SACKETT, W.M., 1988 : Diffusive flux of methane from warm wetlands. *Global Biogeochemical cycles*, vol.2, n.4, pp.411-425.

BARTLETT, K.B., CRILL, P.M., SEBACHER, D.I., HARRISS, R.C., WILSON, J.O., MELACK, J.M., 1988 : Methane flux from the central Amazonian floodplain. *Journal of Geophysical Research*, vol.93, n.D2, pp.1571-1582.

BARTLETT, K.B., CRILL, P.M., BONASSI, J.A., RICHEY, J.E., HARRISS, R.C., 1990 : Methane flux from the Amazon river floodplain: Emissions during Rising water., *Journal of Geophysical Research*, vol.95, n.D10, pp.16773-16788.

BARTLETT, K.B., CRILL, P.M., SASS, R.L., HARRISS, R.C., DISE, N.B., 1993 : Methane Emissions from Tundra Environments in the Yukon-Kuskokwin delta, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, vol.97, N.D15, pp.16645-16650.

BAYO OMOTOSHO, J., 1992 : Long-range prediction of the onset and end of the rainy season in the West African Sahel. *International Journal of Climatology*, vol.12, pp.369-382.

BEAUDET, G., COQUE, R., MICHEL, P., ROGNON, P. 1977 : Y a-t-il eu capture du Niger ? *Bull.Assoc.Géogr.français*, Paris, n.445-446, pp.215-222.

BELINE, M., 1931 : L'hydrographie ancienne du Niger. *Conseil Int.Rech, Union Géodes. Géophysique int., Sect.hydrologie, Sciences*, 17, pp.31-34.

BELLION, Y., 1989 : Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad). *Centre International pour la formation et les échanges géologiques, publication occasionnelle*, 17. 302 p.

BELLION, Y., BENKHELIL, J., FAURE, H., GIRAUD, R., LETHEOFF, B., OUSMANE, B., 1983 : Le bassin du Niger oriental: observations structurales et évolution géodynamique. In "Bassins sédimentaires en Afrique". *Res.commun; Séances spec.Soc.Geol.France*, Marseille mars 1983, 57p.

BELTRANDO, G., CHARRE, J., DOUGUEDROIT, A., 1986 : Régionalisation des variations temporelles récentes des précipitations de la zone soudano-sahélienne (de l'océan Indien à l'océan Atlantique). in: INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM, éd. pp. 25-28.

BERTRAND, R., 1976 : Les écotopes des plaines inondables du moyen Niger. *Tellus*, vol.XXIV, pp.123-150.

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.

BILLON, B., 1968 : Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). *Cahier de l'Orstom, série hydrologie*, vol.V, n°2, pp.3-13.

BLAKE, D.R., ROWLAND, F.S., 1988 : Continuing Worldwide Increase in the tropospheric Methane, 1978 to 1987. *Science*, vol.239, pp.1129-1131.

BLANCK, J.P., 1986 : Le quaternaire ancien dans la boucle du Niger. in: INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp.35-38.

BLANCK, J.P., 1993 : Etude diachronique de l'inondation dans le système laguno-dunaire du Bara (Mali) par la crue du Niger en 1973. *Revue de Géomorphologie dynamique*, t.XLII, n.4, pp.113-121.

BLANCK, J.-P., CLOOTS, A.R., HIRSCH, 1969 : Un exemple d'application en géomorphologie: l'étude de la vallée du Niger Moyen. *Bull.Fac.Lettres Strasbourg*, avril-mai, pp.459-471.

BLANCK, J.P., TRICART, J.L.F., 1990 : Quelques effets de la néotectonique sur la géomorphologie dans la région du Delta Central du Niger (Mali). *C.R. Acad.Sci.Paris,série géographie physique*, t.310, série II, pp.309-313.

BLOT, A., 1980 : L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal. Travaux et doc. 114, ORSTOM éd, 434p.

BLUTH, G.J., KUMP, L.R., 1994 : Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol.58, n.10, pp.2341-2359.

BOISSAVY-VINAU, M., 1994 : Le méthane, mémoire fidèle du climat. *La Recherche*, n.262, pp.214-215.

BOLIN, B., DEGENS, E.T., DUVIGNEAUD, P., KEMPE, S., 1979 : The Global Biogeochemical Cycle. pp.1-53. in: *The Global Carbon Cycle*, SCOPE 13, Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S., Ketner, P., éd., Wiley & Sons, 491p.

BONNEFILLE, R., 1986 : Modifications des végétations intertropicales et changements climatiques. in: *INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique"*. ORSTOM éd. pp.49-52.

BRADY, P.V., CARROLL, S.A. 1994 : Direct effects of CO₂ and temperature on silicate weathering : Possible implications for climate control. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 8 : 1853-1856.

BRUNET-MORET, Y., CHAPERON, P., LAMAGAT, J.P., MOLINIER, M., 1986 : Monographie hydrologique du fleuve Niger, tome I : Niger supérieur, 396 p., tome II : Cuvette lacustre et Niger Moyen, 506 p., Coll. Monog. Hydrologique n.8, ORSTOM éd., Paris.

CARBONNEL, J.P., MEYBECK, M., 1975 : Quality variations of the Mekong river at Phnom Pen, Cambodia, and chemical transport in the Mekong basin. *Journal of hydrology*, 27, pp.249-265.

CARBONNEL, J.P., HUBERT, P., CHAUCHE, A., 1987 : Sur l'évolution séquentielle de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest depuis le début du siècle. *C.R.Acad.Sci, Paris, série II*, t.305, pp.625-628.

CARBONNEL, J.P., HUBERT, P., WALBADET, E., MERMOUD, A., BARIAC, T., 1990 : Variabilité spatiale des précipitations soudano-sahéliennes à l'échelle décamétrique. *C.R. Acad. Sci., série II*, t.311, pp.1425-1430.

CARBONNEL, J.P., HUBERT, 1992 : Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. in: *L'aridité, une contrainte au développement*. Didactique, ORSTOM, éd., pp. 37-51.

CARMOUZE, J.-P., 1976 : La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. *Travaux et Documents*, vol.58, ORSTOM éd., 418p.

CARRE, P., 1972 : Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cahier ORSTOM, série hydrologie*, vol.IX, n.1, p.19-46.

CASENAVE, A., VALENTIN, C., 1989 : Les états de surface de la zone sahélienne - influence sur l'infiltration. collection Didactique, ORSTOM éd. 229p.

CENSIER, C., OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., 1994 : Les apports détritiques terrigènes dans la cuvette lacustre du Niger entre Mopti et Kona (Mali). in : *Colloque PEGI*, 22-24 nov. 1993, CNRS- Insu-Orstom, Paris.

CHANTON, J.P., MARTENS, C.S., KELLEY, C.A., CRILL, P.M., SHOWERS, W.J., 1992 : Methane transport mechanisms and isotopic fractionation in emergent macrophytes of Alaskan tundra lake. *Journal of Geophysical Research*, vol.97, n.D15, pp.16682-16688.

- CHAPPELLAZ, J., BARNOLA, J.M., RAYNAUD, D., KOROTKEVICH, Y.S., LORIUS, C., 1990 : Ice-core record of atmospheric methane over the past 160000 years. *Nature*, vol.345, pp.127-131.
- CHAPPELLAZ, J., FUNG, I.Y., THOMPSON, A.M., 1993 : The atmospheric CH₄ increase since the Last Glacial Maximum. I. Source Estimates. *Tellus, série B*, vol.45, n.3, pp.228-241.
- CHARRIERE, B., GADEL, F., SERVE, L., 1991 : Nature and distribution of phenolic compounds in water and sediments from Mediterranean deltaic and lagunal environments. *Hydrobiologia*, vol.222, pp.89-100.
- CHESTER, R., JOHNSON, L.R., 1971 : Atmospheric Dusts collected off the West African Coast. *Nature*, 229 :105-107.
- CHEVALLIER, P., 1990 : Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte-d'Ivoire) ; Etude et thèse, éd. ORSTOM. 311pp.
- CHUBERT, G., FAURE-MURET, A., 1971 : Grands bassins sédimentaires de l'Afrique occidentale. pp.268-282. in : *Tectonique de l'Afrique*. UNESCO éd., Paris, 602 p.
- CHOURET, A., 1977 : Régimes des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad : synthèse des études de l'Orstom en république du Tchad. in : *Erosion and solid Matter Transport in Inland Waters Symposium*. IASH - UNESCO, vol.122, pp.126-133.
- CICERONE, R.J., OREMLAND, R.S., 1988 : Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical cycles*, vol.2, n.4, pp.299-327.
- CICERONE, R.J., SHETTER, J.D., 1981 : Sources of Atmospheric Methane : Measurements in Rice Paddies and a Discussion. *Journal of Geophysical Research*, vol.86, n.C8, pp.7203-7209.
- CICERONE, R.J., DELWICHE, C.C., TYLER, S.C., ZIMMERMAN, P.R., 1992 : Methane emissions from California Rice Paddies with varied Treatments. *Global Biogeochemical Cycles*, vol.6, n.3, pp.233-248.
- CLOS-ARCEDUC, A., 1955 : Le fleuve fossile de Tombouctou. *Tropiques* 371, pp.36-41.
- COGELS, F.X., GAC, J.Y., 1986 : Etude chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) et de leur évolution annuelle. Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. *Géodynamique*, vol.1, n.2, pp.121-134
- COUDE-GAUSSEN, G., ROGNON, P., 1983 : Les poussières sahariennes. *La Recherche*, vol.14, n.147, pp.1050-1061.
- COUDE-GAUSSEN, G., 1991 : Les poussières sahariennes. Cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques. John Libbey éd.,
- COUREL, M.F., 1986 : Variations récentes de l'albédo de surface dans les régions sahéennes et critique du mécanisme biogéophysique de Charney. in : *INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique"*. ORSTOM éd., pp.87-90.
- COUREL, M.F., 1992 : Albedo et pluviométrie dans le Sahel. in : *L'aridité, une contrainte au développement*. Le FLOCH, E., GROUZIS, M., CORNET, A., BILLE, J.C., éd. Didactique. ORSTOM éd., pp.95-104.
- COUREL, M.F., KANDEL, R.S., RASOOL, S.I., 1984 : Surface albedo and Sahel drought. *Nature*, vol.307, pp.528-531.

COUREL, M.F., CHAMARD, P.C., LE RHUN, J., TOGOLA, M., JACQUEMINET, C., 1992 : Bilan de 25 ans de déficit hydrologique dans le delta central du Niger; conséquences sur les ressources agro-sylvo-pastorales. Séminaire-bilan sur les recherches relatives au sylvo-pastoralisme au Sahel, Dakar: EISMV 7-12 mai 1992. 17p.

CRAIG, 1961 : Isotopic variations in meteoric water. *Sciences*, vol.133, pp.1702-1703.

CRILL, P.M., MARTENS, C.S., 1983 : Spatial and temporal fluctuations of methane production in anoxic, coastal marine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, vol.25, pp.564-571.

CRILL, P.M., BARTLETT, K.B., WILSON, J.O., SEBACHER, D.I., HARRISS, R.C., MELACK, J.M., McINTYRE, S., LESACK, L., SMITH-MORRILL, L., 1988 : Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake. *Journal of Geophysical Research*, vol.93, n.D2, pp.1564-1570.

DAVEAU, S., 1966 : Le quaternaire de la vallée et de la boucle du Niger. *Bulletin de l'IFAN, série A, Sciences naturelles*, vol.28, n.1, pp.404-406.

DAVIS, J.S., KELLER, H.M., 1983 : Dissolved loads in streams and rivers - Discharge and seasonally related variations. in: *Dissolved loads of Rivers and surface Water Quantity/Quality relationships. Proceeding of the Hamburg symposium, IAHS*, n.141, pp.79-89.

De ANGELIS, M.A., SCRANTON, M.I., 1993 : Fate of methane in the Hudson River and Estuary. *Global Biogeochemical Cycles*, vol.7, n.3, pp.509-523.

DEGENS, E.T., 1979 : Primordial Synthesis of Organic Matter. pp.54-78. in : *The Global Carbon Cycle, SCOPE 13*, Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S., Ketner, P., Wiley & Sons éd., 491p.

DELAUNE, R.D., SMITH, C.J., PATRICK, W.H., 1983 : Methane emission. *Tellus*, vol.35, série B, pp.7-15.

DEN ELZEN, M.G.J., ROTMANS, J., 1993 : Modelling climate Related Feedback Processes. *Journal of Environmental Science and Health*, vol.28, série A, n.9, pp.2095-2151.

DELMAS, R.A., MARENCO, A., TATHY, J.P., CROS, B., BAUDET, J.G.R., 1991 : Sources and sinks of methane in the African Savannah : CH₄ emission from biomass burning. *Journal of Geophysical Research*, vol.96, n. D4, pp.7287-7300.

DELMAS, R.A., SERVANT, J., TATHY, J.P., CROS, B., LABAT, M., 1992a : Sources and sinks of methane and carbon dioxide exchanges in mountain forest in equatorial Africa. *Journal of Geophysical Research, série D*, vol.97, n.6, pp.6169-6179.

DELMAS, R.A., TATHY, J.P., CROS, B., BUAT-MENARD, B.P.(ed), DELMAS, R.(ed), 1992b: Atmospheric methane budget in Africa. *The chemistry of the Global atmosphere. Journal of Atmospheric Chemistry*, vol.14, n.1-4, pp.395-409.

DESCONNET, J.C., LEBEL, T., TAUPIN, J.D., 1994 : Bilan hydrologique de surface durant la période de suivi à long terme de Hapex-Sahel à partir du suivi des mares temporaires sur une zone test de 600 km². in : *Hydrologie et météorologie de Mésos-échelle dans HAPEX-Sahel : Dispositif de mesures au sol et premiers résultats. ORSTOM*, in press.

DEVOL, A.H., RICHEY, J.E., FORSBERG, B.R., MARTINELLI, L., 1990 : Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon river floodplain to the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, vol.95, n. D10, pp.16417-16426.

De VOOYS, C.G.N., 1979 : Primary Production in Aquatic Environments. pp.259-292. in : *The Global Carbon Cycle, SCOPE 13*, Bolin, B., Degens, E.T., Kempe, S., Ketner, P., éd., Wiley & Sons éd., 491p.

DIARRA, A.T., 1992 : Monthly water balance of the Inland delta of Niger river in Mali. Water Resources research and documentation center.

DIANOV-KLOKOV, V.I., YURGANOV, L.N., 1989 : Spectroscopic measurements of Atmospheric Carbon monoxide and methane. 2 : Seasonal variations and Long-term trends. *Journal of Atmospheric Chemistry* vol.8, pp.153-164.

DINCER, T., HUTTON, L.G., KUPPEE, B.B.J., 1981 : Study, using stable isotopes, of flow distribution, surface-groundwater relations and Evapotranspiration in the Okavango swamp, Botswana. Technical Reports Series, n.210. AIEA. pp.3-17.

Direction Nationale de la statistique et de l'informatique, 1990 : Recensement général de la population et de l'habitat, Bureau national du recensement, Ministère du Plan. Bamako, 10 vol.

DISE, N.B., GORHAM, E., VERRY, E.S., 1993 : Environmental factors controlling methane emissions from Peatlands in northern Minnesota. *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, n. D6, pp.10583-10594.

DOLEDEC, S., CHESSEL, D., 1987 : Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. I.-Description d'un plan d'observation complet par projection de variables. *Acta Oecologica*, vol.8, n.3, pp.403-426.

DREES, L.R., MANU, A., WILDING, L.P., 1993 : Characteristics of aeolian dusts in Niger, West Africa. *Geoderma*, vol.59, pp.213-233.

DREVER, J.I., 1994 : The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol.58, n.10, pp.2325-2332.

DUBAR, C., 1988 : Eléments de paléohydrologie de l'Afrique Saharienne : les dépôts quaternaires d'origine aquatique du nord-est de l'Aïr (Niger, Palhydraf site 3). Thèse de troisième cycle, Orsay.

DUMONT, H.J., 1987 : Internal delta of the River Niger. In: BURGIS, M.J., SYMOENS, J.J. Zones humides et lacs peu profonds d'Afrique. ORSTOM éd., pp.215-224.

DURAND, A., LANG, J., 1986 : Problèmes d'évaluation de l'aridité dans les paléoenvironnements : exemple du Kanémien (21000-13000 ans BP) au Tchad et au Niger. in: INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp.123-126.

DUVERT, P., 1987 : Géochimie des eaux du Fouta Djallon, Flux dissous et particuliers en Haute Gambie (Kedougou et Gouloumbou). ORSTOM éd., 98 p.

EHHALT, D.H., 1974 : The Atmospheric cycle of methane. *Tellus XXVI*, vol.1-2, pp.58-70.

EUGSTER, H.P., 1980 : Lake Magadi, Kenya, and its precursors. pp.195-232. in : *Hypersaline brines and evaporitic environment*. Developments in Sedimentology, n.28, A.Nissenbaum éd.,

EVANS, C.J., 1990 : Alteration products at the earth's surface. The clay mineral. in: *Weathering, soils & paleosols*. I.P.Martini, W.Chesworth- Elsevier, éd., pp. 107-125.

FABRE, J., PETIT-MAIRE, N., 1988 : Holocene climatic evolution at 22'-23'N from two paleolakes in the Taoudenni area (Northern Mali). *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol.65, n.3/4, pp.133-148.

FAURE, H., GAC, J.Y., 1981: Will the Sahelian drought end in 1985? *Nature*, vol.291, pp.475-478.

- FINDLEY, S., PACE, M., LINTS, D., 1991 : Variability and transport of suspended sediment, particulate and dissolved organic carbon in the tidal freshwater Hudson River. *Biogeochemistry*, vol.12, pp.149-169.
- FONTAINE, B., 1986 : Précipitations Soudano-Sahélienne et circulation estivale sur l'Afrique Occidentale et l'Atlantique Nord. in : P.Pagney, S.Nieuwolt, "Etudes de climatologie tropicale", recherche en géographie, Masson, pp.65-78.
- FONTAINE, B., 1991 : Variations pluviométriques et connexions climatiques : les aires de mousson indienne et Ouest-Africaine. *Sécheresse*, vol.2, n°4, pp.259-264.
- FONTAINE, B., PERARD, J., 1986 : Irrégularité des pluies et dynamique de l'atmosphère en Afrique de l'Ouest : comparaison des périodes 1953-1963 et 1968-1975. INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp.139-144.
- FONTAINE, B., JANICOT, S., 1992 : Win-field coherence and Its variations over West Africa. *Journal of Climate*, vol.5, n.5, pp.512-524.
- FONTAINE, B., BIGOT, S., 1993 : West African rainfall deficits and sea surface temperatures. *International journal of climatology*, vol.13, pp.271-285.
- FONTES, J.C., 1976 : Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse de doctorat ès Sciences, Univ.Paris VI, 208 p.
- FONTES J.C., OLIVRY, O., 1976 : Premiers résultats sur la composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroun. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol.XIII, n.3, pp. 179-194.
- FONTES, J.C., GASSE, F., 1986 : PALHYDAF : Etat d'avancement, novembre 1985. in : INQUA : 1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique" . ORSTOM éd., pp.149-152.
- FONTES, J.C., ANDREWS, J.N., EDMUNDS, W.M., GUERRE, A., TRAVI, A., 1991 : Paleorecharge by the Niger River (Mali) Deduced from Groundwater Geochemistry. *Water Resources Research*, vol.27, n.2, pp.199-214.
- FOSTER, I.D.L., CARTER, A.D., GRIEVE, I.C., 1983 : Biogeochemical controls on river water quality in a forested drainage basin, Waewickshire, U.K. in: Dissolved loads of Rivers and surface Water Quantity/Quality relationships. *Proceeding of the Hamburg symposium, IAHS*, n.141, pp.241-253.
- FREEMAN, C., LOCK, M.A., REYNOLDS, B., 1993 : Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down : Potential feedback to climatic change. *Biogeochemistry*, vol.19, pp.51-60.
- FREYSSINET, P., 1990 : Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali. Evolution des paysages et prospection géochimique de l'or. BRGM. Thèse de 3ème cycle.
- FRYE, J.P., MILLS, A.L., ODUM, W.E., 1994 : Methane fluxes in *Peltandra Virginica* (Araceae) wetlands : Comparison of fields data with a mathematical model. *American Journal of Botany*, vol.81, n.4, pp.407-413.
- FURON, R., 1929 : L'ancien delta du Niger. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, tome II, pp.265-274.
- GAC, J.Y., 1980 : Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération de l'érosion et de la sédimentation. *Travaux et documents*, vol.123, ORSTOM éd., 251 p.

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 (R.C.A.). Cahier ORSTOM, série Géologie, vol.V, n.1, pp.83-96.

GAC, J.Y., DROUBI, A., FRITZ, B., TARDY, Y., 1977 : Geochemical behaviour of silica and magnesium during the evaporation of waters in Chad. *Chemical geology*, vol.19, pp.215-228.

GAC, J.Y., KANE, A., 1986a : Le Fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sci.Géol.,Bull.*, vol. 39, n. 1, pp.99-130.

GAC, J.Y., KANE, A., 1986b : Le Fleuve Sénégal : II. Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sci.Géol.,Bull.*, vol. 39, n. 2, pp.151-172.

GAC, J.Y., BOUCHEZ, J.M., BAMBA, B.S., CARN, M., ORANGE, D., DUVERT, P., 1987 : Géochimie des eaux du Fouta Djallon, flux dissous et particulaire en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou). Monographie, ORSTOM éd., 102 p.

GAC, J.Y., FAURE, H., 1987 : Le "vrai" retour à l'humide au Sahel est-il pour demain. *C.R.Acad.Sci.*, Paris, série II, t.305, pp.777-781.

GALLAIRE, R., 1994 : Données sur les transports du Niger Moyen entre Kandadji et Niamey. in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.

GALLAIRE, R., FONTES, J.C., ZUPPI, G.M., 1994 : Caractérisation isotopique et origine des pluies sur le massif de l'Air (Niger). Symposium Tricaride, AISH, Vienne, 22-26 août 1994, in press.

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, 153 p.

GALLAIS, J., 1981 : L'Office du Niger. pp.56-57. in : Atlas du MALI, éd. Jeune Afrique.

GALLOWAY, J.N., LIKENS, G.E., EDGERTON, E.S., 1975 : Acid precipitation in the North-eastern United States : pH and Acidity. *Science*, vol.194, pp.122-123.

GALLOWAY, J.N., LIKENS, G.E., KEENE, W.C., MILLER, J.M., 1982 : The composition of precipitation in the remote areas of the world. *Journal of Geophysical Research*, vol.87, n.11, pp.8771-8786.

GARRELS, R.M., CHRIST, C.L., 1967 : Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Collection monographie de chimie minérale, Gauthier-Villars éd., 335p.

GASSE, F., STABELL, B., FOURTANIER, E., VAN IPEREN, Y., 1989 : Freshwater Diatom Influx in Intertropical Atlantic : Relationships with Continental Records from Africa. *Quaternary Research*, vol.32, pp.229-243.

GHOSH, S.K., 1991 : Dissolution of silica in nature and its implications. *Bulletin of Canadian petroleum geology*, vol.39, n.2, pp.212.

GIBBS, R.J., 1970 : Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, vol.170, p.1088-1090.

GIBBS, R.J., 1972 : Water chemistry of the Amazon river. *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol.36, p.1061-1066.

GILMAN, C.S., 1964 : Rainfall. in : Handbook of applied hydrology, Ven Te Chow éd. section 9. McGraw-Hill.

- GIRESSE, P., OUETININGUE, R., BARUSSEAU, J.-P., 1990 : Minéralogie et microgranulométrie des suspensions et des alluvions du Congo et de l'Oubangui. *Sci.Géol., Bulletin*, vol.43, N. 2-4, pp.151-173.
- GODARD, A., TABEAUD, M.T., 1993 : Les climats. Mécanismes et répartition. A.Colin éd.
- GOETZ, C., ERLLENKEUSER, H., 1991 : les isotopes stables de l'oxygène et du carbone. in : Paléoenvironnement du Sahara : lacs Holocènes à Taoudenni (Mali). chap.2, le lac Haijad, pp.103-106. N.Petit-Maire, C.N.R.S éd.
- GOSSEYE, P., 1989 : Les crues et l'inondation de la région deltaïque. Rapport interne. ORSTOM, Bamako.
- GOURCY, L., 1993 : Note sur les mesures isotopiques du Niger à Banankoro et du Bani dans la région de Douna-San. pp. 201-207. in : Les ressources en eau au Sahel - Etudes hydrogéologiques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest par les techniques isotopiques. IAEA, Tecdoc, n.721. 211p.
- GOURCY, L., SONDAG, F., 1994 : Premiers résultats sur la distribution et le bilan des éléments majeurs dissous dans la cuvette lacustre du fleuve Niger (MALI) (année 1990-1991). in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.
- GRANIER, C., 1981 : Biogéographie, pp.18-20. in: Atlas du MALI, Jeune Afrique éd.
- GROVE, A.T., 1972 : The dissolved and the solid load carried by some West African Rivers: Senegal, Niger, Benue and the Shari. *J.hydrobiol.*, vol. 16, pp.277-300.
- GROVE, A.T., 1985 : The environmental setting. pp.3-20. in : The Niger and their neighbours, A.T. Grove éd., A.A.Balkema/Rotterdam/Boston. 331p.
- GROUZIS, M., 1992 : Germination et établissement des plantes annuelles Sahéliennes. pp.267-282. in : L'aridité, une contrainte au développement. Le FLOC'H, E., GROUZIS, M., CORNET, A., BILLE, J.C., Didactique. ORSTOM éd.
- 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.
- GUERRE, A., 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. 49 p.
- GUIGUEN, N., 1985 : Etudes hydrologiques complémentaires de la cuvette lacustre du Niger. Projet HYDRONIGER. ORSTOM, Bamako. 88p.
- GUILLOT, B., LAHUEC, J.P., CITEAU, J., BELLEC, B., NOYALET, A., 1986 : Analyse de l'évolution climatique en Afrique de l'Ouest en 1983-1985 à l'aide de l'imagerie satellitaire et de données conventionnelles. in: INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp.173-178.
- GUYOT, J.L., JOUANNEAU, J.M., QUINTANILLA, J., WASSON, J.G., 1993 : Les flux de matières dissoutes et particulaires exportées des Andes par le Rio Béni (Amazonie Bolivienne) en période de crue. *Geodinamica Acta*, vol.6, n.4, pp.233-241.
- HARRISS, R.C., SEBACHER, D.I., DAY, F.P., 1982 : Methane flux in the Great Dismal Swamp. *Nature*, vol.297, pp.673-675.

- HEINEN, W., OEHLER, J.H., 1979 : Evolutionary aspects of biological involvement in the cycling of silica. in: Biogeochemical cycling of mineral-forming elements. P.A.Trudinger et D.J. Swaine. Elsevier, éd., pp.431-443.
- HERCZEG, A.L., SIMPSON, H.J., MAZOR, E., 1993 : Transport of soluble salts in a large semiarid basin : River Murray, Australia. *Journal of hydrology*, vol.144, pp.59-84.
- HIERNAUX, P., 1982 : La carte des ressources fourragères des parcours du Delta Intérieur du Niger, notice, CIPEA-ODEM, 96, p.1.
- HIROTA, M., MURAMATSU, H., MAKINO, Y., IKEGAMI, M., TSUTSUMI, K., 1989 : Gas chromatographic measurement of Atmospheric methane in Japan. *Atmospheric Environment*, vol.23, n.8, pp.1835-1839.
- HOLZAPFFEL, T., 1985 : Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord*, vol.12, 136p.
- HOLZAPFEL-PSCHORN, A., SEILER, W., 1986 : Methane emission during a cultivation period from an Italian Rice paddy. *Journal of Geophysical Research*, vol.91, série D, pp.11803-11814.
- HUBERT, P., CARBONNEL, J.P., 1986 : Approches statistiques de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. in: INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp.199-202.
- HUBERT, P., CARBONNEL, 1987 : Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, vol.95, pp.165-183.
- HUSTED, S., 1993 : An open chamber technique for determination of methane emission from stored livestock manure. *Atmospheric Environment. Part A.*, vol.27, n.11, pp.1635-1642.
- HUSTED, S., 1994 : Seasonal Variation in Methane Emission from Stored Slurry and Solid Manures. *Journal of Environmental Quality*, vol.23, n.3, pp.585-592.
- IRION, G., 1991 : Minerals in Rivers. pp.265-281. in : *Biogeochemistry of Major World Rivers*. SCOPE, n.42, E.T.Degens, S.Kempe, J.E.Richey, éd. J.Wiley & Sons, 342 p.
- ISAKSEN, I.S.A., HOV, O., 1987 : Calculation of trends in the tropospheric concentration of O₃, OH, CO, CH₄ and NO_x. *Tellus*, vol.39, série B, pp.271-285.
- ITTEKOT, V., 1988 : Global trends in the nature of organic matter in rivers suspensions. *Nature*, vol. 332, pp. 436-438.
- JACOBBERGER, P.A., 1988a : Drought-related changes to geomorphologic processes in central Mali. *Geological Society of America Bulletin*, vol.100, pp.351-361.
- JACOBBERGER, P.A., 1988b : Mapping Abandoned River Channels in Mali through directional Filtering of Thematic Mapped Data. *Remote sensing environment*, vol.26, pp.161-170.
- JANICOT, S., 1992a : Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part I : Regionalizations and typings. *Journal of climate*, vol.5, n.5, pp.489-497.
- JANICOT, S., 1992b : Spatiotemporal variability of West African Rainfall. Part II : Associated surface and Airmass Characteristics. *Journal of climate*, vol.5, n.5, pp.489-497.
- JOSEPH, A., 1986 : Recharges et paléorecharges des nappes sub-désertiques au Niger. Thèse de troisième cycle, Université de Paris XI, U.F.R. Orsay.

- JOSEPH, A., ARANYOSSY, J.F., 1989 : Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'Ouest en relation avec les lignes de grain. *Hydrogéologie*, n.3, pp.215-218.
- JOSEPH, A., FRANGI, J.P., ARANYOSSY, J.F., 1993 : Caractéristiques isotopiques des eaux météoriques et souterraines en Afrique Sahélo-Soudanaise. pp. 23-51. in : *Les ressources en eau au Sahel-Etudes hydrogéologiques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest par les techniques isotopiques*. IAEA, Tecdoc, n.721. 211p.
- JOUANNEAU, J.M., LAPAQUELLERIE, Y., LATOUCHE, C., TASTET, J.P., 1990 : Résultats préliminaires de la campagne Oubangui-Congo de novembre 1988. Microgranulométrie, minéralogie, analyses chimiques des matières en suspension. *Sci.Géol. Bulletin*, vol.43, n.1, pp.3-14.
- JUSSERAND, C., 1976 : Preliminary isotopic ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) data of some waters in the Republic of Mali. *J. of hydrology*, vol.28, pp.87-89.
- KAMATE, C., 1981 : Climat. in: *Atlas du MALI*, pp. 14-17. Jeune Afrique éd.
- KARPOFF, R., 1991 : cadre hydrogéologique. in : *Paléoenvironnement du Sahara : lacs Holocènes à Taoudenni (Mali)*. chapitre 1 : généralités, pp.31-38. N. Petit-Maire, C.N.R.S éd.
- KATTAN, Z., PROBST, J.L., 1986 : Transport en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crue. *Journées d'hydrologie de Strasbourg, crue et inondations*. 16, 17, 18 octobre 1986. pp.143-167.
- KATTAN, Z., GAC, J.Y., PROBST, J.L., 1987 : Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin - Estimation of the subsurface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *Journal of hydrology*, vol.92, pp.59-76.
- KELLER, M., MITRE, M.E., STALLARD, R.F., 1990 : Consumption of Atmospheric methane in tropical Soils of central Panama : effects of agricultural development. *Global Biogeochemical Cycle*, vol.4, n.1, pp.21-27.
- KELLER, M., STALLARD, R.F., 1994 : Methane emission by bubbling from Gatun lake, Panama. *Journal of Geophysical Research*, vol.99, n. D4, pp.8307-8319.
- KHALIL, M.A.K, RASMUSSEN, R.A, 1983 : Sources, Sinks, and Seasonal cycles of Atmospheric Methane. *Journal of Geophysical Research*, vol.88, n. C9, pp.5131-5144.
- KHALIL, M.A.K, RASMUSSEN, R.A, 1994 : Global emissions of Methane during the last several centuries. *Chemosphere*, vol.29, n.5, pp.833-842.
- KILHAM, P., 1990 : Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers : Data from Africa. *Limnol.Oceanogr.*, vol.35, n.1, pp.80-83.
- KING, G.M., 1990 : Regulation by light of methane emissions from a wetland. *Nature*, vol. 345, pp.513-515.
- KNAPP, A.K., YAVITT, J.B., 1992 : Evaluation of a close chamber method for estimating methane emissions from aquatic plants. *Tellus*, 44 B, pp.63-71.
- LACAUX, J.P., MOEMBA-NDEMBA, J., LEFEIVRE, B., CROS, B., DELMAS, R., 1992 : Biogenic emissions and biomass burning influences on the chemistry of the fogwater and stratiform precipitations in the African Equatorial forest. *Atmospheric Environment*, vol. 26 A, n. 4, pp.541-551.

LAL, S., SUBBARAYA, B.H., BORCHERS, R., FABIAN, P., 1988 : Surface measurements of trace gases in the tropical region near Hyderabad. *Atmospheric Environment*, vol.22, n.7, pp.1501-1503.

LAMAGAT, J.-P., 1983 : Analyse de la vitesse de propagation des crues. Application à la prévision des crues et des étiages. ORSTOM Bamako, Mult. 37p.

LAMAGAT, J.-P., MOLINIER, M., 1983 : Etude des anomalies des crues du Niger. Travaux et documents, ORSTOM éd.

LAMB, P.J., 1982 : Persistence of subsaharian drought. *Nature*, vol.299, pp.46-48.

LAPAQUELLERIE, Y., 1987 : Utilisation de la diffractométrie X pour la détermination des constituants amorphes dans les sédiments marins (silice biogène et ondes volcaniques). *Clay minerals*, vol.22, pp.457-463.

LARAQUE, A., BRICQUET, J.P., BERTHELOT, M., OLIVRY, J.C., 1994 : Les exportations de matières du fleuve Congo. in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.

LE GAL LA SALLE, C., 1990 : Etude des précipitations Nigériennes. mémoire de D.E.A., Université de Paris-XI, U.F.R. Orsay. 58 p.

LEPRUN, J.C., 1992 : Etude de quelques brousses tigrées Sahéliennes: structure, dynamique, écologie. pp.221-244. in : L'aridité, une contrainte au développement. Le FLOC'H, E., GROUZIS, M., CORNET, A., BILLE, J.C., Didactique, ORSTOM éd.

LEPRUN, J.C., OLIVIER da SILVEIRA, C., 1992 : Analogies et particularités des sols et des eaux de deux régions semi-arides : le Sahel de l'Afrique de l'Ouest et le Nordeste brésilien. pp.131-151. in : L'aridité, une contrainte au développement. Le FLOC'H, E., GROUZIS, M., CORNET, A., BILLE, J.C., Didactique, ORSTOM éd.

LEROUX, M., 1983: Le climat de l'Afrique tropicale. Champion éd., 2 vol., 633p.

LEROUX, M. 1987 : L'Anticyclone mobile Polaire, relais des échanges méridiens: son importance climatique. *Géodynamique 2* (2), pp.161-167.

LEWIS W.M., SAUNDERS, J.F., 1989 : Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry*, vol.7, pp.203-240.

LEZINE, A.M., 1987 : Paléoenvironnements des végétaux d'Afrique occidentale nord-tropicale depuis 12000 BP. Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales (Sénégal-Mauritanie). *Géodynamique 2* (2), pp.137-138.

LORIUS, C., 1991 : Climat et gaz à effet de serre : les données des archives glaciaires. La vie des Sciences, C.R.de l'Académie des Sciences, série générale, tome 8, n.2, pp.107-124.

LUDWIG, R., WAGNER, R.H., 1986 : Contribution à la planification de l'exploitation des eaux souterraines dans une zone de formations gréseuses au Mali. *Bulletin de liaison du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques.*, n. 65, pp.3-12.

McCARTHY, T.S., 1993 : The great inland deltas of Africa. *Journal of African Earth Sciences*, vol.17, n.3, pp.275-291.

McCARTHY, T.S., METCALFE, 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., ELLERY, K., 1993 : Vegetation-induced, subsurface precipitation as an aggradation process in the permanent swamps of the Okavango (delta) fan, Botswana. *Chemical Geology*, vol. 107, pp. 111-131.

MAGLIONE, G., 1976 : Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Les dépressions interdunaires du Tchad. Travaux et documents, 50, ORSTOM, éd., 335pp.

MAHE, G., 1993 : Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Etudes et Thèses, ORSTOM éd., 438 p.

MAHE, G., OLIVRY, J.C., 1991 : Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. in : Hydrology for the Water Management of large River Basins. Proceeding of the Vienna symposium, August 1991. IAHS publ. n.201, pp. 163-171.

MAHE, G., CITEAU, J., 1993 : Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. Veille climatique satellitaire, n. 44, pp. 34-54.

MARENCO, A., MACAIGNE, M., PRIEUR, S., 1989 : Meridian and Vertical CO and CH₄ distributions in the background troposphere (70°N-60°S; 0-12 km d'altitude) from scientific aircraft measurements during the Statoz III experiment (June 1984). Atmospheric Environment, vol.23, n. 1, pp. 185-200.

MARGAT, J., 1992 : Les eaux fossiles. L'environnement en Afrique, vol.161, pp.76-78.

MARTIN, A., BALESDENT, J., MARIOTTI, A., 1992 : Earthworm diet related to soil organic matter dynamics through 13C measurements. Oecologia, vol.91, pp.23-29.

MARTIN, C., 1983 : Mesures de l'érosion chimique dans le massif des Maures : L'exemple du bassin versant du Rimbaud (Var, France). in : Dissolved loads of Rivers and surface Water Quantity/Quality relationships. Proceeding of the Hamburg symposium, IAHS, n.141, pp.265-276.

MARTINS, O., 1988 : Solute concentrations in the lower Niger river and the source rock contribution. Hydrological processes, vol.2, n.1, pp.19-29.

MARTINS, O., PROBST, J.L., 1991 : Biogeochemistry of Major African Rivers : Carbon and mineral transport. pp.127-155. in : Biogeochemistry of Major World Rivers. SCOPE n. 42, E.T. Degens, S. Kempe, J.E. Richey éd., J.Wiley & Sons, 342 p.

MATHIEU, P., MONNET, C., 1971 : Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. Cahier Orstom, série géologie, vol.III, n.2, pp.93-114.

METEOROLOGIE NATIONALE : Annuaire climatologiques 1990 à 1993. Bamako, Mali.

MEYBECK, M., 1979 : Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. revue de géologie dynamique et de géographie physique, vol.21, fasc.3, p.215-246.

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, IAHS publ., n. 141, pp. 173-192.

MEYBECK, M., 1984 : Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse d'état, Université de Paris VI. 554 p.

MEYBECK, M., 1993 : Riverine transport of atmospheric carbon : Sources, Global Typology and Budget. *Water, Air, and Pollution*, vol.70, pp.443-463.

MICHARD, G., 1989 : *Equilibre chimique dans les eaux naturelles*. Publisud éd., 357p.

MINAMI, K., NEUE, H.U., 1994 : Rice paddies as a methane source. *Climatic change*, vol.27, pp.13-26.

MØBERG, J.P., ESU, I.E., MALGWI, W.B., 1991 : Characteristics and constituent of Harmattan dust falling in Northern Nigeria. *Geoderma*, vol.48, pp.73-81.

MOLINIER, M., 1979 : Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cahier de l'ORSTOM, série hydrologie*, vol.XVI, n°1, pp.55-66.

MOORE, T.R., KNOWLES, R., 1990 : Methane emission from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. pp.45-61.

MORRISSEY, L.A., LIVINGSTON, G.P., 1992 : Methane Emissions from Alaska Arctic Tundra : An assessment of local Spatial Variability. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, n. D15, pp.16661-16670.

MOUKOLO, N., OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., LARAQUE, A., 1992 : Transports de matières solides et en suspension dans les rivières du bassin du fleuve Congo. *Bulletin de liaison du CIEH*, n. 90, pp.3-10.

NACKE, G., 1991 : Surface Albedo derived from Meteosat imagery with application to Africa. *Journal of Geophysical Research, série D*, vol. 96, n. 10, pp.18581-18601.

NDIAYE, B., ARANYOSSY, J.F., FAYE, A., 1993 : Le rôle de l'évaporation dans la formation des dépressions piézométriques en Afrique Sahélienne: hypothèses et modélisation. pp.53-64. in: *Les ressources en eau au Sahel-Etudes hydrogéologiques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest par les techniques isotopiques*. IAEA, Tecdoc, n. 721. 211p.

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 doctorat d'Université en géochimie fondamentale. Université de Paris VII.

NICHOLSON, S.E., 1981 : Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, vol. 109, n. 10, pp. 2191-2208.

NICHOLSON, S.E., PALAO, I.M., 1993 : A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel. Part I: Characteristics of rainfall fluctuations. *International journal of climatology*, vol.13, pp.371-389.

NICKLING, W.G., GILLIES, J.A., 1993 : Dust emission and transport in Mali, West Africa. *Sedimentology*, vol.40, pp.859-868.

NOUVELOT, J.-F., 1969 : Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahier de l'ORSTOM, série hydrologie*, vol.VI, n°4, pp.43-86.

NOUVELOT, J.F., 1972 : Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. *Cahier ORSTOM, série hydrologie*, vol.IX, n°1, pp.47-74.

OLIVRY, J.C., 1977 : Transport solides en suspension au Cameroun. in : *Erosion and solid Matter Transport in Inland Waters Symposium*. IASH - UNESCO, vol. 122, pp.134-141.

OLIVRY, J.C., 1983 : Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débit et précipitations). Cah.ORSTOM, série hydrologie, vol.XX, n. 1, pp. 47-69.

OLIVRY, J.C., 1993 : Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique Intertropicale. in: l'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frécaut. M.Griselin, Presses Universitaires de Nancy éd., pp.181-190.

OLIVRY, J.C., 1994a : Le contexte hydroclimatique de la cuvette lacustre. pp. 39-58. in : La Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd.

OLIVRY, J.C., 1994b : Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur. in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.

OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., THIEBAUX, J.P., SIGHA, N., 1988 : Transport de matière sur les grands fleuves des régions intertropicales : les premiers résultats des mesures de flux particulaire sur le bassin du fleuve Congo. Proceeding of the Porto Alegre Symp., déc. 1988. IASH publ. 174, pp.509-521.

OLIVRY, J.C., BRICQUET, J.P., BAMBA, F., DIARRA, M., 1994a : Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.

OLIVRY, J.C., CHOURET, A., VUILLAUME, G., 1994b : Monographie hydrologique du lac Tchad. A paraître.

OLIVRY, J.C., GOURCY, L., TOURE, M., 1994c : Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. in : Colloque PEGI, 22-24 nov. 1993, CNRS-Insu-Orstom, Paris.

ORANGE, 1992 : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Sciences géologiques, mémoire n. 93.

ORANGE, D., GAC, J.Y., PROBST, J.L., TANRE, D., 1990 : Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques. Une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal. C.R.Acad.Sci.Paris, t. 311, série II, pp. 167-172.

ORANGE, D., GAC, J.Y., 1990 : Reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djallon (Guinée). Flux de matière dissoute et en suspension en Haute Gambie. Géodynamique, vol.5, n.1, pp.35-45.

OUSMANE, B., 1988 : Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande Sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-Est). Thèse de docteur ès Sciences, Uni. de Niamey, 148p.

PAQUET, H., COUDE-GAUSSEN, G., ROGNON, P., 1984 : Etude minéralogique des poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19° et 35° de latitude nord. Revue de géologie dynamique et de géographie physique, vol. 24, n. 4, pp. 257-265.

PEARMAN, G.I., ETHERIDGE, D., De SILVA, F., FRASER, P.J., 1986 : Evidence of changing concentrations of atmospheric CO₂, N₂O, and CH₄ from air bubbles in Antarctic ice. Nature, vol. 320, pp. 248-250.

PETIT-MAIRE, N., 1986 : Paléoclimatologie du Sahara occidental et central pendant les deux derniers optima climatiques, aux latitudes paratropicales. in : INQUA : 1986 DAKAR SYMPOSIUM " Changements globaux en Afrique" ORSTOM, éd., pp.375-379.

- PETIT-MAIRE, N., 1991 : Tableau d'ensemble. in : Paléoenvironnement du Sahara : lacs Holocènes à Taoudenni (Mali). chap.2, tableau des paléolacs et l'environnement terrestre, pp.191-194. N.Petit-Maire, C.N.R.S éd.
- PETIT-MAIRE, N., FABRE, J., CARBONEL, P., SCHULTZ, E., AUCOUR, A.M., 1987 : La dépression de Taoudenni (Sahara Malien) à l'Holocène. Géodynamique, vol.2, n.2, pp.127-160.
- PETIT-MAIRE, N., RISER, J., 1987 : Holocene palaeohydrography of the Niger. Palaeoecology of Africa. vol. 18, pp. 135-141.
- PETIT-MAIRE, N., FONTUGNE, M., ROULAND, C., 1991 : Les derniers 130 000 ans : changements climatiques intertropicaux et variations du taux de méthane atmosphérique. C.R.de l'Acad.Sci.Paris, t. 312, série II, pp. 1235-1241.
- PETRENCHUK, O.P., SELESZNEVA, E.S., 1970 : Chemical composition of precipitation in regions of the Soviet Union. Journal of Geophysical Research, vol. 75, n. 18, pp. 3629-3634.
- 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, n. 1, pp. 80-96.
- PLUMMER, L.N., JONES, B.F., TRUESDELL, A.H., 1976 : Wateqf. A Fortran IV version of Wateq. A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geol.Surv.Invest. Report 76-13, 61 p.
- PONCET, Y., 1994 : Le milieu du delta central. pp. 58-66. in: La Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd.
- PONCET, Y., TROUBAT, J.J., 1994 : L'eau, 1980-1990. cartes n.1 in : la Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd.
- POUYAUD, B., 1986 : Contribution à l'évaluation de l'évaporation des nappes d'eau libre en climat tropical sec. Etude et Thèse, ORSTOM éd., 254p.
- POUYAUD, B., 1987 : L'évaporation des nappes d'eau libre. hydrologie continentale, vol.2, n. 1, pp. 26-46.
- PRIEME, A. 1994 : Production and emission of methane in a brackish and a freshwater wetland. Soil Biol. Biochemistry, vol. 26, n. 1, pp. 1-78.
- PROBST, J.L., BAZERBACHI, A., 1986 : Transports en solution et en suspension par la Garonne Supérieure. Sci. Géol. Bull., vol. 39, n. 1, pp. 79-98.
- PROBST, J.L., MORTATTI, J., TARDY, Y., 1994 : Carbon river fluxes and weathering CO₂ consumption in the Congo and Amazon river basins. Applied Geochemistry, vol.9, n.1, pp.1-14.
- PYE, K., 1987 : Eolian dust and dust deposits. Academic Press éd., 334 p.
- QUENSIERE, J., 1994 : La faune Ichtyologique. in : La Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd., pp. 70-80.
- RAIMBAULT, M., 1986 : Le gisement néolithique de Kobadi (Sahel Malien) et ses implications paléohydrologiques. in : INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM, éd., pp.393-397.

- RAMANATHAN, A.L., VAITHIYANATHAN, P., SUBRAMANIAN, V., DAS, B.K., 1994 : Nature and transport of solute load in the Cauvery river basin, India. *Water research*, vol.28, n.7, pp.1585-1593.
- RASMUSSEN, R.A., KHALIL, M.A.K., 1981 : Atmospheric methane (CH₄) : Trends and seasonal cycles. *Journal of Geophysical Research* série D, vol. 86, n. 10, pp.9826-9832.
- RAYNAUD, D., JAUZEL, J., BARNOLA, J.M., CHAPPELLAZ, J., DELMAS, R.J., LORIUS, C., 1993 : The Ice record of Greenhouse Gases. *Science*, vol. 259, pp. 865-1092.
- RIOU, C., 1975 : La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. ORSTOM éd., 236 p.
- RISER, J., 1986 : Paléohydrographie du bassin d'Araouane à l'Holocène. in : INQUA/1986 DAKAR SYMPOSIUM "Changements globaux en Afrique". ORSTOM éd., pp. 509-510.
- RISER, J., AUCOUR, A.M., TOURE, F., 1986 : Niveaux lacustres et néotectonique au lac Faguibine (Mali). *C.R.Acad.Sc.Paris*, tome 303, Série II, n. 10, pp. 941-943.
- RISER, J., PETIT-MAIRE, 1986 : Paléohydrographie du bassin d'Araouane à l'Holocène. *Revue de Géologie dynamique et Géographie physique*. vol.27, pp. 205-212.
- ROCHE, M.A., 1980 : Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. *Travaux et Document*, n. 117, ORSTOM éd., 383 p.
- ROCHE, M.A., JAUREGUI, C.F., 1988 : Water resources, salinity and salt yields of the rivers of the Bolivian Amazon. *Journal of hydrology*, vol. 101, pp.305-331.
- ROULAND, C., BRAUMAN, A., LABAT, M., LAPAGE, M., 1993 : Nutritional factors affecting methane emission from termites. *Atmospheric methane : sources, sinks and role in global change*. M.A.K. Khalil et M.J. Shearer, éd., *Chemosphere*, vol. 26, n. 1-4, pp. 617-622.
- ROULET, N.T., ASH, R., QUINTON, W., 1993 : Methane flux from drained northern peatlands : Effects of a persistent water table lowering on flux. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 7, n. 4, pp.749-769.
- ROULET, N.T., JANO, A., KELLY, C.A., KLINGER, L.F., MOORE, T.R., PROTZ, R., RITTER, J.A., ROUSE, W.R., 1994 : Role of the Hudson Bay lowland as a source of Atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, série D, vol. 1, pp. 1439-1454.
- RUDOLPH, J., 1994 : Anomalous methane. *Nature*, vol.368, pp.19-20.
- SARROT-REYNAULD, J., TRAORE, A.Z., 1989 : Etude isotopique des eaux souterraines de la région de Koula Nossombougou (Mali). *Hydrogéologie*, n. 3, pp. 179-187.
- Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali, 1990 : ministère de l'Industrie de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali, Programme des Nations Unies pour le développement, préparé par le Département de la Coopération Technique et pour le Développement (DCTD), projet MLI/84/005, Exploitation, évaluation et gestion des ressources en eaux souterraines. volume I : rapport, 289 p., volume II : annexes, 113 p.
- SCHIPPER, L.A., REDDY, K.R., 1994 : Methane production and Emissions from Four Reclaimed and Pristine Wetlands of South-eastern United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 58, pp.1270-1275.
- SCHLESINGER, W.H., MELACK, J.M., 1981 : Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus*, vol. 33, pp. 172-187.

- SCHOELLER, H., 1962 : Les eaux souterraines. Hydrologie, dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson éd., 643 p.
- SEBACHER, D.I., HARRISS, R.C., 1982 : A system for measuring methane fluxes from Inland and Coastal wetland Environments. *Journal Environ. Quality*, vol. 11, n. 1, pp. 34-37.
- SEILER, W., CONRAD, R., SCHARFFE, D., 1984 : Field Studies of methane Emission from termite Nests into the Atmosphere and Measurements of Methane Uptake by Tropical Soils. *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 1, pp. 171-186.
- SEILER, W., HOLZAPFEL-PSCHORN, A., CONRAD, R., SCHARFFE, D., 1984 b : Methane emission from rice paddies. *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 1, pp. 241-268.
- SEIMBILLE, F., 1986 : Global water cycle. R.E. Berner éd., 394 p.
- SERVANT, J., 1991 : Les sources naturelles et artificielles de méthane dans l'atmosphère à l'échelle mondiale. *Atmospheric research*, vol. 26, pp. 525-542
- SEYLER, P., OLIVRY, J.C., NKAMDJOU, S., 1993 : Hydrogeochemistry of the Ngoko River, Cameroon: chemical balances in a rainforest equatorial basin. in : *Hydrology of Warm Humid Region*, proc. of the Yokohama symposium, juillet 1993. IAHS publ. n. 216, pp. 87-105.
- SHEPPARD, J.C., WESTBERG, H., HOPPER, J.F., GANESAN, K., ZIMMERMAN, P., 1982 : Inventory of global methane sources and their production rates, *Journal of Geophysical Research*, série C, vol. 87, pp. 1305-1312.
- SHOCK, E.L., 1994 : Catalysing methane production. *Nature*, vol. 368, pp.499-500.
- SIGG, L., STUMM, W., BERHA, P., 1992 : Chimie des milieux aquatiques. Masson, éd. 391p.
- SIGHA-NKAMDJOU, 1993 : Caractérisation et fonctionnement hydrochimique d'un bassin versant en milieu forestier équatorial humide : L'exemple de la Ngoko à Moloundou (sud-est du Cameroun). Thèse de 3ème cycle, Université de Paris IX-Orsay, 379 p.
- SIRCOULON, 1976 : Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique Intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah.ORSTOM*, série hydrologie, vol. XIII, n. 2, pp. 75-174.
- SIRCOULON, J., 1992 : Evolution des climats et des ressources en eau. L'environnement en Afrique, n. 161, pp. 57-76.
- STALLARD, R.F., EDMOND, J.M., 1981 : Geochemistry of the Amazon. 1: Precipitation chemistry and the Marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, n. 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, n. C14, pp. 9671-9688.
- STALLARD, R.F., EDMOND, J.M., 1987 : Geochemistry of the Amazon. 3: Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, n. C92, pp. 8293-8302.
- STEEN, B., 1977 : Techniques for measuring dry deposition. Summary of WMO Expert Meeting on dry deposition, avril 18-22, 1977, Gothenburg. pp. 287-289. in : *Saharan dust*, Scope 14, A. Morales, John Wiley & sons éd.
- STEELE, L.P., FRASER, P.J., RASMUSSEN, R.A., KHALIL, M.A.K., CONWAY, T.J., CRAWFORD, A.J., GAMMON, R.H., MASARIE, K.A., THONING, K.W., 1987 : Methane in troposphere. *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 5, pp. 125-172.

STEVENS, C.M., ENGELKEMEIR, A., 1988 : Stable Carbon Isotopic Composition of methane from some Natural and Anthropogenic sources. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n. 10, série D, pp. 725-733.

SUTCLIFFE, J.V., LAZENBY, J.B.C., 1989 : Hydrology and river control of the Niger and Senegal. in: *Sahel forum, The-State-of-the-art of hydrology and hydrology in the arid and semi-arid areas of Africa, Ouagadougou, 18/02/1989*. pp. 846-856.

SUTCLIFFE, J.V., PARKS, Y.P., 1989 : Comparative water balances of selected African wetlands. *Journal des Sciences hydrologiques*, vol. 34, n. /2, pp. 49-62.

Synthèse hydrogéologique du Mali, 1990 : ministère de l'Industrie de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali, Programme des Nations Unies pour le développement, préparé par le Département de la Coopération Technique et pour le Développement (DCTD), projet MLI/84/005, Exploitation, évaluation et gestion des ressources en eaux souterraines.

TATHY, J.P., CROS, B., DELMAS, R.A., MARENCO, A., SERVANT, J., 1992 : Methane emission from flooded forest in Central Africa. *Journal of Geophysical Research*, vol.97, n. D6, pp.6159-6168.

TAUPIN, 1990 : Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien, et évolution géochimique des solutions du sol (Vallée du moyen Niger). thèse de troisième cycle. Université de Paris-XI Orsay. 172 p.

THIOULOUSE, J., CHESSEL, D., 1987 : Les analyses multitableaux en écologie factorielle. I.-De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Oecologica*, vol. 8, n. 4, pp. 463-480.

THOMPSON, A.M., CHAPPELLAZ, J.A., FUNG, I.Y., KUCSERA, T., 1993 : The atmospheric CH₄ increase since the Last Glacial Maximum. II. Interactions with oxidants. *Tellus*, série B, vol. 45, n. 3, pp. 228-241.

THURMAN, E.M., 1986 : *Organic geochemistry of natural waters*. M. Nijhoff et W.Junk éd., 497 pp.

TIHAMA EL ABBASS, PERSON, A., GERARD, M., ALBOUY, Y., SAUVAGE, M., SAUVAGE, J.F., BERTIL, D., 1993 : Arguments géophysiques et géologiques en faveur de manifestations volcaniques récentes dans la région du lac Faguibine (MALI). *C.R.de l'Académie des Sciences, Sciences de la terre*, vol. 316, n. 9, pp. 1303-1310.

TRAVI, Y., GAC, J.Y., FONTES, J.C., FRITZ, B., 1987 : Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *géodynamique*, vol. 2, n. 1, pp. 43-53.

TRAVI, Y., GUIRAUD, R., 1982 : Présence d'un aquifère généralisé dans les formations gréseuses Précambriennes de la région de San (Mali). Rôle de la fracturation majeure dans les écoulements souterrains. *Bulletin de liaison du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques*, n. 50, pp. 3-8.

TRICART, J., 1959 : Géomorphologie dynamique de la moyenne vallée du Niger. *Ann.Géogr.*, vol. 68, pp. 333-343.

TRUDINGER, P.A., SWAINE, D.J., SKYRING, G.W., 1979 : Biogeochemical cycling of elements-General considerations. pp. 1-27 in : *Biogeochemical cycling of mineral-forming elements*. P.A.Trudinger et D.J.Swaine, Elsevier éd.

TYLER, S.C., BRAILSFORD, G.W., YAGI, K., MINAMI, K., CICERONE, R.J., 1994 : Seasonal variations in methane flux and $\delta^{13}\text{C}_4$ values for rice paddies in Japan and their implications. *Global Biogeochemical Cycles*, vol.8, n.1, pp.1-12.

- URVOY, Y., 1942 : Les bassins du Niger. Etude de géographie physique et de paléogéographie. Mém.Inst.Fra.Afrique Noire 4, 135 p.
- VAITHIYANATHAN, P., RAMANATHAN, AL., SUBRAMANIAN, V., 1988 : Erosion, transport and deposition of sediments by the tropical rivers of India. in : sediment budget, proceeding of the Porto Alegre symposium, déc.1988. IAHS publication n. 174, pp. 561-574.
- VALENTINE, D.W., HOLLAND, E.A., SCIMEL, D.S., 1994 : Ecosystem and physiological controls over methane production in northern wetlands. Journal of Geophysical Research, vol. 99, vol. D1, pp. 1563-1571.
- VALLES, V., N'DIAYE, M., BERNADAC, A., TARDY, Y., 1989 : Geochemistry of waters in the Kouroumari Region, Mali ; Al, Si, and Mg in Waters Concentrated by Evaporation : Development of a model. Arid Soil Research, vol. 3, pp. 21-29.
- VANNITSEM, S., DEMAREE, G., 1991 : Détection et modélisation des sécheresses au Sahel: Proposition d'une nouvelle méthodologie. Hydrologie continentale, vol. 6, n. 2, pp. 155-171.
- VEIHMEYER, F.J., 1964 : Evapotranspiration, in : Handbook of Applied Hydrology. Ven Te Chow, McGraw-Hill éd., section 11.
- VOUTE, C., 1962 : Geological and morphological evolution of the Niger and Benue valley, Ann.Mus.Roy.Congo Belge 8, pp. 189-205.
- WALLING, D.E., 1984 : The sediment yields of African rivers. pp. 265-283. in : Challenges in African hydrology and Water resources. Proceedings of the Harare symposium. IASH, n. 144. 587 p.
- WALLING, D.E., WEBB, B.W., 1983 : The dissolved loads of rivers : a global overview. in : Dissolved loads of Rivers and surface Water Quantity/Quality relationships. Proceeding of the Hamburg symposium, IAHS, n. 141, pp. 3-20.
- WASSMANN, R., THEIN, U.G., WHITICAR, M.J., RENNENBERG, H., SEILER, W., JUNK, W.J., 1992: Methane emissions from the Amazon Floodplain : characterisation of production and transport. Global Biogeochemical Cycles, vol. 6, n. 1, pp. 3-13.
- 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, pp. 363-379.
- WEFER, G., HEINZE, P.M., BERGER, W.H., 1994 : Clues to ancient methane release. Nature, vol. 369, pp. 282.
- WELCOMME, R.L., 1979 : Fisheries ecology of floodplain rivers. London-New York, Longman, 317 p.
- WHITE, J.W.C., CLAIS, P., FIGGE, R.A., KENNY, R., MARKGRAF, V., 1994 : A high-resolution record of atmospheric CO₂ contents from carbon isotopes in peat. Nature, vol. 367, pp. 153-156.
- WHITING, G.J., CHANTON, J.P., 1992 : Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen. Global Biogeochemical Cycles, vol. 6, n. 3, pp. 225-231.
- WILKE, B.M., DUKE, B.J., JIMOH, W.L.O., 1984 : Mineralogy and chemistry of Harmattan dust in northern Nigeria. Catena, vol.11, pp.91-96.

WILSON, J.O., CRILL, P.M., BARTLETT, K.B., SEBACHER, D.I., HARRISS, R.C., SASS, R.L., 1989 : Seasonal variation of methane emissions from temperate swamp. *Biogeochemistry*, vol.8, pp. 55-71.

WUILLOT, J., 1994 : Les phytocœnosés aquatiques. pp. 66-70. in: *La Pêche dans le Delta Central du Niger. Approche pluridisciplinaire d'un système de production halieutique*. J. Quensière, IER-ORSTOM-Karthala éd.

YAALON, D.H., GANOR, E., 1977 : East Mediterranean trajectories of Dust-carrying storms from the Sahara and Sinai. pp.187-193. in: *Saharan dust*, Scope 14, éd. Morales, John Wiley & sons.

YAGI, K., CHAIROJ, P., TSURUTA, H., CHOLITKUL, W., MINAMI, K., 1994 : Methane emission from Rice Paddy Fields in the Central Plain of Thailand. *Soil Science Plant Nutr.*, vol. 40, n. 1, pp. 29-37.

YAIR, A., KORNIELI, A., ISSAR, A., 1991 : The chemical composition of precipitation and runoff water on an arid limestone hillside, Northern Negev, Israel. *Journal of hydrology*, vol. 129, pp. 371-388.

YOBOUE, V., 1991 : Caractéristiques physiques et chimiques des aérosols et des pluies collectés dans la savane humide de Côte d'Ivoire. Thèse de 3ème cycle de l'Université de Toulouse. 146 p.

YURTSEVER, Y., GAT, J.R., 1981 : Atmospheric water. pp.103-142. in : *Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. Technical reports series, n. 210, Gat et Gonfiantini, AIEA éd.

ZANDER, R., DEMOULIN, P., EHHALT, D.H., SCHMIDT, U., 1989 : Secular increase of the Vertical Column Abundance of methane derived from IR Solar Spectra Recorder at the Jungfraujoch Station. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, série D, n. 8, pp. 11029-11039.

ZOSKA, J.R., 1985 : The water quality and hydrobiology of the Niger. pp. 77-99. in : *The Niger and its neighbours*. A.T.Grove, A.Balkema/Rotterdam/ Boston, éd., 331 p.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CARACTERISTIQUES DU DELTA CENTRAL DU FLEUVE

1. CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.1 GEOGRAPHIE	9
1.2 GEOLOGIE	11
1.2.1 HISTOIRE GEODYNAMIQUE.....	11
1.2.2 STRATIGRAPHIE	12
1.2.2.1 Les Formations du socle Précambrien inférieur.....	12
1.2.2.2 Les formations sédimentaires du Précambrien supérieur et du Paléozoïque	12
1.2.2.3 Les séries sédimentaires du Mésozoïque et du Cénozoïque.....	12
1.2.2.4 Le Quaternaire.....	14
1.2.2.5 Récapitulatif de la géologie du Mali.....	14
1.3 HYDROGEOLOGIE.....	16
1.3.1 LES AQUIFERES FISSURES.....	16
1.3.1.1 Les aquifères du socle.....	16
1.3.1.2 Les aquifères infracambriens	16
1.3.1.3 Les aquifères du Cambrien	18
1.3.1.4 Les aquifères du Primaire.....	18
1.3.2 LES AQUIFERES A PERMEABILITE INTERGRANULAIRE.....	18
1.3.2.1 Les aquifères du Continental Intercalaire.....	18
1.3.2.2 Les aquifères du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	18
1.3.2.3 Les aquifères du Continental Terminal/Quaternaire	18
1.4 VEGETATION.....	20
1.5 CLIMAT	22
1.5.1 ELEMENTS PRINCIPAUX DE CLIMATOLOGIE OUEST-AFRICAINE	22
1.5.1.1 La circulation atmosphérique.....	22
1.5.1.2 Les perturbations tropicales	23
1.5.2 LES SAISONS.....	23
1.5.3 DOMAINES CLIMATIQUES.....	25
1.5.3.1 Les zones soudaniennes	25
1.5.3.2 La zone sahélienne.....	25
1.5.3.3 La zone saharienne	26
1.5.4 PARAMETRES CLIMATIQUES DU BASSIN DU NIGER.....	26
1.5.5 CONCLUSIONS.....	26

2 HYDROLOGIE DES BASSINS SUPERIEURS DU NIGER ET BANI

2.1 HYDROGRAPHIE DU BASSIN AMONT	27
2.1.1 LE FLEUVE NIGER.....	27
2.1.2 HYDROGRAPHIE DU BANI.....	27
2.1.3 LE NIGER MOYEN ET INFERIEUR.....	28
2.2 HYDROLOGIE DES BASSINS AMONTS DU NIGER ET DU BANI	29
2.2.1 LE FLEUVE NIGER A KOULIKORO.....	29
2.2.2. LE BANI A DOUNA.....	30
2.2.3. HYDROGRAMMES CARACTERISTIQUES DU NIGER ET DU BANI.....	32

3 LE BASSIN DU DELTA INTERIEUR

3.1 CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES SPECIFIQUES DU DELTA	33
3.1.1 PRESENTATION SOMMAIRE DU MILIEU ET DES POPULATIONS.....	33
3.1.2 MORPHOLOGIE.....	34
3.1.3 LE MILIEU VEGETAL AQUATIQUE.....	35
3.1.3.1 Zones non inondées.....	35
3.1.3.2 Zones régulièrement inondées.....	35
3.2 PRESENTATION DES SYSTEMES HYDRIQUES	36
3.2.1 ORIGINE DE LA CUVETTE.....	36
3.2.2 HYDROGRAPHIE.....	38
3.2.3 LIMITES ET MODALITES DE L'INONDATION.....	40
3.2.4 RELATIONS AVEC L'AQUIFERE.....	41
3.3 HYDROLOGIE DE KE-MACINA A DIRE	42
3.3.1 LE DELTA VIF.....	42
3.3.1.1 Ke-Macina.....	42
3.3.1.2 Kara.....	43
3.3.1.3 Nantaka-Mopti.....	44
3.3.2 LE DELTA AVAL.....	44
3.3.2.1 Akka.....	44
3.3.2.2 Autres défluent du lac Debo.....	45
3.3.2.3 Dire.....	45
3.3.3 EVOLUTION DES PENTES HYDRAULIQUES.....	45
3.3.4 PROPAGATION DE L'ONDE DE CRUE.....	46
3.4 MODELISATION DES SURFACES INONDEES	47
3.4.1 PRINCIPE DU MODELE.....	47
3.4.2 RESULTATS.....	48

4 LE CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE ACTUEL

4.1 EVOLUTION RECENTE DES PRECIPITATIONS.....	51
4.2 CONSEQUENCES SUR LES ECOULEMENTS.....	52
4.2.1 EN AFRIQUE DE L'OUEST.....	52
4.2.2 SUR LE BASSIN AMONT DU NIGER.....	53
4.2.3 L'HYPERTARISSEMENT	53

PRELEVEMENTS ET ANALYSES

INTRODUCTION	55
---------------------------	-----------

5 MISE EN PLACE DU RESEAU D'OBSERVATION

5.1 CHOIX DES SITES D'OBSERVATION.....	56
5.1.1 LES STATIONS HYDROLOGIQUES.....	56
5.1.2 LES SITES DE PRELEVEMENTS DE POUSSIERES	58
5.1.3 CAMPAGNES PONCTUELLES.....	59
5.1.3.1 Stations amont.....	59
5.1.3.2 Stations aval	59
5.2 PRELEVEMENTS	60
5.2.1 FREQUENCE DES PRELEVEMENTS.....	60
5.2.2 TYPES DE PRELEVEMENT	60
5.2.3 PRELEVEMENTS POUR LA CHIMIE, ISOTOPES, COD ET COP	61
5.2.4 PRELEVEMENTS POUR L'ANALYSE DES MATIERES EN SUSPENSION.....	61
5.2.5 POUSSIERES ATMOSPHERIQUES.....	63
5.2.6 METHANE.....	63

6 METHODES D'ANALYSE

6.1 PREPARATION ET STOCKAGE DES ECHANTILLONS.....	65
6.2 ANALYSES CHIMIQUES	65
6.3 ANALYSES ISOTOPIQUES.....	66
6.4 ANALYSE DU CARBONE ORGANIQUE ET COMPOSES PHENOLIQUES	66
6.5 ANALYSE DES MATIERES EN SUSPENSION.....	67

6.6 ANALYSE DE METHANE.....	67
7 CRITIQUE DES METHODES	
7.1 ANALYSES CHIMIQUES	69
7.1.1 LES EFFETS DU STOCKAGE.....	69
7.1.2 CRITIQUE DES RESULTATS ANALYTIQUES.....	72
7.2 LES DEBITS SOLIDES.....	74
7.3 LES POUSSIERS ATMOSPHERIQUES.....	75
7.3.1 APPAREIL.....	75
7.3.2 CHOIX DES SITES	76
7.3.3 FREQUENCE DE MESURE.....	76
7.4 METHANE.....	77
7.4.1 APPAREIL.....	77
7.4.2 CHOIX DES SITES	78
7.4.3 FREQUENCE.....	78

LES FLUX A TRAVERS LA CUVETTE LACUSTRE DE KE-MACINA ET DOUNA A DIRE DURANT LES ANNEES 90-94
--

8 LES FLUX HYDRIQUES

8.1 LES PRECIPITATIONS.....	80
8.1.1. APPORTS PLUVIOMETRIQUES DANS LE DELTA	80
8.1.2. EVOLUTION DES TENEURS ISOTOPIQUES DES PLUIES DE BAMAKO.....	82
8.1.2.1. Présentation des pluies retenues pour l'analyse des isotopes stables.....	82
8.1.2.2. Evolution saisonnières de ^{18}O	83
8.1.2.3. Relation $\delta^{18}\text{O}$ /température de l'air.....	83
8.1.2.4. Relation $\delta^{18}\text{O}$ /humidité de l'air.....	85
8.1.2.5. Relation $\delta^{18}\text{O}$ /hauteur des précipitations.....	86
8.1.3. RELATION $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^2\text{H}$ ENTRE LES EVENEMENTS PLUVIEUX	87
8.1.4. ETUDE COMPAREE DES MOYENNES PONDEREES	88
8.1.5. ORIGINE DES PRECIPITATIONS.....	90
8.2 L'ECOULEMENT DE SURFACE.....	93
8.2.1. MODULES ET HAUTEURS SUR LE BASSIN AMONT.....	93
8.2.2. LES ECOULEMENTS DANS LA CUVETTE LACUSTRE.....	93

8.2.3. EVOLUTION DU $\delta^{18}\text{O}$ AU COURS DE LA CRUE	95
8.2.4. RELATION $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$	99
8.2.5. RELATION AVEC LES NAPPES PHREATIQUES	100
8.2.6. FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE SUR LES STATIONS AMONT	101
8.2.7. EVOLUTION SPATIALE A TRAVERS LE DELTA DURANT L'ETIAGE ET LA CRUE.....	102
8.3. AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES	105
8.3.1. TEMPERATURE ET HUMIDITE.....	105
8.3.2. EVAPORATION.....	107
8.3.3. APPLICATION DU MODELE D'ESTIMATION DES SURFACES INONDEES.....	109
8.4. SYNTHÈSE DES CONDITIONS HYDROCLIMATIQUES DANS LE DELTA CENTRAL.....	111

9 LES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION

9.1. EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS DE MES.....	114
9.1.1. CONCENTRATIONS MOYENNES, MAXIMALES ET MINIMALES.....	114
9.1.2. RELATION DEBIT/CONCENTRATIONS A L'ECHELLE MENSUELLE.....	119
9.1.3. EVOLUTION SPATIALE ENTRE KE-MACINA ET DIRE.....	119
9.2. CARACTERISTIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION	123
9.2.1. GRANULOMETRIE.....	123
9.2.2. COMPOSITION MINERALOGIQUE DETERMINEE PAR DIFFRACTOMETRIE AUX RAYONS X.....	126
9.3. BILAN MENSUEL DU TRANSPORT DE MES.....	129
9.3.1. VARIATIONS SAISONNIERES DES FLUX PARTICULAIRES DE 1990 A 1994....	131
9.3.2. EVOLUTION MENSUELLE DU TRANSPORT DE MATIERES EN SUSPENSION ...	131
9.3.2.1. Transport mensuel à chaque station du delta.....	131
9.3.2.2. Etude du transport mensuel cumulé durant l'année 1992-1993.....	132
9.3.2.3. Evolution du transport de matière en fonction des volumes d'eau écoulés.....	135
9.3.2.4. Bilan mensuel de MeS dans la cuvette lacustre.....	135
9.3.2.5. Estimation des apports atmosphériques	139
9.4. BILAN ANNUEL DU TRANSPORT DE MES.....	141
9.5. ESTIMATION DE L'EROSION ANNUELLE.....	144
9.5.1. MESURES SUR LE NIGER A BANANKORO	144

9.5.2. MESURES SUR LE BANI A DOUNA.....	145
9.6. CONCLUSIONS.....	148

10 LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES

10.1. HYDROCHIMIE DES EAUX DE PLUIE A BAMAKO.....	150
10.1.1. COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES EAUX DE PLUIES.....	150
10.1.2. EVOLUTION ANNUELLE DE LA COMPOSITION MOYENNE DES EAUX DE PLUIES.....	153
10.1.3. CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS DISSOUS.....	156
10.1.4. INFLUENCE DES POUSSIERES ATMOSPHERIQUES SUR LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE PLUIES.....	160
10.1.5. LES PLUIES SUR LE DELTA CENTRAL.....	161
10.2. HYDROCHIMIE DES EAUX DU FLEUVE A TRAVERS LE DELTA	163
10.2.1. PRESENTATION GENERALE DE LA QUALITE DES EAUX.....	163
10.2.1.1. Composition chimique moyenne des eaux du Niger	163
10.2.1.2. Etat d'équilibre des eaux du delta.....	165
10.2.2. COMPORTEMENT DES ELEMENTS CHIMIQUES AU COURS DE L'ANNEE.....	168
10.2.2.1. Evolution annuelle des conductivités et du pH.....	168
10.2.2.2. Variations des concentrations de juillet 1990 à décembre 1991	168
10.2.2.3. Relation TDS/isotopes stables	171
10.2.2.4. Relation entre la charge chimique totale dissoute et les débits	172
10.2.2.5. Analyse en composante principale	177
10.2.3. EVOLUTION SPATIALE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES EAUX	179
10.2.3.1. Comparaison de la composition chimique du Niger, du Bani et des eaux du delta.....	179
10.2.3.2. Analyse statistique de données multitableaux	184
10.3. BILAN MENSUEL DU TRANSPORT D'ELEMENTS DISSOUS.....	192
10.3.1. TRANSPORT SAISONNIER D'ELEMENTS DISSOUS DE 1990 A 1994.....	192
10.3.2. BILAN MENSUEL DU TRANSPORT DISSOU TOTAL.....	194
10.3.2.1. Evolution annuelle du flux mensuel du TDS en fonction des volumes écoulés.....	194
10.3.2.2. Bilan mensuel de TDS pour le Niger amont et le delta.....	196
10.3.3. BILAN DES APPORTS ATMOSPHERIQUES.....	199
10.3.4. FLUX MENSUEL DE CATIONS, BICARBONATES ET SILICE EN 1992-1993	200

10.4. BILAN ET FLUX ANNUELS AU TRAVERS DE LA CUVETTE LACUSTRE	204
10.4.1. BILAN ET TRANSPORT ANNUEL DE MATIERE DISSOUTE	204
10.4.1.1. Bilan annuel de TDS dans le delta central.....	204
10.4.1.2. Le transport spécifique d'éléments dissous par le Niger et le Bani.....	206
10.4.2. BILAN ET FLUX DES CATIONS, DU BICARBONATE ET DE LA SILICE	206
10.5. FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU DELTA	213

11 LES FLUX DE DIFFERENTES FORMES NON-MINERALES DU CARBONE

11.1 LE CARBONE ORGANIQUE	216
11.1.1 LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE	217
11.1.1.1 Concentration de COP dans le delta au début et au maximum de la crue.....	217
11.1.1.2 Relation entre COP et les particules en suspension.....	218
11.1.1.3 Evolution spatiale du COP.....	220
11.1.1.4 Extrapolation au calcul du flux annuel	222
11.1.2 LES POLYSACCHARIDES ET LES COMPOSES PHENOLIQUES DES PARTICULES EN SUSPENSION	223
11.1.2.1 Les polysaccharides.....	223
11.1.2.2 Les composés phénoliques	224
11.1.3 LE CARBONE ORGANIQUE DISSOUS.....	226
11.1.3.1 Evolution spatiale des concentrations en basses eaux et hautes eaux.....	226
11.1.3.2 Transport spécifique et bilan annuel.....	228
11.2 LE METHANE	229
11.2.1 LE ROLE DES REGIONS HUMIDES SUR LE CLIMAT MONDIAL.....	229
11.2.2 LE CYCLE DU METHANE.....	230
11.2.2.1 Formation du méthane dans les sédiments.....	230
11.2.2.2 Transfert du méthane vers l'atmosphère.....	230
11.2.2.3 Comportement du méthane dans la stratosphère.....	232
11.2.3 VARIATIONS SAISONNIERES DES CONCENTRATIONS DE METHANE AU-DESSUS DES ZONES INONDEES	233
11.2.4 COMPORTEMENT DU MILIEU	238
11.2.5 ACTION DU MILIEU SUR LES DEGAGEMENTS DE METHANE	240
11.2.6 EVALUATION DES FLUX DE METHANE.....	240

CONCLUSIONS

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

TABLEAUX

1.5.4: Quelques paramètres climatiques du bassin du Niger	26
2.2.1: Analyse fréquentielle des modules ($m^3 s^{-1}$) à Koulikoro sur la période 1907-1990 (Olivry et al, 1994a)	29
2.2.2: Analyses fréquentielles des maximum de crue à Koulikoro ($m^3 s^{-1}$)	30
2.2.3: Analyse fréquentielle des modules et maximum ($m^3 s^{-1}$) à Douna de 1951 à 1990 (Olivry et al, 1994a)	30
3.3.1: Dates moyennes, les plus précoces et les plus tardives des maximum de crue des stations du delta	43
3.3.2: Modules interannuels et part relative des mois de crue par rapport à l'écoulement annuel pour les stations du delta	43
3.3.3: Evolution de la pente hydraulique en octobre 1990	45
3.3.4: Estimation du temps moyen du décalage de la crue et de la vitesse apparente moyenne de la crue pour la période 1953-1991	46
3.4.1: Résultats du calcul des surfaces maximales inondées, des surfaces minimales mises en eau pendant une durée de quatre mois en fonction des entrées (Ke-Macina+Douna), des pertes et en relation avec les hauteurs maximales observées à Mopti	50
5.1.1: Estimation des distances partielles pour les stations d'observation	58
7.1.1: Evolution de la composition chimique des eaux de Dire avant et après un an de stockage non filtré	69
7.1.2: Modification de la composition chimique d'une eau prélevé à Kotaka le 5/7/93 et filtrée	70
7.1.3: Variation de la composition chimique de deux eaux prélevées à Douna le 9 et le 16/10/91, filtrées rapidement et analysées avec trois mois d'intervalle	71
7.1.4: Récapitulatif des erreurs relatives regroupées en trois classes (0-5%, 5-10% et >10%), selon la concentration des eaux et le déséquilibre ionique	73
8.1.1: Estimation la zone d'influence de chaque station météorologique selon la méthode de Thiessen	80
8.1.2: Hauteur moyenne des précipitations sur le delta central	80
8.2.1: Composition isotopiques des eaux du Niger et Bani en 1990-1991	96
8.2.2: Composition isotopiques des eaux souterraines de la région de Douna-San (d'après Aranyossy, 1990)	100
8.2.3: Composition isotopique des eaux du delta en période de crue et d'étiage	102
8.3.1: Valeurs mensuelles des moyennes et extréma d'humidité relative (%), de température de l'air ($^{\circ}C$) et de vitesse des vents ($m s^{-1}$) en 1994	105
8.3.2: Valeurs de l'ETP moyenne sur le delta	108
8.3.3: Calcul des entrées et pertes en eaux et estimation des surfaces maximales inondées du delta central de 1990 à 1994	109
9.1.1: Concentrations moyennes, minimales et maximales, écart-type et coefficients de variation (CV) pour les matières en suspension des stations du delta	115
9.1.2: Décalage entre le début, le maximum de la crue et le maximum de concentration de MeS	122
9.2.1: Analyse granulométrique des matières en suspensions, (médiane et fraction sableuse) et teneurs relatives en matières organiques	124
9.2.2: Composition minéralogique semi-quantitative établie à partir des spectres de diffractométrie	127
9.3.1: Distance et décalage entre les stations de prélèvement	129
9.3.2: Transport moyen mensuel (10^6 tonnes) pour les années 1990-1994 dans le delta	133
9.4.1: Bilan annuel du transport de MeS et concentrations moyennes calculées à partir du bilan pour les années hydrologiques 1992-1993 et 1993-1994	141
9.5.1: Estimation des apports du bassin versant et du lit du fleuve Niger à Banankoro en 1992-1993	145
9.5.2: Estimation des apports du bassin versant et du lit du fleuve Bani à Douna en 1992-1993	147
10.1.1: Composition chimique moyenne (en $mg l^{-1}$) des eaux de pluie de Bamako en 1993	150
10.1.2: Moyennes mensuelles et annuelle pondérées par les hauteurs d'eau pour les pluies 1993 de Bamako et part relative de chacun des éléments (%)	154
10.1.3: Evolution mensuelle des rapports ioniques X_i/Cl pour les eaux de pluie de Bamako	157
10.1.4: Comparaison de la composition chimique d'une eau avant et après le mélange avec des poussières atmosphériques recueillies à Bamako en octobre 1993	160
10.1.5: Composition chimique moyenne des eaux de pluies recueillies dans le delta en 1993	161
10.1.6: Part relative de chacun des éléments dans les eaux de pluies du delta	162
10.1.7: Evolution mensuelle des rapports ioniques X_i/Na^+ pour les eaux de pluie du delta	162
10.2.1: Moyenne ($mg l^{-1}$), écart-type et coefficient de variation des éléments majeurs, H'	

et conductivité ($\mu\text{S cm}^{-1}$) sur toutes les stations depuis 1990 (n=523).....	163
10.2.2: Concentrations moy.annuelles de quelques grands fleuves.....	165
10.2.3: Etat de saturation de l'eau vis à vis des différentes formes solides de la silice.....	167
10.2.4: Matrice des corrélations établie pour 10 variables physico-chimiques.....	177
10.2.5: Composition chimique moyenne des eaux de Banankoro et du delta de 1990 à 1993 et part relative de chacun des éléments principaux par rapport au total dissous.....	179
10.2.6: Données physico-chimiques utilisées pour l'analyse statistique.....	185
10.3.1: Bilan mensuel sur l'année 1992-1993 du total dissous pour les stations du Niger, Bani et delta.....	194
10.3.2: Bilan des apports atmosphériques mensuels sur le delta.....	200
10.4.1: Bilan du transport annuel (10^3 tonnes) pour l'année 1992-1993 et 1993-1994 pour le delta aval et le delta amont.....	207
10.4.2: Bilan du transport annuel, des pertes dans le delta et de la concentration moyenne en différents éléments dissous pour le delta aval et le delta amont.....	208
11.1.1: Résultats des analyses de COP exprimés en % et en mg C l^{-1}	217
11.1.2: Valeurs ponctuelles de COD au travers du delta central.....	226
11.2.1: Analyse des concentrations de méthane dans l'air sur le delta.....	235
11.2.2: Inventaire de la production mondiale de méthane de quelques milieux naturels.....	241

FIGURES

1.1.1: Situation géographique du Mali.....	10
1.1.2: Carte géographique du Mali.....	10
1.2.1: Carte schématique des formations géologiques du Mali (d'après Atlas, Jeune Afrique, 1981).....	13
1.2.2: Coupe géologique de la région de l'Azaouad (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).....	15
1.3.1: Carte des secteurs hydrogéologiques du Mali (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).....	17
1.3.2: Coupe géologique schématique dans l'aquifère du Continental Terminal dans le delta intérieur (d'après synthèse hydrogéologique du Mali, 1990).....	19
1.4.1: Carte des formations végétales (d'après « Atlas du Mali, 1981).....	21
1.5.1: Elements fondamentaux de la circulation atmosphérique (Fontaine, 1991).....	24
1.5.2: Evolution saisonnière du FIT (d'après Atlas, Jeune Afrique, 1981).....	24
2.1.1: Le bassin du fleuve Niger.....	28
2.2.1: Evolution des modules et moyenne mobile sur 5 ans à Koulikoro de 1907 à 1993.....	31
2.2.2: Evolution des modules et moyenne mobile sur 5 ans à Douna de 1951 à 1993.....	31
2.2.3: Hydrogrammes de crue (1989-1990) pour le Niger à Banankoro et le Bani à Douna.....	32
3.1.1: Carte schématique du delta central du fleuve Niger.....	33
3.2.1: Schéma des lacs holocènes au Sahara malien (Petit-Maire et al, 1987).....	37
3.2.2: Carte synthétique de l'hydrographie du delta central (échelle env. 1/2200000).....	39
3.2.3: Schéma du circuit d'alimentation des lacs de rive droite (d'après Brunet-Moret et al, 1986).....	40
3.3.1: Chronique des modules de 1924 à 1992 pour les stations du delta.....	43
3.3.2: Evolution de la pente hydraulique du Bani en mars et octobre 1990.....	46
3.3.3: Evolution de la pente hydraulique du Niger en mars et octobre 1990.....	46
3.4.1: Hydrogramme des débits mensuels des entrées (Ke-Macina+Douna) et des sorties (Dire) en 1992-93.....	49
3.4.2: Courbe des pertes mensuelles cumulées en 1992-93.....	49
3.4.3: Exemple d'application du modèle, année 1992-93.....	49
4.1.1: Isohyètes interannuelles moyennes, avant 70 et après 70 au Mali.....	52
4.2.1: Coefficients de tarissement à Koulikoro, Douna et Banankoro de 1909 à 1990.....	53
5.1.1: Carte de positionnement des stations de prélèvements hebdomadaires.....	57
5.2.1: Schéma de l'installation pour la mesure des débits solides.....	64
5.2.2: Schéma du capteur de poussières atmosphériques.....	64

5.2.3: Schéma de la chambre statique pour la mesure du CH ₄	64
7.1.1: Evolution de la chimie selon le temps d'attente avant filtration	70
7.1.2: Erreur de mesure selon Schoeller pour toutes les analyses chimiques.....	73
8.1.1: Chronique des précipitations de 1926 à 1993 à Bamako.....	81
8.1.2: Précipitations mensuelles sur les stations de Mopti et Tombouctou.....	81
8.1.3: Répartition des valeurs de δ ¹⁸ O	84
8.1.4: Evolution saisonnière des teneurs en O-18 des pluies à Bamako.....	84
8.1.5: Relation δ ¹⁸ O/T de l'air.....	84
8.1.6: Relation δ ¹⁸ O/Hr.....	84
8.1.7: δ ¹⁸ O en fonction des hauteurs de pluie en 1991.....	86
8.1.8: δ ¹⁸ O en fonction des hauteurs de pluie en 1992	86
8.1.9: δ ¹⁸ O en fonction des hauteurs de pluie en 1993.....	86
8.1.10: Relation δ ¹⁸ O/δ ² H pour les pluies 1991	89
8.1.11: Relation δ ¹⁸ O/δ ² H pour les pluies 1992.....	89
8.1.12: Relation δ ¹⁸ O/δ ² H pour les pluies 1993.....	89
8.1.13: Valeurs moyennes mensuelles et annuelles sur plusieurs années à Bamako	92
8.1.14: Composition isotopique d'août sur plusieurs stations de l'Afrique de l'Ouest.....	92
8.1.15: Teneurs en ¹⁸ O en fonction de la latitude.....	92
8.1.16: Teneurs en ¹⁸ O en fonction de la longitude.....	92
8.2.1: Etude statistique des débits maximum à Koulikoro de 1907 à 1993.....	94
8.2.2a: Débits journaliers à Ke-Macina, Douna, Akka et Dire en 1992-93.....	94
8.2.2b: Variations interannuelles des débits mensuels de 1990 à 1994.....	94
8.2.3: Evolution de l'O-18 à Banankoro au cours de la crue 1990-1991.....	98
8.2.4: Evolution de l'O-18 à Douna au cours de la crue 1990-1991.....	98
8.2.5: Relation O-18/H-2 à Banankoro au cours de la crue 1990-91.....	98
8.2.6: Relation O-18/H-2 à Douna au cours de la crue 1990-91.....	98
8.2.7: Etude isotopique des aquifères de la région de San, du Bani et des pluies régionales.....	101
8.2.8: Teneurs en O-18 le long du Niger et du Bani en fin de saison sèche.....	103
8.2.9: Teneurs en O-18 des eaux du fleuve Niger et de ces affluents durant la crue.....	103
8.2.10: Relation O-18/H-2 à l'étiage et en crue sur le delta.....	103
8.3.1: Valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air sous abri à Segou, Mopti et Tombouctou	106
8.3.2: Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative à Segou, Mopti et Tombouctou	106
8.3.3: Variations de l'ETP sur les stations de Mopti et Tombouctou de 1990 à 1993	109
9.1.1: Evolution annuelle des concentrations ponctuelles de matières en suspensions.....	116
9.1.2: Relation entre la vitesse de l'eau et les concentrations de MeS pour les jaugeages réalisés de Nantaka à Dire du 7/93 au 11/93.....	115
9.1.3: Evolution des concentrations moyennes mensuelles en fonction du débit 1992.....	120
9.1.4: Evolution spatiale des concentrations de MeS mesurées lors des campagnes en 1993.....	121
9.2.1: Distribution de la taille des particules à Dire en août 1992.....	126
9.3.1: Débit solide et débit liquide pour toutes les stations du delta	130
9.3.2: Transport mensuel cumulé de matières en suspension en 1992-1993	134
9.3.3: Relation entre le flux mensuel de matières et les volumes d'eau écoulés en 1992-1993	134
9.3.4: Bilan mensuel du transport particulaire sur le delta en 1992-1993 et 1993-94.....	136
9.3.5: Croquis de la séparation du Diaka et du Niger (d'après Galiais, 1967).....	137
9.3.6: Valeurs hebdomadaires des concentrations de poussières et valeur moyenne pour les trois pièges installés au Mali en 1992.....	139
9.4.1: Bilan annuel du transport de matières en suspension sur le delta en 1992-1993.....	142
9.4.2: Bilan annuel du transport de MeS	143
9.5.1: Etude de l'O-18 et MeS à Banankoro au cours de la crue 1990-91.....	146
9.5.2: Relation entre le volume d'eau et le transport mensuel de MeS durant les hautes eaux et les basses eaux à Banakoro en 1992.....	146

9.5.3: Etude de l'O-18 et MeS à Douna au cours de la crue 1990-91	146
9.5.4: Relation entre le volume d'eau et le transport mensuel de MeS durant les hautes eaux et les basses eaux à Douna en 1992	146
10.1.1: Relation conductivité/TDS pour les eaux de Bamako	151
10.1.2: Relation hauteur des précipitations/total dissous	153
10.1.3: Evolution au cours de l'année de la composition chimique des pluies	155
10.1.4: Relation entre différents éléments chimiques des eaux de pluies 1993 à Bamako	158
10.1.5: Relation $\delta^{18}\text{O}/\text{Cl}^-$ à Bamako	159
10.1.6: Relation d/Cl^- pluies de Bamako	159
10.2.0: Composition chimique moyenne des eaux du delta	164
10.2.1: Diagrammes d'équilibre	167
10.2.2: Relation conductivité/concentrations des éléments dissous	168
10.2.3: Evolution des éléments dissous majeurs en 1991 sur quelques stations du delta	170
10.2.4: Evolution annuelle des rapports entre éléments majeurs	171
10.2.5: Relation TDS/ $\delta^{18}\text{O}$ à Banankoro	172
10.2.6: Relation TDS/ $\delta^{18}\text{O}$ à Douna	172
10.2.7: Relation entre la charge totale dissoute et le débit sur chaque station du delta	173
10.2.8: Relation entre les cations, le bicarbonate et la silice en fonction du débit en 1990-91	175
10.2.9: Cercle des corrélations pour les variables selon le plan F1*F2	177
10.2.10: Evolution du pH en fonction des MeS sur le delta de 1990 à 1993	178
10.2.11: Comparaison de la part relative (%) des principaux éléments dissous et du pH en amont et en aval du Niger et sur le Bani	179
10.2.12: Evolution spatiale des conductivités mesurées lors des campagnes	181
10.2.13: Evolution spatiale du pH mesuré lors des campagnes	181
10.2.14: Evolution spatiale des températures mesurées lors des campagnes	181
10.2.15: Evolution spatiale des cations, bicarbonate et silice mesurés lors des campagnes	183
10.2.16: Evolution des paramètres physico-chimiques (pH, éléments dissous (mg l^{-1}) et débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), en période d'étiage, montée des eaux, maximum de crue et décrue sur 10 stations	186
10.2.17: Cercle des corrélations des quatre périodes selon les facteurs 1 et 2 de l'ACP	185
10.2.18: Représentation de chaque variable physico-chimique de l'ACP	188
10.2.19: Représentation de l'espace des unités statistiques pour l'ACP selon les facteurs F1 et F2	190
10.2.20: Représentation simultanée du cercle de corrélation des variables et de l'espace des unités statistiques	190
10.3.1: Evolution annuelle du transport de TDS et du débit de 1990 à 1993	193
10.3.2: Transport mensuel cumulé de matières dissoutes en 1992-93	195
10.3.3: Relation entre le flux mensuel de matières et le volume d'eau écoulé en 1992-93	195
10.3.4: Gains (%) de matières dissoutes enregistrés à Ke-Macina en 1992-93 et évolution du volume d'eau de la retenue de Selingue	198
10.3.5: Bilan de transport entre Ke-Macina et Kara+Tilembeya	198
10.3.6: Bilan du transport entre Tilembeya+Douna et Nantaka	198
10.3.7: Bilan mensuel du transport d'éléments dissous entre les entrées et les sorties du lac Debo	198
10.3.8: Bilan mensuel du transport entre les sorties du lac Debo et Dire	198
10.3.9: Bilan mensuel des éléments dissous principaux en 1992-1993 de Ke-Macina+Douna aux sorties du lac Debo et des sorties du lac à Dire	202
10.4.1: Bilan annuel du transport d'éléments dissous principaux pour les années 1992-1993 et 1993-1994	204
10.4.2: Carte des conductivités moyennes des aquifères dans le sud du Mali (d'après synthèse hydrogéologique, 1990)	205
10.4.3: Bilan des entrées-sorties pour le delta amont et le delta aval en 1992-1993	207
11.1.1: Schéma du cycle du carbone organique	216
11.1.2: Relation COP (%) / TS (mg l^{-1})	221
11.1.3: Relation COP (mg C l^{-1}) / TS (mg l^{-1})	221
11.1.4: Distribution de la taille des particules à Dire	221
11.1.5: Evolution du COP à travers le delta en juillet	221

11.1.6: Evolution du COP à travers le delta en novembre.....	221
11.1.7: Evolution comparée des concentrations de matières en suspension et COD en juillet.....	221
11.1.8: Evolution comparée des concentrations de MeS et COD en novembre.....	221
11.1.9: Concentrations de polysaccharides dans le fleuve Niger	223
11.1.10: Phénols totaux exprimés en fonction de la masse de l'échantillon.....	224
11.1.11: Phénols totaux exprimés en fonction de la teneur en carbone organique.....	224
11.1.12: Rapports entre les séries syringil (S), vanillin (V) et cinnamil (C)	225
11.1.13: Concentrations de COD dans le delta durant trois périodes, juillet, août, novembre	227
11.1.14: Relation entre COD et COP pour les prélèvements faits lors de trois campagnes à travers le delta	228
11.2.1: Sources et piégeage du méthane dans la colonne d'eau (d'après De Angelis et Scranton, 1993).....	231
11.2.2: Relation entre le flux de méthane de la plante, de son environnement et de quelques variables physiologiques (d'après Knapp et Yavitt, 1992).....	231
11.2.3: Evolution du méthane dans l'atmosphère et la stratosphère (d'après Cicerone et Oremland, 1988)	232
11.2.4: Variation saisonnière du taux de CH ₄ dans l'air	234
11.2.5: Variation du taux de CH ₄ au-dessus de plans d'eau occupés par différents types de végétation	234
11.2.6: Evolution des concentrations de CH ₄ dans l'air de Batamani à Niafunke.....	234
11.2.7: Etude des teneurs en méthane de l'air au-dessus des bourgoutières selon le type hydrologique	234
11.2.8: Suivi journalier des concentrations en méthane à Batamani.....	234
11.2.9: Etude du taux de méthane au-dessus des bourgoutières pour différents paramètres physico-chimiques	239

ANNEXES

annexe 1: débits moyens mensuels à Koulikoro

année	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov.	déce	janv	fevr	mars	avril	Qan	mm5
1907-08	35	264	823	1889	3744	3074	1984	920	318	152	70	37	1112	
1908-09	170	188	643	2290	4080	4030	1670	774	295	154	87	59	1207	
1909-10	49	884	1910	4850	6240	4480	2660	1130	502	182	82	54	1924	1411
1910-11	53	184	848	3022	4477	3659	1439	562	228	85	48	33	1224	1444
1911-12	29	279	1190	4050	6220	4070	1750	764	329	156	80	40	1586	1365
1912-13	29	80	925	2280	4520	4620	1680	649	331	145	50	26	1280	1162
1913-14	85	124	639	1290	3050	2300	1390	480	189	58	43	46	810	1189
1914-15	100	262	569	1210	3600	3140	1170	556	185	61	32	30	912	1142
1915-16	46	589	1600	2860	4790	3710	1490	628	311	158	66	39	1359	1182
1916-17	44	139	1420	3320	5040	4110	1240	448	217	113	72	23	1350	1327
1917-18	165	226	765	3550	5870	3710	1510	953	427	214	115	117	1477	1420
1918-19	59	895	1690	3740	4540	4100	1840	844	383	183	114	49	1538	1390
1919-20	69	589	1617	3218	4684	3738	1444	627	266	118	63	47	1375	1325
1920-21	43	366	1520	2610	4350	3120	1470	598	242	113	71	44	1213	1323
1921-22	91	101	689	2360	3980	2810	1240	554	205	100	47	33	1022	1318
1922-23	93	203	592	2260	4450	5660	2380	1120	433	177	84	129	1469	1477
1923-24	37	302	1370	2970	4980	4210	2420	1010	433	236	110	44	1513	1699
1924-25	84	217	1860	5020	7250	6970	2580	1070	511	247	128	68	2171	1825
1925-26	59	446	1600	4060	6770	8420	3890	1360	648	324	145	74	2320	1920
1926-27	91	546	2170	3730	5870	3990	1800	933	419	182	79	43	1654	2044
1927-28	125	273	1570	3160	5600	6190	4030	1330	585	260	115	60	1944	2016
1928-29	116	373	1290	5030	7580	5970	2910	1130	576	243	155	101	2133	1955
1929-30	85	773	2330	4180	6190	6290	2510	1020	487	265	147	81	2029	1952
1930-31	303	922	1810	4600	6080	5820	2620	1010	521	247	122	110	2018	1911
1931-32	158	927	1700	3090	5530	4670	1680	879	515	247	132	113	1638	1804
1932-33	89	535	1760	3190	6500	4710	2170	966	446	211	137	83	1736	1687
1933-34	52	488	2010	3900	6140	3450	1490	884	395	189	97	61	1598	1574
1934-35	41	136	950	3580	4990	4100	2040	791	345	184	76	55	1447	1583
1935-36	350	95	1130	3960	5160	4090	1480	605	256	124	75	45	1451	1488
1936-37	94	691	1390	2960	5450	5720	2090	1010	405	193	108	89	1685	1461
1937-38	55	200	859	2280	4700	3950	1820	652	277	127	82	58	1259	1440
1938-39	73	179	752	3060	5260	4730	2150	720	298	136	67	41	1462	1380
1939-40	48	250	666	2240	4530	4850	2010	843	353	157	82	46	1342	1291
1940-41	42	175	911	2630	3430	3560	1860	653	283	140	59	33	1151	1235
1941-42	119	211	953	2390	5320	3050	1490	708	308	148	65	47	1239	1176
1942-43	72	276	750	2220	4020	2140	1220	589	226	105	49	45	981	1105
1943-44	50	164	668	2130	4680	3920	1400	525	237	102	45	30	1166	1120
1944-45	35	108	458	1830	4360	2780	1340	516	195	90	41	23	987	1175
1945-46	78	115	430	2720	4500	4180	1630	585	218	98	43	44	1227	1228
1946-47	32	288	971	2979	4750	5197	2440	872	352	152	63	26	1514	1329
1947-48	52	160	903	2570	4940	4280	1240	467	179	83	49	33	1249	1406
1948-49	80	322	1650	3820	6060	4460	2070	760	346	187	104	94	1666	1463
1949-50	66	119	610	3290	6240	3430	1440	651	274	143	74	45	1375	1581
1950-51	202	126	736	2480	5130	5500	2360	771	354	199	135	81	1511	1655
1951-52	96	530	1580	3680	5300	5370	5380	1810	754	399	203	113	2107	1715
1952-53	93	182	1210	3160	5070	5470	2290	914	492	231	142	80	1614	1852
1953-54	200	564	2160	4370	6520	5100	2350	1080	600	307	187	179	1970	1952
1954-55	211	640	1940	4190	6090	5080	3210	1670	765	412	272	198	2060	1797
1955-56	121	669	2030	4000	6020	5880	2720	1250	638	356	227	167	2008	1890
1956-57	71	187	988	2240	4740	4500	1730	776	376	183	104	57	1332	1800
1957-58	261	321	1340	3770	6370	6800	3520	1260	622	357	161	138	2082	1692
1958-59	99	823	1490	2200	4440	4370	2230	1390	603	315	168	83	1518	1625

annexe 1: débits moyens mensuels à Koulikoro

1959-60	85	309	1400	2980	5680	4440	1860	769	352	179	88	61	1519	1610
1960-61	73	293	1430	3750	5910	4870	2220	858	356	171	91	37	1676	1575
1961-62	113	97	969	2960	5380	3310	1310	479	204	94	44	35	1255	1577
1962-63	131	205	1120	3310	7050	6020	2790	1200	486	258	171	69	1907	1602
1963-64	45	135	650	2460	4830	5910	2780	881	350	167	74	45	1530	1559
1964-65	87	413	1220	3690	5400	5070	1830	957	498	241	139	95	1641	1599
1965-66	76	327	1830	2740	4770	4570	1930	686	281	169	100	81	1461	1612
1966-67	106	187	596	2780	4590	5060	2440	881	375	186	111	57	1453	1592
1967-68	117	140	940	3320	5980	8000	3020	1090	518	273	162	105	1974	1686
1968-69	61	725	1160	3310	4450	3860	1820	908	402	190	115	85	1428	1623
1969-70	81	288	1840	3720	6910	5770	4360	1260	583	264	140	96	2115	1596
1970-71	53	178	519	2470	5240	2920	1200	611	232	111	59	37	1143	1423
1971-72	168	109	723	3440	5500	3590	1150	646	253	117	53	43	1321	1323
1972-73	18	665	1320	2420	3670	2740	1380	628	257	116	44	20	1107	1187
1973-74	26	143	341	2740	3630	2220	1230	396	177	71	33	27	927	1268
1974-75	94	71	1000	3330	5620	4610	1550	525	216	100	41	34	1437	1302
1975-76	64	223	1190	3190	5600	5230	1790	715	313	139	53	30	1547	1249
1976-77	38	261	794	2520	3400	4640	3940	1260	575	259	109	43	1492	1327
1977-78	114	166	589	1560	3280	2630	1040	367	160	79	40	46	842	1335
1978-79	60	437	1150	2520	4210	4230	1890	705	329	157	60	40	1318	1205
1979-80	25	349	1520	4250	5210	3420	1690	685	299	154	61	23	1478	1130
1980-81	131	118	331	1990	3820	2050	1260	583	215	85	31	21	893	1144
1981-82	148	241	926	2930	4340	2880	1100	394	168	94	70	82	1119	1049
1982-83	119	464	879	1966	3440	2040	1116	392	198	126	104	94	914	879
1983-84	155	336	927	1850	2920	2270	756	347	184	111	107	112	840	884
1984-85	116	275	594	1690	1650	1800	632	291	151	100	100	106	626	813
1985-86	143	163	482	2030	3920	2720	747	292	138	109	105	119	919	774
1986-87	191	192	388	1200	3120	2250	899	319	174	137	132	147	766	751
1987-88	111	263	440	1490	2130	2390	971	346	174	130	95	87	720	754
1988-89	187	140	529	1660	3100	1660	628	248	148	124	103	143	726	717
1989-90	152	141	329	1140	2300	2030	735	355	157	98	92	120	640	718
1990-91	113	273	642	1530	2470	2030	814	367	185	126	125	108	733	729
1991-92	141	218	643	1470	2510	2250	1020	384	187	137	131	139	770	
1992-93	173	266	755	1430	2850	2000	869	383	188	118	125	142	776	
1993-94	142	246	522	1550	2160	1990	1070							
moy.	100	319	1093	2872	4796	4103	1883	771	345	171	96	70	1396	
année	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov.	déce	janv	fevr	mars	avril	Qan	mm5

annexe 2: débits moyens mensuels de 1990 à 1994

DEBITS MOYENS MENSUELLES DE 1990 A 1994

STATION DE BANANKORO SUR LE NIGER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	25	59	378	1390	2130	1470	568	211	78	25	9	7	532
1991-92	8	68	415	1360	1970	1630	700	233	89	38	12	5	545
1992-93	7	107	543	1270	2130	1380	583	205	81	30	18	11	533
1993-94	16	71	298	1400	1820	1430	791	297					

STATION DE KOULIKORO SUR LE NIGER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	113	273	642	1530	2470	2030	814	367	185	126	125	108	733
1991-92	141	218	643	1470	2510	2250	1020	384	187	137	131	139	770
1992-93	173	266	755	1430	2850	2000	869	383	188	118	125	142	776
1993-94	142	246	522	1550	2160	1990	1070						

STATION DE KE-MACINA SUR LE NIGER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	25	104	457	1290	2200	1840	678	267	99	36	28	22	590
1991-92	15	80	391	1310	2250	2060	936	302	90	64	42	41	633
1992-93	35	89	520	1240	2580	1780	715	333	120	38	31	29	628
1993-94	44	62	317	1340	1920	1800	966	402	127	35	36	28	590

STATION DE KARA SUR LE DIAKA

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	0	4	74	348	664	566	171	43	4	0	0	0	157
1991-92	0	0	62	361	696	647	258	48	1	0	0	0	173
1992-93	0	2	90	327	787	563	189	48	8	0	0	0	168
1993-94	0	0	41.5	358	588	569	268	76					

STATION DE TILEMBEYA SUR LE NIGER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	26	144	413	964	1560	1510	665	296	141	48	41	34	489
1991-92	21	98	343	861	1680	1640	867	347	134	89	49	43	515
1992-93	52	98	438	932	1790	1540	696	373	156	67	34	46	520
1993-94	42	61											

STATION DE DOUNA SUR LE BANI

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	0	4	119	641	549	367	115	46	14	4	1	0.3	165
1991-92	0	41	59	539	874	497	225	75	36	16	4	0.3	197
1992-93	0	32	60	219	705	445	153	60	26	9	1.5	0	143
1993-94	0	0	91	218	694	409	141	57.4	27	9	1	0	137

annexe 2: débits moyens mensuels de 1990 à 1994

STATION DE NANTAKA SUR LE NIGER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	127	206	485	1540	2050	2050	991	488	181	103	77	67	701
1991-92	51	99	307	1150	1870	1840	1080	427	191	139	97	82	523
1992-93	78	109	366	872	1680	1760	817	392	291	190	166	163	551
1993-94	168	184	397	1110	1970	2010	1200	602					

STATION DE AKKA SUR L'ISSA BER

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	35	87	227	867	1310	1560	1300	752	289	123	68	50	558
1991-92	29	55	199	803	1380	1700	1590	1050	407	180	98	68	631
1992-93	70	77	247	751	1230	1640	1410	903	358	139	64	57	581
1993-94	66	76	190	611	1260	1554	1400	970	417	149	81	58	569

STATION DE AWOYE SUR LE BARA ISSA

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	0	0	5	102	169	212	146	70	21.8	0	0	0	61
1991-92	0	0	5	88	178	234	197	103	36	0	0	0	70
1992-93	0	0	15	82	152	222	162	86	30	0	0	0	63
1993-94	0	0	12	84			150	89	28	0	0	0	

STATION DE KORIENTZE SUR LE KOLI-KOLI

année	mai	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	module
1990-91	0	0	0	16	66	93	60	16	0	0	0	0	21
1991-92	0	0	0	14	81	121	94	41	3	0	0	0	30
1992-93	0	0	0	12	71	122	79	28	1	0	0	0	26
1993-94	0	0	0	2	67	109	76	32	1	0	0	0	24

STATION DE DIRE SUR LE NIGER

année	juin	juil.	août	sept.	octo.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avril	mai	module
1990-91	45	192	801	1250	1430	1290	842	391	159	77	45	30	548
1991-92	29	176	757	1300	1550	1550	1170	520	246	107	72	67	630
1992-93	55	213	748	1180	1520	1390	994	452	185	76	48	47	578
1993-94	65	154	575	1190	1450	1350	893	550	214	86	57	42	552

annexe 3: points kilométriques du Niger

STATION	PK	depuis Dire
Tossaye	2235	
Dire	2640.5	0
confluence	2660	
El Waladji	2655	
Haoussa	2655	
Bala Mounde	2671	30.5
Madina	2680.5	
Guindegata Nari	2684.5	
Tonka	2692.1	51.6
Tondifarma	2700	
Ama Koyra	2709	
Niafunke	2726.1	51.6
Sibo	2738	97.5
Waki	2747	106.5
Sebi	2768.5	128
Doua	2779	
Attara	2790	149.5
Aore	2808	167.5
Akka	2826.3	185.8
Debo	2850	209.5
Mbouna	2889.1	248.6
Kona	2905.6	265.1
Kotaka	2919.5	279
Chenal Batamani	2923	282.5
Batamani ville	2926.5	
Sense	2932	
Saya	2940	299.5
Diamina	2955	
Nantaka	2968	327.5
confluence	2971.3	
Mopti	2973	332.5

STATION	PK	depuis Dire
Sare Seni	2976	335.5
Kouakourou	3022.5	
Dogere Modi	3035	
Kolenze	3040	
Tilembeya	3083.5	443
Diafarabe	3086	
séparation Diaka	3089.1	448.6
Ke-Macina	3133.1	492.6
Koulikoro	3470	829.5
Sotuba	3495	
arrivée Sankarani	3587.2	946.7
Banankoro	3641.7	1001.2
Sofara	3045	
Beneni-Kegny	3165.5	
Douna	3292.4	

annexe 4: analyses isotopiques des pluies à Bamako

PLUIES A BAMAKO 1991			
date	hauteur	18 O	2 H
30-06	30.2	-3.7	-16.2
10-07	21.3	-4.8	-24.1
11-07	23.7	-7.6	-51.0
16-07	21.0	-4.4	-18.1
17-07	0.7	-4.2	-18.9
18-07	29.1	-8.6	-55.7
21-07	27.6	-4.7	-30.9
23-07	1.7	-3.3	-17.3
26-07	66.8	-8.1	-52.5
27-07	40.1	-10.4	-70.5
30-07	130.7	-7.6	-49.4
01-08	14.5	-8.2	-51.1
04-08	8.9	-3.7	-13.5
05-08	7.1	-3.2	
07-08	13.3	-3.4	-18.1
10-08	8.4	-5.3	-32.1
14-08	14.3	-8.7	-62.1
17-08	42.7	-10.6	-67.6
19-08	10.6	-7.7	-56.2
24-08	8.6	-10.2	-67.0
26-08	7.9	-4.7	
30-08	8.8	-8.5	-57.9
02-09	10.3	-9.8	-67.5
04-09	12.7	-7.5	-52.2
08-09	10.2	-7.6	-43.2
10-09	7.0	-3.3	
17-09	17.1	-3.7	-11.4
21-09	15.1	-3.4	-10.9
05-10	19.8	-5.5	-25.9
06-10	31.5	-6.1	-30.0
18-10	50.3	-2.7	-2.9

PLUIES A BAMAKO 1992			
date	hauteur	18 O	2 H
04-06	38.4	-2.6	-9.8
06-06	21.5	-1.9	-5.5
14-06	19.8	-0.6	2.9
20-06	23.8	-2.1	-2.4
24-06	18.0	-1.3	-1.2
27-06	18.3	-1.7	-3.3
28-06	22.5	-1.8	-16.3
30-06	20.0	-2.4	-7.5
07-07	16.8	-2.9	-17.2
10-07	8.0	-4.1	-17.0
12-07	13.5	-3.3	-12.7
18-07	29.0	-6.0	-42.4
23-07	27.0	-7.9	-55.0
25-07	11.0	-7.1	-44.3
26-07	12.2	-6.4	-42.7
27-07	19.0	-7.7	-59.1
27-07	11.1	-6.5	-41.7
31-07	30.2	-6.3	-50.0
02-08	35.2	-6.9	-50.5
03-08	37.1	-7.9	-54.0
16-08	37.0	-5.1	-33.6
23-08	25.9	-5.1	-30.7
01-09	26.7	-10.5	-79.8
04-09	12.1	-7.9	-51.3
07-09	76.8	-5.3	-32.6
10-09	21.5	-6.5	-42.1
13-09	9.8	-0.2	11.3
15-09	35.0	-1.3	-4.9
17-09	53.5	-5.3	-35.7
18-09	10.0	-6.0	-35.1
23-09	8.9	-2.6	-0.8

PLUIES A BAMAKO 1993			
date	hauteur	18 O	2 H
05-06	12.5	-3.0	-4.5
15-06	23.0	-1.8	2.3
22-06	9.1	-1.3	-3.3
24-06	19.6	-0.9	4.5
09-07	60.0	-4.8	-19.9
17-07	20.0	-4.7	-24.8
23-07	47.0	-3.3	-10.7
25-07	12.2	-6.1	-36.1
27-07	18.8	-4.9	-33.5
02-08	32.0	-7.7	-42.4
08-08	28.7	-3.8	-15.1
17-08	28.0	-8.9	-62.7
19-08	13.2	-8.7	-59.6
23-08	24.2	-6.4	-40.1
25-08	14.7	-8.1	-55.7
26-08	12.2	-8.4	-57.7
28-08	10.7	-4.6	-30.4
03-09	54.2	-10.0	-65.6
19-09	19.2	-2.7	-9.9
27-09	30.6	-3.8	-15.8

pluies ponderées par les hauteurs				
date	Hr [%]	T[°C]	O-18	H-2
jul-91	80	26.7	-7.2	-45.7
aoû-91	80	25.7	-8.2	-52.5
sep-91	81	27.1	-5.9	-33.0
oct-91	79	26.1	-4.3	-15.8
jun-92	76	28.3	-1.9	-6.0
jul-92	86	25.8	-6.1	-41.7
aoû-92	84	25.7	-6.3	-43.1
sep-92	85	25.2	-5.3	-33.4
jun-93	69	28.9	-2.1	-2.1
jul-93	80	26.8	-4.4	-21.4
aoû-93	85	26.0	-7.0	-44.1
sep-93	82	26.1	-6.8	-40.6

mai-74			2.3	25.3
jun-74			-1.2	-4.1
jul-74			-8.8	-65.2
aoû-74			-6.6	-39.5
sep-74			-3.0	-17.2
oct-74			-1.6	-7.3
mai-75			-0.9	4.0
jun-75			-6.2	-42.1
jul-75			-8.8	-58.6
aoû-75			-6.0	-36.9
sep-75			-1.6	-1.2
oct-75			1.6	17.4

PRINCIPE DU CALCUL DE L'ETP PAR PENMAN

$$ETP = \frac{\Delta}{L(\Delta + \gamma)} RN + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} Ea$$

Avec:

ETP: évapotranspiration potentielle [mm].

Δ : pente de la courbe de tension de vapeur saturante de l'air en fonction de la température de l'air.

γ : constante psychrométrique

L: chaleur latente de vaporisation

Rn: rayonnement net solaire

Ea: pouvoir évaporant de l'air [mm.j⁻¹]

La chaleur latente de vaporisation est l'énergie consommée par la vaporisation d'un gramme d'eau en fonction de la température t de l'air [°C].

$$L = 2499 - 2.142t \text{ [joules] } \textcircled{\text{D}}$$

γ est la constante psychrométrique. Sa valeur est donnée par la formule suivante:

$$\gamma = Cp \frac{P}{0.622L} [\text{mb} \cdot \text{°C}^{-1}] \textcircled{\text{D}}$$

Cp: chaleur spécifique prise égale à 0.24

P: pression atmosphérique [mb]

$$P = 1013 - 0.1055 \cdot \text{altitude [m]}$$

La tension de vapeur saturante augmente avec la température jusqu'à la température d'ébullition de l'eau où elle atteint la valeur de la pression atmosphérique. Δ correspond à la pente de/dt . Les relevés climatologiques donnent en général l'humidité relative de l'air HR définie comme le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau e à la pression maximale de vapeur d'eau à la température de l'air es .

$$HR = \frac{e}{es} \cdot 100 [\%]$$

La courbe de la tension de vapeur saturante (es) en fonction de la température de l'air est de la forme:

annexe 5: méthode de calcul de l'ETP

$$es=33.8639*(0.00738*t+0.8072)^8 -0.000019*(41.8*t+48)+0.001316 \textcircled{3}$$

Sa pente est donc:

$$A = 33.8639 * (0.05904 * (0.00738 * t + 0.8072)^7 - 0.0000342) \textcircled{4}$$

Le rayonnement net est le résultat du bilan radiatif de courte et de grande longueur d'onde. Le rayonnement global (RG) est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Ce rayonnement est en partie réfléchi en fonction de l'albédo de la surface du sol. Le rayonnement global peut se mesurer directement avec un pyranomètre ou par la relation:

$$RG = IGa * (a + b (h/H)) \textcircled{5}$$

Ou IGa est le rayonnement solaire à la limite supérieure de l'atmosphère. Cette donnée peut être déterminée si l'on connaît la date et la latitude du lieu.

a et b sont deux coefficient d'ajustement, différents selon les sources.

h et H sont la durée d'insolation du jour considéré et la durée astronomique du jour pour la date considérée et la latitude du lieu. Pour les régions tropicales, Glover et Mac Culloch proposent une formule faisant intervenir la latitude (lat):

$$RG = IGa * (0.29.\cos.lat + 0.52 (h/H))$$

Le rayonnement de grande longueur d'onde est le rayonnement du sol et de l'atmosphère, Ra et Rt.

$$Ra-Rt = -q * \sigma * T^4$$

T est la température [°K]

σ est la constante de Stephan Boltzmann [$1,19 \cdot 10^{-7} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$]

La formulation générale de q est:

$$q=(x-y.\sqrt{e})*(z+t(h/H))$$

Le pouvoir évaporant de l'air Ea suit la formule:

$$Ea= m(es-er)(1+n*V)$$

(es-er) est le déficit de saturation de l'air (différence entre la pression maximale de vapeur d'eau à la température de l'atmosphère et la pression réelle en millibars).

annexe 5: méthode de calcul de l'ETP

V est la vitesse du vent à 2 mètres [m.s⁻¹]; m et n sont des coefficients déterminés localement.

L'ETP peut se partager en une part radiative et une part convective, $ETP = f(RN) + f(Ea)$ et dont le développement aboutit à la formule:

$$ETP = \frac{\Delta}{L(\Delta + \gamma)} \left((1 - \text{albedo}) * IGa * \left(a + b * \left(\frac{h}{H} \right) \right) - \sigma * T^4 * (x - y * \sqrt{e}) * \left(z + t * \left(\frac{h}{H} \right) \right) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * m * (es - e) * (1 + n * V) \right)$$

Δ est donné par ④

γ est donné par ②

L est donné par ④

IGa est calculé en fonction de la date, de la latitude de la déclinaison solaire,..

H est la durée astronomique du jour [heures], fonction de la date et de la latitude

h est la durée d'insolation [heures]

a et b sont les coefficients de la relation ③

σ est la constante de Stephan Boltzmann [$1.19 \cdot 10^{-7}$ cal.cm².j⁻¹]

e est la tension de vapeur réelle

es est la pression de vapeur saturante, donnée par la relation ③

T est la température moyenne de l'air [°K]

V est la vitesse du vent mesurée à 2 mètres [m.s⁻¹]

annexe 6: concentration de MeS

ISSA BER A AKKA en 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	dec
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	10.6	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	7.8	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	187	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	5
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	410	?	?	1.6	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	9
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	?	?	?	?	?	?	?	298	?	7.8	1.6	8.2
Mini	?	?	?	?	?	?	?	187	?	7.8	1.6	5
Maxi	?	?	?	?	?	?	?	410	?	7.8	1.6	10.6

ISSA BER A AKKA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	Janv	fevr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	dec
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	8.2
3	25.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	58.8	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	51.1	?	?	?	?	?	?
7	?	59.4	64.3	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	15.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	14.2	?
11	?	?	?	48.4	?	?	81.4	?	?	?	7.7	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	122	?	?	?	?	?	?
14	?	48.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	49.2	?	?	?	?	?	?	11.3
17	23.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	44	?	?	?	?	?	?	5.4	?
19	?	?	?	?	?	?	100	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	61.8	?	?	?	?	?	?
21	?	?	58.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	15.1
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	72.4	?	?	?	?	?	?	1.4	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	51.5	?	?	?	?	?	?
28	?	?	55.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	1.2
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	32.9	54	59.6	55.9	49.2	71.8	90.7	?	?	?	4.8	8.9
Mini	15.7	48.6	55.5	44	49.2	51.5	81.4	?	?	?	1.4	1.2
Maxi	25.2	59.4	64.3	72.4	49.2	122	100	?	?	?	7.7	15.1

ISSA BER A AKKA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	fevr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	dec
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	81.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	69	?	?	?	?	?	?	?	?	6	?
4	?	?	?	?	53.1	?	?	101	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	21.6	?	?
6	9.3	?	?	83.1	?	?	92.9	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	66.4	?	?	11.7	?
8	?	?	?	?	?	60.2	?	?	?	?	?	?
9	?	?	84	?	?	?	?	?	?	?	10.6	?
10	?	86.2	?	?	?	?	?	61.5	?	?	?	?
11	?	?	?	?	41.5	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	12.1	?	?
13	3.7	?	?	61.3	?	?	83	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	42.6	?	?	?	10.2
15	?	?	?	?	?	85.9	?	?	?	?	?	?
16	?	?	63.7	?	?	?	?	?	?	5.4	10.5	?
17	?	78	?	?	?	?	?	85.8	?	?	?	?
18	?	?	?	?	125	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	38.9	?	?	63.8	?	?	86.8	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	31.6	?	?	14.1
22	?	?	?	?	?	62.3	?	?	?	?	?	?
23	?	?	48.1	?	?	?	?	?	?	?	6	?
24	?	77.7	?	?	?	?	?	42.6	?	?	?	?
25	?	?	?	?	58.6	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	19.8	?	?
27	72.5	?	?	67.3	?	?	98	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	27	?	?	34.2
29	?	?	?	?	?	115	?	?	?	?	?	?
30	?	?	67.7	?	?	?	?	?	?	?	8.5	?
31	?	?	?	?	?	?	?	68.2	?	?	?	?
Moy	31.1	80	69.1	68.9	69.5	75.2	90.2	71.9	41.9	14.7	8.3	17.6
Mini	1.2	69	48.4	61.3	41.5	52.5	83	42.6	27	5.4	6	10.2
Maxi	72.5	86.2	81.9	83.1	125	115	98	101	66.4	21.6	10.6	34.2

ISSA BER A AKKA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	Janv	fevr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	dec
1	?	62.9	63.6	?	?	?	?	?	?	?	25.7	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	99.4	?	?	?
3	?	?	?	?	91.9	?	?	?	?	?	?	?
4	33.7	?	?	?	?	?	?	?	?	30.2	?	?
5	?	?	?	62.1	?	?	53.2	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	56.7	?	?	9.5
7	?	?	?	?	?	117	?	?	?	?	?	?
8	?	57.4	84.4	?	?	?	?	?	?	?	13.1	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	83.1	?	?	?	?	?	?	?
11	34.4	?	?	?	?	?	?	?	?	32	?	?
12	?	?	?	50.6	?	?	95.6	?	?	?	?	?
13	3.7	?	?	?	?	?	?	?	47.3	?	?	17.2
14	?	?	?	?	?	113	?	?	?	?	?	?
15	?	93.4	92.7	?	?	?	?	?	?	?	4.4	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	17.2	?	?	?	?	?	?	?
18	48.4	?	?	?	?	?	?	?	?	22	?	?
19	?	?	?	37.4	?	?	91.1	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	51.9	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	61.3	?	?	?	?	?	?
22	?	90.9	84.8	?	?	?	?	?	?	?	11.2	?
23	?	?	?	?	?	?	?	167	?	?	?	?
24	?	?	?	?	41.2	?	?	?	?	?	?	?
25	38.6	?	?	?	?	?	?	?	?	20.3	?	?
26	?	?	?	110	?	?	77.2	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	128	?	?	34.8	?	?	18.9
29	?	?	53.8	?	?	?	?	?	?	?	11.7	?
30	?	?	?	?	?	?	?	105	?	?	?	?
31	?	?	?	?	38.9	?	?	?	?	?	?	?
Moy	38.8	76.2	75.9	64.9	54.5	105	79.3	124	47.7	26.1	13.2	15.2
Mini	33.7	57.4	53.8	37.4	17.2	61.3	53.2	99	34.8	20.3	4.4	9.5
Maxi	48.4	93.4	92.7	110	91.9	128	95.6	167	56.7	32	25.7	18.9

annexe 6: concentration de MeS

BARA ISSA A AWOYE en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	97.9	?	?	?	?	?	?	5.3
3	19.8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	70.8	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	383	?	?	?	?	?	?	5.5
10	29.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	98.3	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	72	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	433	?	?	?	?	?	?	8.5
17	31.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	72.5	?	?	?	?	?	?	4.8	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	87.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	3.7
24	24.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	278	?	?	?	?	?	?	8.8	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	98.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
31	25.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	26.3	?	86.1	130	305	?	?	?	?	?	6.8	5
Mini	19.8	?	72	70.8	97.9	?	?	?	?	?	4.8	2
Maxd	31.6	?	98.4	278	433	?	?	?	?	?	8.8	8.5

BARA ISSA A AWOYE en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	22	?	174	?	?	?	?	?	?	15.2
3	?	3.8	?	?	?	?	?	98.1	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	39	?	?
6	9.2	?	?	87.5	?	?	91.6	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	61.9	?	?	25.6
8	?	?	?	?	?	768	?	?	?	?	?	?
9	?	?	45.5	?	?	?	?	?	?	?	13	?
10	?	29.8	?	?	?	?	?	124	?	?	?	?
11	?	?	?	?	220	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	15	?	?
13	9.6	?	?	110	?	?	85.1	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	53.9	?	?	22.3
15	?	?	?	?	?	751	?	?	?	?	?	?
16	?	?	73.1	?	?	?	?	?	?	?	18.2	?
17	?	49.6	?	?	?	?	?	133	?	?	?	?
18	?	?	?	?	282	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	14.3	?	?
20	8.2	?	?	73.2	?	?	84.6	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	39.7	?	?	73.3
22	?	?	?	?	?	701	?	?	?	?	?	?
23	?	?	75.1	?	?	?	?	?	?	?	9.3	?
24	?	45.8	?	?	?	?	?	80.1	?	?	?	?
25	?	?	?	?	387	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	13.7	?	?
27	2.3	?	?	143	?	?	30.9	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	49.1	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	58.8	?	?	?	?	?	?	?	7.1	?
31	?	?	?	?	?	?	?	97.3	?	?	?	?
Moy	7.3	32.2	54.9	104	266	653	73.1	106	51.2	20.5	12.6	40.4
Mini	2.3	3.8	22	73.2	143	768	30.9	80.1	39.7	13.7	7.1	22.3
Maxd	9.6	49.6	75.1	143	387	394	91.6	133	61.9	39	18.2	73.3

BARA ISSA A AWOYE en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	113	78	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	105	?	?	?	?
3	?	?	?	?	241	?	?	?	?	?	?	?
4	40.3	?	?	?	?	?	?	?	46.5	?	?	?
5	?	?	?	94.2	?	?	815	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	83.7	?	?	16.4	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	54.4	76.9	?	?	?	?	?	?	?	27.4	?
9	?	?	?	?	?	?	143	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	295	?	?	?	?	?	?	?
11	55.5	?	?	?	?	?	?	?	?	31.4	?	?
12	?	?	?	104	?	?	76.8	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	85	?	?	28.8	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	76.5	84.1	?	?	?	?	?	?	?	16.7	?
16	?	?	?	?	?	?	?	175	?	?	?	?
17	?	?	?	?	304	?	?	?	?	?	?	?
18	218	?	?	?	?	?	?	?	30.2	?	?	?
19	?	?	?	174	?	?	115	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	58.7	?	?	13.2
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	45.9	90.3	?	?	?	?	?	?	?	30.5	?
23	?	?	?	?	?	?	145	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	320	?	?	?	?	?	?	?
25	66.4	?	?	?	?	?	?	?	?	26.5	?	?
26	?	?	?	154	?	?	86	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	94.6	?	?	12.5	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	113	?	?	?	?	?	?	?	15.2	?
30	?	?	?	?	?	?	122	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	230	?	?	?	?	?	?	?
Moy	95.1	72.5	88.4	131	278	?	273	138	80.6	33.7	22.5	17.7
Mini	40.3	45.9	76.9	94.2	230	?	86	105	58.7	26.5	15.2	12.5
Maxd	218	113	113	241	320	?	815	175	94.6	46.5	30.5	28.8

annexe 6: concentrations de MeS

NIGER A DIRE en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déc
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	5.4
3	?	?	53.3	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	65	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2.2
10	?	?	57.8	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	23.5	?
13	71	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	52.8	27.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4.4	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	44.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	67.6	43.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	8.6	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	95	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	20.8
31	?	?	40.1	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	68.9	60.2	49.5	?	?	?	?	?	?	?	12.2	9.5
Mini	44.5	52.8	27.5	?	?	?	?	?	?	?	4.4	2.2
Maxd	95	67.6	57.8	?	?	?	?	?	?	?	23.5	20.8

NIGER A DIRE en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déc
1	?	?	?	?	?	76.6	?	?	?	?	?	?
2	?	?	41.5	?	?	?	?	?	?	?	10.8	?
3	?	31.5	?	?	?	?	?	?	152	?	?	?
4	?	?	?	?	54.3	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	21.6	?	?
6	16.4	?	?	56.8	?	?	42.6	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	42	?	?	38.1
8	?	?	?	?	?	78.6	?	?	?	?	?	?
9	?	?	34.8	?	?	?	?	?	?	?	10.2	?
10	?	43.1	?	?	?	?	?	58.8	?	?	?	?
11	?	?	?	?	29.8	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	26.1	?	?
13	2.9	?	?	68.5	?	?	55.5	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	58	?	?	34.2
15	?	?	?	?	?	99.6	?	?	?	?	?	?
16	?	?	45.8	?	?	?	?	?	?	?	22.1	?
17	?	(72.8)	?	?	?	?	?	77.2	?	?	?	?
18	?	?	?	?	66.8	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	25.3	?	?
20	24.2	?	?	?	?	?	63.6	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	30.9	?	?	28.5
22	?	?	?	?	?	66.6	?	?	?	?	?	?
23	?	?	31.3	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	31.9	?	?	?	?	?	79.4	?	?	?	?
25	?	?	?	?	24.4	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	11.7	?	?
27	35.3	?	?	48.9	?	?	107	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	56.1	?	?	12
29	?	?	?	?	?	31.4	?	?	?	?	?	?
30	?	?	49.5	?	?	?	?	?	?	?	18.4	?
31	?	?	?	?	?	?	?	60.3	?	?	?	?
Moy	19.6	35.5	40.6	58.1	45.8	70.6	67.2	85.6	46.8	41.2	15.4	28.2
Mini	2.9	31.5	34.8	48.9	24.4	31.4	42.6	58.8	30.9	11.7	10.2	12.0
Maxd	35.3	43.1	49.5	68.5	66.8	99.6	107	152	56.1	26.1	22.1	38.1

NIGER A DIRE en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déc
1	?	136	374	?	?	?	?	?	?	?	12	?
2	?	?	?	?	?	?	66.7	103	?	?	?	?
3	?	?	?	?	162	?	?	?	?	?	?	?
4	34.1	?	?	?	?	?	?	?	?	36.5	?	?
5	?	?	?	127	?	?	114	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	97.3	?	?	17.1
7	?	?	?	?	?	210	?	55.8	?	?	?	?
8	?	163	134	?	?	?	?	?	?	?	23.6	?
9	?	?	?	?	?	?	?	69.5	?	?	?	?
10	?	?	?	?	94.6	?	?	?	?	?	?	?
11	58.2	?	?	?	?	?	?	?	?	30.1	?	?
12	?	?	?	140	?	?	72.5	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	84.6	?	?	?	21.6
14	?	?	?	?	?	140	?	?	?	?	?	?
15	?	133	92.9	?	?	?	?	?	?	?	14.8	?
16	?	?	?	?	?	?	?	88.4	?	?	?	?
17	?	?	?	?	146	?	?	?	?	?	?	?
18	112	?	?	?	?	?	?	?	?	20.3	?	?
19	?	?	?	56.7	?	?	89.8	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	51.3	?	?	26.3	?
21	?	?	?	?	?	64	?	?	?	?	?	?
22	?	97	111	?	?	?	?	?	?	?	16.9	?
23	?	?	?	?	?	?	?	121	?	?	?	?
24	?	?	?	?	88	?	?	?	?	?	?	?
25	124	?	?	?	?	?	?	?	?	13.3	?	?
26	?	?	?	338	?	?	82.1	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	51.9	?	?	?	30.2
28	?	?	?	?	?	63.3	?	?	?	?	?	?
29	?	?	85.9	?	?	?	?	?	?	?	17.4	?
30	?	?	?	?	?	?	?	114	?	?	?	?
31	?	?	?	83.7	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	82.1	132	159	166	115	119	89.7	89.8	71.3	25.1	16.9	23.8
Mini	34.1	97	85.9	56.7	88	63.3	72.5	69.5	51.3	13.3	12	17.1
Maxd	124	163	374	338	162	210	114	121	97	36.5	23.6	30.2

annexe 6: concentrations de MeS

DIAKA A KARA en 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	57.6	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	26.5	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	60.2	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	71.1	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	62.3	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4.3
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	?	?	?	?	?	?	?	52.3	66.7	15.3	3.9	4.3
Mini	?	?	?	?	?	?	?	39	62.3	3.6	3.9	4.3
Maxd	?	?	?	?	?	?	?	60.2	71.1	26.5	3.9	4.3

DIAKA A KARA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	18.6
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	15.3
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	?	19.0	?	?	?	?	?	?	?	?	?	22.7
Mini	?	13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	11.4
Maxd	?	30.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	47.0

DIAKA A KARA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	54.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	82.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	8.1	?
3	?	?	?	?	?	?	?	73.1	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	420	?	?
6	?	?	?	?	?	?	16	?	?	?	?	?
7	?	?	27.8	?	?	?	?	80.6	?	?	14.5	?
8	?	26.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	21	?
10	?	?	?	?	?	?	?	34.8	?	?	?	?
11	14.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	21.3	?	?
13	?	?	?	?	?	?	85.4	?	?	?	?	?
14	?	?	7.4	?	?	?	?	40.2	?	?	68.4	?
15	?	8.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4.9	?
17	?	?	?	?	?	?	?	41.7	?	?	?	?
18	45.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	91.5	?	?
20	?	?	?	?	?	?	35.7	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	187	?	?	55.9
22	?	12.5	?	?	?	5.2	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	3.7	?
24	?	?	?	?	?	?	?	13.8	?	?	?	?
25	19.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	25.4	?	?
27	?	?	?	?	?	?	44.7	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	141	?	?	?
29	?	15.6	?	?	?	11.8	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	7.7	?
31	?	?	?	?	?	?	?	47	?	?	?	41.9
Moy	38.8	23.5	17.6	?	?	8.5	25.9	34.3	112.3	46.1	9.1	46.3
Mini	14.7	8.9	7.8	?	?	5.2	16.0	13.8	40.2	21.3	3.7	14.5
Maxd	82.4	26.4	27.8	?	?	11.8	44.7	47.0	187.1	91.5	21.0	68.4

DIAKA A KARA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	392	45.4	?	?	?	?	?	?	?	29.1
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	254	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	62.2	?	?	72.3	?	?	29	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	61.1	?	18.5
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	22.8	61.1	?	?	?	?	?	?	?	39.7
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	15.8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	27.4	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	52.4	?	47.6
14	?	?	?	?	?	44.5	?	?	?	?	?	?
15	?	?	31.5	265	?	?	?	?	?	?	?	21.6
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	28.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	25.1	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	57.7	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	25.7
22	?	?	56	57.7	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	89.9	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	44	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	73.9	?	9.2
28	?	?	?	?	?	185	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	232	?	?	?	?	?	?	?	38
30	?	?	?	?	?	?	?	72.8	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	85.6	126	132	?	?	91	?	81.4	61.3	27.2	31.0	23.9
Mini	15.8	22.8	45.4	?	?	43.5	?	72.8	52.4	25.1	22	9.2
Maxd	254	392	265	?	?	185	?	89.9	73.9	29	40	47.6

annexe 6: concentration de MeS

NIGER A KE-MACINA en 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	41.1	57.9	18.4	13.2	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	25.4	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	18.9	50.6	?	?	?	0.8
Moy	?	?	?	?	?	?	18.9	45.9	41.7	18.4	13.2	0.8
Mini	?	?	?	?	?	?	41.1	25.4	18.4	13.2	0.8	
Maxd	?	?	?	?	?	?	18.9	50.6	57.9	18.4	13.2	0.8

NIGER A KE-MACINA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	36.4	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	81.1	?	?
4	?	?	?	6.8	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	144	?	?	0.8
6	?	?	?	?	?	17.8	?	?	?	?	?	?
7	?	?	4	?	?	?	?	?	?	?	26.4	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	0.4	7.6	?	12.3	41.2	?	?	?	?	93.3	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	136	?	?	41.6
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	2.7	?	?	?	?	?	?	?	3.7	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	115	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	115	?	?	?
20	?	?	?	15.5	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	12.1	?	?	?	?	?	?	?	10.7	?
22	?	?	?	?	?	?	?	151	?	?	?	?
23	?	?	?	?	54.3	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	27.2	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	100	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	7.6	13.9	?	?	?	?	?	?	?	14	?
29	?	?	?	?	?	?	?	142	?	?	?	?
30	?	?	?	10.2	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4.3	?	?
Moy	0.4	4.8	8.2	11.2	44.0	17.8	0.0	146	124	64.1	13.7	21.2
Mini	0.4	1.9	2.7	6.8	36.4	17.8	0	142	100	4.3	3.7	0.8
Maxd	0.4	7.6	13.9	15.5	54.3	17.8	0	151	144	115	26.4	41.6

NIGER A KE-MACINA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	12.7	?	?	4.9	?	?	?	?	?	?	15.2	?
3	?	?	?	?	?	?	57.7	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	5.4	?	?	?	?	?	54.2	?	?	?
6	?	6.7	?	?	?	?	32.6	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	27.2	?	?	19.6	?
8	?	?	?	?	39.8	?	?	?	?	?	?	?
9	7.7	?	?	0	?	?	?	?	?	48.1	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	105	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	5.1	?	?	?	?	?	?	18.6	?	?
13	?	8.9	?	?	?	?	24.8	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	43.3	?	?	18.7	?
15	?	?	?	?	?	39.8	?	?	?	?	?	?
16	6.4	?	?	3.3	?	?	?	?	?	?	39	?
17	?	?	?	?	?	?	?	50.3	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	2.8	?	?	?	?	?	21.7	?	?	?
20	?	(94.9)	?	?	?	?	26.7	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	29.2	?	?	13.3	?
22	?	?	?	?	?	64.6	?	?	?	?	?	?
23	1	?	?	7.7	?	?	?	?	?	?	47.2	?
24	?	?	?	?	?	?	?	16.3	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	8.5	?	?	?	?	?	?	20.9	?	?
27	?	8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	20	?	?	31.7	?
29	?	?	?	?	?	26.4	?	?	?	?	?	?
30	13.6	?	?	12	52	?	?	?	?	?	12.6	?
31	?	?	?	?	?	?	?	30.5	?	?	?	?
Moy	8.3	7.9	7.3	5.6	52.0	36.7	28.0	51.9	29.9	28.9	32.4	20.8
Mini	1.0	6.7	2.8	0.0	52	13	24.8	16.3	20	18.6	12.6	13.3
Maxd	13.6	8.9	8.5	3.3	52	64.6	32.6	105	43.3	54.2	48.1	31.7

NIGER A KE-MACINA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	jul	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	81.4	?	?	?	?
3	?	?	?	?	375	?	?	?	?	?	?	?
4	54.8	?	?	?	?	?	?	?	?	47.7	?	?
5	?	?	?	105	?	?	14.1	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	61	?	?	9.7
7	?	?	?	?	?	26	?	?	?	?	?	?
8	?	7.1	246	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	82.5	?	?	?	?
10	?	?	?	?	60	?	?	?	?	?	?	?
11	13.2	?	?	?	?	?	?	?	?	55.9	?	?
12	?	?	?	46.6	?	?	58.5	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	75	?	?	31.6
14	?	?	?	?	?	62.5	?	?	?	?	?	?
15	?	58.5	11	?	?	?	?	?	?	?	79.4	?
16	?	?	?	?	?	?	?	56.9	?	?	?	?
17	?	?	?	?	13	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	47.1	?	?	?
19	?	?	?	8.5	?	?	360	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	142	?	?	35.3
21	?	?	?	?	?	72.9	?	?	?	?	?	?
22	?	19.2	?	?	?	?	?	?	?	?	25.5	?
23	?	?	?	?	?	?	?	99.9	?	?	?	?
24	?	?	?	?	16.7	?	?	?	?	?	?	?
25	15.6	?	?	?	?	?	?	?	?	38.5	?	?
26	?	?	?	56.7	?	?	55.7	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	13.7
28	?	?	?	?	?	16.3	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	370	?	?	?	?	?	?	43.6	?
30	?	?	?	?	?	?	?	71.3	?	?	?	?
31	?	?	?	?	17.1	?	?	?	?	?	?	?
Moy	27.9	29.2	183	54.2	96.3	44.4	42.8	78.2	92.5	50.2	49.5	22.6
Mini	13.2	7.1	11	8.5	13	16.3	14.1	56.9	61	47.1	25.5	9.7
Maxd	54.8	58.5	370	105	375	72.9	58.5	99.9	142	55.9	79.4	35.3

annexe 6: concentration de MeS

KOLI-KOLI A KORIENTZE EN 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2.8	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	2.4	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	97.4	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2.8
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	?	?	?	?	?	?	?	97.4	2.4	2.8	2.0	2.8
Mini	?	?	?	?	?	?	?	97.4	2.4	2.8	2	2.8
Maxd	?	?	?	?	?	?	?	97.4	2.4	2.8	2	2.8

KOLI-KOLI A KORIENTZE EN 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	4.5	?	?	?	?	?	?	?	?	12.3	?	?
2	?	?	?	45.5	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	14.3	19.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	583	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	3.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	166	?	?	191	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	10.7	28.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	213	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	7.8	?	?	?	?	?	?	?	?	35.4	?	?
16	?	?	?	135	?	?	350	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	10.4	72.3	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	2.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	199	?	?	383	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	49.7	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	8.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	3.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	171	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	20.1
Moy	4.2	10.9	40.0	136	?	?	274	398	49.7	23.8	?	20.1
Mini	2.4	8.2	19.5	45.5	?	?	171	213	49.7	12.3	?	20.1
Maxd	7.8	14.3	72.3	199	?	?	383	583	49.7	35.4	?	20.1

KOLI-KOLI A KORIENTZE EN 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	124	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	546	?	?	?	?	?	?
3	?	?	11.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	362	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	9.9	?	?	108	?	?	?	?	?	?	?	13
8	?	?	?	?	?	637	?	?	78.5	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	6.5	?
10	?	?	9.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	272	?	?	?	?	?	?	?
13	?	4.3	?	?	?	?	92.2	?	?	?	?	?
14	?	?	?	76.9	?	?	?	?	?	?	?	34.4
15	?	?	?	?	?	?	?	?	91.3	91.3	?	?
16	?	?	?	?	?	519	?	?	?	?	12	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	233	?	?	?	?
19	?	?	?	?	418	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	269	?	?	?	?	?
21	?	?	?	172	?	?	?	?	?	?	?	16.3
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	10.2	?
24	?	?	37.5	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	3.9	?	?	?	?	?	156	?	?	?	?
26	?	?	?	?	406	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	458	?	?	?	?	?	?	?	15.2
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	13.2	?
31	?	?	44.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	9.9	4.1	25.7	203.8	364.6	567.3	180.6	194.5	98.0	91.3	10.5	19.7
Mini	9.9	3.9	9.5	76.9	272	519	92.2	156	78.5	91.3	6.5	13
Maxd	9.9	4.3	44.6	458	418	637	269	233	124	91.3	13.2	34.4

KOLI-KOLI A KORIENTZE EN 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	nov	déce
1	?	20.4	46.1	?	?	?	?	?	?	?	21.3	?
2	?	?	?	?	?	?	?	232	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	18.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	138	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	102	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	21.7	110	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	206	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	20.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	207	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	7.5	84.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	405	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	17.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	275	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	55.5	78.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	196	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	21.9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	144	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	122	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	116	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	19.7	26.3	88.1	?	?	?	209	231	?	?	21.3	?
Mini	17.6	7.5	46.1	?	?	?	144	116	?	?	21.3	?
Maxd	21.9	55.5	122	?	?	?	275	405	?	?	21.3	?

annexe 6: concentrations de MeS

NIGER A NANTAKA en 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	12.5	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	47.1	2.8	4.8	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	25.2	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	5.1	?
Moy	?	?	?	?	?	?	?	47.1	2.8	4.8	?	14.3
Mini	?	?	?	?	?	?	?	47.1	2.8	4.8	?	5.1
Maxi	?	?	?	?	?	?	?	47.1	2.8	4.8	?	25.2

NIGER A NANTAKA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	13.9	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	55.9	?	?	25.5
3	?	?	?	?	0.6	?	?	?	?	?	?	?
4	?	18.3	18.1	?	?	?	?	?	?	?	21.3	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	20.1	?	?	?	?	?	?	?
7	7.4	?	?	?	?	?	?	?	?	32.4	?	?
8	?	?	?	22.9	?	?	?	?	?	?	25.5	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	28.6	?	?	33
10	?	6.7	?	?	?	23.4	?	?	?	?	?	?
11	?	14.9	18.4	?	?	?	?	?	?	?	36.7	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	3.1	?	?	?	?	?	?	?
14	5.3	?	?	?	?	?	?	?	?	32.2	?	?
15	?	?	?	16	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	56.2	?	?	29.1
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	23.9	18.3	?	?	?	?	?	?	?	22.4	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	25.6	?	3.9	?	?	?	?	?	?	?
21	1.3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	11.1	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	42.1	?	?	11.1
24	?	?	?	?	?	3.3	?	?	?	?	?	?
25	?	16.9	17.4	?	?	?	?	?	?	?	29.1	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	9.8	?	?	?	?	?	?	?
28	4.1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	8.7	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	13.6	?	?	2.5
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	4.5	16.1	19.6	14.5	9.2	9.1	?	?	39.3	32.3	27.4	20.2
Mini	1.3	6.7	17.4	8.7	3.1	0.6	?	?	13.6	32.2	21.3	2.5
Maxi	7.4	23.9	25.6	22.9	20.1	23.4	?	?	56.2	32.4	36.7	33

NIGER A NANTAKA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	?	?	11.4	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	74.1	?
3	?	32	?	?	?	?	189	111	?	?	21.1	?
4	?	?	?	?	48.2	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	12.9	?	?
6	26.9	?	?	2.3	?	?	56.3	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	37	?	?	49.2	?
8	?	?	?	?	?	22.5	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	23.6	?
10	?	?	?	?	?	?	?	16.2	?	?	?	?
11	?	?	?	?	10.1	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	17.7	?	?
13	14.4	?	?	15.8	?	?	48.7	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	25.6	?	?	42
15	?	?	?	?	?	11.2	?	?	?	?	?	?
16	?	?	13.3	?	?	?	?	?	?	?	8.4	?
17	?	23.7	?	?	?	?	?	54.3	?	?	?	?
18	?	?	?	?	28.9	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	44.3	?	?
20	0.4	?	?	15.6	?	?	69.7	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	42.7	?	?	22.3
22	?	?	?	?	?	20	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	12.6	?
24	?	22.1	?	?	?	?	?	78.5	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	64.2	?	?
27	13	?	?	73.4	?	?	46.7	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	24.3	?	?	17.2
29	?	?	?	?	?	46.2	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	17.5	?
31	?	?	?	?	?	?	?	37	?	?	?	?
Moy	14	26	13	11	22.3	22.3	50.6	58.5	32.4	34.8	16.6	32.7
Mini	0.4	22	13	2	2	11.2	46.7	10.2	24.3	12.9	8.4	17.2
Maxi	27	32	13	16	48.2	46.2	56.3	111	42.7	64.2	23.6	49.2

NIGER A NANTAKA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	38.4	35.9	?	?	?	?	?	?	?	10.5	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	40.5	?	?	?
3	?	?	?	?	20.4	?	?	?	?	?	?	?
4	36.6	?	?	?	?	?	?	?	?	18.6	?	?
5	?	?	?	14	?	?	33.8	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	49.2	?	55	?	?	22.8
7	?	?	?	?	?	31.3	?	?	?	?	?	?
8	?	30.6	23.9	?	?	?	?	?	?	?	71.7	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	87.1	?	?	?
10	?	?	?	?	32.4	?	?	?	?	?	?	?
11	14.6	?	?	?	?	?	?	?	?	19.2	?	?
12	?	?	?	18.7	?	?	32	92.5	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	51.3	?	?	30.5
14	?	?	?	?	?	37.2	?	?	?	?	?	?
15	?	13.4	15.1	?	?	?	?	?	?	?	40.1	?
16	?	?	?	?	?	?	?	62.9	?	?	?	?
17	?	?	?	?	41.6	?	?	?	?	?	?	?
18	58.6	?	?	?	?	?	?	?	?	42.8	?	?
19	?	?	?	16.8	?	?	44.8	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	25	?	?	22.9
21	?	?	?	?	?	29.9	?	?	?	?	?	?
22	?	18.9	20.5	?	?	?	?	?	?	?	46.6	?
23	?	?	?	?	?	?	?	87.8	?	?	?	?
24	?	?	?	?	12.3	?	?	?	?	?	?	?
25	29	?	?	?	?	?	?	?	?	38.4	?	?
26	?	?	?	10.6	?	?	142	?	?	?	?	?
27	?	?	?	13.8	?	?	?	?	4.3	?	?	12.9
28	?	?	?	?	?	21.7	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	21.7	?	?	?	?	?	?	74.1	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	77.3	?	?	?
31	?	?	?	?	122	?	?	?	?	?	?	?
Moy	34.7	25.3	23.4	15	45.7	30	63.1	71.1	33.8	29.8	48.6	22.3
Mini	14.6	13.4	15.1	10.6	12.3	21.7	32	40.5	4.3	19.2	10.5	12.9
Maxi	36.6	38.4	35.9	21.7	122	37.2	142	87.8	55	42.8	71.7	30.5

annexe 6: concentration de MeS

BANI A SOFARA en 1990												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	127	57.9	20.2	16.9	26.3
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	14.2
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	83.3	3.7	6.6	3.5	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	23.1
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	40.7	?	10.6	?	?
31	?	?	?	?	?	?	124	65.9	?	6.2	?	?
Moy	?	?	?	?	?	?	124	92.1	34.1	11.0	10.3	16.9
Mini	?	?	?	?	?	?	124	65.9	3.7	6.2	3.5	4
Maxd	?	?	?	?	?	?	124	127	57.9	20.2	16.9	26.3

BANI A SOFARA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g/m3												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	3.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	11.4	?
2	?	?	?	18	?	?	?	?	?	?	?	23.4
3	?	?	?	?	?	?	?	?	80.9	?	?	?
4	?	?	?	?	?	244	?	?	?	?	?	?
5	?	20.7	17.6	?	?	?	?	?	?	?	35.9	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	141	?	?	?
7	?	?	?	?	23.2	?	?	?	?	?	?	?
8	20.8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	27.7	?
9	?	?	?	21.1	?	?	?	?	?	?	?	15.2
10	?	?	?	?	?	?	?	?	60.2	?	?	?
11	?	?	?	?	?	125	?	?	?	?	?	4
12	?	13.5	21.6	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	122	?	?	?	?
14	?	?	?	?	3.3	?	?	?	?	?	?	?
15	14.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	28.9	?
16	?	?	?	16.5	?	?	?	?	?	?	?	25.5
17	?	?	?	?	?	?	?	?	54.7	?	?	?
18	?	?	?	?	?	221	?	?	?	?	28.7	?
19	?	19	18.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	150	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	14.9	?	?	?	?	?	?	?	?	29.3	?	?
23	?	?	?	15.9	?	?	?	?	?	?	?	21.7
24	?	?	?	?	?	?	?	?	47.3	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	33.2	?
26	?	12.7	18.2	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	99.3	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
29	7.4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	52.3	?	?	?	?	?	?	?	31.3
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	12.2	16.5	19	24.8	13.3	197	?	128	60.8	24.3	32.8	23.4
Mini	3.7	12.7	17.6	15.9	3.3	125	?	99.3	47.3	11.4	28.7	15.2
Maxd	20.8	20.7	21.6	52.3	23.2	244	?	150	80.9	29.3	35.9	31.3

BANI A SOFARA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	?	?	41.1	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	22.4	?
3	?	26.9	?	?	?	?	?	127	?	?	?	?
4	?	?	?	?	45	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	17.4	?	?	36.4	?	?	138	?	?	39.7	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	106	?	?	?	31.2
8	?	?	?	?	?	150	?	?	?	?	?	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	13.2	?
10	?	36.6	?	?	?	?	?	158	?	?	?	?
11	?	?	?	?	26	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	39.3	?	?
13	55.9	?	?	35.1	?	?	153	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	98.9	?	?	47.9
15	?	?	?	?	?	88.6	?	?	?	?	?	?
16	?	?	4	?	?	?	?	?	?	?	36.2	?
17	?	46.3	?	?	?	?	?	139	?	?	?	?
18	?	?	?	?	34.9	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	20.1	?	?
20	36.6	?	?	19.7	?	?	185	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	74.7	?	?	35.1
22	?	?	?	?	?	29.1	?	?	?	?	?	?
23	?	?	8.4	?	?	?	?	?	?	?	43.1	?
24	?	?	?	?	?	?	?	136	?	?	?	?
25	?	?	?	?	80.9	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	16.8	?	?
27	26.8	?	?	11.4	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	60.8	?	?	20.1
29	?	?	?	?	?	72.6	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	134	?	?	?	?
31	?	?	3.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	34.2	16.5	5.4	15.6	26	50.8	169	140	85.1	29.0	27.8	33.6
Mini	17.4	12.7	3.7	4.4	26	29.1	153	127	60.8	16.8	13.2	20.1
Maxd	55.9	20.7	8.4	19.7	26	72.6	185	139	106	39.7	43.1	47.9

BANI A SOFARA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ⁻³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	95.6	?	?	?	?	?	?	?	24.2
2	?	?	?	?	?	?	?	191	?	?	?	?
3	?	?	?	?	168	?	?	?	?	?	?	?
4	31.2	?	?	?	?	?	?	?	?	60.7	?	?
5	?	?	?	27.9	?	?	71.2	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	152	?	?	29.9
7	?	?	?	?	?	58.8	?	?	?	?	?	?
8	?	42.4	45.1	?	?	?	?	?	?	?	25.1	?
9	?	?	?	?	?	?	?	206	?	?	?	?
10	?	?	?	?	39.3	?	?	?	?	?	?	?
11	33.5	?	?	?	?	?	?	?	?	99.9	?	?
12	?	?	?	17.6	?	?	93.6	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	84.7	?	?	33.2
14	?	?	?	?	?	130	?	?	?	?	?	?
15	?	43.2	25.2	?	?	?	?	?	?	?	23.6	?
16	?	?	?	?	?	?	?	160	?	?	?	?
17	?	?	?	?	224	?	?	?	?	?	?	?
18	25.6	?	?	?	?	?	?	?	?	42.9	?	?
19	?	?	?	17.3	?	?	93.9	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	98.1	?	?	12.8
21	?	?	?	?	?	90.7	?	?	?	?	?	?
22	?	31.6	33.6	?	?	?	?	?	?	?	29.1	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	146	?	?	?	?	?	?	?
25	24.7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	33.2	?
26	?	?	?	33.1	?	?	101	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	107	?	?	30.9
28	?	?	?	?	?	713	?	?	?	?	?	?
29	?	?	32.4	?	?	?	?	?	?	?	44.1	?
30	?	?	?	?	?	?	?	284	?	?	?	?
31	?	?	?	?	42.6	?	?	?	?	?	?	?
Moy	28.8	39.1	46.4	24	124	248	89.8	210	123	59.2	29.2	26.7
Mini	24.7	31.6	32.4	17.3	39.3	58.8	93.6	160	84.7	33.2	23.6	12.8
Maxd	33.5	43.2	95.6	33.1	168	713	101	284	174	99.9	44.1	33.2

annexe 6: concentration de MeS

NIGER A TILÉMBEYA en 1991												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	7.3	?
2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
8	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	15.7	?
9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
11	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
14	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	16.7	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
17	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
22	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	3.7	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
24	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
25	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	26
29	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	16.1	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
31	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Moy	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	11.9	26.0
Mini	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	7.3	26.0
Maxd	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	16.7	26

NIGER A TILÉMBEYA en 1992												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	6.4	?	?	?	11.5	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	8.3	?	?	?	?	?	1.8	?
3	?	?	?	?	?	?	?	42.2	?	?	?	?
4	9.8	?	?	4.5	?	?	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?	?	?	?	10.2	?	?
6	?	?	?	?	7.1	?	38.8	?	?	?	?	?
7	?	?	9.2	?	?	?	?	?	?	?	?	10.7
8	?	11.2	?	?	?	12.9	?	?	8.0	?	?	?
9	?	?	?	?	10.8	?	?	?	?	?	18.9	?
10	?	?	?	?	?	?	?	22.0	?	?	?	?
11	10.5	?	?	4.7	?	?	?	?	?	?	?	?
12	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4.9	?	?
13	?	?	?	?	15.4	?	16.0	?	?	?	?	?
14	?	?	7.7	?	?	?	?	?	30.1	?	?	5.0
15	?	7.6	?	?	?	3.0	?	?	?	?	?	?
16	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	6.4	?
17	?	?	?	?	?	?	?	20.6	?	?	?	?
18	10.4	?	?	4.2	?	?	?	?	?	?	?	?
19	?	?	?	?	?	?	?	?	?	1.9	?	?
20	?	?	?	?	7.4	?	53.1	?	?	?	?	?
21	?	?	?	?	?	?	?	?	53.0	?	?	12.0
22	?	12.3	19.4	?	?	12.7	?	?	?	?	?	?
23	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	13.3	?
24	?	?	?	?	?	?	?	39.2	?	?	?	?
25	5.7	?	?	2.6	?	?	?	?	?	?	?	?
26	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	53.1	?	?	?	?	?
28	?	?	?	?	?	?	?	?	15.2	?	?	8.5
29	?	6.5	8.6	?	?	45.5	?	?	?	?	?	?
30	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2.9	?
31	?	?	?	?	?	?	?	46.0	?	?	?	?
Moy	9.1	8.8	11.2	4.0	12.3	17.1	36.0	31.0	26.6	6.2	8.7	9.1
Mini	5.7	6.4	8.6	2.6	7.4	3.0	16.0	20.6	8.0	4.9	1.8	5.0
Maxd	10.5	12.3	19.4	4.7	15.4	45.5	54.1	42.2	53.0	10.2	18.9	12.0

NIGER A TILÉMBEYA en 1993												
CONCENTRATION DES MATIERES EN SUSPENSION en g m ³												
Jour	janv	févr	mars	avri	mai	juin	juil	août	sept	octo	noye	déce
1	?	4.0	5.6	?	?	?	?	?	?	?	17.1	?
2	?	?	?	?	?	?	?	56.9	?	?	?	?
3	?	?	?	?	8.1	?	?	?	?	?	?	?
4	10.3	?	?	?	?	?	?	?	?	28.1	?	?
5	?	?	?	5.5	?	?	36.6	?	?	?	?	?
6	?	?	?	?	?	?	?	?	35.7	?	?	8.8
7	?	?	?	?	?	15.8	?	?	?	?	?	?
8	?	5.2	11.7	?	?	?	?	?	?	?	13.8	?
9	?	?	?	?	?	?	?	44.4	?	?	?	?
10	?	?	?	?	6.3	?	?	?	?	?	?	?
11	7.4	?	?	?	?	?	?	?	?	18.5	?	?
12	?	?	?	23.1	?	?	36.5	?	?	?	?	?
13	?	?	?	?	?	?	?	?	29.5	?	?	8.5
14	?	?	?	?	?	27.0	?	?	?	?	?	?
15	?	7.1	4.2	?	?	?	?	?	?	?	7.3	?
16	?	?	?	?	?	?	?	36.4	?	?	?	?
17	?	?	?	?	13.8	?	?	?	?	?	?	?
18	6.0	?	?	?	?	?	?	?	?	15.3	?	?
19	?	?	?	4.2	?	?	41.7	?	?	?	?	?
20	?	?	?	?	?	?	?	?	21.5	?	?	7.9
21	?	?	?	?	?	22.2	?	?	?	?	?	?
22	?	4.3	11.1	?	?	?	?	?	?	?	24.1	?
23	?	?	?	?	?	?	?	58.0	?	?	?	?
24	?	?	?	?	39.1	?	?	?	?	?	?	?
25	6.9	?	?	?	?	?	?	?	?	15.7	?	?
26	?	?	?	6.9	?	?	23.8	?	?	?	?	?
27	?	?	?	?	?	?	?	?	43.4	?	?	5.2
28	?	?	?	?	?	19.3	?	?	?	?	?	?
29	?	?	3.6	?	?	?	?	?	?	?	10.0	?
30	?	?	?	?	?	?	?	70.2	?	?	?	?
31	?	?	?	?	5.9	?	?	?	?	?	?	?
Moy	7.7	4.2	7.2	9.9	14.6	21.1	34.7	53.2	32.5	19.4	14.3	7.6
Mini	6.0	4.0	3.6	4.2	5.9	19.3	23.8	36.4	21.5	15.3	7.3	5.2
Maxd	10.3	7.1	11.7	23.1	39.1	27.0	41.7	70.2	43.4	28.1	24.1	8.8

annexe 7: analyses chimiques

AKKA (Issa-ber)

DATE	pH	ondu 20'	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	Cation	Anion	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	SiO2	minér.	dis.
			még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
19-23-Aou-90	7.0	46.8	0.11	0.12	0.09	0.10	0.36	0.06	ND	0.00	0.42	0.42	2.20	1.43	3.68	2.35	21.96	1.95	ND	0.14	9.93	33.71	43.64
18-oct-90	6.8	42.8	0.10	0.11	0.07	0.10	0.36	0.03	ND	0.00	0.39	0.39	2.06	1.39	2.54	2.39	21.96	0.99	ND	0.14	14.38	31.48	45.86
23-nov-90	6.9	52.2	0.10	0.13	0.14	0.13	0.40	0.09	ND	0.00	0.51	0.50	1.98	1.59	5.63	3.06	24.40	3.33	ND	0.14	13.99	40.14	54.13
13-27-Déc-90	7.7	57.5	0.11	0.15	0.15	0.17	0.42	0.10	0.04	0.00	0.57	0.57	2.12	1.82	5.73	3.81	25.62	3.69	2.36	0.14	15.95	45.29	61.24
3,10,17-Jan-91	6.8	56.2	0.12	0.16	0.11	0.16	0.49	0.07	0.01	0.00	0.56	0.58	2.47	1.99	4.42	3.77	29.59	2.64	0.87	0.10	15.83	45.84	61.67
07-fév-91	7.6	54.4	0.14	0.12	0.06	0.17	0.42	0.05	ND	0.01	0.48	0.48	2.81	1.48	2.15	3.84	25.62	1.70	ND	0.67	14.12	38.27	52.39
14-fév-91	7.6	54.4	0.14	0.13	0.05	0.17	0.41	0.05	ND	0.01	0.49	0.47	2.87	1.56	1.96	3.86	25.01	1.60	ND	0.53	13.70	37.37	51.07
21-fév-91	7.5	60	0.16	0.13	0.05	0.19	0.45	0.05	ND	0.01	0.53	0.51	3.21	1.58	1.96	4.37	27.15	1.88	ND	0.62	13.64	40.76	54.40
28-fév-91	7.6	60	0.17	0.13	0.06	0.20	0.44	0.07	0.01	0.01	0.56	0.52	3.31	1.60	2.42	4.60	26.54	2.48	0.37	0.58	12.16	41.90	54.06
07-mar-91	7.6	62	0.19	0.15	0.05	0.20	0.50	0.07	ND	0.01	0.59	0.58	3.77	1.77	2.07	4.55	30.62	2.34	ND	0.58	10.90	45.71	56.61
21-mar-91	7.6	64	0.21	0.15	0.06	0.20	0.51	0.08	0.01	0.01	0.61	0.61	4.11	1.80	2.23	4.67	31.11	2.66	0.37	0.67	10.71	47.62	58.33
28-mar-91	7.6	65	0.18	0.15	0.06	0.22	0.54	0.08	0.01	0.02	0.62	0.64	3.69	1.80	2.50	5.15	32.94	2.73	0.37	0.77	9.98	49.95	59.93
04-avr-91	7.6	69	0.22	0.16	0.06	0.23	0.59	0.08	0.01	0.02	0.67	0.69	4.33	1.94	2.42	5.36	35.69	2.94	0.37	0.77	11.82	53.82	65.64
11-avr-91	7.6	75	0.24	0.18	0.08	0.23	0.68	0.05	ND	0.01	0.73	0.74	4.85	2.16	3.09	5.34	41.48	1.88	ND	0.53	13.34	59.33	72.67
18-avr-91	7.5	71	0.23	0.17	0.07	0.21	0.61	0.06	ND	0.01	0.69	0.69	4.67	2.04	2.85	4.90	37.21	2.16	ND	0.67	12.74	54.51	67.25
25-avr-91	7.5	70	0.23	0.17	0.07	0.23	0.66	0.04	0.01	0.01	0.70	0.72	4.67	2.04	2.66	5.29	39.96	1.56	0.43	0.58	12.57	57.19	69.76
16-mai-91	7.3	64	0.25	0.20	0.07	0.23	0.73	0.03	0.01	0.01	0.75	0.78	5.05	2.39	2.82	5.29	44.53	1.10	0.74	0.43	13.90	62.35	76.25
23-mai-91	7.6	88	0.25	0.17	0.10	0.22	0.70	0.03	0.03	ND	0.75	0.76	5.09	2.09	3.99	5.11	42.70	0.99	1.98	ND	15.03	61.95	76.98
30-mai-91	7.7	102	0.29	0.24	0.12	0.25	0.90	0.03	0.01	0.02	0.89	0.96	5.83	2.88	4.50	5.70	54.90	0.99	0.74	0.77	14.46	76.32	90.78
06-jun-91	7.6	100	0.29	0.23	0.11	0.24	0.89	0.03	ND	ND	0.87	0.92	5.79	2.74	4.26	5.57	54.29	0.99	ND	ND	15.28	73.64	88.92
13-jun-91	7.7	102	0.29	0.22	0.13	0.23	0.84	0.03	0.03	0.01	0.88	0.91	5.73	2.72	5.24	5.36	50.94	0.99	1.98	0.58	15.72	73.54	89.26
20-jun-91	7.6	68	0.24	0.15	0.11	0.21	0.66	0.03	0.01	ND	0.71	0.71	4.85	1.82	4.38	4.81	40.26	1.17	0.74	ND	14.17	58.03	72.20
27-jun-91	7.6	74	0.24	0.14	0.08	0.19	0.54	0.03	0.02	0.02	0.64	0.61	4.73	1.73	3.09	4.28	32.94	1.10	1.24	0.77	16.49	49.87	66.36
04-jul-91	7.5	71	0.22	0.13	0.10	0.19	0.54	0.03	0.01	0.01	0.64	0.59	4.47	1.53	3.75	4.37	32.94	1.10	0.87	0.38	15.84	49.42	65.26
11-jul-91	7.6	78	0.23	0.15	0.10	0.20	0.63	0.03	0.02	0.01	0.68	0.69	4.63	1.87	3.99	4.53	38.13	1.17	0.99	0.58	14.59	55.88	70.47
19-jul-91	7.5	73	0.22	0.14	0.10	0.17	0.57	0.03	0.03	0.02	0.64	0.65	4.49	1.73	3.99	4.00	34.77	0.99	1.74	0.96	14.55	52.66	67.21
18-nov-91	7.4	41	0.11	0.10	0.04	0.13	0.38	ND	ND	ND	0.38	0.38	2.16	1.19	1.72	2.99	23.18	0.21	ND	ND	14.90	31.46	46.36
25-nov-91	7.4	42	0.10	0.10	0.04	0.13	0.38	0.01	0.00	0.01	0.38	0.40	2.08	1.17	1.72	3.01	23.18	0.35	0.25	0.48	15.10	32.25	47.35
02-déc-91	7.3	43	0.10	0.10	0.04	0.13	0.39	ND8	0.00	0.01	0.38	0.40	2.06	1.22	1.68	3.06	23.79	0.28	0.25	0.48	15.10	32.82	47.92
09-déc-91	7.2	45	0.12	0.12	0.05	0.15	0.43	ND9	0.01	ND	0.44	0.44	2.42	1.47	1.99	3.47	26.23	0.32	0.68	ND	14.30	36.59	50.89
16-déc-91	7.4	49	0.12	0.12	0.05	0.15	0.42	ND9	0.00	0.00	0.43	0.43	2.36	1.43	1.96	3.40	25.62	0.32	0.25	0.19	14.60	35.54	50.14
23-déc-91	7.2	48	0.11	0.11	0.05	0.14	0.41	0.01	0.01	0.00	0.41	0.43	2.18	1.37	1.92	3.29	25.01	0.35	0.50	0.19	14.60	34.82	49.42
30-déc-91	7.6	63	0.23	0.10	0.06	0.20	0.62	0.03	0.02	0.01	0.60	0.67	4.63	1.26	2.50	4.51	37.52	1.03	1.05	0.43	15.5	52.93	68.47
06-jan-92	6.9	47	0.1	0.07	0.05	0.15	0.33	0.02	0.01	0.01	0.37	0.37	2.04	0.90	1.88	3.38	20.13	0.85	0.31	0.38	14.4	29.88	44.26
09-mar-92	7.5	55	0.13	0.09	0.06	0.19	0.45	0.02	ND	0.01	0.46	0.48	2.53	1.14	2.19	4.30	27.45	0.78	ND	0.58	12.2	38.96	51.12
25-mai-92	7.6	70	0.25	0.13	0.07	0.21	0.62	0.03	0.02	0.01	0.65	0.68	5.07	1.52	2.54	4.76	37.82	1.03	1.05	0.43	14.9	54.23	69.16
15-jun-92	7.6	65	0.25	0.11	0.06	0.20	0.62	0.01	ND	0	0.62	0.63	4.93	1.39	2.35	4.51	37.52	0.39	0.25	0.19	15.4	51.51	66.92
29-jun-92	7.6	63	0.23	0.10	0.06	0.20	0.62	0.03	0.02	0.01	0.60	0.67	4.63	1.26	2.50	4.51	37.52	1.03	1.05	0.43	15.5	52.93	68.47
20-jul-92	6.8	59	0.2	0.08	0.07	0.18	0.50	0.04	0.02	ND	0.52	0.55	4.03	0.96	2.66	4.05	30.20	1.28	1.05	ND	15	44.22	59.22
07-sep-92	7.1	44	0.13	0.03	0.05	0.14	0.34	0.02	ND	0.01	0.35	0.37	2.55	0.41	1.76	3.22	20.44	0.78	ND	0.38	15.3	29.54	44.88
12-oct-92	7.1	44	0.13	0.04	0.04	0.14	0.32	0.04	0.01	0.03	0.35	0.39	2.63	0.50	1.52	3.20	19.52	1.28	0.50	1.30	15	30.43	45.41
26-oct-92	7.7	51	0.11	0.10	0.05	0.20	0.46	0.02	0	0	0.46	0.48	2.24	1.24	2.07	4.51	27.76	0.82	ND	ND	16.9	38.64	55.54
30-nov-92	6.9	41	0.06	0.05	0.03	0.13	0.27	0.01	ND	0	0.28	0.29	1.26	0.62	1.33	2.92	16.47	0.50	ND	0.19	15	23.29	38.27
28-déc-92	6.9	48	0.09	0.08	0.05	0.15	0.37	0.02	0.01	ND	0.37	0.39	1.86	0.91	1.80	3.54	22.57	0.57	0.37	ND	13.9	31.63	45.51
11-jan-93	7.8	57	0.18	0.11	0.05	0.27	0.62	0.02	ND	ND	0.61	0.64	3.53	1.29	2.11	6.21	37.83	0.71	ND	ND	15.4	51.68	67.05
29-mar-93	7.7	111	0.21	0.15	0.06	0.22	0.62	0.02	ND	ND	0.63	0.63	4.17	1.78	2.23	5.06	37.53	0.60	ND	ND	11.6	51.36	62.93
14-jun-93	7.3	63	0.21	0.16	0.07	0.19	0.62	0.02	0.01	ND	0.63	0.65	4.29	1.95	2.62	4.32	37.83	0.75	0.62	ND	20.2	52.38	72.56
04-jul-93	7.5	61	0.22	0.12	0.06	0.21	0.60	0.02	ND	ND	0.62	0.62	4.41	1.51	2.46	4.90	36.61	0.67	ND	ND	14.9	50.57	65.43
19-jul-93	7.3	55	0.18	0.13	0.06	0.17	0.51	0.02	0.01	ND	0.54	0.54	3.59	1.62	2.35	3.86	31.12	0.64	0.56	ND	18.7	43.73	62.42
02-aoû-93	7.4	56	0.14	0.13	0.08	0.15	0.49	0.02	ND	ND	0.50	0.51	2.79	1.63	3.09	3.47	29.90	0.64	ND	ND	12.9	41.52	54.42
04-oct-93	7.4	36	0.07	0.09	0.04	0.11	0.30	0.01	ND	ND	0.31	0.31	1.36	1.08	1.56	2.51	18.31	0.28	ND	ND	13.2	25.10	38.30
18-oct-93	7.4	41	0.08	0.10	0.04	0.12	0.31	0.04	ND	ND	0.34	0.35	1.60	1.22	1.56	2.76	18.90	0.39	ND	ND	13.8	26.43	40.23
01-nov-93	7.5	39	0.07	0.10	0.04	0.12	0.32	0.01	ND	ND	0.34	0.33	1.48	1.24	1.60	2.76	19.50	0.36	ND	ND	14.3	26.94	41.24
15-nov-93	7.2	41	0.11	0.11	0.04	0.14	0.38	0.01	ND	0.01	0.41	0.39	2.27	1.39	1.72	3.11	22.88	0.43	ND	0.29	15.4	32.07	

annexe 7: analyses chimiques

AWOYE (BARA ISSA)

DATE	pH	cond. 20°	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
02-aoû-90	7.2	68.9	0.18	0.19	0.14	0.18	0.63	0.10	ND	0.01	0.70	0.73	3.61	2.32	5.62	4.14	38.43	3.44	ND	0.34	13.80	57.90	71.70
26-sep-90	6.9	52.2	0.12	0.12	0.12	0.12	0.40	0.08	ND	0.00	0.48	0.48	2.46	1.44	4.64	2.83	24.40	2.88	ND	0.10	16.75	38.75	55.50
07-oct-90	7.0	90.3	0.24	0.26	0.21	0.21	0.70	0.10	ND	ND	0.92	0.80	4.81	3.15	8.19	4.83	42.70	3.66	ND	ND	20.36	67.33	87.69
26-oct-90	7.1	54.2	0.13	0.15	0.09	0.16	0.44	0.07	ND	0.00	0.53	0.51	2.61	1.82	3.55	3.68	26.84	2.34	ND	0.19	11.72	41.02	52.74
24-nov-90	6.9	53.5	0.12	0.14	0.15	0.13	0.44	0.08	ND	0.01	0.54	0.52	2.40	1.74	5.69	2.92	26.84	2.66	ND	0.43	14.33	42.70	57.03
16-déc-90	7.0	56.2	0.12	0.16	0.12	0.15	0.47	0.08	ND	0.00	0.55	0.55	2.40	1.94	4.68	3.45	28.67	2.84	ND	0.14	13.80	44.12	57.92
20-déc-90	7.7	51.1	0.13	0.12	0.06	0.16	0.41	0.04	ND	0.02	0.47	0.47	2.57	1.43	2.34	3.66	25.01	1.35	ND	1.01	14.80	37.36	52.16
27-déc-90	7.7	55.7	0.14	0.13	0.06	0.17	0.42	0.06	ND	0.02	0.50	0.50	2.77	1.59	2.46	3.84	25.62	2.06	ND	1.01	11.63	39.34	50.97
03-jan-91	7.7	47.7	0.11	0.11	0.05	0.14	0.35	0.05	ND	0.01	0.41	0.42	2.28	1.28	1.91	3.31	21.35	1.88	ND	0.58	13.20	32.60	45.80
10-jan-91	7.7	49.1	0.12	0.11	0.05	0.15	0.35	0.06	ND	0.01	0.42	0.42	2.32	1.32	1.95	3.40	21.35	2.09	ND	0.58	12.97	33.02	45.99
17-jan-91	7.7	50.4	0.13	0.12	0.05	0.15	0.38	0.05	ND	ND	0.45	0.43	2.53	1.44	2.11	3.47	23.18	1.92	ND	ND	12.46	34.64	47.10
24-jan-91	7.7	51.1	0.13	0.12	0.05	0.15	0.41	0.04	ND	ND	0.45	0.45	2.53	1.45	2.11	3.50	25.01	1.49	ND	ND	12.68	36.08	48.76
31-jan-91	7.7	51.7	0.13	0.12	0.06	0.16	0.47	0.08	ND	0.00	0.46	0.55	2.57	1.48	2.18	3.56	28.67	ND	ND	0.14	12.18	38.60	50.78
14-mar-91	8.2	88.0	0.27	0.19	0.13	0.26	0.73	0.09	ND	0.02	0.86	0.84	5.49	2.35	5.19	5.89	44.53	3.23	ND	0.72	12.89	67.39	80.28
21-mar-91	7.9	95.0	0.32	0.20	0.12	0.30	0.80	0.10	0.01	0.02	0.93	0.93	6.33	2.36	4.68	6.81	48.80	3.66	0.37	0.82	12.56	73.82	86.38
28-mar-91	7.8	99.0	0.34	0.21	0.12	0.32	0.85	0.09	0.01	0.09	0.98	1.04	6.79	2.53	4.52	7.25	51.85	3.34	0.37	4.51	13.35	81.16	94.51
04-avr-91	7.4	103.3	0.37	0.22	0.11	0.31	0.94	0.07	0.01	0.01	1.00	1.02	7.33	2.63	4.10	7.22	57.04	2.52	0.31	0.58	14.61	81.72	96.33
12-avr-91	7.4	110.3	0.39	0.23	0.11	0.34	1.03	0.09	0.01	0.02	1.08	1.14	7.90	2.77	4.41	7.80	62.83	3.02	0.37	0.72	14.78	89.81	104.59
18-avr-91	7.4	127.5	0.45	0.25	0.13	0.40	1.14	0.14	0.01	0.02	1.22	1.30	8.92	2.96	5.07	9.25	69.54	4.86	0.37	0.82	15.77	101.79	117.56
25-avr-91	7.1	128.1	0.49	0.25	0.13	0.40	1.21	0.10	0.01	0.01	1.27	1.33	9.76	3.06	4.99	9.29	73.81	3.55	0.37	0.48	17.14	105.32	122.46
02-mai-91	7.3	128.8	0.50	0.26	0.14	0.43	1.27	0.14	0.02	0.02	1.32	1.44	9.94	3.11	5.54	9.82	77.47	4.97	0.99	0.72	16.97	112.56	129.53
09-mai-91	7.2	128.1	0.52	0.26	0.12	0.40	1.13	0.07	0.06	0.03	1.30	1.29	10.36	3.18	4.84	9.13	68.93	2.41	3.91	1.34	14.21	104.10	118.31
16-mai-91	7.0	129.5	0.55	0.28	0.14	0.43	1.28	0.09	0.07	0.04	1.41	1.48	11.06	3.44	5.50	9.98	78.08	3.05	4.34	2.06	22.27	117.52	139.79
13-jan-92	7.2	54.8	0.16	0.12	0.06	0.15	0.47	0.02	0.01	ND	0.50	0.50	3.23	1.48	2.39	3.50	28.68	0.57	0.62	ND	13.14	40.46	53.60
10-fév-92	7.2	54.2	0.16	0.12	0.07	0.16	0.45	0.02	0.02	0.01	0.51	0.49	2.71	1.44	2.78	3.75	27.15	0.78	1.12	0.29	11.56	40.00	51.56
08-jun-92	7.7	111.0	0.41	0.17	0.14	0.42	1.00	0.09	0.02	0.05	1.14	1.15	8.18	2.12	5.28	9.68	61.02	3.05	1.24	2.16	18.21	92.72	110.93
20-jul-92	7.4	58.6	0.14	0.11	0.06	0.18	0.49	0.02	ND	0.01	0.48	0.52	3.51	1.33	2.46	4.07	29.90	0.78	ND	0.48	14.84	42.53	57.37
24-aoû-92	7.2	42.0	0.13	0.08	0.06	0.11	0.34	0.02	ND	ND	0.38	0.36	2.55	1.00	2.27	2.42	20.75	0.67	ND	ND	12.45	29.65	42.10
28-sep-92	7.0	42.0	0.13	0.08	0.04	0.12	0.31	0.01	0.02	0.02	0.36	0.36	2.45	0.94	1.60	2.67	18.92	0.50	1.12	0.72	13.01	28.90	41.91
12-oct-92	7.1	42.0	0.12	0.08	0.04	0.11	0.32	0.01	0.02	0.01	0.35	0.36	2.70	1.02	1.41	2.44	19.53	0.43	0.99	0.34	13.27	28.84	42.11
19-oct-92	6.9	42.7	0.13	0.09	0.03	0.11	0.37	0.01	ND	ND	0.36	0.38	2.85	1.06	1.33	2.58	22.58	0.39	ND	ND	13.22	30.78	44.00
26-oct-92	6.9	43.3	0.14	0.09	0.03	0.12	0.37	0.01	0.01	0.01	0.39	0.40	2.77	1.07	1.33	2.83	22.58	0.50	0.31	0.38	13.65	31.76	45.41
16-nov-92	7.0	47.1	0.14	0.10	0.04	0.15	0.40	0.01	ND	0.01	0.43	0.41	2.69	1.19	1.56	3.50	24.10	0.32	ND	0.34	13.42	33.70	47.12
28-déc-92	7.3	52.2	0.13	0.12	0.06	0.15	0.45	0.01	ND	ND	0.46	0.46	2.95	1.42	2.19	3.47	27.15	0.46	ND	ND	12.65	37.65	50.30
11-jan-93	7.5	49.0	0.13	0.11	0.06	0.16	0.45	0.02	ND	0.01	0.46	0.48	2.67	1.29	2.35	3.63	27.46	0.82	ND	0.43	10.62	38.64	49.26
21-jun-93	7.3	132.3	0.47	0.23	0.16	0.47	1.13	0.08	0.10	0.02	1.34	1.33	9.44	2.83	6.41	10.88	68.95	2.84	6.26	0.82	23.28	108.43	131.71
19-jul-93	7.3	60.6	0.20	0.15	0.07	0.16	0.57	0.03	0.02	ND	0.58	0.61	3.93	1.85	2.74	3.70	34.78	0.89	1.12	ND	18.14	49.00	67.14
06-sep-93	7.1	34.2	0.11	0.09	0.05	0.07	0.31	0.01	0.01	ND	0.32	0.33	2.12	1.08	2.07	1.59	18.92	0.43	0.62	ND	13.75	26.83	40.58
27-sep-93	7.0	37.2	0.07	0.09	0.04	0.10	0.29	0.01	ND	0.01	0.30	0.30	1.42	1.07	1.68	2.21	17.70	0.28	ND	ND	12.40	24.36	36.76
08-nov-93	7.1	46.4	0.14	0.12	0.05	0.14	0.41	0.02	ND	ND	0.44	0.43	2.71	1.41	1.99	3.13	25.02	0.57	ND	ND	14.47	34.82	49.29
06-déc-93	7.2	41.9	0.12	0.11	0.04	0.17	0.41	0.01	ND	ND	0.44	0.42	2.43	1.39	1.41	3.23	25.02	0.36	ND	ND	12.40	33.82	46.22

annexe 7: analyses chimiques

BANANKORO (NIGER)

DATE	pH	condu 20°	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
17-jul-90	7.1	38.9	0.12	0.11	0.08	0.05	0.30	0.02	0.01	0.01	0.35	0.34	2.38	1.28	3.21	1.06	18.30	0.71	0.62	0.48	3.88	28.03	31.91
07-aoû-90	6.9	30.7	0.09	0.07	0.03	0.07	0.26	ND	0.01	0.01	0.27	0.28	1.84	0.90	1.29	1.70	15.86	ND	0.62	0.48	6.50	22.70	29.20
28-aoû-90	7.6	37.1	0.08	0.07	0.03	0.08	0.23	0.02	ND	ND	0.26	0.25	1.62	0.85	1.06	1.84	14.03	0.67	ND	ND	13.27	20.07	33.34
07-sep-90	7.5	35.8	0.08	0.07	0.05	0.07	0.21	0.03	0.01	ND	0.27	0.25	1.60	0.85	1.92	1.61	12.81	0.89	0.01	ND	11.28	19.69	30.97
18-sep-90	7.5	37.8	0.09	0.08	0.06	0.07	0.27	0.02	0.01	ND	0.30	0.30	1.70	0.97	2.27	1.66	16.47	0.67	0.74	ND	11.38	24.49	35.87
28-sep-90	7.4	36.5	0.08	0.08	0.03	0.07	0.21	0.02	0.02	ND	0.26	0.25	1.60	0.97	1.17	1.61	12.51	0.67	1.49	ND	13.37	20.03	33.40
08-oct-90	7.4	37.8	0.09	0.08	0.03	0.08	0.24	0.02	0.02	ND	0.28	0.27	1.80	0.98	1.17	1.84	14.34	0.78	1.05	ND	12.88	21.97	34.85
18-oct-90	7.5	39.8	0.10	0.08	0.04	0.09	0.24	0.04	0.02	0.02	0.31	0.31	1.90	0.98	1.64	2.12	14.34	1.28	1.05	0.96	15.70	24.27	39.97
28-oct-90	7.4	39.8	0.09	0.07	0.04	0.10	0.23	0.04	0.01	0.02	0.30	0.29	1.80	0.85	1.56	2.19	13.73	1.28	0.74	0.77	14.59	22.92	37.51
08-nov-90	7.4	42.4	0.10	0.08	0.04	0.12	0.27	0.04	0.01	0.02	0.34	0.34	2.02	1.00	1.68	2.69	16.47	1.49	0.87	0.86	15.48	27.08	42.56
19-nov-90	7.5	42.4	0.11	0.08	0.04	0.12	0.30	0.05	0.01	0.02	0.35	0.38	2.10	1.01	1.56	2.78	18.30	1.77	0.87	0.96	15.66	29.36	45.02
29-nov-90	7.4	43.8	0.11	0.09	0.04	0.14	0.35	0.02	ND	ND	0.38	0.37	2.26	1.06	1.56	3.29	21.35	0.78	ND	ND	17.06	30.30	47.36
09-déc-90	7.4	45.1	0.12	0.08	0.06	0.14	0.38	0.03	ND	ND	0.40	0.41	2.44	1.00	2.23	3.20	23.18	0.89	ND	ND	17.80	32.93	50.73
23-déc-90	7.4	45.1	0.12	0.09	0.05	0.14	0.39	0.02	ND	ND	0.40	0.41	2.46	1.05	2.03	3.29	23.79	0.78	ND	ND	16.87	33.40	50.27
06-jan-91	7.5	51.1	0.13	0.09	0.07	0.15	0.40	0.03	0.02	ND	0.44	0.45	2.63	1.11	2.66	3.40	24.40	0.99	1.05	ND	16.84	36.24	53.08
20-jan-91	7.6	53.0	0.15	0.10	0.08	0.17	0.47	0.03	ND	ND	0.50	0.50	3.07	1.26	2.97	3.80	28.67	0.99	ND	ND	16.90	40.76	57.66
03-fév-91	7.5	66.3	0.17	0.13	0.10	0.23	0.62	0.03	0.01	ND	0.62	0.66	3.39	1.54	3.91	5.20	37.82	1.06	0.68	ND	17.31	53.60	70.91
17-fév-91	7.5	59.7	0.17	0.13	0.09	0.17	0.49	0.03	0.02	0.02	0.55	0.55	3.39	1.52	3.52	3.89	29.89	0.99	0.99	0.96	15.04	45.15	60.19
03-mar-91	7.6	65.0	0.18	0.14	0.06	0.18	0.55	0.01	ND	ND	0.57	0.56	3.61	1.69	2.50	4.21	33.55	0.50	ND	ND	16.43	46.05	62.48
17-mar-91	7.8	68.3	0.18	0.14	0.08	0.20	0.59	0.01	0.00	ND	0.60	0.61	3.61	1.69	3.09	4.60	35.99	0.50	0.19	ND	17.11	49.66	66.77
31-mar-91	7.7	74.3	0.20	0.16	0.08	0.20	0.60	0.02	0.01	ND	0.64	0.63	4.01	1.98	2.97	4.60	36.60	0.78	0.56	ND	16.51	51.50	68.01
14-avr-91	7.6	76.9	0.21	0.16	0.08	0.21	0.63	0.03	0.01	ND	0.67	0.67	4.21	1.94	3.25	4.88	38.43	0.99	0.50	ND	15.31	54.19	69.50
21-avr-91	7.6	78.2	0.20	0.16	0.09	0.22	0.61	0.04	0.01	0.01	0.67	0.68	4.07	1.90	3.40	5.06	37.21	1.38	0.74	0.67	17.80	54.43	72.23
05-mai-91	7.6	84.9	0.23	0.17	0.09	0.23	0.66	0.05	0.01	0.02	0.71	0.74	4.55	2.09	3.36	5.18	40.26	1.67	0.87	0.86	16.37	58.84	75.21
19-mai-91	7.5	86.2	0.22	0.18	0.11	0.23	0.68	0.05	ND	0.01	0.74	0.74	4.37	2.21	4.18	5.27	41.48	1.60	ND	0.67	16.27	59.78	76.05
25-mai-91	7.6	57.7	0.16	0.11	0.08	0.16	0.46	0.03	0.01	0.01	0.51	0.51	3.17	1.33	3.28	3.57	28.06	0.99	0.56	0.38	14.31	41.34	55.65
02-jun-91	7.5	54.4	0.16	0.10	0.09	0.16	0.47	0.02	ND	0.01	0.50	0.50	3.11	1.19	3.40	3.70	28.67	0.78	ND	0.38	12.35	41.24	53.59
09-jun-91	7.6	53.0	0.16	0.09	0.10	0.15	0.46	0.02	ND	0.00	0.51	0.48	3.25	1.14	3.79	3.50	28.06	0.67	ND	0.10	16.22	40.51	56.73
16-jun-91	7.5	54.4	0.15	0.10	0.09	0.17	0.50	0.03	0.00	0.02	0.52	0.55	3.03	1.26	3.64	3.84	30.50	0.99	0.25	0.96	15.55	44.47	60.02
23-jun-91	7.4	51.7	0.14	0.09	0.08	0.15	0.45	0.02	ND	ND	0.47	0.47	2.75	1.13	3.28	3.52	27.45	0.57	ND	ND	16.71	38.70	55.41
30-jun-91	7.4	55.7	0.11	0.08	0.13	0.15	0.42	0.05	ND	ND	0.46	0.47	2.10	0.98	4.89	3.36	25.62	1.77	ND	ND	15.67	38.73	54.40
05-jul-91	7.4	43.8	0.11	0.07	0.08	0.12	0.35	0.03	ND	0.01	0.38	0.39	2.10	0.85	3.25	2.85	21.35	0.99	ND	0.67	12.85	32.07	44.92
12-jul-91	7.4	42.4	0.11	0.08	0.08	0.12	0.36	0.03	0.00	0.02	0.38	0.41	2.12	0.97	3.13	2.69	21.96	1.10	0.25	0.86	16.78	33.09	49.87
19-jul-91	7.3	47.7	0.10	0.08	0.07	0.11	0.35	0.03	ND	0.02	0.36	0.40	2.02	0.92	2.78	2.62	21.35	1.06	ND	0.77	16.81	31.53	48.34
26-jul-91	7.2	41.1	0.10	0.08	0.08	0.09	0.31	0.05	0.00	0.01	0.34	0.37	1.92	0.98	3.01	2.00	18.91	1.77	0.25	0.48	13.36	29.33	42.69
02-aoû-91	7.2	37.1	0.09	0.08	0.07	0.09	0.30	0.04	ND	0.01	0.33	0.35	1.80	0.97	2.78	2.05	18.30	1.38	ND	0.48	14.14	27.76	41.90
09-aoû-91	7.3	37.1	0.09	0.08	0.06	0.09	0.30	0.03	ND	0.01	0.32	0.34	1.86	0.98	2.39	2.05	18.30	0.99	ND	0.58	14.19	27.15	41.34
16-aoû-91		34.5	0.09	0.08	0.06	0.08	0.29	0.03	ND	0.00	0.31	0.32	1.72	0.95	2.42	1.91	17.69	0.99	ND	0.14	13.55	25.83	39.38
23-aoû-91	7.2	35.4	0.09	0.08	0.06	0.08	0.29	0.02	ND	ND	0.31	0.31	1.82	0.97	2.23	1.82	17.69	0.74	ND	ND	12.95	25.28	38.23
30-aoû-91	7.1	35.8	0.09	0.08	0.04	0.06	0.29	0.01	ND	ND	0.28	0.30	1.80	1.02	1.68	1.47	17.69	0.39	ND	ND	12.55	24.06	36.61
06-sep-91	7.1	35.1	0.09	0.09	0.05	0.07	0.30	0.01	ND	ND	0.30	0.31	1.82	1.12	1.80	1.59	18.30	0.35	ND	ND	13.93	24.98	38.91
13-sep-91	7.2	33.2	0.09	0.09	0.04	0.08	0.29	0.02	ND	0.01	0.30	0.32	1.72	1.09	1.64	1.77	17.69	0.71	ND	0.48	11.09	25.11	36.20
20-sep-91	7.2	33.2	0.09	0.09	0.04	0.08	0.29	0.02	ND	0.01	0.30	0.32	1.80	1.11	1.52	1.82	17.69	0.71	ND	0.58	11.57	25.23	36.80
27-sep-91	7.2	33.2	0.09	0.09	0.04	0.08	0.30	0.01	ND	ND	0.29	0.31	1.72	1.06	1.49	1.79	18.30	0.39	ND	ND	10.76	24.75	35.51
04-oct-91	7	35.1	0.09	0.09	0.04	0.09	0.32	0.01	0.00	0.00	0.31	0.33	1.86	1.13	1.41	2.02	19.52	0.50	ND	ND	12.16	26.44	38.60
11-oct-91	7	37.1	0.09	0.09	0.04	0.09	0.34	0.01	0.00	0.00	0.31	0.34	1.86	1.06	1.56	2.12	20.44	0.28	ND	ND	12.26	27.32	39.58
18-oct-91	7.1	34.5	0.09	0.09	0.04	0.09	0.32	0.01	ND	ND	0.31	0.33	1.80	1.08	1.41	2.14	19.52	0.28	ND	ND	11.74	26.24	37.98
28-oct-91	7.3	38.5	0.11	0.10	0.04	0.12	0.35	0.02	ND	ND	0.36	0.37	2.14	1.15	1.49	2.76	21.35	0.67	ND	ND	13.23	29.57	42.80
08-nov-91	7.3	38.5	0.11	0.10	0.04	0.13	0.37	0.01	ND	ND	0.37	0.38	2.14	1.15	1.45	2.99	22.27	0.39	ND	ND	14.92	30.39	45.31
19-nov-91	7.1	39.1	0.10	0.10	0.03	0.13	0.35	0.03	ND	ND	0.36	0.38	2.08	1.15	1.33	2.99	21.05	1.17	ND	ND	14.84	29.77	44.61
25-nov-91	7.2	42.4	0.12	0.10	0.04	0.14	0.40	0.01	ND	ND	0.39	0.41	2.30	1.20	1.41	3.15	24.40	0.39	ND	ND	15.29	32.87	48.16
02-déc-91	7.2	44.4	0.12	0.10	0.04	0.14	0.41	0.01	ND	ND	0.40	0.42	2.38	1.22	1.49	3.20	25.01	0.50	ND	ND	15.39	33.79	49.18
07-jan-92	7.7	47.5	0.13	0.08	0.03	0.17	0.41	0.02	ND	0.01	0.42	0.43	2.67	1.00	1.33	3.82	24.71	0.57	ND	0.48	16.08	34.58	50.66
03-mar-92	7.6	57.9	0.16	0.10	0.05	0.20	0.50	0.02	ND	ND	0.51	0.52	3.25	1.25	1.76	4.62	30.51	0.57	ND	ND	17.64	41.96	59.60
05-mai-92	7.5	75.8	0.20	0.13	0.06	0.27	0.65	0.03															

annexe 7: analyses chimiques

DATE	pH	condu 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
04-jan-93	7.2	48.2	0.13	0.07	0.03	0.18	0.44	0.01	ND	ND	0.42	0.45	2.65	0.90	1.13	4.14	26.54	0.39	ND	ND	17.86	35.75	53.61
03-mai-93	7.7	57.9	0.19	0.18	0.07	0.10	0.54	0.03	ND	0.01	0.53	0.58	3.73	2.15	2.66	2.37	32.95	1.10	ND	0.62	21.32	45.58	66.90
07-jun-93	7.5	50.0	0.14	0.13	0.06	0.17	0.48	0.02	ND	ND	0.49	0.50	2.75	1.58	2.31	3.80	29.29	0.57	ND	ND	21.13	40.29	61.42
19-jul-93	7.6	57.9	0.16	0.15	0.07	0.18	0.54	0.02	ND	0.01	0.56	0.57	3.25	1.84	2.54	4.21	32.95	0.78	ND	0.38	21.29	45.95	67.24
09-août-93	7.0	37.2	0.07	0.09	0.05	0.13	0.34	0.01	ND	ND	0.33	0.35	1.30	1.05	2.11	2.94	20.44	0.50	ND	ND	14.44	28.34	42.78
13-sep-93	7.1	31.7	0.05	0.09	0.03	0.09	0.27	0.01	ND	ND	0.26	0.28	0.98	1.14	1.06	2.14	16.48	0.46	ND	ND	11.66	22.26	33.92
04-déc-93	7.6	46.9	0.09	0.12	0.03	0.18	0.43	0.09	ND	ND	0.42	0.52	1.86	1.44	1.10	4.19	26.24	0.32	ND	ND	16.67	35.14	51.81
16-avr-94	7.1	77.3	0.24	0.21	0.07	0.14	0.65	0.03	ND	ND	0.65	0.68	4.79	2.53	2.66	3.17	39.66	0.89	ND	ND	20.53	53.70	74.23

DIRE (Niger)

DATE	pH	cond 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
15-déc-90	7.4	47.7	0.11	0.10	0.05	0.14	0.38	0.01	ND	ND	0.40	0.39	2.10	1.26	1.83	3.27	23.18	0.46	ND	ND	13.30	32.10	45.40
06-jan-91	6.9	66.2	0.16	0.24	0.09	0.23	0.57	0.10	ND	0.00	0.72	0.67	3.20	2.90	3.51	5.29	34.77	3.41	ND	0.19	9.99	53.27	63.26
13-jan-91	7.0	65.6	0.16	0.23	0.10	0.23	0.55	0.10	ND	0.01	0.72	0.66	3.20	2.78	3.90	5.29	33.55	3.59	ND	0.29	9.79	52.60	62.39
20-jan-91	7.1	62.2	0.15	0.23	0.09	0.21	0.57	0.09	ND	0.01	0.68	0.66	3.00	2.78	3.51	4.83	34.77	3.02	ND	0.34	9.94	52.25	62.19
27-jan-91	7.0	70.2	0.16	0.24	0.10	0.27	0.55	0.17	ND	0.00	0.77	0.72	3.20	2.90	3.90	6.21	33.55	5.96	ND	0.19	9.86	55.92	65.78
17-fév-91	7.0	63.6	0.15	0.23	0.09	0.23	0.56	0.11	ND	0.00	0.70	0.67	3.00	2.78	3.51	5.29	33.86	3.76	ND	0.19	9.51	52.39	61.90
24-fév-91	7.1	62.2	0.16	0.22	0.09	0.22	0.59	0.10	ND	0.00	0.69	0.69	3.10	2.61	3.59	5.13	35.99	3.41	ND	0.19	11.37	54.02	65.39
03-mar-91	6.9	74.9	0.17	0.24	0.11	0.29	0.62	0.15	ND	0.00	0.81	0.77	3.40	2.90	4.29	6.67	37.82	5.18	ND	0.19	9.88	60.46	70.34
10-mar-91	7.5	66.3	0.19	0.16	0.06	0.23	0.52	0.11	ND	0.01	0.64	0.64	3.72	1.94	2.50	5.24	31.54	3.91	ND	0.62	9.12	49.46	58.58
17-mar-91	7.6	66.3	0.18	0.16	0.06	0.22	0.50	0.09	0.01	0.01	0.62	0.61	3.52	1.91	2.50	5.11	30.50	3.27	0.43	0.62	10.05	47.85	57.90
24-mar-91	7.7	61.2	0.16	0.15	0.06	0.20	0.54	0.07	0.01	0.01	0.56	0.63	3.10	1.83	2.22	4.62	32.64	2.56	0.37	0.62	8.27	47.96	56.23
31-mar-91	7.7	67.6	0.20	0.16	0.06	0.22	0.53	0.08	0.01	0.02	0.64	0.63	3.92	1.96	2.50	5.04	32.33	2.73	0.37	0.72	10.49	49.57	60.06
12-nov-91	7.1	53.0	0.11	0.09	0.05	0.12	0.37	0.02	0.04	ND	0.37	0.43	2.14	1.11	1.99	2.85	22.57	0.64	2.54	ND	13.67	33.85	47.52
18-nov-91	7.1	46.4	0.11	0.10	0.05	0.13	0.37	0.01	0.01	ND	0.38	0.40	2.28	1.15	1.91	2.88	22.57	0.50	0.87	ND	13.84	32.15	45.99
25-nov-91	7.2	45.1	0.12	0.10	0.05	0.13	0.39	0.01	0.00	ND	0.39	0.41	2.30	1.17	1.87	2.97	23.79	0.39	0.25	ND	13.31	32.74	46.05
02-déc-91	7.3	45.1	0.12	0.10	0.05	0.14	0.40	0.01	0.01	ND	0.41	0.42	2.32	1.25	1.95	3.22	24.40	0.39	0.37	ND	14.21	33.90	48.11
09-déc-91	7.3	42.4	0.11	0.10	0.05	0.13	0.37	0.02	0.00	0.01	0.39	0.40	2.12	1.22	1.83	3.08	22.57	0.57	0.25	0.48	13.64	32.12	45.76
16-déc-91	7.4	43.8	0.10	0.11	0.05	0.14	0.40	0.01	ND	ND	0.40	0.41	2.08	1.27	1.91	3.17	24.40	0.25	ND	ND	13.98	33.08	47.06
23-déc-91	7.4	47.7	0.11	0.11	0.06	0.14	0.41	0.01	0.01	0.00	0.42	0.43	2.18	1.34	2.15	3.27	25.01	0.39	0.37	0.19	14.08	34.90	48.98
30-déc-91	7.4	49.1	0.11	0.12	0.06	0.15	0.42	0.01	0.01	0.00	0.44	0.44	2.26	1.39	2.26	3.45	25.62	0.39	0.37	0.19	13.76	35.94	49.70
03-fév-92	8.1	61.8	0.15	0.11	0.06	0.24	0.53	0.02	0.01	0.01	0.55	0.56	2.99	1.30	2.19	5.45	32.34	0.57	0.31	0.48	16.23	45.63	61.86
02-mar-92	7.3	61.2	0.15	0.12	0.06	0.23	0.52	0.02	0.01	0.01	0.56	0.56	3.08	1.44	2.19	5.29	31.73	0.75	0.68	0.29	10.89	45.44	56.33
11-mai-92	7.9	63.2	0.19	0.17	0.07	0.24	0.64	0.03	ND	0.01	0.67	0.67	3.83	2.06	2.66	5.50	38.75	0.99	ND	0.34	9.28	54.12	63.40
15-jun-92	7.1	74.5	0.23	0.17	0.07	0.25	0.66	0.03	ND	0.01	0.71	0.70	4.61	2.02	2.62	5.66	40.27	0.99	ND	0.43	13.01	56.60	69.61
29-jun-92	7.4	75.2	0.25	0.17	0.07	0.23	0.68	0.02	ND	ND	0.71	0.70	4.93	2.06	2.65	5.24	41.49	0.85	ND	ND	12.74	57.23	69.97
27-jul-92	7.8	72.5	0.20	0.14	0.08	0.26	0.57	0.05	0.01	0.02	0.69	0.65	4.03	1.74	3.28	5.98	34.78	1.70	0.56	0.96	12.10	53.03	65.13
17-août-92	6.8	54.8	0.17	0.10	0.06	0.15	0.42	0.03	0.02	0.01	0.48	0.47	3.37	1.26	2.38	3.36	25.63	0.89	1.24	0.43	12.90	38.55	51.45
07-sep-92	6.9	39.5	0.12	0.07	0.03	0.11	0.30	0.02	0.01	ND	0.33	0.33	2.31	0.82	1.33	2.62	18.31	0.64	0.43	ND	13.69	26.45	40.14
05-oct-92	8.2	124.9	0.93	0.16	0.04	0.12	1.21	0.02	0.01	0.01	1.24	1.25	18.70	1.88	1.52	2.67	73.84	0.67	0.50	0.38	13.92	100.16	114.08
12-oct-92	7.5	51.8	0.09	0.08	0.12	0.14	0.32	0.10	0.02	ND	0.44	0.44	1.80	1.02	4.69	3.27	19.53	3.55	1.24	ND	13.20	35.10	48.30
26-oct-92	7.0	44.6	0.13	0.09	0.05	0.13	0.34	0.03	0.01	0.01	0.39	0.38	2.61	1.03	1.76	2.90	20.74	0.99	0.50	0.29	13.72	30.81	44.53
02-nov-92	7.2	45.2	0.14	0.09	0.04	0.14	0.38	0.01	ND	ND	0.40	0.39	2.85	1.08	1.37	3.15	23.18	0.50	ND	ND	13.95	32.12	46.07
21-déc-92	7.2	46.4	0.13	0.10	0.04	0.16	0.39	0.02	0.01	ND	0.42	0.42	2.53	1.17	1.56	3.63	23.79	0.53	0.62	ND	13.63	33.83	47.46
25-jan-93	7.7	51.0	0.15	0.12	0.06	0.20	0.49	0.03	ND	0.01	0.52	0.52	2.91	1.41	2.42	4.53	29.90	0.89	ND	0.34	11.21	42.40	53.61
01-mar-93	7.3	52.3	0.16	0.11	0.06	0.20	0.48	0.03	0.02	0.01	0.53	0.54	3.15	1.35	2.46	4.65	28.99	1.21	1.24	0.48	13.44	43.52	56.96
26-avr-93	7.6	76.1	0.24	0.17	0.11	0.28	0.72	0.06	0.01	0.01	0.79	0.80	4.83	2.01	4.11	6.42	42.93	2.20	0.43	0.34	11.24	63.26	74.50
10-mai-93	7.9	63.2	0.19	0.17	0.10	0.20	0.60	0.03	0.00	0.01	0.66	0.64	3.82	2.04	2.65	5.50	38.74	0.99	0.00	0.34	9.28	54.08	63.36
21-jun-93	7.5	79.0	0.27	0.20	0.08	0.25	0.76	0.04	ND	0.01	0.79	0.81	5.35	2.43	3.05	5.68	46.38	1.42	ND	0.34	16.66	64.64	81.30
02-jul-93	7.5	74.9	0.28	0.14	0.09	0.26	0.73	0.04	ND	0.01	0.76	0.78	5.51	1.68	3.36	5.89	44.55	1.49	ND	0.29	17.26	62.76	80.02
19-jul-93	7.5	67.1	0.23	0.16	0.06	0.22	0.65	0.02	0.01	ND	0.68	0.68	4.57	1.93	2.50	5.15	39.66	0.75	0.62	ND	16.95	55.18	72.13
13-sep-93	7.1	32.9	0.07	0.08	0.05	0.16	0.31	0.02	ND	0.02	0.36	0.34	1.44	0.99	1.84	3.75	18.61	0.75	ND	0.77	13.44	28.14	41.58
11-oct-93	6.9	36.3	0.07	0.09	0.04	0.12	0.32	0.01	ND	0.01	0.32	0.34	1.46	1.07	1.64	2.67	19.53	0.28	ND	0.38	12.10	27.04	39.14
25-oct-93	7.1	40.1	0.10	0.10	0.05	0.13	0.38	0.01	ND	ND	0.37	0.38	1.92	1.24	1.92	2.92	22.88	0.28	ND	ND	12.99	31.17	44.16
08-nov-93	6.8	39.5	0.08	0.10	0.04	0.12	0.35	0.01	ND	ND	0.35	0.36	1.64	1.20	1.68	2.85	21.36	0.28	ND	ND	13.00	29.02	42.02
13-déc-93	6.8	52.4	0.10	0.11	0.05	0.19	0.38	0.03	ND	0.04	0.44	0.45	1.92	1.30									

annexe 7:analyses chimiques

DOUNA (BANI)

DATE	pH	cond. 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
19-jul-90	7.1	71.7	0.12	0.11	0.08	0.05	0.29	0.02	0.01	0.01	0.35	0.33	2.38	1.28	3.21	1.06	17.69	0.71	0.62	0.48	9.12	27.42	36.54
08-aoû-90	6.9	29.9	0.08	0.06	0.06	0.06	0.21	0.03	0.04	0.01	0.26	0.29	1.68	0.69	2.23	1.47	12.81	1.06	2.48	0.48	5.36	22.91	28.27
28-aoû-90	7.0	31.0	0.11	0.07	0.05	0.10	0.31	0.02	ND	0.01	0.33	0.34	2.24	0.81	1.88	2.37	18.91	0.71	ND	0.48	9.39	27.40	36.79
18-sep-90	7.0	36.4	0.11	0.07	0.04	0.09	0.30	0.01	ND	0.01	0.31	0.32	2.14	0.80	1.64	2.14	18.30	0.35	ND	0.48	8.45	25.86	34.31
08-oct-90	7.0	45.0	0.11	0.07	0.04	0.11	0.34	0.01	0.01	0.01	0.32	0.37	2.20	0.84	1.49	2.44	20.74	0.35	0.62	0.48	7.82	29.16	36.98
28-oct-90	7.1	41.6	0.13	0.09	0.04	0.12	0.39	0.01	0.01	0.01	0.37	0.42	2.51	1.03	1.56	2.65	23.79	0.35	0.62	0.48	8.09	32.99	41.08
17-nov-90	7.2	39.9	0.13	0.10	0.04	0.12	0.43	0.01	0.01	0.01	0.40	0.46	2.69	1.25	1.60	2.76	26.23	0.35	0.62	0.48	12.48	35.99	48.47
09-déc-90	7.1	44.5	0.14	0.12	0.05	0.14	0.45	0.01	0.01	0.01	0.45	0.48	2.83	1.48	1.84	3.29	27.45	0.35	0.62	0.48	11.64	38.34	49.98
06-jan-91	7.5	64.5	0.18	0.20	0.05	0.15	0.57	0.02	ND	ND	0.59	0.59	3.69	2.38	2.11	3.47	34.77	0.78	ND	ND	14.49	47.20	61.69
20-jan-91	7.7	66.5	0.20	0.22	0.06	0.16	0.66	0.03	0.03	ND	0.64	0.72	3.99	2.71	2.42	3.59	40.26	0.89	1.86	ND	14.49	55.72	70.21
03-fév-91	7.6	76.6	0.21	0.25	0.06	0.15	0.66	0.02	0.01	ND	0.66	0.69	4.15	2.98	2.19	3.54	40.26	0.78	0.31	ND	14.11	54.21	68.32
17-fév-91	7.6	77.9	0.22	0.28	0.06	0.16	0.72	0.03	ND	ND	0.71	0.75	4.31	3.36	2.39	3.66	43.92	0.89	ND	ND	13.46	58.51	71.97
03-mar-91	7.7	81.3	0.24	0.30	0.07	0.18	0.76	0.03	ND	0.01	0.78	0.80	4.75	3.66	2.54	4.05	46.36	0.99	ND	0.58	12.24	62.93	75.17
13-mar-91	7.7	88.0	0.25	0.34	0.07	0.18	0.80	0.03	0.01	ND	0.83	0.84	4.93	4.08	2.70	4.21	48.80	1.10	0.50	ND	11.18	66.32	77.50
27-mar-91	7.8	96.7	0.27	0.36	0.07	0.19	0.87	0.03	0.01	ND	0.90	0.91	5.45	4.34	2.89	4.46	53.07	1.13	0.68	ND	10.22	72.03	82.25
10-avr-91	7.9	106.1	0.28	0.36	0.08	0.21	0.94	0.02	ND	ND	0.93	0.96	5.63	4.33	3.21	4.76	57.34	0.78	ND	ND	7.69	76.05	83.74
19-avr-91	7.9	112.1	0.28	0.36	0.09	0.22	1.00	0.03	0.01	ND	0.94	1.04	5.67	4.32	3.52	4.95	61.00	0.99	0.62	ND	7.10	81.06	88.16
03-mai-91	7.9	122.2	0.30	0.34	0.10	0.23	1.00	0.03	0.01	ND	0.97	1.04	5.97	4.13	3.83	5.36	61.00	0.99	0.62	ND	5.90	81.91	87.81
17-mai-91	7.9	130.3	0.30	0.33	0.11	0.25	1.05	0.03	0.01	ND	0.98	1.08	6.05	4.01	4.18	5.64	64.05	0.99	0.31	ND	12.46	85.23	97.69
25-mai-91	7.9	130.3	0.30	0.34	0.11	0.25	1.04	0.03	0.01	0.01	1.00	1.08	6.05	4.13	4.14	5.75	63.44	0.99	0.31	0.48	13.05	85.30	98.35
01-jun-91	7.9	130.3	0.31	0.34	0.11	0.26	1.04	0.03	ND	ND	1.01	1.07	6.13	4.12	4.26	5.89	63.44	0.99	ND	ND	11.69	84.84	96.53
08-jun-91	7.8	92.7	0.27	0.29	0.14	0.16	0.82	0.03	0.02	ND	0.86	0.87	5.47	3.57	5.36	3.57	50.02	0.99	1.05	ND	11.09	70.03	81.12
15-jun-91	7.7	75.9	0.23	0.24	0.12	0.12	0.66	0.03	0.02	0.01	0.72	0.71	4.63	2.94	4.85	2.83	39.96	0.99	1.05	0.48	9.96	57.73	67.69
22-jun-91	7.6	81.9	0.23	0.24	0.13	0.14	0.65	0.07	0.02	0.01	0.74	0.76	4.65	2.89	5.20	3.13	39.65	2.59	1.49	0.48	7.96	60.08	68.04
29-jun-91	7.6	65.1	0.19	0.21	0.11	0.11	0.57	0.04	0.01	0.02	0.63	0.65	3.87	2.54	4.42	2.60	34.77	1.49	0.87	0.96	5.06	51.51	56.57
30-jun-91	7.7	60.4	0.19	0.20	0.12	0.07	0.52	0.03	ND	0.01	0.58	0.56	3.71	2.48	4.54	1.63	31.72	1.21	ND	0.38	3.67	45.67	49.34
07-jul-91	7.6	18.8	0.18	0.18	0.13	0.06	0.48	0.05	ND	0.01	0.55	0.54	3.59	2.22	5.08	1.29	29.28	1.84	ND	0.48	7.14	43.79	50.93
14-jul-91	7.4	59.3	0.16	0.16	0.10	0.06	0.43	0.05	0.01	0.01	0.48	0.50	3.25	1.94	3.71	1.38	26.23	1.77	0.31	0.58	7.16	39.17	46.33
22-jul-91	7.3	91.1	0.13	0.12	0.09	0.05	0.35	0.03	0.01	ND	0.38	0.39	2.51	1.40	3.56	1.22	21.35	0.99	0.68	ND	5.71	31.70	37.41
30-jul-91	7.3	88.5	0.08	0.07	0.07	0.04	0.22	0.03	0.01	0.01	0.25	0.27	1.52	0.83	2.58	0.92	13.42	1.06	0.37	0.58	3.87	21.28	25.15
06-aoû-91	7.1	174.6	0.06	0.06	0.05	0.03	0.20	0.02	ND	ND	0.20	0.22	1.22	0.68	2.03	0.78	12.20	0.67	ND	ND	4.29	17.59	21.88
13-aoû-91	7.2	83.4	0.09	0.08	0.06	0.07	0.26	0.03	0.02	ND	0.30	0.31	1.78	0.95	2.23	1.68	15.86	1.13	1.05	ND	7.32	24.69	32.01
20-aoû-91	7.2	75.0	0.09	0.08	0.06	0.08	0.27	0.03	0.02	ND	0.29	0.31	1.76	0.91	2.15	1.75	16.47	0.99	0.99	ND	8.69	25.03	33.72
27-aoû-91	7.2	44.3	0.10	0.08	0.06	0.09	0.30	0.03	ND	ND	0.33	0.33	2.00	0.97	2.19	2.12	18.30	1.06	ND	ND	9.60	26.65	36.25
03-sep-91	7.2	46.9	0.09	0.08	0.06	0.08	0.29	0.03	ND	ND	0.31	0.32	1.88	0.94	2.23	1.86	17.69	0.99	ND	ND	8.97	25.59	34.56
10-sep-91	7.2	33.2	0.12	0.09	0.06	0.10	0.34	0.03	0.02	0.02	0.37	0.41	2.38	1.12	2.19	2.28	20.74	1.06	0.99	0.96	11.24	31.73	42.97
17-sep-91	7.4	36.7	0.12	0.10	0.05	0.11	0.34	0.03	0.01	0.02	0.38	0.40	2.46	1.15	1.99	2.44	20.74	0.99	0.87	0.96	12.15	31.61	43.76
25-sep-91	7.2	44.5	0.14	0.10	0.06	0.12	0.38	0.03	0.01	0.02	0.43	0.44	2.81	1.24	2.31	2.85	23.18	0.99	0.87	0.96	11.50	35.21	46.71
02-oct-91	7.3	6.7	0.14	0.11	0.05	0.12	0.42	0.02	ND	ND	0.42	0.44	2.85	1.33	1.92	2.83	25.62	0.57	ND	ND	14.68	35.10	49.78
09-oct-91	7.5	50.4	0.14	0.10	0.05	0.13	0.43	0.02	ND	ND	0.43	0.45	2.85	1.26	2.07	2.94	26.23	0.60	ND	ND	14.45	35.96	50.41
16-oct-91	7.4	49.1	0.14	0.10	0.05	0.12	0.40	0.02	ND	ND	0.41	0.42	2.71	1.24	1.92	2.78	24.40	0.53	ND	ND	14.84	33.58	48.42
23-oct-91	7.0	52.4	0.13	0.10	0.05	0.13	0.40	0.01	ND	ND	0.40	0.41	2.61	1.18	1.88	2.94	24.40	0.46	ND	ND	15.28	33.47	48.75
30-oct-91	7.4	51.7	0.14	0.11	0.05	0.14	0.43	0.02	0.00	0.01	0.43	0.46	2.73	1.29	1.96	3.17	26.23	0.71	0.25	0.48	15.77	36.81	52.58
06-nov-91	7.5	49.7	0.13	0.11	0.05	0.14	0.41	0.01	ND	0.01	0.42	0.43	2.65	1.31	1.92	3.11	25.01	0.35	ND	0.48	15.32	34.82	50.14
14-nov-91	7.4	52.4	0.14	0.12	0.05	0.14	0.44	0.02	0.00	0.01	0.44	0.47	2.77	1.40	1.96	3.15	26.84	0.71	0.25	0.48	15.57	37.55	53.12
21-nov-91	7.5	53.7	0.15	0.13	0.05	0.13	0.45	0.01	ND	0.01	0.46	0.47	2.91	1.58	1.96	3.08	27.45	0.32	ND	0.29	15.77	37.58	53.35
28-nov-91	7.2	57.0	0.15	0.13	0.05	0.14	0.48	0.01	ND	ND	0.47	0.49	3.03	1.58	1.99	3.15	29.28	0.28	ND	ND	16.04	39.32	55.36
05-déc-91	7.3	58.3	0.16	0.14	0.05	0.14	0.50	0.01	0.01	0.01	0.50	0.53	3.13	1.71	2.11	3.31	30.50	0.35	0.62	0.48	16.17	42.22	58.39
14-déc-91	7.5	54.4	0.15	0.14	0.05	0.14	0.46	0.01	0.01	0.01	0.48	0.49	2.99	1.74	1.92	3.27	28.06	0.01	ND	0.48	15.89	38.46	54.35
27-déc-91	7.4	57.7	0.15	0.15	0.05	0.14	0.50	0.01	0.01	0.01	0.50	0.53	3.07	1.81	2.07	3.29	30.50	0.01	0.00	0.48	15.51	41.23	56.74
31-déc-91	7.4	58.3	0.16	0.16	0.05	0.15	0.51	0.00	0.01	0.00	0.52	0.53	3.23	1.91	1.99	3.36	31.11	0.07	0.62	0.19	15.42	42.48	57.90
11-fév-92	7.4	66.8	0.20	0.17	0.06	0.17	0.62	0.01	ND	ND	0.60	0.63	4.07	2.01	2.35	3.86	37.53	0.50	ND	ND	12.66	50.31	62.97
23-mai-92	7.8	102.7	0.37	0.33	0.09	0.21	1.00	0.03	ND	ND	0.99	1.03	7.40	3.95	3.60	4.76	61.02	0.89	ND	ND	11.82	81.61	93.43
02-jun-92	7.4	102.0	0.34	0.29	0.12	0.18	0.95	0.03	0.01	ND	0.92	0.98	6.85	3.48	4.50	4.03	57.66	0.89	0.68	ND	13.48	78.09	91.57
15-jun-9																							

annexe 7:analyses chimiques

DATE	pH	cond. 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
25-jan-93	7.9	59.2	0.19	0.20	0.06	0.17	0.60	0.03	ND	0.01	0.62	0.64	3.87	2.43	2.27	3.93	36.61	0.96	ND	0.38	15.36	50.45	65.81
03-mai-93	7.6	102.2	0.37	0.34	0.10	0.23	1.02	0.03	ND	0.01	1.04	1.05	7.44	4.15	3.87	5.29	62.24	0.99	ND	0.29	14.36	84.26	98.62
21-jun-93	7.4	131.7	0.51	0.41	0.13	0.28	1.28	0.03	ND	0.02	1.32	1.32	10.22	4.94	4.97	6.44	78.11	1.03	ND	0.72	17.67	106.42	124.09
05-jul-93	7.8	123.8	0.50	0.37	0.12	0.25	1.24	0.03	ND	ND	1.24	1.27	9.98	4.52	4.61	5.82	75.67	1.03	ND	ND	17.47	101.63	119.10
22-aoû-93	7.4	33.0	0.08	0.08	0.07	0.06	0.27	0.02	0.00	0.01	0.28	0.29	1.56	1.01	2.58	1.31	16.48	0.57	ND	0.29	8.10	23.80	31.90
20-sep-93	7.5	34.2	0.11	0.09	0.05	0.09	0.32	0.01	ND	ND	0.34	0.33	2.18	1.07	1.92	2.07	19.53	0.28	ND	ND	14.88	27.05	41.93
18-oct-93	7.2	41.4	0.10	0.11	0.05	0.13	0.39	0.01	ND	ND	0.39	0.40	2.08	1.35	1.99	2.88	23.80	0.28	ND	ND	14.50	32.39	46.89
31-oct-93	6.7	48.2	0.11	0.13	0.05	0.14	0.43	0.01	ND	ND	0.42	0.44	2.22	1.58	1.84	3.11	26.24	0.36	ND	ND	14.84	35.34	50.18
10-jan-94	7.0	63.5	0.15	0.19	0.05	0.18	0.57	0.01	ND	0.01	0.57	0.60	3.03	2.30	2.11	4.05	34.78	0.50	ND	0.58	14.60	47.34	61.94
25-avr-94	7.1	101.8	0.37	0.34	0.09	0.24	0.98	0.05	0.01	ND	1.03	1.04	7.36	4.10	3.44	5.57	59.50	1.88	0.74	ND	13.72	82.58	96.30

KARA (Diaka)

DATE	pH	onduc 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation mé/l	Anion mé/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	dissous mg/l
Aou-90	7.1	40.1	0.10	0.12	0.08	0.12	0.36	0.05	ND	0.05	0.42	0.45	2.09	1.44	3.16	2.76	21.66	1.60	ND	2.16	11.93	34.86	46.79
12-sep-90	7.2	38.3	0.09	0.10	0.10	0.12	0.37	0.08	ND	0.00	0.41	0.45	1.86	1.17	3.90	2.85	22.57	2.66	ND	0.14	13.61	35.16	48.77
14-sep-90	7.2	38.3	0.08	0.10	0.09	0.12	0.31	0.07	ND	0.00	0.39	0.38	1.68	1.15	3.51	2.76	18.91	2.31	ND	0.19	14.92	30.51	45.43
07-oct-90	7.2	31.6	0.09	0.10	0.06	0.11	0.30	0.04	ND	0.01	0.36	0.35	1.74	1.25	2.22	2.51	18.30	1.53	ND	0.24	14.30	27.78	42.08
25-oct-90	7.1	32.8	0.08	0.11	0.05	0.11	0.31	0.03	ND	0.00	0.35	0.35	1.60	1.28	1.99	2.53	18.91	1.21	ND	0.14	15.02	27.66	42.68
31-oct-90	7.1	33.5	0.08	0.10	0.05	0.12	0.31	0.04	ND	0.00	0.36	0.35	1.54	1.26	2.07	2.81	18.91	1.31	ND	0.19	15.21	28.09	43.30
30-nov-90	7.0	40.8	0.09	0.11	0.10	0.14	0.35	0.08	ND	0.00	0.44	0.43	1.78	1.33	3.90	3.22	21.35	2.80	ND	0.19	14.96	34.58	49.54
15-déc-90	7.2	48.4	0.13	0.16	0.09	0.17	0.47	0.07	ND	0.00	0.56	0.54	2.52	1.97	3.67	3.98	28.67	2.45	ND	0.19	14.94	43.45	58.39
10-jan-91	7.1	46.3	0.12	0.16	0.08	0.16	0.45	0.05	ND	0.00	0.52	0.51	2.40	1.94	3.12	3.68	27.45	1.88	ND	0.19	14.99	40.66	55.65
10-fév-91	7.3	115.3	0.30	0.36	0.14	0.45	0.84	0.37	ND	0.02	1.25	1.23	5.92	4.36	5.46	10.35	51.24	12.99	ND	1.01	13.77	91.33	105.10
20-fév-91	7.1	107.0	0.31	0.38	0.14	0.35	0.85	0.23	0.02	0.01	1.18	1.10	6.20	4.60	5.46	8.03	51.55	7.99	1.43	0.43	12.65	85.68	98.33
28-fév-91	7.6	93.7	0.28	0.43	0.14	0.30	0.86	0.14	ND	0.02	1.15	1.01	5.60	5.25	5.62	6.79	52.46	4.86	ND	0.77	13.57	81.34	94.91
08-fév-92	8.2	116.0	0.16	0.11	0.11	0.27	0.60	0.10	0.01	0.01	0.65	0.71	3.17	1.34	4.26	6.23	36.61	3.51	0.31	0.36	14.19	55.80	69.99
22-jun-92	7.4	57.3	0.18	0.11	0.05	0.17	0.50	0.03	0.01	0.01	0.51	0.53	3.51	1.33	2.11	3.91	30.21	0.89	0.31	0.38	15.23	42.64	57.87
29-jun-92	7.4	54.8	0.17	0.11	0.05	0.18	0.48	0.02	ND	0.01	0.50	0.51	3.35	1.29	1.92	4.19	28.99	0.78	ND	0.38	13.55	40.89	54.44
17-aoû-92	7.1	38.2	0.10	0.06	0.04	0.11	0.30	0.01	0.01	0.01	0.31	0.32	2.00	0.73	1.45	2.60	18.00	0.39	0.50	0.48	14.31	26.15	40.46
07-sep-92	7.1	34.5	0.05	0.07	0.04	0.12	0.26	0.02	0.01	0.01	0.27	0.30	1.00	0.83	1.49	2.71	15.56	0.71	0.87	0.67	13.06	23.84	36.90
14-sep-92	6.6	23.8	0.07	0.04	0.02	0.03	0.15	0.01	0.02	ND	0.16	0.18	1.40	0.50	0.90	0.69	8.85	0.50	1.43	ND	4.10	14.26	18.36
21-sep-92	6.9	38.2	0.11	0.06	0.04	0.11	0.28	0.02	0.02	0.02	0.32	0.33	2.18	0.78	1.56	2.51	16.78	0.67	1.30	0.82	12.25	26.61	38.86
28-sep-92	7.0	35.0	0.10	0.06	0.03	0.10	0.28	0.01	ND	ND	0.29	0.29	2.06	0.75	1.06	2.25	17.09	0.39	ND	ND	13.32	23.60	36.92
12-oct-92	7.0	35.0	0.10	0.06	0.03	0.10	0.28	0.01	ND	ND	0.29	0.29	2.87	0.85	1.60	2.62	18.61	0.89	1.61	ND	14.35	29.05	43.40
16-nov-92	7.1	37.0	0.10	0.07	0.02	0.12	0.31	0.01	ND	ND	0.30	0.31	1.96	0.82	0.67	21.71	18.61	0.32	ND	ND	15.31	44.09	59.40
07-déc-92	7.6	36.1	0.10	0.08	0.03	0.13	0.34	0.02	ND	ND	0.34	0.36	2.08	0.95	1.17	3.01	20.75	0.57	ND	ND	15.31	28.53	43.84
28-déc-92	7.0	52.2	0.14	0.09	0.04	0.17	0.44	0.03	ND	0.01	0.44	0.47	2.83	1.09	1.68	3.91	26.54	0.89	ND	0.38	14.81	37.33	52.14
16-jun-93	7.1	64.5	0.20	0.14	0.08	0.21	0.54	0.04	0.03	ND	0.63	0.61	3.97	1.74	3.01	4.78	32.95	1.45	1.61	ND	19.06	49.52	68.58
05-jul-93	7.3	56.6	0.19	0.14	0.05	0.20	0.55	0.02	ND	0.01	0.58	0.58	3.77	1.70	2.11	4.60	33.56	0.71	ND	0.29	18.98	46.74	65.72
30-aoû-93	6.7	38.6	0.11	0.09	0.05	0.19	0.40	0.02	ND	ND	0.44	0.42	2.14	1.08	1.96	4.46	24.41	0.78	ND	1.44	16.77	36.27	53.04
27-sep-93	7.0	33.8	0.07	0.08	0.04	0.11	0.30	0.01	ND	ND	0.30	0.31	1.36	1.01	1.64	2.51	18.31	0.50	ND	ND	13.70	25.32	39.02
11-oct-93	7.3	33.1	0.07	0.09	0.05	0.12	0.31	0.02	ND	ND	0.31	0.32	1.34	1.06	1.76	2.65	18.61	0.67	ND	ND	14.21	26.09	40.30
15-nov-93	7.3	41.3	0.05	0.09	0.03	0.12	0.30	0.01	ND	ND	0.29	0.31	0.92	1.03	1.21	2.83	18.31	0.36	ND	ND	14.70	24.66	39.36
03-jan-94	6.9	56.7	0.13	0.13	0.07	0.17	0.30	0.03	0.11	0.02	0.50	0.46	2.69	1.56	2.62	3.89	18.31	1.03	7.01	1.06	17.44	38.15	55.59

annexe 7: analyses chimiques

KORIENTZE (KOLI-KOLI)

DATE	pH	cond. 20°	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	H4SiO4 mg/l	minér. mg/l	dissous mg/l
23-aoû-90	7.1	65.6	0.19	0.22	0.10	0.16	0.58	0.05	ND	0.00	0.67	0.63	3.80	2.66	3.90	3.68	35.38	1.60	ND	0.14	19.95	51.16	71.12
19-sep-90	7.0	48.8	0.15	0.18	0.08	0.10	0.46	0.03	ND	0.00	0.51	0.49	3.00	2.18	3.12	2.25	28.06	1.07	ND	0.14	17.84	39.82	57.66
17-oct-90	7.1	59.5	0.16	0.18	0.09	0.15	0.56	0.09	ND	0.00	0.58	0.65	3.20	2.18	3.51	3.45	34.16	3.16	ND	0.14	20.22	49.80	70.03
16-nov-90	7.0	73.6	0.25	0.22	0.14	0.17	0.58	0.12	ND	0.00	0.78	0.70	5.00	2.66	5.46	3.91	35.38	4.26	ND	0.14	23.28	56.82	80.10
25-déc-90	7.1	60.2	0.17	0.21	0.11	0.14	0.53	0.05	ND	0.00	0.63	0.57	3.40	2.54	4.29	3.22	32.03	1.63	ND	0.14	24.06	47.26	71.32
1-25-Jan-91	6.8	60.2	0.18	0.22	0.12	0.17	0.58	0.07	ND	0.00	0.68	0.65	3.61	2.65	4.64	3.82	35.48	2.38	ND	0.14	23.65	52.73	76.37
05-fév-91	7.3	64.2	0.19	0.24	0.10	0.18	0.60	0.04	ND	ND	0.71	0.64	3.80	2.90	3.90	4.14	36.60	1.35	ND	ND	20.74	52.69	73.43
12-fév-91	7.4	66.9	0.20	0.26	0.10	0.19	0.65	0.04	ND	ND	0.75	0.69	4.00	3.15	3.90	4.37	39.65	1.49	ND	ND	20.80	56.56	77.36
19-fév-91	7.1	101.7	0.23	0.29	0.38	0.24	0.65	0.39	ND	0.04	1.14	1.08	4.60	3.51	14.82	5.41	39.65	13.85	ND	1.82	20.88	83.65	104.53
26-fév-91	7.1	72.3	0.22	0.28	0.10	0.21	0.70	0.06	ND	0.01	0.81	0.77	4.40	3.39	3.90	4.83	42.70	2.27	ND	0.38	19.20	61.87	81.07
05-mar-91	7.1	74.9	0.23	0.29	0.11	0.22	0.58	0.07	ND	0.01	0.85	0.65	4.60	3.51	4.29	5.06	35.38	2.38	ND	0.24	19.44	55.46	74.90
12-mar-91	7.5	67.3	0.25	0.20	0.09	0.23	0.73	0.05	ND	0.01	0.76	0.78	5.04	2.40	3.39	5.20	44.35	1.60	ND	0.53	16.42	62.50	78.92
19-mar-91	7.5	69.3	0.24	0.19	0.10	0.26	0.76	0.07	0.01	0.01	0.79	0.78	4.80	2.27	3.71	6.03	46.06	2.31	0.37	0.58	14.02	66.12	80.13
02-avr-91	7.5	73.3	0.28	0.24	0.09	0.24	0.79	0.04	ND	0.01	0.85	0.85	5.68	2.84	3.47	5.59	48.19	1.53	ND	0.67	11.62	67.97	79.59
09-avr-91	7.5	105.2	0.42	0.31	0.13	0.33	1.13	0.09	0.01	0.02	1.19	1.24	8.46	3.80	5.11	7.50	68.63	3.02	0.37	0.91	16.96	97.79	114.75
16-avr-91	7.6	110.0	0.42	0.32	0.14	0.33	1.15	0.07	ND	ND	1.20	1.22	8.30	3.87	5.42	7.48	70.15	2.52	ND	ND	14.82	97.74	112.55
23-avr-91	7.5	173.9	0.68	0.51	0.30	0.48	1.57	0.26	0.08	0.06	1.97	1.96	13.56	6.18	11.58	11.09	95.77	9.23	4.77	2.64	41.81	154.83	196.63
09-jul-91	7.6	120.7	0.27	0.19	0.21	0.33	0.85	0.08	0.06	0.02	1.00	1.02	5.40	2.29	8.03	7.66	51.85	2.98	3.97	0.96	37.94	83.14	121.08
16-jul-91	7.3	109.4	0.22	0.16	0.18	0.33	0.71	0.08	0.10	0.04	0.88	0.92	4.38	1.88	7.14	7.52	43.01	2.77	5.95	1.87	32.53	74.51	107.04
23-jul-91	7.4	87.5	0.20	0.13	0.16	0.26	0.60	0.07	0.04	0.03	0.75	0.75	3.96	1.60	6.20	5.93	36.60	2.49	2.67	1.54	23.82	60.98	84.80
30-jul-91	7.5	92.8	0.23	0.16	0.16	0.24	0.60	0.08	0.08	0.04	0.79	0.80	4.64	1.92	6.05	5.54	36.60	2.88	4.96	1.73	25.73	64.32	90.04
06-aoû-91	7.3		0.22	0.13	0.22	0.41	0.70	0.15	0.11	0.01	0.97	0.97	4.34	1.51	8.70	9.38	42.70	5.18	6.94	0.38	35.36	79.14	114.50
13-aoû-91	7.6	85.5	0.19	0.13	0.15	0.21	0.62	0.11	0.01	0.01	0.68	0.75	3.82	1.54	5.69	4.92	37.82	3.91	0.56	0.48	21.94	58.74	80.67
07-jan-92	7.5	60.5	0.18	0.13	0.07	0.16	0.57	0.02	ND	ND	0.54	0.58	3.57	1.52	2.73	3.75	34.48	0.67	ND	ND	23.70	46.72	70.42
08-jun-92	7.4	72.3	0.07	0.04	0.14	0.43	0.44	0.11	0.06	0.04	0.68	0.65	1.42	0.43	5.51	9.91	26.85	3.97	3.85	1.78	31.22	53.72	84.93
18-aoû-92	7.3	61.2	0.16	0.1	0.08	0.2	0.49	0.04	0.01	0.02	0.55	0.55	3.17	1.27	3.28	4.58	29.60	1.38	0.62	0.72	21.90	44.61	66.51
25-aoû-92	7.3	61.2	0.19	0.12	0.07	0.15	0.5	0.01	0.02	ND	0.53	0.52	3.73	1.40	2.85	3.47	30.21	0.43	0.93	ND	22.24	43.01	65.25
08-sep-92	7.3	58.6	0.16	0.1	0.08	0.19	0.46	0.03	0.02	0.01	0.52	0.52	3.13	1.17	3.01	4.46	27.76	1.17	1.12	0.67	21.22	42.49	63.70
15-oct-92	7.6	44.5	0.15	0.11	0.06	0.12	0.42	0.02	ND	0.01	0.44	0.44	3.09	1.34	2.19	2.74	25.63	0.64	ND	0.29	12.66	35.91	48.56
09-nov-92	7.6	73.9	0.17	0.11	0.16	0.14	0.39	0.1	0.07	0.02	0.57	0.57	3.73	1.35	6.10	3.11	23.49	3.58	4.28	0.82	18.61	46.45	65.06
30-nov-92	6.7	57.3	0.16	0.11	0.07	0.14	0.38	0.03	0.06	0.01	0.49	0.48	3.29	1.36	2.89	3.29	23.49	0.92	3.41	0.62	18.99	39.28	58.27
28-déc-92	7.4	56.1	0.16	0.12	0.07	0.15	0.48	0.02	ND	0.01	0.51	0.51	3.37	1.42	2.85	3.52	28.99	0.64	ND	0.62	19.98	41.41	61.39
18-jan-93	7.5	53.6	0.18	0.13	0.08	0.17	0.53	0.02	ND	0.01	0.56	0.56	3.55	1.61	3.13	3.93	32.34	0.71	ND	0.24	15.87	45.50	61.38
28-jun-93	7.4	177.7	0.41	0.29	0.38	0.6	1.35	0.21	0.11	0.04	1.69	1.71	8.26	3.58	14.98	13.89	82.38	7.31	6.82	1.87	52.48	139.07	191.55
11-oct-93	7.3	43.4	0.1	0.12	0.06	0.11	0.35	0.01	ND	ND	0.38	0.36	2.00	1.41	2.15	2.42	21.36	0.43	ND	ND	14.48	29.76	44.24
25-oct-93	7.3	43.1	0.1	0.12	0.05	0.11	0.37	0.01	ND	ND	0.38	0.38	2.06	1.44	2.03	2.53	22.27	0.36	ND	ND	15.95	30.69	46.64
08-nov-93	7.3	43.1	0.1	0.12	0.05	0.11	0.37	0.01	ND	ND	0.38	0.38	3.13	1.51	2.23	2.78	25.63	0.78	0.56	0.29	11.10	36.90	48.00
15-nov-93	7.3	45.1	0.15	0.12	0.05	0.11	0.41	0.01	ND	0	0.43	0.43	3.05	1.48	1.96	2.53	25.02	0.50	ND	0.48	11.22	35.01	46.23
07-fév-94	7.3	52.8	0.17	0.14	0.06	0.16	0.51	0.01	ND	ND	0.52	0.51	3.33	1.64	2.46	3.57	30.82	0.28	ND	ND	7.85	42.10	49.95

annexe 7: analyses chimiques

Koulikoro (Niger)

DATE	pH	cond. 20°	Cations (méq/l)										Anions (mg/l)										
			Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	Cation	Anion	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	SiO2	minér.	dissous
09-jun-91	7.8	67.6	0.16	0.10	0.07	0.25	0.50	0.04	0.05	0.03	0.59	0.61	3.26	1.26	2.89	5.66	30.50	1.28	3.29	1.20	14.97	49.33	64.30
16-jun-91	7.2	57.0	0.15	0.10	0.08	0.18	0.49	0.03	0.00	0.00	0.50	0.52	2.92	1.21	3.16	4.07	29.89	0.89	0.00	0.00	13.11	42.14	55.25
23-jun-91	7.2	54.4	0.16	0.11	0.08	0.18	0.48	0.03	0.01	0.01	0.52	0.52	3.10	1.33	2.96	4.07	28.98	1.17	0.50	0.38	14.47	42.49	56.96
30-jun-91	7.3	51.7	0.14	0.10	0.11	0.15	0.45	0.03	0.00	0.00	0.50	0.48	2.72	1.22	4.29	3.47	27.45	1.21	0.00	0.00	10.14	40.36	50.50
07-jul-91	7.3	51.7	0.13	0.04	0.07	0.10	0.30	0.01	0.00	0.00	0.34	0.31	2.64	0.48	2.65	2.32	18.30	0.50	0.00	0.00	9.63	26.90	36.53
11-jul-91	7.3	51.7	0.13	0.10	0.10	0.15	0.44	0.03	0.00	0.00	0.49	0.47	2.62	1.26	3.82	3.54	26.84	1.07	0.00	0.00	12.43	39.15	51.58
18-jul-91	7.0	45.7	0.11	0.09	0.09	0.14	0.45	0.02	0.00	0.00	0.43	0.47	2.20	1.14	3.47	3.24	27.15	0.78	0.00	0.00	9.34	37.98	47.32
25-jul-91	7.3	39.8	0.10	0.08	0.08	0.13	0.38	0.03	0.00	0.00	0.40	0.41	2.04	1.00	3.24	3.06	22.88	1.10	0.00	0.00	10.06	33.32	43.38
01-août-91	7.0	42.4	0.09	0.08	0.08	0.12	0.34	0.03	0.00	0.00	0.37	0.36	1.88	0.94	3.08	2.78	20.44	0.96	0.00	0.00	11.14	30.08	41.22
08-août-91	7.2	41.1	0.10	0.07	0.09	0.12	0.35	0.04	0.00	0.00	0.37	0.38	1.90	0.87	3.43	2.74	21.05	1.38	0.00	0.00	11.60	31.37	42.97
15-août-91	7.1	42.4	0.10	0.07	0.07	0.14	0.33	0.03	0.00	0.00	0.38	0.36	1.90	0.87	2.81	3.24	20.13	1.10	0.00	0.00	9.20	30.05	39.25
22-août-91	7.2	35.8	0.09	0.07	0.11	0.11	0.32	0.05	0.00	0.00	0.37	0.37	1.70	0.82	4.21	2.53	19.52	1.67	0.00	0.00	6.90	30.45	37.35
29-août-91	7.3	33.8	0.09	0.07	0.06	0.09	0.29	0.02	0.00	0.00	0.30	0.30	1.70	0.86	2.18	2.09	17.39	0.67	0.00	0.00	6.90	24.90	31.80
06-sep-91	7.2	33.8	0.09	0.07	0.07	0.09	0.29	0.04	0.00	0.01	0.32	0.34	1.84	0.88	2.69	2.07	17.69	1.31	0.00	0.58	6.06	27.06	33.12
15-sep-91	7.1	37.1	0.11	0.08	0.06	0.11	0.32	0.03	0.00	0.01	0.35	0.36	2.14	0.92	2.30	2.46	19.52	1.07	0.25	0.29	4.28	28.94	33.22
23-sep-91	7.1	38.5	0.11	0.07	0.06	0.11	0.32	0.03	0.01	0.01	0.34	0.37	2.10	0.88	2.26	2.48	19.52	0.99	0.56	0.67	3.47	29.47	32.94
04-oct-91	7.2	36.5	0.10	0.08	0.05	0.12	0.32	0.02	0.00	0.00	0.34	0.34	1.96	0.92	2.03	2.71	19.52	0.71	0.00	0.00	2.66	27.85	30.51
11-oct-91	7.2	34.5	0.10	0.08	0.05	0.11	0.30	0.03	0.01	0.02	0.34	0.36	1.94	0.91	2.11	2.60	18.00	1.17	0.74	0.96	1.78	28.42	30.20
19-oct-91	7.2	37.8	0.10	0.07	0.06	0.14	0.31	0.05	0.02	0.02	0.38	0.39	2.02	0.90	2.46	3.27	18.61	1.78	0.99	0.96	14.70	30.97	45.67
26-oct-91	7.3	37.1	0.10	0.08	0.06	0.13	0.34	0.03	0.01	0.02	0.37	0.39	2.04	0.92	2.15	3.06	20.44	0.96	0.68	0.96	14.86	31.20	46.06
02-nov-91	7.3	36.5	0.10	0.08	0.05	0.13	0.34	0.02	0.01	0.02	0.36	0.38	2.04	0.96	1.87	3.01	20.44	0.78	0.56	0.77	14.78	30.42	45.20
10-nov-91	7.3	37.8	0.11	0.08	0.05	0.14	0.34	0.04	0.01	0.02	0.37	0.41	2.16	0.94	1.91	3.15	20.44	1.49	0.74	0.96	14.86	31.80	46.66
20-nov-91	6.8	36.9	0.11	0.07	0.03	0.13	0.34	0.01	0.01	0.01	0.33	0.37	2.14	0.82	1.05	2.90	20.74	0.36	0.62	0.48	12.54	29.11	41.65

annexe 7: analyses chimiques

MACINA (NIGER)

DATE	pH	condu 20'	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	Cation	Anion	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	SiO2	minér. dissous	
			még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
31-jul-90	7.3	42.8	0.11	0.13	0.10	0.13	0.38	0.07	ND	0.01	0.47	0.46	2.24	1.51	3.82	3.06	22.88	2.63	ND	0.34	10.43	36.47	46.90
10-aoû-90	7.3	36.1	0.09	0.10	0.08	0.11	0.33	0.05	ND	0.00	0.38	0.38	1.72	1.25	3.08	2.60	19.83	1.63	ND	0.19	11.55	30.30	41.85
31-aoû-90	7.2	33.7	0.09	0.10	0.07	0.11	0.33	0.03	ND	0.01	0.37	0.36	1.78	1.26	2.77	2.42	19.83	1.21	ND	0.24	13.11	29.49	42.60
10-sep-90	7.3	33.5	0.09	0.10	0.08	0.11	0.33	0.04	ND	0.00	0.37	0.37	1.74	1.16	3.00	2.42	19.83	1.28	ND	0.19	13.38	29.61	42.99
30-sep-90	7.3	36.8	0.10	0.11	0.07	0.12	0.36	0.03	ND	0.00	0.39	0.39	2.04	1.32	2.57	2.69	21.96	0.99	ND	0.19	13.82	31.77	45.59
10-oct-90	7.1	33.5	0.09	0.11	0.06	0.12	0.32	0.04	ND	0.00	0.37	0.36	1.80	1.28	2.34	2.69	19.52	1.38	ND	0.19	13.68	29.21	42.89
10-nov-90	7.0	105.0	0.11	0.14	0.74	0.14	0.35	0.71	0.01	0.02	1.13	1.09	2.16	1.68	28.90	3.20	21.35	25.13	0.74	1.06	14.48	84.22	98.70
31-déc-90	6.6	61.5	0.12	0.15	0.23	0.17	0.42	0.21	0.02	0.01	0.67	0.66	2.40	1.82	8.97	3.93	25.62	7.42	1.30	0.53	14.33	51.99	66.32
10-jan-91	7.1	51.0	0.14	0.16	0.12	0.17	0.43	0.10	ND	0.00	0.59	0.54	2.78	1.94	4.68	3.89	26.23	3.69	ND	0.19	14.56	43.40	57.96
10-fév-91	7.2	46.8	0.14	0.17	0.06	0.18	0.47	0.05	ND	0.00	0.55	0.52	2.74	2.06	2.34	4.14	28.67	1.78	ND	0.14	14.52	41.87	56.39
28-fév-91	7.1	56.2	0.16	0.19	0.08	0.22	0.53	0.02	0.01	0.02	0.65	0.58	3.20	2.30	3.12	5.06	32.33	0.71	0.81	0.77	11.77	48.29	60.06
07-mar-91	7.3	53.6	0.16	0.12	0.04	0.16	0.47	0.03	0.01	0.01	0.49	0.52	3.26	1.45	1.68	3.77	28.37	1.03	0.62	0.62	14.28	40.80	55.08
14-mar-91	7.2	54.8	0.16	0.12	0.05	0.17	0.51	0.04	0.01	0.02	0.49	0.57	3.20	1.48	1.79	3.82	30.81	1.38	0.50	0.82	14.26	43.79	58.05
21-mar-91	7.2	58.7	0.17	0.13	0.05	0.18	0.52	0.04	0.01	0.01	0.53	0.58	3.40	1.55	1.99	4.19	31.42	1.35	0.68	0.53	14.21	45.10	59.31
28-mar-91	7.3	58.7	0.17	0.13	0.05	0.18	0.49	0.04	0.02	0.01	0.53	0.56	3.40	1.52	2.11	4.14	29.59	1.31	1.24	0.62	13.50	43.93	57.43
04-avr-91	7.3	57.4	0.18	0.13	0.06	0.17	0.53	0.04	0.01	0.01	0.53	0.58	3.50	1.55	2.18	3.89	32.33	1.28	0.37	0.48	13.50	45.58	59.08
10-avr-91	7.4	58.0	0.16	0.12	0.05	0.18	0.46	0.06	ND	0.02	0.51	0.55	3.14	1.45	2.07	4.14	28.06	2.27	ND	1.06	14.13	42.19	56.32
20-avr-91	7.4	77.8	0.26	0.17	0.06	0.22	0.65	0.07	0.01	0.02	0.71	0.75	5.20	2.00	2.38	5.11	39.65	2.63	0.37	1.06	11.81	58.39	70.20
30-avr-91	7.4	68.2	0.23	0.15	0.06	0.20	0.61	0.06	0.01	0.03	0.65	0.70	4.66	1.84	2.50	4.69	37.21	2.09	0.37	1.34	13.52	54.71	68.23
02-mai-91	7.1	68.2	0.23	0.14	0.07	0.24	0.58	0.06	0.03	0.01	0.68	0.68	4.66	1.68	2.69	5.47	35.08	2.17	1.67	0.62	15.56	54.05	69.61
10-mai-91	7.4	59.9	0.21	0.13	0.06	0.20	0.54	0.05	0.01	0.01	0.60	0.61	4.26	1.57	2.30	4.60	32.94	1.60	0.43	0.67	17.22	48.38	65.60
23-mai-91	7.8	63.6	0.20	0.11	0.04	0.19	0.51	0.03	0.02	0.02	0.54	0.58	4.08	1.37	1.52	4.30	31.11	1.07	0.99	0.96	16.66	45.40	62.06
06-jun-91	7.9	67.6	0.19	0.12	0.09	0.19	0.54	0.04	0.02	ND	0.59	0.60	3.84	1.50	3.47	4.35	32.94	1.38	0.99	ND	15.50	48.47	63.97
22-aoû-91	7.3	40.4	0.10	0.06	0.04	0.12	0.28	0.03	0.01	ND	0.31	0.32	1.90	0.76	1.60	2.65	17.08	0.89	0.68	ND	11.70	25.56	37.26
29-aoû-91	7.2	37.1	0.10	0.07	0.04	0.11	0.28	0.02	ND	0.01	0.31	0.31	1.94	0.79	1.56	2.51	17.08	0.71	ND	0.67	11.80	25.26	37.06
05-sep-91	7.2	36.5	0.10	0.07	0.04	0.11	0.28	0.01	ND	0.01	0.31	0.30	1.92	0.81	1.56	2.53	17.08	0.36	ND	0.67	10.74	24.93	35.67
12-sep-91	7.4	35.8	0.09	0.06	0.04	0.11	0.26	0.01	0.02	0.00	0.30	0.29	1.84	0.76	1.44	2.51	15.86	0.36	1.36	0.10	11.90	24.23	36.13
19-sep-91	7.5	30.2	0.10	0.07	0.03	0.13	0.32	0.00	0.00	0.00	0.32	0.33	1.96	0.88	1.01	2.90	19.52	0.14	0.19	0.10	14.90	26.70	41.60
26-sep-91	7.4	30.0	0.10	0.08	0.03	0.13	0.32	0.01	ND	ND	0.33	0.33	1.98	0.91	1.01	2.88	19.52	0.36	ND	ND	14.60	26.65	41.25
03-oct-91	7.8	29.7	0.08	0.07	0.02	0.12	0.29	0.00	ND	ND	0.30	0.29	1.68	0.87	0.90	2.78	17.69	0.11	ND	ND	14.50	24.03	38.53
10-oct-91	7.7	30.3	0.10	0.07	0.03	0.13	0.32	ND	ND	ND	0.32	0.32	1.94	0.86	1.13	2.92	19.52	ND	ND	ND	14.53	26.37	40.90
17-oct-91	7.6	29.5	0.10	0.08	0.03	0.12	0.32	0.01	0.00	0.01	0.33	0.34	1.92	0.94	1.09	2.83	19.52	0.28	0.19	0.38	14.29	27.16	41.45
24-oct-91	7.6	27.5	0.09	0.07	0.03	0.11	0.29	0.01	0.00	0.01	0.31	0.31	1.88	0.90	1.09	2.53	17.69	0.28	0.19	0.38	12.11	24.94	37.05
31-oct-91	7.6	29.6	0.11	0.07	0.02	0.13	0.35	0.01	ND	ND	0.34	0.36	2.28	0.87	0.90	3.04	21.35	0.18	ND	ND	14.02	28.61	42.63
07-nov-91	7.4	32.4	0.13	0.08	0.02	0.13	0.35	0.01	ND	0.01	0.37	0.37	2.62	1.00	0.90	3.08	21.35	0.39	ND	0.48	15.27	29.82	45.09
14-nov-91	7.6	34.1	0.13	0.09	0.02	0.14	0.37	0.00	ND	ND	0.38	0.37	2.58	1.05	0.94	3.17	22.57	0.11	ND	ND	14.88	30.42	45.30
21-nov-91	7.4	32.4	0.12	0.09	0.02	0.13	0.38	0.01	ND	0.00	0.36	0.39	2.38	1.05	0.82	3.08	23.18	0.21	ND	0.19	14.81	30.92	45.73
28-nov-91	7.5	31.1	0.11	0.08	0.02	0.13	0.33	0.01	ND	0.00	0.34	0.34	2.20	0.93	0.90	2.94	20.13	0.18	ND	0.19	14.99	27.47	42.46
05-déc-91	7.5	33.6	0.11	0.09	0.03	0.14	0.37	0.02	ND	0.01	0.37	0.40	2.28	1.10	0.98	3.11	22.57	0.57	ND	0.48	14.94	31.08	46.02
12-déc-91	7.4	34.0	0.11	0.09	0.03	0.15	0.40	0.01	ND	ND	0.38	0.41	2.20	1.08	1.17	3.43	24.40	0.25	ND	ND	15.35	32.52	47.87
27-déc-91	7.4	30.3	0.11	0.10	0.03	0.14	0.38	0.01	ND	ND	0.38	0.39	2.20	1.15	1.21	3.27	23.18	0.39	ND	ND	14.55	31.40	45.95
06-fév-92	7.4	48.3	0.14	0.06	0.04	0.22	0.41	0.04	0.01	0.04	0.46	0.50	2.88	0.69	1.68	4.95	25.01	1.38	0.68	1.68	16.41	38.95	55.36
02-avr-92	7.1	52.2	0.13	0.08	0.04	0.17	0.36	0.03	0.05	0.01	0.43	0.45	2.66	0.97	1.64	4.00	21.96	0.99	3.35	0.38	14.48	35.95	50.43
01-jun-92	6.8	54.2	0.17	0.07	0.05	0.18	0.43	0.03	0.01	0.03	0.46	0.50	3.34	0.85	1.87	4.09	26.23	1.10	0.37	1.39	16.98	39.25	56.23
08-jun-92	6.9	54.8	0.18	0.07	0.05	0.17	0.45	0.02	ND	0.00	0.47	0.47	3.54	0.87	1.95	3.93	27.45	0.67	ND	0.19	17.23	38.61	55.84
22-jun-92	7.0	54.8	0.18	0.07	0.05	0.18	0.43	0.03	0.01	0.03	0.47	0.50	3.60	0.83	1.95	4.03	26.23	1.17	0.50	1.39	16.47	39.70	56.17
20-jul-92	6.9	50.9	0.15	0.05	0.05	0.18	0.42	0.03	ND	0.01	0.42	0.46	2.92	0.58	1.95	4.07	25.62	0.89	ND	0.58	16.04	36.61	52.65
24-aoû-92	6.8	37.8	0.05	0.02	0.04	0.13	0.23	0.02	ND	0.01	0.24	0.26	0.98	0.25	1.56	2.88	14.03	0.67	ND	0.29	14.94	20.66	35.60
21-sep-92	6.7	45.7	0.10	0.03	0.05	0.16	0.30	0.06	0.01	0.00	0.34	0.37	1.98	0.40	1.91	3.61	18.30	1.99	0.68	0.19	15.43	29.06	44.49
28-sep-92	7.3	37.2	0.07	0.09	0.04	0.12	0.31	0.02	ND	ND	0.32	0.33	1.42	1.03	1.60	2.76	18.92	0.71	ND	ND	13.98	26.45	40.43
06-oct-92	7.6	46.5	0.15	0.08	0.05	0.19	0.38	0.07	0.01	ND	0.47	0.46	2.91	0.92	2.11	4.44	23.19	2.59	0.62	ND	12.02	36.78	48.80
26-oct-92	6.7	39.2	0.07	0.03	0.03	0.13	0.26	0.02	ND	ND	0.27	0.28	1.34	0.38	1.29	3.08	15.86	0.78	ND	ND	16.37	22.73	39.10
14-déc-92	7.3	41.9	0.14	0.08	0.03	0.17	0.42	0.02	ND	ND	0.42	0.43	2.83	1.01	1.21	3.80	25.32	0.57	ND	ND	12.84	34.73	47.57
28-déc-92	6.6	52.2	0.14	0.06	0.04	0.20	0.44	0.03	ND	0.00	0.45												

annexe 7: analyses chimiques

NANTAKA (BANI+NIGER)

DATE	pH	conduc 20°	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	minér. mg/l	Dissous mg/l
20-aoû-90	7.2	43.5	0.08	0.10	0.10	0.11	0.32	0.06	ND	0.01	0.39	0.39	1.68	1.20	3.90	2.53	19.52	2.27	ND	0.29	14.74	31.39	46.13
20-sep-90	7.1	38.8	0.09	0.09	0.06	0.10	0.31	0.03	ND	0.01	0.34	0.34	1.78	1.11	2.22	2.28	18.61	0.89	ND	0.43	15.86	27.32	43.18
20-oct-90	7.0	37.5	0.08	0.10	0.05	0.11	0.31	0.01	ND	0.00	0.33	0.32	1.56	1.19	1.87	2.46	18.91	0.43	ND	0.10	16.55	26.51	43.06
déc-90			0.10	0.13	0.08	0.15	0.38	0.06	ND	0.00	0.46	0.44	2.03	1.60	3.26	3.38	23.18	2.06	ND	0.07	17.30	35.58	52.88
jan-91			0.12	0.15	0.10	0.16	0.47	0.06	ND	0.01	0.54	0.54	2.47	1.86	3.86	3.73	28.82	2.06	ND	0.48	17.32	43.28	60.60
04-fév-91	7.0	54.2	0.13	0.17	0.07	0.18	0.49	0.04	ND	0.00	0.55	0.52	2.60	2.11	2.57	4.14	29.59	1.28	ND	0.10	17.29	42.38	59.67
10-fév-91	7.0	58.9	0.14	0.18	0.07	0.21	0.50	0.08	ND	ND	0.60	0.58	2.80	2.12	2.89	4.83	30.50	2.73	ND	ND	15.37	45.87	61.24
11-fév-91	7.1	54.9	0.14	0.17	0.06	0.18	0.55	0.03	ND	0.00	0.55	0.58	2.82	2.08	2.46	4.03	33.55	1.14	ND	0.05	16.41	46.12	62.53
18-fév-91	7.2	56.2	0.15	0.19	0.07	0.18	0.52	0.03	ND	0.00	0.59	0.55	3.00	2.30	2.61	4.19	31.42	1.21	ND	0.05	15.81	44.77	60.58
25-fév-91	7.0	57.5	0.15	0.18	0.07	0.19	0.52	0.05	ND	0.00	0.59	0.58	3.00	2.18	2.81	4.37	31.72	1.92	ND	0.05	15.86	46.04	61.90
04-mar-91	7.2	57.5	0.15	0.20	0.07	0.19	0.55	0.04	ND	0.00	0.61	0.59	3.00	2.42	2.73	4.37	33.55	1.38	ND	0.05	15.25	47.50	62.75
11-mar-91	7.5	59.9	0.14	0.12	0.05	0.23	0.46	0.07	ND	0.02	0.54	0.54	2.84	1.43	1.99	5.27	27.76	2.34	ND	1.10	15.45	42.73	58.18
18-mar-91	7.4	58.0	0.15	0.13	0.05	0.19	0.43	0.07	0.01	0.01	0.52	0.52	2.96	1.62	1.91	4.32	25.93	2.56	0.37	0.62	14.38	40.29	54.67
25-mar-91	7.5	58.0	0.16	0.14	0.05	0.19	0.46	0.07	0.01	0.01	0.53	0.54	3.22	1.66	1.83	4.26	28.06	2.31	0.37	0.62	14.92	42.33	57.25
01-avr-91	7.4	63.8	0.16	0.14	0.08	0.19	0.48	0.09	0.01	0.02	0.57	0.59	3.28	1.66	3.28	4.28	28.98	3.05	0.43	0.82	15.28	45.77	61.05
08-avr-91	7.7	61.2	0.17	0.14	0.20	0.19	0.53	0.21	0.01	0.01	0.70	0.76	3.40	1.69	7.80	4.37	32.33	7.46	0.37	0.67	14.25	58.09	72.34
15-avr-91	7.9	63.8	0.18	0.14	0.09	0.19	0.50	0.08	0.01	0.02	0.60	0.61	3.56	1.66	3.67	4.42	30.56	2.91	0.50	0.72	14.03	47.99	62.02
22-avr-91	8.3	76.5	0.17	0.14	0.09	0.18	0.47	0.09	0.01	0.02	0.58	0.58	3.30	1.66	3.55	4.23	28.67	3.02	0.37	0.77	13.78	45.57	59.35
29-avr-91	7.3	288.0	0.21	0.16	0.28	0.20	0.56	0.28	0.01	0.01	0.84	0.87	4.16	1.95	10.92	4.49	34.16	10.01	0.81	0.53	14.81	67.02	81.83
06-mai-91	7.2	63.1	0.21	0.15	0.07	0.20	0.58	0.04	0.01	0.02	0.63	0.64	4.16	1.85	2.89	4.49	35.08	1.38	0.56	0.77	14.51	51.17	65.68
13-mai-91	7.3	59.9	0.20	0.15	0.06	0.19	0.53	0.03	0.01	0.01	0.59	0.58	3.92	1.77	2.30	4.30	32.33	0.99	0.62	0.62	15.55	46.86	62.41
20-mai-91	7.5	72.9	0.20	0.15	0.09	0.19	0.60	0.04	0.01	0.01	0.64	0.67	4.08	1.80	3.63	4.39	36.60	1.38	0.87	0.58	15.57	53.33	68.90
27-mai-91	7.7	95.5	0.22	0.16	0.09	0.20	0.61	0.03	0.00	0.00	0.67	0.64	4.36	1.91	3.59	4.58	37.21	0.89	0.25	0.19	16.12	52.97	69.09
10-jun-91	7.5	70.3	0.21	0.16	0.10	0.21	0.65	0.04	ND	ND	0.68	0.69	4.28	1.94	3.86	4.76	39.35	1.46	ND	ND	16.01	55.64	71.65
17-jun-91	7.5	70.3	0.18	0.12	0.09	0.18	0.55	0.03	ND	ND	0.57	0.58	3.58	1.49	3.63	4.03	33.25	1.10	ND	ND	16.77	47.07	63.84
24-jun-91	7.2	62.3	0.19	0.13	0.14	0.18	0.56	0.08	0.01	0.02	0.63	0.66	3.80	1.54	5.27	4.19	33.86	2.66	0.56	0.96	16.11	52.82	68.93
26-aoû-91	7.5	67.0	0.09	0.07	0.04	0.10	0.28	0.02	ND	0.02	0.30	0.32	1.76	0.79	1.60	2.35	17.08	0.78	ND	0.77	12.55	25.12	37.67
02-sep-91	7.6	33.1	0.08	0.06	0.04	0.11	0.26	0.02	ND	0.02	0.29	0.30	1.68	0.76	1.48	2.42	15.86	0.71	ND	0.77	12.19	23.68	35.87
09-sep-91	7.5	31.8	0.09	0.08	0.03	0.10	0.25	0.02	ND	0.02	0.30	0.29	1.74	1.00	1.13	2.39	15.25	0.71	ND	0.77	12.25	23.00	35.25
16-sep-91	7.5	33.1	0.10	0.07	0.03	0.11	0.26	0.02	ND	0.01	0.30	0.30	1.98	0.82	1.05	2.44	15.86	0.78	ND	0.67	12.02	23.61	35.63
23-sep-91	7.5	36.5	0.10	0.07	0.04	0.10	0.30	0.02	ND	0.01	0.31	0.33	2.00	0.87	1.44	2.39	18.30	0.71	ND	0.67	13.79	26.39	40.18
30-sep-91	7.4	37.8	0.10	0.08	0.03	0.12	0.31	0.02	ND	0.01	0.32	0.34	2.02	0.92	1.17	2.69	18.91	0.71	ND	0.67	13.96	27.09	41.05
07-oct-91	7.4	37.1	0.10	0.07	0.03	0.12	0.30	0.02	ND	0.01	0.32	0.33	1.92	0.88	1.21	2.71	18.30	0.71	ND	0.48	13.80	26.22	40.02
14-oct-91	7.5	37.1	0.10	0.08	0.03	0.12	0.31	0.02	ND	0.01	0.33	0.34	2.06	0.93	1.17	2.76	18.91	0.71	ND	0.67	13.73	27.21	40.94
04-nov-91	7.5	35.8	0.09	0.08	0.02	0.13	0.30	0.02	ND	0.01	0.32	0.33	1.88	0.92	0.94	2.88	18.30	0.71	ND	0.67	14.58	26.29	40.87
11-nov-91	7.3	42.4	0.10	0.08	0.03	0.13	0.33	0.02	ND	ND	0.34	0.35	1.96	0.96	1.25	2.90	20.13	0.67	ND	ND	15.30	27.87	43.17
18-nov-91	7.4	39.1	0.10	0.08	0.03	0.13	0.33	0.02	ND	ND	0.34	0.35	1.90	0.98	1.13	2.99	20.13	0.67	ND	ND	15.61	27.81	43.42
25-nov-91	7.4	39.8	0.10	0.09	0.03	0.13	0.33	0.02	ND	ND	0.35	0.35	2.02	1.05	1.29	2.99	20.13	0.78	ND	ND	15.74	28.26	44.00
02-déc-91	7.3	39.8	0.09	0.09	0.03	0.13	0.35	0.02	ND	ND	0.34	0.37	1.88	1.05	1.09	3.08	21.35	0.67	ND	ND	15.00	29.13	44.13
09-déc-91	7.3	47.7	0.11	0.10	0.04	0.16	0.36	0.03	0.02	ND	0.41	0.40	2.14	1.15	1.72	3.73	21.96	0.99	0.99	ND	15.53	32.68	48.21
16-déc-91	7.4	44.4	0.10	0.09	0.03	0.14	0.36	0.02	ND	ND	0.37	0.38	2.04	1.13	1.29	3.27	21.96	0.67	ND	ND	14.72	30.35	45.07
23-déc-91	7.4	45.7	0.11	0.10	0.04	0.15	0.39	0.02	ND	ND	0.39	0.41	2.14	1.17	1.37	3.47	23.79	0.78	ND	ND	14.49	32.72	47.21
30-déc-91	7.4	46.4	0.11	0.10	0.03	0.15	0.39	0.02	ND	ND	0.40	0.41	2.24	1.21	1.29	3.52	23.79	0.78	ND	ND	15.30	32.83	48.13
06-jan-92	7.3	48.4	0.12	0.11	0.03	0.15	0.41	0.02	ND	ND	0.41	0.43	2.34	1.27	1.29	3.52	25.01	0.67	ND	ND	15.41	34.10	49.51
13-jan-92	7.5	47.7	0.12	0.11	0.03	0.15	0.41	0.01	ND	ND	0.42	0.42	2.46	1.31	1.29	3.52	25.01	0.36	ND	ND	14.65	33.94	48.59
20-jan-92	7.5	48.4	0.12	0.11	0.03	0.16	0.41	0.02	ND	ND	0.42	0.43	2.42	1.28	1.33	3.63	25.01	0.71	ND	ND	14.98	34.38	49.36
27-jan-92	7.5	49.1	0.13	0.11	0.04	0.16	0.42	0.01	ND	ND	0.43	0.43	2.52	1.36	1.44	3.66	25.62	0.50	ND	ND	13.12	35.09	48.21
03-fév-92	7.5	47.7	0.13	0.11	0.04	0.16	0.43	0.01	ND	ND	0.43	0.44	2.50	1.29	1.40	3.70	26.23	0.36	ND	ND	14.30	35.49	49.79
17-fév-92	7.3	51	0.12	0.12	0.04	0.17	0.45	0.01	ND	ND	0.44	0.46	2.44	1.39	1.60	3.80	27.45	0.36	ND	ND	12.48	37.03	49.51
24-fév-92	7.6	51.7	0.13	0.13	0.04	0.17	0.46	0.01	ND	ND	0.47	0.47	2.68	1.54	1.60	3.84	28.06	0.36	ND	ND	12.60	38.07	50.67
06-avr-92	7	56.06	0.16	0.12	0.04	0.20	0.47	0.02	ND	ND	0.52	0.49	3.18	1.46	1.64	4.62	28.67	0.71	ND	ND	11.8	40.29	52.04
13-avr-92	7.7	51.8	0.11	0.14	0.06	0.19	0.50	0.01	ND	ND	0.51	0.51	2.27	1.7	2.39	4.46	30.51	0.46	ND	ND	13.4	41.79	55.23
15-jun-92	7.5	58.6	0.17	0.12	0.06	0.20	0.48	0.03	ND	ND	0.55	0.51	3.65	1.44	2.30	4.53	29.98	1.21	ND	ND	12.40	43.10	55.50
22-jun-92	7.2	56.1	0.17	0.11	0.06	0.18	0.46	0.02	ND	ND	0.51	0.48	3.41	1.31	2.15	4.07	28.06	0.71	ND	ND	15.06	39.71	54.77
06-jul-92	7.0	57.3	0.19																				

annexe 7: analyses chimiques

DATE	pH	conduc 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation mé/l	Anion mé/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	miner. mg/l	Dissous mg/l
14-déc-92	7.5	35.5	0.11	0.08	0.03	0.13	0.36	0.01	ND	ND	0.35	0.37	2.16	0.99	1.13	3.08	21.97	0.32	ND	ND	13.04	29.65	42.69
28-déc-92	6.8	46.5	0.13	0.09	0.03	0.17	0.38	0.01	ND	0.01	0.42	0.40	2.69	1.06	0.98	3.91	23.19	0.50	ND	0.48	15.65	32.80	48.45
08-fév-93	7.4	38.9	0.14	0.10	0.03	0.17	0.43	0.02	ND	ND	0.45	0.45	2.81	1.25	1.25	3.91	26.24	0.60	ND	ND	11.94	36.06	48.00
10-mai-93	7.7	59.6	0.15	0.15	0.06	0.21	0.57	0.01	ND	0.01	0.57	0.60	3.09	1.76	2.39	4.46	30.51	0.46	ND	ND	16.60	42.67	59.27
21-jun-93	7.6	57.9	0.19	0.14	0.06	0.19	0.57	0.02	ND	0.01	0.58	0.60	3.71	1.75	2.15	4.46	34.78	0.75	ND	0.29	20.52	47.89	68.41
06-jul-93	7.4	54.2	0.19	0.11	0.06	0.19	0.52	0.02	ND	ND	0.55	0.54	3.75	1.33	2.35	4.46	31.73	0.82	ND	ND	14.04	44.43	58.47
19-jul-93	7.2	51.3	0.15	0.11	0.07	0.17	0.45	0.03	0.01	0.01	0.50	0.51	3.05	1.35	2.74	3.91	27.46	1.21	0.68	0.48	17.73	40.87	58.60
16-aoû-93	7.2	35.5	0.10	0.08	0.06	0.12	0.33	0.03	ND	0.01	0.35	0.36	1.92	0.96	2.23	2.81	20.14	0.89	ND	0.34	15.17	29.28	44.45
23-aoû-93	7.0	32.9	0.09	0.08	0.05	0.11	0.30	0.02	ND	0.01	0.32	0.33	1.74	0.94	2.03	2.46	18.31	0.67	ND	0.34	16.15	26.49	42.64
13-sep-93	7.3	33.1	0.06	0.07	0.04	0.11	0.28	0.01	ND	ND	0.28	0.29	1.12	0.89	1.60	2.48	17.09	0.43	ND	ND	12.85	23.61	36.46
04-oct-93	7.1	41.3	0.07	0.09	0.05	0.14	0.31	0.03	0.02	ND	0.34	0.36	1.34	1.08	1.88	3.22	18.92	0.99	1.12	ND	14.94	28.55	43.49
18-oct-93	7.3	33.8	0.05	0.09	0.03	0.12	0.30	0.01	0.00	ND	0.29	0.31	1.00	1.06	1.25	2.76	18.31	0.21	ND	ND	14.45	24.59	39.04

annexe 7: analyses chimiques

SOFARA (Bani)

DATE	pH	cond	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation méq/l	Anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SIO2 mg/l	mnér mg/l	dissous mg/l
31-jul-90	7.1	58.9	0.11	0.13	0.17	0.11	0.41	0.10	0.00	0.00	0.52	0.51	2.16	1.57	6.75	2.42	25.01	3.66	0	0.19	6.26	41.75	48.01
10-août-90	7.0	76.3	0.10	0.12	0.11	0.11	0.38	0.03	0.00	0.00	0.44	0.42	2.00	1.45	4.29	2.53	23.18	1.17	0.00	0.19	8.38	34.82	43.20
20-août-90	7.1	36.8	0.09	0.15	0.08	0.06	0.28	0.07	0.00	0.00	0.38	0.35	1.84	1.84	3.20	1.31	17.08	2.38	0.00	0.19	10.50	27.84	38.34
31-août-90	7.1	52.2	0.13	0.21	0.09	0.12	0.42	0.04	0.00	0.00	0.55	0.46	2.60	2.60	3.51	2.76	25.62	1.31	0.00	0.19	13.64	38.60	52.24
10-sep-90	7.1	40.1	0.11	0.11	0.07	0.10	0.34	0.03	0.00	0.00	0.39	0.37	2.18	1.33	2.73	2.28	20.74	1.07	0.00	0.19	13.75	30.52	44.27
20-sep-90	7.2	40.1	0.12	0.11	0.07	0.10	0.34	0.07	0.00	0.00	0.39	0.42	2.30	1.36	2.69	2.21	20.74	2.63	0.00	0.19	15.66	32.11	47.77
30-sep-90	7.3	49.2	0.10	0.11	0.08	0.13	0.29	0.08	0.00	0.00	0.42	0.37	1.96	1.33	3.12	2.99	17.69	2.70	0.00	0.19	13.33	29.98	43.31
10-oct-90	7.2	41.5	0.11	0.11	0.07	0.11	0.33	0.05	0.00	0.00	0.40	0.39	2.16	1.32	2.85	2.42	20.13	1.81	0.00	0.19	13.11	30.87	43.98
20-oct-90	7.2	42.8	0.11	0.12	0.06	0.12	0.38	0.03	0.00	0.00	0.41	0.41	2.22	1.42	2.46	2.65	22.88	1.10	0.00	0.19	13.73	32.91	46.64
31-oct-90	7.1	48.2	0.12	0.14	0.08	0.13	0.38	0.05	0.00	0.00	0.47	0.43	2.38	1.66	3.16	3.06	23.18	1.81	0.00	0.14	14.39	35.39	49.78
10-nov-90	7.1	50.8	0.12	0.15	0.09	0.14	0.43	0.06	0.00	0.00	0.50	0.49	2.46	1.78	3.55	3.22	26.23	2.09	0.00	0.14	15.50	39.48	54.98
20-nov-90	7.1	51.5	0.13	0.16	0.09	0.15	0.45	0.06	0.00	0.00	0.52	0.52	2.52	1.90	3.35	3.43	27.45	2.20	0.00	0.19	15.56	41.04	56.60
30-nov-90	7.1	50.8	0.13	0.17	0.08	0.13	0.47	0.04	0.00	0.00	0.52	0.51	2.54	2.11	3.12	3.08	28.67	1.31	0.00	0.19	15.81	41.02	56.83
10-déc-90	7.3	55.5	0.13	0.19	0.08	0.16	0.47	0.06	0.00	0.00	0.56	0.53	2.60	2.30	3.12	3.68	28.67	2.06	0.00	0.19	14.28	42.62	56.90
11-déc-90	7.5	56.2	0.13	0.19	0.10	0.15	0.49	0.09	0.00	0.00	0.57	0.58	2.60	2.29	3.90	3.45	29.89	3.12	0.00	0.19	14.84	45.44	60.28
18-déc-90	7.3	60.2	0.15	0.21	0.13	0.15	0.49	0.10	0.00	0.00	0.64	0.60	3.00	2.54	5.07	3.45	29.89	3.59	0.00	0.19	14.86	47.73	62.59
25-déc-90	7.2	56.2	0.14	0.21	0.11	0.15	0.49	0.06	0.00	0.00	0.61	0.56	2.80	2.54	4.13	3.45	29.89	2.27	0.00	0.14	15.01	45.23	60.24
01-jan-91	7.2	60.2	0.15	0.21	0.11	0.15	0.51	0.07	0.00	0.01	0.62	0.58	3.00	2.54	4.13	3.45	31.11	2.34	0.00	0.34	14.62	46.91	61.53
08-jan-91	7.4	59.5	0.16	0.23	0.08	0.15	0.54	0.04	0.00	0.01	0.62	0.59	3.20	2.78	3.12	3.45	32.94	1.31	0.00	0.48	14.91	47.29	62.20
15-jan-91	7.2	59.5	0.16	0.34	0.08	0.15	0.57	0.03	0.00	0.00	0.73	0.60	3.20	4.11	3.12	3.45	34.77	0.99	0.00	0.19	15.04	49.84	64.88
22-jan-91	7.3	60.9	0.17	0.27	0.08	0.15	0.59	0.03	0.00	0.01	0.67	0.62	3.40	3.27	3.12	3.45	35.99	0.92	0.00	0.29	14.96	50.44	65.40
29-jan-91	7.3	62.9	0.16	0.28	0.09	0.17	0.63	0.03	0.00	0.01	0.70	0.67	3.20	3.39	3.51	3.91	38.43	1.14	0.00	0.48	14.86	54.05	68.91
05-fév-91	7.3	68.2	0.18	0.29	0.09	0.18	0.63	0.05	0.00	0.01	0.74	0.69	3.60	3.51	3.51	4.14	38.43	1.78	0.00	0.53	14.50	55.49	69.99
12-fév-91	7.2	69.6	0.19	0.32	0.09	0.18	0.66	0.05	0.00	0.01	0.78	0.72	3.80	3.87	3.51	4.14	40.26	1.63	0.00	0.67	14.53	57.89	72.42
19-fév-91	7.2	71.6	0.20	0.33	0.10	0.19	0.69	0.05	0.00	0.02	0.82	0.76	4.00	3.99	3.90	4.37	42.09	1.88	0.00	0.96	13.98	61.19	75.17
26-fév-91	7.2	73.6	0.21	0.35	0.10	0.20	0.69	0.05	0.00	0.01	0.86	0.75	4.20	4.24	3.90	4.60	42.09	1.70	0.00	0.67	14.14	61.40	75.54
05-mar-91	7.3	75.6	0.22	0.37	0.10	0.20	0.72	0.05	0.00	0.02	0.89	0.78	4.40	4.48	3.90	4.60	43.92	1.63	0.00	0.82	13.73	63.75	77.48
12-mar-91	7.7	76.5	0.23	0.23	0.09	0.20	0.60	0.11	0.01	0.02	0.75	0.73	4.54	2.78	3.35	4.67	36.60	3.87	0.37	0.72	11.20	56.91	68.11
19-mar-91	7.7	80.3	0.25	0.26	0.09	0.22	0.73	0.07	0.00	0.02	0.81	0.81	4.98	3.13	3.39	4.99	44.23	2.41	0.00	0.72	11.34	63.86	75.20
26-mar-91	8.3	85.4	0.26	0.27	0.09	0.23	0.78	0.06	0.01	0.02	0.86	0.86	5.28	3.28	3.59	5.38	47.28	2.06	0.31	0.91	11.26	68.09	79.35
02-avr-91	7.9	89.2	0.27	0.28	0.10	0.22	0.79	0.07	0.01	0.01	0.87	0.86	5.36	3.38	3.98	5.06	47.89	2.34	0.31	0.24	11.13	68.55	79.68
09-avr-91	7.8	96.9	0.28	0.31	0.12	0.24	0.86	0.06	0.00	0.00	0.95	0.92	5.64	3.71	4.76	5.43	52.46	2.24	0.00	0.00	11.17	74.24	85.41
16-avr-91	7.7	108.4	0.32	0.35	0.15	0.27	1.00	0.09	0.00	0.01	1.08	1.10	6.48	4.17	5.73	6.16	61.00	3.20	0.25	0.34	10.35	87.33	97.68
23-avr-91	7.5	112.2	0.37	0.39	0.13	0.29	1.06	0.06	0.00	0.01	1.18	1.13	7.44	4.74	4.99	6.67	64.66	2.24	0.00	0.43	11.35	91.17	102.52
30-avr-91	7.5	121.8	0.40	0.41	0.13	0.34	1.16	0.06	0.01	0.01	1.28	1.24	7.90	4.96	5.11	7.82	70.46	2.20	0.43	0.67	8.61	99.55	108.16
07-mai-91	7.5	127.9	0.39	0.32	0.19	0.35	1.13	0.12	0.01	0.01	1.25	1.27	7.82	3.85	7.49	8.10	68.93	4.26	0.37	0.53	6.38	101.34	107.72
14-mai-91	7.4	153.3	0.44	0.51	0.18	0.41	1.43	0.10	0.00	0.01	1.54	1.54	8.80	6.20	7.06	9.45	87.23	3.37	0.00	0.67	8.89	122.78	131.67
04-jun-91	7.7	95.5	0.31	0.37	0.16	0.36	1.19	0.06	0.02	0.02	1.20	1.29	6.20	4.48	6.24	8.28	72.59	2.13	1.24	0.96	8.37	102.12	110.49
11-jun-91	7.9		0.28	0.06	0.16	0.30	0.63	0.07	0.01	0.03	0.80	0.74	5.60	0.73	6.24	6.90	38.43	2.49	0.62	1.44	7.09	62.44	69.53
18-jun-91	7.6	67.6	0.22	0.04	0.15	0.26	0.53	0.06	0.01	0.02	0.66	0.61	4.30	0.47	5.81	5.87	32.33	1.99	0.50	0.96	6.89	52.22	59.11
06-août-91	7.0	47.0	0.11	0.09	0.13	0.04	0.32	0.06	0.02	0.00	0.36	0.39	2.16	1.09	4.91	0.83	19.52	1.99	0.99	0.00	6.88	31.49	38.37
13-août-91	7.0	31.6	0.07	0.06	0.09	0.02	0.20	0.05	0.01	0.00	0.23	0.26	1.40	0.68	3.32	0.35	12.20	1.78	0.62	0.00	5.55	20.33	25.88
20-août-91	6.9	41.6	0.10	0.08	0.06	0.07	0.17	0.04	0.04	0.03	0.31	0.28	2.04	0.97	2.34	1.61	10.37	1.56	2.54	1.39	9.84	22.82	32.66
27-août-91	7.0	29.5	0.08	0.07	0.06	0.04	0.18	0.03	0.04	0.00	0.25	0.24	1.62	0.82	2.30	0.99	10.98	0.89	2.36	0.00	6.86	19.96	26.82
03-sep-91	7.2	41.6	0.12	0.09	0.07	0.10	0.29	0.06	0.02	0.02	0.37	0.38	2.36	1.04	2.85	2.21	17.69	1.99	0.99	0.96	10.28	30.09	40.37
10-sep-91	7.3	34.9	0.10	0.08	0.06	0.08	0.25	0.04	0.01	0.02	0.32	0.32	2.02	0.96	2.46	1.84	14.95	1.31	0.81	0.96	8.68	25.30	33.98
17-sep-91	7.3	38.9	0.12	0.08	0.08	0.09	0.32	0.02	0.02	0.00	0.36	0.36	2.38	0.91	3.04	2.07	19.52	0.67	1.05	0.00	12.00	29.65	41.65
24-sep-91	7.3	43.0	0.13	0.08	0.09	0.10	0.34	0.03	0.02	0.02	0.40	0.40	2.66	0.98	3.32	2.35	20.74	0.99	0.99	0.86	13.87	32.89	46.76
01-oct-91	7.4	48.3	0.15	0.10	0.10	0.11	0.38	0.04	0.01	0.02	0.46	0.45	2.96	1.15	3.86	2.60	23.18	1.46	0.87	0.86	14.48	36.94	51.42
08-oct-91	7.5	47.0	0.15	0.09	0.09	0.11	0.41	0.02	0.00	0.00	0.45	0.43	3.02	1.14	3.63	2.60	25.01	0.75	0.00	0.00	14.93	36.14	51.07
15-oct-91	7.5	44.3	0.15	0.10	0.08	0.11	0.37	0.03	0.01	0.02	0.44	0.44	3.08	1.23	2.96	2.46	22.57	1.07	0.87	1.06	13.69	35.30	48.99
22-oct-91	7.4	48.3	0.15	0.10	0.08	0.11	0.37	0.02	0.01	0.00	0.44	0.41	3.06	1.23	2.96	2.53	22.57	0.78	0.87	0.00	14.73	34.01	48.74
05-nov-91	7.5	45.7	0.15	0.10	0.07	0.12	0.37	0.02	0.01	0.00	0.44	0.40	2.96	1.21	2.89	2.69	22.57	0.67	0				

annexe 7: analyses chimiques

DATE	pH	cond	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	Cation mé/l	Anion mé/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	minér mg/l	dissous mg/l
06-Jan-92	7.5	61.0	0.17	0.15	0.09	0.15	0.50	0.02	0.01	0.00	0.55	0.52	3.36	1.75	3.39	3.34	30.20	0.57	0.50	0.19	15.30	43.29	58.59
13-Jan-92	7.5	62.3	0.18	0.16	0.09	0.16	0.51	0.03	0.02	0.02	0.58	0.58	3.50	1.88	3.55	3.57	31.11	1.10	1.36	0.96	13.74	47.02	60.76
20-Jan-92	7.5	62.3	0.18	0.16	0.10	0.16	0.51	0.04	0.02	0.02	0.60	0.59	3.56	1.96	3.86	3.66	30.81	1.49	1.24	1.15	13.80	47.73	61.53
27-Jan-92	7.5	66.3	0.18	0.17	0.10	0.16	0.51	0.04	0.03	0.02	0.61	0.61	3.66	2.00	3.94	3.63	31.11	1.38	2.05	1.15	13.25	48.92	62.17
03-fév-92	7.6	66.3	0.18	0.17	0.09	0.16	0.55	0.03	0.01	0.02	0.60	0.61	3.66	2.03	3.47	3.61	33.55	0.99	0.87	0.77	13.34	48.95	62.29
10-fév-92	7.5	63.6	0.19	0.18	0.10	0.17	0.57	0.04	0.02	0.02	0.64	0.65	3.82	2.21	3.74	3.82	34.77	1.28	0.99	1.15	12.48	51.79	64.27

TILEMBEYA (NIGER)

DATE	pH	COND. 20'	Ca méq/l	Mg méq/l	K méq/l	Na méq/l	Tac méq/l	Cl méq/l	NO3 méq/l	SO4 méq/l	cation méq/l	anion méq/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Tac mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	SO4 mg/l	SiO2 mg/l	minér mg/l	Issous mg/l
18-Jan-92	6.9	48.4	0.13	0.09	0.03	0.15	0.39	0.02	0.02	ND	0.39	0.42	2.61	1.05	0.98	3.50	23.49	0.57	1.30	ND	14.9	33.48	48.42
11-avr-92	7.6	46.5	0.14	0.11	0.04	0.18	0.46	0.02	ND	ND	0.47	0.48	2.89	1.37	1.53	4.07	28.07	0.67	ND	ND	11.4	38.60	49.96
01-Jun-92	7.2	62.4	0.19	0.11	0.05	0.17	0.55	0.03	0.01	ND	0.53	0.58	3.85	1.37	2.07	3.91	33.25	0.99	0.37	ND	14.9	45.81	60.68
08-Jun-92	7.1	53.5	0.16	0.1	0.05	0.17	0.5	0.02	ND	ND	0.48	0.51	3.27	1.22	1.80	3.82	30.20	0.57	ND	ND	15.7	40.86	56.51
06-Jul-92	7.7	51.8	0.13	0.12	0.07	0.19	0.48	0.02	ND	ND	0.51	0.5	2.57	1.45	2.62	4.39	29.29	0.57	ND	ND	12.3	40.88	53.18
17-aoû-92	7.3	35.7	0.1	0.06	0.04	0.11	0.3	0.03	0.01	0.01	0.31	0.34	1.92	0.78	1.45	2.55	18.00	0.99	0.87	0.24	13.4	26.79	40.20
07-sep-92	7.0	33.1	0.09	0.05	0.02	0.1	0.27	0.01	0.01	0.01	0.27	0.3	1.88	0.64	0.94	2.19	16.17	0.50	0.62	0.29	13.1	23.22	36.31
28-sep-92	7.1	36.2	0.11	0.06	0.04	0.11	0.31	0.02	ND	ND	0.32	0.33	2.18	0.77	1.52	2.60	18.61	0.78	ND	ND	13.5	26.46	39.91
05-oct-92	7.5	55.7	0.07	0.08	0.04	0.11	0.3	0.01	ND	ND	0.3	0.31	1.30	0.96	1.56	2.60	18.31	0.39	ND	ND	13.7	25.12	38.82
12-oct-92	7.0	39.5	0.12	0.08	0.03	0.1	0.35	0.01	0.01	ND	0.32	0.36	2.32	0.91	1.06	2.37	21.05	0.39	0.31	ND	14.4	28.41	42.80
19-oct-92	6.9	42.0	0.13	0.07	0.02	0.11	0.36	0.01	ND	ND	0.33	0.37	2.57	0.86	0.78	2.51	21.66	0.50	ND	ND	14.8	28.87	43.63
12-nov-92	7.2	31.2	0.09	0.07	0.03	0.13	0.31	0.01	ND	ND	0.32	0.32	1.88	0.84	1.09	2.97	18.91	0.46	0.00	0.00	14.2	26.16	40.37
16-nov-92	7.2	37.0	0.1	0.07	0.02	0.12	0.31	0.01	ND	ND	0.3	0.32	1.98	0.80	0.70	2.76	18.61	0.39	ND	ND	15.2	25.24	40.39
07-déc-92	7.6	34.9	0.11	0.08	0.02	0.14	0.35	0.01	ND	ND	0.35	0.36	2.10	0.94	0.94	3.24	21.36	0.32	ND	ND	13.4	28.90	42.31
28-déc-92	7.4	47.1	0.15	0.09	0.02	0.15	0.42	0.01	ND	ND	0.41	0.43	2.92	1.09	0.94	3.36	25.32	0.50	ND	ND	14.7	34.12	48.79
18-Jan-93	7.6	41.3	0.13	0.1	0.03	0.16	0.41	0.01	ND	ND	0.42	0.42	2.69	1.19	1.06	3.59	24.71	0.36	ND	ND	12.1	33.59	45.64
05-avr-93	7.8	55.7	0.14	0.14	0.05	0.21	0.52	0.03	ND	ND	0.54	0.55	2.71	1.65	2.03	4.88	31.73	0.89	ND	ND	12.9	43.89	56.79
14-Jun-93	7.4	55.8	0.14	0.13	0.05	0.19	0.51	0.02	0.01	ND	0.51	0.53	2.79	1.62	2.03	4.35	31.12	0.53	0.50	ND	14.3	42.93	57.19
26-Jul-93	7.0	46.9	0.1	0.1	0.06	0.15	0.4	0.02	ND	ND	0.41	0.42	2.00	1.20	2.42	3.45	24.41	0.82	ND	ND	16.9	34.31	51.23
13-sep-93	6.9	31.7	0.05	0.07	0.03	0.1	0.27	0.01	ND	ND	0.26	0.27	1.04	0.89	1.29	2.28	16.17	0.32	ND	ND	14.1	21.99	36.04
27-sep-93	6.9	31.7	0.05	0.08	0.03	0.11	0.26	0.01	ND	ND	0.27	0.27	1.04	0.92	1.17	2.46	15.69	0.36	ND	ND	12.8	21.64	34.46
15-oct-93	7.2	36.1	0.09	0.1	0.04	0.13	0.33	0.02	ND	0.01	0.35	0.36	1.80	1.16	1.56	2.94	20.14	0.78	ND	0.48	17.2	28.86	46.04
22-nov-93	7.1	37.4	0.09	0.1	0.04	0.15	0.34	0.02	0.02	ND	0.38	0.37	1.82	1.22	1.49	3.45	20.75	0.57	1.05	ND	16.9	30.34	47.19
31-Jan-94	7.6	38.9	0.11	0.11	0.04	0.16	0.4	0.01	ND	ND	0.41	0.41	2.29	1.28	1.41	3.59	24.10	0.39	ND	ND	16.2	33.05	49.23
25-avr-94	7.0	61.8	0.19	0.16	0.05	0.22	0.56	0.04	0.01	0.01	0.62	0.62	3.83	1.91	1.88	5.06	34.17	1.49	0.50	0.24	16.6	49.07	65.65

annexe 7 : analyses chimiques

PRECIPITATIONS-1993

station	date	H mm	pH	cond µS/cm	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	cation		anions		Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO ₃	SO ₄	SIO	TDS
					még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l
Batamani	Juln		7.0	132.9	0.40	0.20	0.32	0.07	0.79	0.09	0.01	0.19	0.99	1.09	7.9	2.5	12.4	1.7	48.2	3.3	0.8	9.3	11.3			97.3
Batamani	06-07	3	7.9	142.0	0.45	0.19	0.18	0.34	0.86	0.19	0.12	0.07	1.16	1.24	9.1	2.3	7.0	7.8	52.5	6.7	7.6	3.3	4.9			101.1
Mopti	03-08	4	8.0	98.2	0.51	0.04	0.13	0.22	0.85	0.11	0.00	0.00	0.88	0.96	10.1	0.4	4.9	5.0	51.9	4.0	0.0	0.0	2.0			78.3
Youvarou	05-08	24.2	7.6	32.3	0.20	0.03	0.02	0.01	0.24	0.03	0.01	0.02	0.26	0.30	4.0	0.3	0.8	0.2	14.6	1.1	0.6	0.9	0.7			23.3
Youvarou	10-08	26.2	7.2	29.7	0.11	0.03	0.00	0.03	0.19	0.03	0.01	0.01	0.17	0.24	2.2	0.3	0.2	0.6	11.6	1.0	0.7	0.3	0.4			17.3
Dire	08-08	1	7.4	69.1	0.29	0.08	0.12	0.12	0.50	0.09	0.04	0.04	0.60	0.66	5.9	0.9	4.7	2.6	30.5	3.1	2.2	1.8	2.2			53.9

station	date	H mm	pH	cond µS/cm	Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO3	SO4	cation		anions		Ca	Mg	K	Na	Tac	Cl	NO ₃	SO ₄	SIO	TDS
					még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l
Bamako	12-05	4.3	7.3	70.0	0.31	0.08	0.08	0.05	0.42	0.05	0.01	0.04	0.52	0.52	6.2	0.9	3.1	1.2	25.6	1.8	0.4	2.1	1.0			42.4
	13-05	1.7	7.3	105.5	0.33	0.09	0.07	0.14	0.31	0.12	0.09	0.14	0.63	0.66	6.6	1.1	2.8	3.2	18.6	4.3	5.4	6.9	3.0			51.9
	14-05	7.4	7.1	46.6	0.10	0.02	0.03	0.02	0.10	0.04	0.03	0.03	0.17	0.20	2.1	0.3	1.2	0.5	6.1	1.4	1.9	1.4	1.1			15.9
	17-05	3.9	7.2	70.0	0.20	0.04	0.06	0.09	0.23	0.05	0.06	0.06	0.39	0.39	4.0	0.5	2.3	2.0	14.0	1.6	3.5	2.9	2.2			32.9
	21-05	5	7.1	55.7	0.16	0.03	0.04	0.04	0.16	0.04	0.04	0.05	0.27	0.29	3.2	0.4	1.4	1.0	9.8	1.3	2.6	2.3	0.0			21.9
	04-06	24.1	6.9	24.6	0.05	0.02	0.08	0.00	0.06	0.07	0.01	0.01	0.15	0.15	1.0	0.2	3.2	0.0	3.7	2.6	0.4	0.5	0.0			11.6
	05-06	2.3	7.2	58.3	0.14	0.04	0.07	0.05	0.16	0.07	0.05	0.04	0.30	0.32	2.8	0.4	2.6	1.2	9.8	2.4	2.9	1.9	0.3			24.4
	06-06	5.7	7.1	32.4	0.05	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.09	0.09	1.0	0.1	1.0	0.0	1.8	0.6	1.7	0.9	0.9			8.1
	09-06	7.5	7.0	39.5	0.06	0.02	0.08	0.00	0.05	0.06	0.03	0.02	0.15	0.15	1.2	0.2	3.2	0.0	3.1	2.2	1.6	0.7	1.2			13.2
	12-06	7.8	6.6	40.0	0.07	0.01	0.28	0.00	0.04	0.30	0.02	0.01	0.36	0.37	1.4	0.2	2.0	0.0	2.4	2.0	1.2	0.5	0.9			10.6
	15-06	23	6.5	16.8	0.03	0.00	0.06	0.01	0.05	0.06	0.01	0.01	0.11	0.12	0.6	0.0	2.5	0.3	3.1	2.1	0.4	0.4	0.4			9.8
	20-06	4.3	6.6	25.9	0.06	0.02	0.04	0.01	0.04	0.03	0.05	0.02	0.13	0.14	1.3	0.2	1.5	0.2	2.4	1.1	3.1	0.9	1.0			11.7
	22-06	19.1	6.5	40.8	0.06	0.02	0.18	0.01	0.05	0.19	0.02	0.01	0.27	0.27	1.2	0.2	7.0	0.3	3.1	6.6	1.4	0.6	0.5			20.8
	24-06	14.6	6.8	36.9	0.07	0.02	0.11	0.01	0.06	0.13	0.03	0.02	0.22	0.23	1.3	0.3	4.5	0.3	3.7	4.4	1.6	0.8	0.6			17.4
	26-06	5.6	6.6	36.3	0.05	0.01	0.15	0.00	0.07	0.13	0.02	0.01	0.22	0.23	1.0	0.2	5.9	0.0	4.3	4.4	1.4	0.6	0.0			17.8
	29-06	5.9	6.2	5.2	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.3	0.1	0.2	0.0	0.6	0.2	0.2	0.3	0.0			1.9
	07-07	3.4	6.7	28.5	0.10	0.03	0.02	0.02	0.10	0.03	0.03	0.02	0.17	0.18	1.9	0.4	0.9	0.4	6.1	0.9	1.9	1.1	0.8			14.5
	09-07	60	6.9	10.4	0.03	0.03	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.6	0.3	0.0	0.0	2.4	0.2	0.3	0.3	0.8			5.0
	14-07	1.5	6.4	7.8	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.05	0.5	0.1	0.0	0.0	0.6	0.7	0.4	0.5	0.0			2.8
	17-07	20	6.8	7.8	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.4	0.1	0.0	0.0	0.9	0.3	0.0	0.2	0.0			2.0
	22-07	1.2	7.3	54.4	0.17	0.06	0.05	0.28	0.40	0.08	0.01	0.08	0.56	0.57	3.4	0.8	2.0	6.4	24.4	2.7	0.8	3.9	8.6			53.0
	23-07	47	6.9	10.4	0.02	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04	0.3	0.0	1.0	0.2	1.2	0.4	0.2	0.3	0.0			3.7
	25-07	12.2	6.8	18.8	0.04	0.02	0.05	0.01	0.04	0.06	0.00	0.01	0.11	0.11	0.8	0.2	1.8	0.2	2.4	2.1	0.0	0.3	0.3			8.0
	27-07	18.8	6.9	24.6	0.03	0.01	0.09	0.00	0.01	0.14	0.00	0.01	0.13	0.15	0.6	0.2	3.6	0.0	0.3	4.9	0.0	0.2	0.2			9.9
	29-07	7.8	7.0	28.5	0.05	0.02	0.08	0.06	0.10	0.08	0.02	0.01	0.21	0.21	0.9	0.3	3.1	1.3	6.1	2.7	1.3	0.5	2.2			18.5
	30-07	8	6.8	11.0	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.05	0.05	0.5	0.1	0.3	0.0	0.9	0.6	0.6	0.4	0.0			3.6
	02-08	32	6.9	9.1	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.4	0.1	0.2	0.0	1.5	0.4	0.0	0.0	0.0			2.7
	03-08	6.4	6.7	9.1	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.05	0.05	0.5	0.1	0.4	0.0	0.3	0.6	0.9	0.7	0.2			3.7
	06-08	7.9	6.9	9.7	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.4	0.1	0.0	0.0	0.9	0.3	0.6	0.0	0.0			2.4
	08-08	28.7	6.8	9.1	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.3	0.1	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0			1.9
	19-08	13.2	6.4	5.2	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.4	0.1	0.0	0.0	1.2	0.2	0.4	0.0	0.0			2.3
	23-08	24.2	6.0	6.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.3	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0			1.2
	26-08	12.2	6.4	2.6	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.0			1.2
	28-08	10.7	6.3	9.1	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.5	0.1	0.0	0.0	0.6	0.3	0.7	0.4	0.0			2.6
	03-09	54.2		3.9	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0			0.8
	10-09	4.9	5.9	27.2	0.12	0.03	0.02	0.02	0.05	0.03	0.09	0.03	0.20	0.19	2.5	0.3	0.9	0.5	2.7	1.1	5.5	1.4	0.0			14.9
	11-09	7.5	6.0	12.3	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.00	0.07	0.08	0.7	0.2	0.6	0.2	1.5	0.6	2.4	0.0	0.0			6.1
	16-09	7	6.7	14.9	0.04	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.06	0.07	0.8	0.2	0.2	0.0	1.5	0.7	0.6	0.5	0.0			4.5
	19-09	19.2	6.7	16.2	0.05	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.07	0.07	1.0	0.2	0.2	0.0	1.8	0.7	0.4	0.5	0.0			4.8
	20-09	7.4	6.3	10.4	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	0.05	0.6	0.1	0.0	0.0	1.8	0.0	0.6	0.4	0.0			3.6
	25-09	4.1	6.0	22.7	0.11	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	0.07	0.02	0.14	0.15	2.3	0.2	0.0	0.0	2.4	0.7	4.2	0.9	0.0			10.8
	27-09	30.6	6.0	2.6	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.0			1.2
	12-10	3.2	4.7	81.6	0.29	0.10	0.07	0.07	0.00	0.09	0.34	0.10	0.52	0.53	5.7	1.2	2.7	1.5	0.0	3.1	21.1	4.8	0.0			40.1
	16-10	14	6.4	11.0	0.04	0.02	0.00	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.06	0.07	0.7	0.2	0.0	0.2	2.4	0.5	1.0	0.0	1.9			7.0
	17-10																									

Critique des méthodes d'estimation des débits solides

A. MODE DE PRELEVEMENT

1. CHOIX DES POINTS DE MESURE

La mesure des débits liquides nécessite le calcul des vitesses sur un grand nombre de points pour plusieurs verticales. Comme la filtration d'un litre d'eau doit se faire sur chacun des points mesurés, il est nécessaire de sélectionner des verticales et de ne pas trop multiplier le nombre de points.

Le fleuve Niger n'excédant pas une largeur de 2 km en hautes eaux, 3 à 5 verticales sont retenues avec 1 à 5 points selon la profondeur. Les points en surface sont toujours sélectionnés sous une tranche d'eau de plus de 40 cm afin d'éviter les erreurs de calcul de vitesse dus à l'effet des vagues. Les points au fond sont pris à plus de 30 cm afin de ne pas prélever les sables transportés par saltation ou charriage.

Les sections du delta aval ne sont pas équipées de bases pour le calcul au cercle hydrographique des abscisses. Le calcul du débit liquide sera moins précis et sera souvent déduit de l'étalonnage des stations acquis dans les précédentes études. Cette approximation est sans conséquence puisque le but de ces jaugeages est la détermination de la concentration moyenne de matières en suspension (MeS) dans la section.

Une échelle hydrométrique de référence et la relation hauteur/débit, connus sur les stations principales, permettront par la suite le calcul des flux de MeS.

En divisant le débit solide par le débit liquide calculé avec les mêmes points, nous obtenons une concentration moyenne plus précise puisqu'elle affecte un poids à chaque valeur de concentration.

Pour les stations de Ke-Macina, Kara, Tilembeya, Banankoro, Koulikoro, des jaugeages liquides précis sont faits mais les prélèvements d'eau ne se font pas sur toutes les verticales et sur chaque point de mesure de vitesse. La concentration moyenne sera déduite du débit solide et du débit liquide calculé uniquement avec les points où les prélèvements ont été faits.

En basses eaux sur les stations précitées, et de manière systématique pour les stations du centre du delta, la section de jaugeage est définie par deux repères naturels sur les rives du fleuve. Les distances entre les verticales et la largeur totale de la section sont déterminées approximativement.

Les jaugeages sur les stations amont Banankoro, Koulikoro, Ke-Macina, Kara et Tilembeya ont débuté en 1990 et sont plus nombreux que ceux du delta en aval de Mopti, qui ont commencé seulement en 1992. C'est après l'étude de la première année de mesure qu'une détermination plus précise des débits solides s'est révélée nécessaire. Les stations en amont

du delta sont plus facilement accessibles pour les équipes d'hydrologues basées à Bamako. Les autres stations sont à plus de 700 km de Bamako et accessibles pour la plupart en bateau seulement dans la période d'insécurité que connaît la région.

2. REPARTITION SPATIALE DES CONCENTRATIONS PONCTUELLES

Des mesures intenses ont été réalisées, essentiellement durant la crue de juillet à novembre 1993, afin d'établir un protocole de prélèvements futurs plus précis, qui sera réalisable par les observateurs sur chacune des stations.

Dans ce but, des jaugeages solides sont faits sur toutes les stations du delta et en amont durant la crue à une fréquence mensuelle.

Pour chaque jaugeage, la variabilité d'un point à l'autre est grande. Les concentrations peuvent varier de plus de 250%. Les écarts-types sur l'ensemble des valeurs de concentration d'une section sont plus forts lorsque les valeurs de MeS sont faibles. Les variations sont aussi importantes sur les différents points d'une même verticale que sur la largeur de la section de mesure. *Ceci indique qu'il n'est pas nécessaire de multiplier le nombre des verticales.*

Plus de 50% des concentrations maximales sont enregistrées au fond du fleuve. Toutefois, l'augmentation des teneurs en MeS vers le fond n'est pas systématique. Les vitesses ponctuelles relevées au fond ne sont pas élevées (0.4 m s^{-1}), ce qui explique l'absence de remous de fond et la faiblesse du transport par charriage (Nouvelot, 1969).

Le tracé de la section des courbes d'isovaleurs de la concentration, pour les stations de Koulikoro et Douna ne fait pas ressortir une homogénéité dans la section (figure a).

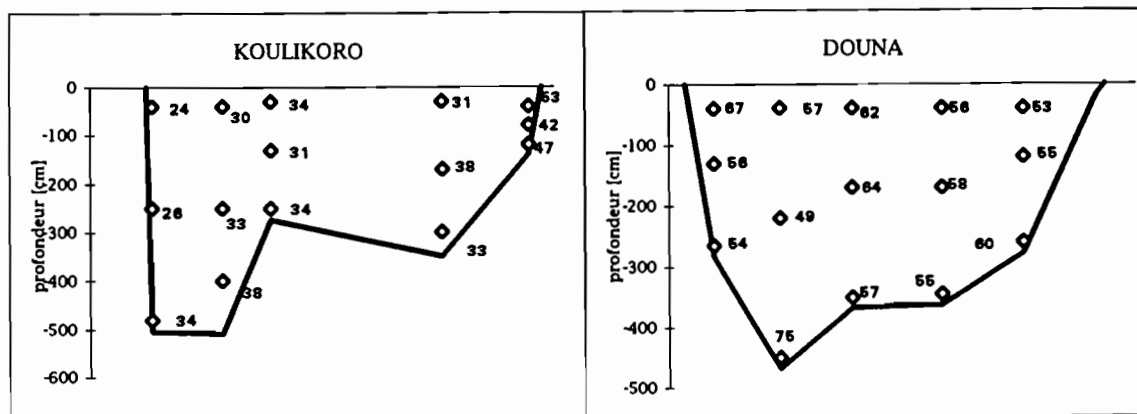


fig.a: répartition spatiale des concentrations (g m^{-3}) de MeS sur une section de mesure

Vu le faible nombre de points de mesure sur chaque verticale, cette analyse de la répartition des concentrations n'est pas significative. Aucun changement de la répartition des concentrations n'est enregistré avec l'évolution du débit liquide.

Vu l'absence d'une évolution systématique des concentrations dans le profil des verticales, la sélection d'une seule verticale retenue dans l'étude du fleuve Congo (Olivry et al, 1988) n'apporterait pas, ici d'informations suffisantes dans la détermination des concentrations moyennes.

B. COMPARAISON DES VALEURS DE CONCENTRATIONS

Pour les stations en aval de Mopti, les jaugeages n'ayant commencé qu'à la crue 1993, le nombre restreint de mesures nous a conduit à faire une étude générale de toutes les stations. Ceci n'est possible que parce qu'aucune des stations ne présente de particularité en ce qui concerne la variabilité des concentrations de MeS selon les méthodes utilisées. Pour les stations amont de Ke-Macina, Kara et Tilembeya, une comparaison sur chaque station sera développée.

Le résultat du jaugeage étant considéré comme le plus proche de la vérité nous l'avons choisi comme valeur invariable y (x et y sont exprimés en $g\ m^{-3}$). L'ensemble des résultats comparés est reporté sur les tableaux.

1. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS « JAUGEAGE/MOYENNE ARITHMETIQUE »

Pour les stations au nord de Nantaka, la relation entre la moyenne arithmétique de tous les points et la concentration obtenue par le jaugeage est très bonne.

$$y = 0.94x + 0.02 \quad R = 0.99$$

Pour l'ensemble des stations de l'entrée du delta la relation est de la forme:

$$y = 1.07x - 2.47 \quad R = 0.98$$

avec:

pour Tilembeya: $y = 1.16x - 5.06 \quad R = 0.99$

Kara: $y = 1.06x - 2.07 \quad R = 0.98$

Ke-Macina $y = 0.95x + 0.5 \quad R = 0.99$

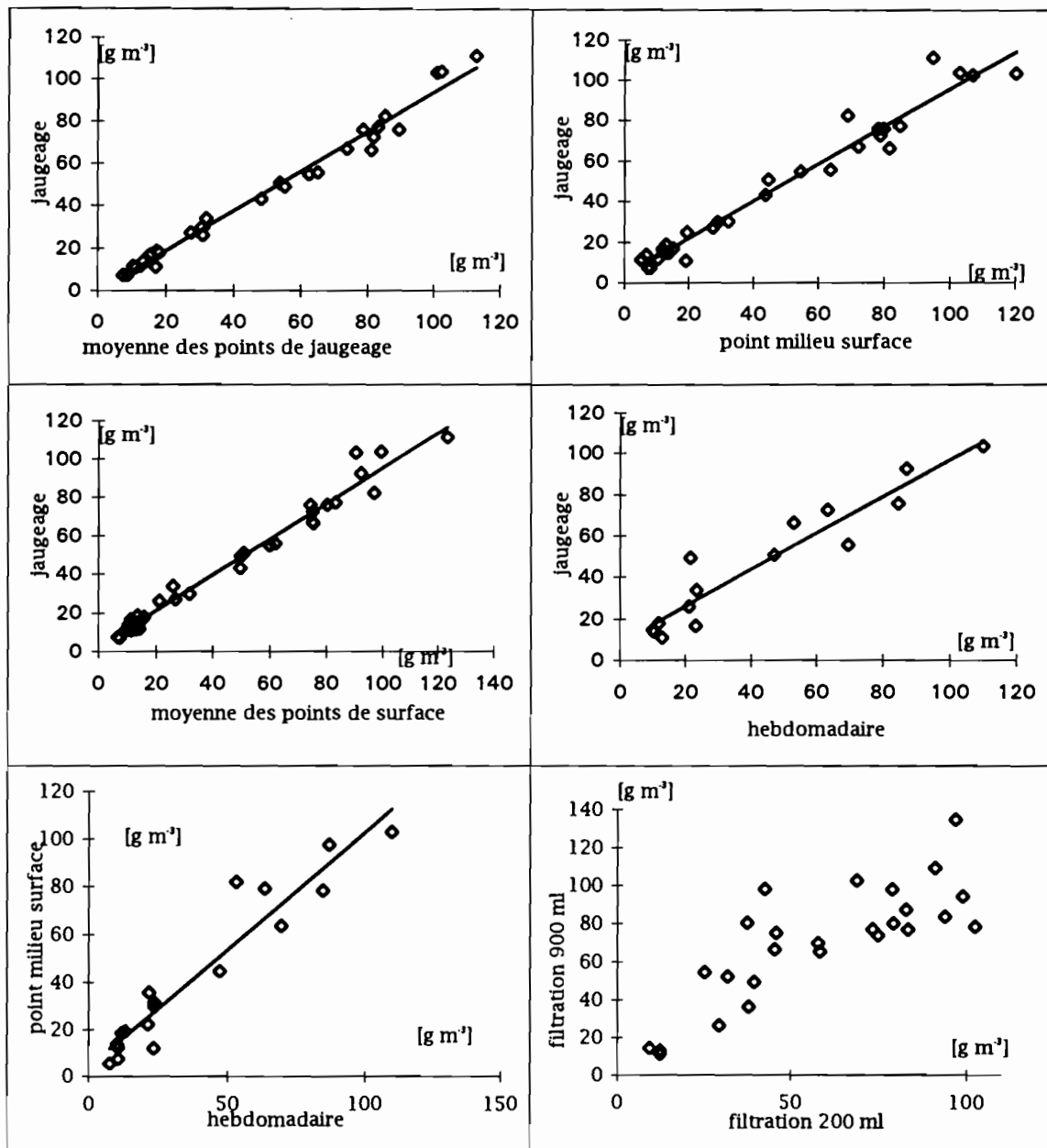
Comme les mesures de vitesse sont effectuées en même temps que les prélèvements d'eau, une méthodologie qui serait uniquement basée sur un calcul de moyenne arithmétique n'apporterait pas un gain de temps. Le treuil et le saumon qui sont utilisés pour les mesures de vitesses pourraient être remplacés toutefois par un autre système moins lourd.

Annexe 8

STATION	date	jaugeage	moy.section totale				moy.surface			point milieu	bidon		hebdo.
			σ	%	ecart mx	σ	%	moy	σ				
Tonka	jul-93	103.3	101	23.9	23.7	64.3	90.5	30	33.1	120.4	90.7	19.2	
Tonka	aoû-93	77.3	83.3	7.4	8.9	26.1	83.4	7.5	9	85			
Tonka	sep-93	54.9	62.6	8.2	13.1	29.3	59.9	7.6	12.7	54.7			
Tonka	nov-93	13.8	13.5	7.5	55.5	25.7	10.5	3.1	29.5	6.9			
Kona	nov-92	30	31.2	6.7	21.5	16.3	25.5	5.4	21.1	29.1			
Kona	jul-93	29.7	30.6	4.5	14.7	15	31.9	4.7	14.7	32.3	30.7	0.7	
Kona	aoû-93	111.3	112.8	27.3	24.2	84.5	123.4	34.3	27.8	95			
Kona	sep-93	76	89.6	16.8	18.8	45.7	80.5	12.2	15.3	80			
Kona	nov-93	27.1	27.5	5.5	20	15.2	26.8	3.6	13.4	27.6			
Akka	nov-91	11.4	10.4	6.6	63	28.8	13.17	9.4	71.3	5.4			7.7
Akka	nov-92	14.6	7.5	3	40	10.8	6.9	2.1	30.4	7.5			10.6
Akka	jul-93	66.4	81.1	12.4	15.3	43.4	75.4	6.4	8.5	81.9	50	11	53.2
Akka	aoû-93	103.7	102.4	34.6	33.8	101.7	99.6	37.4	8.5	103.1	108.2	4.4	110
Akka	sep-93	50.7	53.8	20.3	37.7	72.7	50.8	16.2	31.9	44.6	58.2	3.7	47.3
Akka	nov-93	10.9	11.2	5	44.6	14.4	11.4	6.1	53.5	19.2	53.7	27.3	51.3
Dire	nov-91	16.6	15.18	5.5	36.2	15.22	11.36	3.19	28.1	11.9			23.5
Dire	nov-92	14.7	14.1	5.7	40.4	25.1	13.3	1.2	9	13.8			10.2
Dire	jul-93	72.6	81.9	11.6	14.2	24.9	75.3	3.2	4.2	79	66.7	5.8	63.3
Dire	aoû-93	55.8	65.1	10.1	15.5	44.8	62.1	8	13	63.7	45.9	4.4	69.5
Dire	sep-93	75.9	78.8	12.7	16.1	40.2	74.5	11	14.8	78.4	63.6	6.6	84.6
Dire	nov-93	17.9	18.2	6.4	35.2	19.2	15.9	3	19.1	18.4	3.5	0.6	12
Batamani	sep-92	59.8	59.6	22.5	37.8	78.5	62.7	16.7	26.6	57.4			
Batamani	avr-93	9.2	10.8	3.3	30.6	9.6	10.7	0.9	8.4	10			
Batamani	jul-93	53.5	51.2	31.5	61.5	84.7	64.2	43.8	68.2	112.9	24	0.3	
Batamani	aoû-93	92.1	97.3	29.9	30.7	78.5	91.9	34.4	37.4	101.2			
Batamani	sep-93	102.4	92.1	27.2	29.5	92.9	82.8	20.8	25.1	107.1			
Batamani	nov-93	24.7	28	9	34.1	23	20.9	3.2	15.3	19.6			
Nantaka	nov-92	33.8	32.1	7.6	23.7	30.1	26	6.4	24.6	31.5			23.6
Nantaka	nov-91	26	31	18.6	60	66	21.2	8.2	38.7	22.2			21.3
Nantaka	avr-93	13.8	13.4	7.8	58.2	19.3	13.4	8	59.7	12.1			16.8
Nantaka	jul-93	49.2	55.2	12.6	22.8	30.7	55.1	25.4	46.1	35.6	84.9	1.4	21.7
Nantaka	aoû-93	92.5	92	8.5	9.2	22.1	92.4	8.9	9.6	97.8			87.1
Nantaka	nov-93	23.9	40.3	31.2	77.4	91.5	29.9	6.6	22.1	29.7			23.6
Sarafere	nov-92	14.8	15.6	4.5	28.8	15.9	11.5	0.7	6.1	12.9			
Sarafere	sep-93	82.3	85.3	34	39.9	87.6	97.1	37.3	38.4	68.9			
Sarafere	nov-93	17	15.8	6.6	41.8	22.8	15.6	3.1	19.9	15.2			
Kakadjila	sep-92	43.1	48.3	12.7	26.3	42.9	49.6	6.1	12.3	43.7			
Tenenkou	nov-92	11.8	12.7	3.4	26.8	10.3	14.3	2.7	18.9	10.5			
Awoye	nov-91	11.3	17	18.4	108.2	65.3	9.5	4	42.1	5.2			
Awoye	sep-93	67.1	73.8	2.86	3.9	8.6	75.3	2.7	3.5	72.3			85
Awoye	nov-93	18.6	17.2	4.5	26.2	11.3	13.6	1.1	8.1	13.1			16.7
Saya	avr-93	7.2	8.7	3.7	42.5	11	7.4	1.5	20.3	8.2			

Comparaison des concentrations de MeS (g.m^{-3}) selon différentes méthodes sur le delta central

Annexe 8



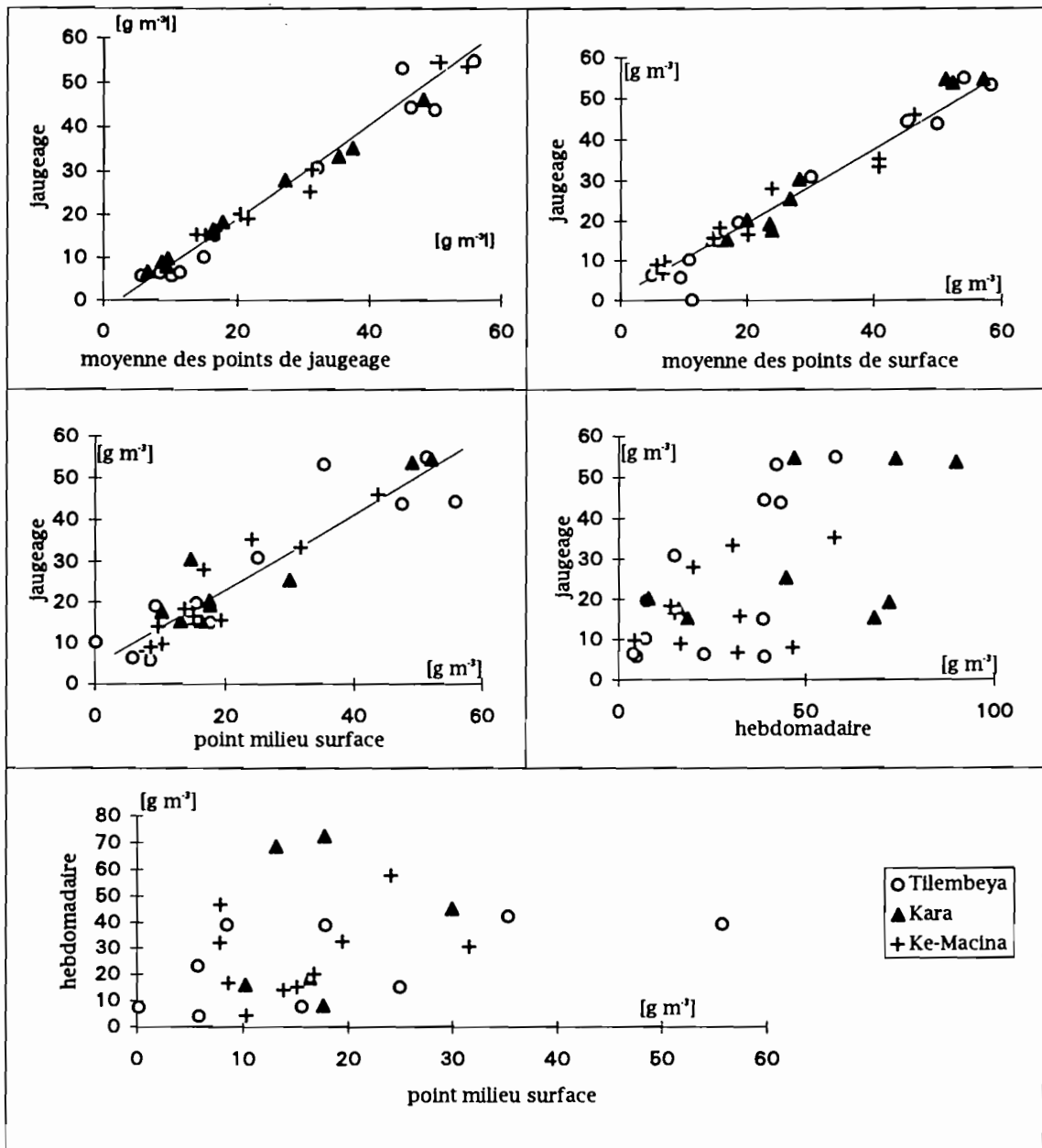
Comparaison des méthodes d'étude des mesures de concentration de MeS
sur les stations du delta

Annexe 8

STATION	date	Jaugeage	section totale				moy.surface			pt milieu (40-60cm)	hebdo
			moy.	s	%	écart mx	moy.	s	%		
Tilembeya	oct-91	10.1	15.1	10	66.2	38.6	11	11.8	107.7	0.2	7.3
	jul-92	15	16.5	7.5	45.5	22.7	15.8	10.5	66.5	17.8	38.8
	aoû-92	53.1	45	33.95	75.5	152.7	58.3	58.9	101	35.3	42.2
	aoû-92	44.3	46.3	6.6	14.3	21.8	45.2	9.4	20.8	55.8	39.2
	sep-92	30.8	32.1	10.1	31.5	41.1	30.2	10.2	33.8	25	15.2
	oct-92	19.6	21.2	6.4	30.2	23.3	18.7	3.6	19.3	15.6	1.8
	déc-92	5.7	10.2	6.9	67.6	17				10	5
	jan-93	6.4	11.5	4.9	42.6	11.4	11.4	4.9	43	5.9	4
	avr-93	6.3	8.5	6.3	74.1	16.8	5.1	0.8	15.7	5.8	23.1
	mai-93	5.7	7	2	28.6	5.7				8.5	39.1
	aoû-93	54.8	55.9	6.4	11.4	25	54.1	6.9	12.8	51.3	58
	sep-93	43.8	49.9	11.6	23.3	41.8	49.9	12.1	24.1	47.5	43.4
nov-93	19								9.3	7.3	
Kara	oct-92	15.2	15.3	6.2	40.5	22.5	16.9	5	29.6	16.3	18.6
	jul-92	17.6	17.6	14	79.5	45.3	24	22.7	94.6	10.2	16
	aoû-92	25.3	31	11.3	36.5	27.8	26.9	5.4	20.1	29.9	45
	aoû-92	54.5	50.2	30	59.8	93.4	51.2	40.3	78.7	107.3	47
	sep-92	30.3	31.2	13.5	43.3	47.6	28.3	11.1	39.2	14.7	141
	oct-92	20.2	20.5	4	19.5	12.9	20	3.6	18	17.6	8.1
	déc-92	15.3	13.9	4.8	35.5	11.5	11.3	2.6	23	13.1	68.4
	jul-93	19.1	21.6	5.1	23.6	9.7	23.6	5.4	22.9	17.7	72.3
	aoû-93	53.6	54.9	4.6	8.4	12.4	52.3	4	7.6	49	89.9
	sep-93	54.5	50.7	17.4	34.3	57.1	57.1	26.6	46.7	52	73.9
	nov-93	19								9.3	21.6
Macina	oct-91	9.7	9.6	6.2	64.6	9.9	7	3.6	51.4	10.3	4.3
	jul-92	15.6	16.3	4.8	29.4	15.7	14.8	3.1	20.9	19.4	32.6
	jul-92	35.2	37.4	13.3	35.6	43.2	40.8	13.5	33.1	24.1	57.7
	aoû-92	33.3	35.3	15.4	43.6	61.8	40.8	22.6	55.4	31.6	30.5
	sep-92	27.9	27.2	7.2	26.5	25.2	24	5.7	23.8	16.7	20
	oct-92	16.5	16.4	8	48.8	25	20.2	8.3	41.1	15.1	15.2
	fév-93	6.6	6.6	2.1	31.8	5	6.7	2.2	32.8	7.8	32
	avr-93	7.8	9.4	3.6	38.3	10.4				7.9	46.6
	mai-93	8.8	8.7	5.7	65.5	14.3	5.8	4	69	8.6	16.7
	jul-93	18.3	17.8	3.9	21.9	9.2	15.8	3.3	20.9	13.8	14.1
	sep-93	46	48.2	9.5	19.7	31.6	46.3	11.8	25.5	43.7	47.7
	nov-93	14								9.7	79.4

Comparaison des concentrations de MeS (g.m³) selon différentes méthodes sur le bassin amont

Annexe 8



Comparaison des méthodes d'étude des mesures de concentration de MeS
sur les stations de l'entrée du delta

2. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS « JAUGEAGE/MOYENNE DES VALEURS DE SURFACE »

Les graphiques 7.2.2 et 7.2.3 montrent qu'il existe une relation étroite entre les résultats par jaugeage et la moyenne des points de surface. Ces points sont au nombre de 3 au minimum lorsque le fleuve a moins de 1000 m de large et de 5 au maximum en hautes eaux.

delta aval:	$y = 0.92x + 2.51$	$R=0.99$
entrée du delta:	$y = 0.91x + 1.28$	$R=0.97$
avec Tilembeya:	$y = 0.96x - 0.68$	$R=0.99$
Kara:	$y = 1.06x - 2.18$	$R=0.96$
Ke-Macina:	$y = 0.76x + 4.32$	$R=0.97$

Bien que représentée par seulement trois à cinq points, la moyenne des mesures de surface (30 à 60 cm de profondeur) est proche de la concentration obtenue par jaugeage. Pour chaque jaugeage, les écarts-types sur la moyenne des valeurs de surface peuvent dépasser les 100%. Ils sont plus faibles pour les stations du coeur du delta (68% max.). En général, les écarts-types sur la moyenne des points de surface sont plus faibles que les écarts-types sur la moyenne arithmétique.

3. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS « JAUGEAGE/POINT UNIQUE »

Ce point de prélèvement unique est, pour les stations de Kara, Ke-Macina et Tilembeya, un "témoin" indépendant du jaugeage, pris par l'hydrologue au milieu du fleuve à 60 cm. Le lieu du jaugeage est situé au même niveau que le lieu de prélèvement de l'échantillon hebdomadaire.

Pour les autres stations, le point unique correspond au point du jaugeage pris au milieu du fleuve en surface. La section de jaugeage peut se situer à plus d'un kilomètre du site du prélèvement hebdomadaire.

Pour établir la relation entre ces deux valeurs de concentrations mesurées par jaugeage et sur un point unique, les points s'écartant trop de la valeur obtenue par jaugeage ont été éliminés.

Delta aval, 95% des valeurs ont donné la relation suivante :

$$y = 0.92x + 3.43 \quad R=0.98$$

A Tilembeya, pour 100% des valeurs, la relation est :

$$y = 0.89x + 4.48 \quad R=0.89$$

A Kara, 90% des points donnent :

$$y = 0.35x + 14.5 \quad R=0.39$$

Ke-Macina, pour 100% des valeurs :

$$y = 0.23x + 11.86 \quad R=0.9$$

Pour les trois dernières stations, 75 % des concentrations mesurées sont inférieures à 30 g m^{-3} .

Les rares points de fortes concentrations « attirent » la droite de corrélation et faussent le calcul.

La relation a été faite également avec les points de surface en rive gauche ou en rive droite et les relations sont les mêmes que pour le point unique central. L'écart entre chaque valeur de surface (RD, RG et milieu) et le jaugeage ne diffère pas.

4. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS « JAUGEAGE/HEBDOMADAIRE »

La relation entre les jaugeages et les prélèvements faits sur un seul point par les observateurs durant la même semaine est bonne pour les stations de Nantaka, Akka, Awoye et Dire. Rappelons que pour ces stations, le jaugeage et le prélèvement hebdomadaire ne se font pas sur le même site.

$$y = 0.89x + 8.2 \quad R=0.95$$

Le nombre de points pour le calcul de la droite de régression est de 20 et la relation est bonne. Les prélèvements de l'observateur donnent des concentrations un peu supérieures à celles des jaugeages.

A Tilembeya, Kara et Ke-Macina, les valeurs des concentrations hebdomadaires et du point unique du jaugeage sont très mal corrélées. La dispersion des points se fait surtout pour les faibles concentrations où les imprécisions de mesures sont fortes. Des pollutions lors du prélèvement, un bloom planctonique local, le passage de troupeaux ou hommes peuvent entraîner une surestimation des teneurs en matières en suspensions.

Ces écarts peuvent entraîner des erreurs importantes pour le calcul du bilan lorsque les débits sont forts et les concentrations faibles (maximum de la crue et décrue) si l'on s'en tenait aux prélèvements des observateurs.

5. COMPARAISON DES CONCENTRATIONS « HEBDOMADAIRE/POINT SURFACE »

Pour les stations en aval de Nantaka, la relation entre les prélèvements hebdomadaires et les points du milieu du fleuve en surface est bonne alors que les prélèvements ne se font pas sur le même site.

$$y = 0.98x + 4.04 \quad R=0.96$$

Comme pour le chapitre précédent, les stations de l'entrée du delta montrent de faibles corrélations entre les concentrations hebdomadaires et les concentrations relevées lors des jaugeages.

6. ANALYSE DES ECHANTILLONS

a) Variations hebdomadaires et journalières

Sur l'année 1991 et 1992 pour les stations de Banankoro, Koulikoro et Douna, un suivi journalier des concentrations de MeS a pu être fait durant la crue.

En dehors des périodes où l'augmentation des concentrations en MeS est attendue, les valeurs de MeS peuvent varier d'un jour sur l'autre d'un facteur 8 pour les concentrations inférieures à 10 g m^{-3} et d'un facteur 3 pour de plus fortes concentrations.

Les écarts hebdomadaires relevés sur l'ensemble des stations sont plus importants. Certaines stations présentent une évolution très irrégulière comme à Ke-Macina ou à Kara. En général, les concentrations varient d'un facteur 3 en hautes ou basses eaux. En ne tenant pas compte des périodes où il y a absence d'écoulement, les plus fortes variations ont été observées à Sofara, Nantaka, Ke-Macina pour des concentrations moyennes inférieures à 30 g m^{-3} . L'écart d'une semaine sur l'autre peut alors dépasser 100% de la concentration.

Il existe des valeurs qui s'éloignent fortement des concentrations moyennes et présentent des écarts de plus de 33 fois cette valeur. Ceci se produit notamment sur les stations où le débit est faible ou durant l'absence d'écoulement. Ces écarts très importants hors des apports turbides d'épisodes de crue ne s'expliquent que par des phénomènes locaux (passage d'homme, d'animaux, d'embarcation, effondrement d'une berge...) ou éventuellement par des erreurs commises au laboratoire.

b) Mesures de laboratoire

L'eau à analyser est stockée au laboratoire à Bamako. Le volume d'eau à filtrer (V) est déterminé à l'aide de deux colonnes en verre de 500 ml.

Des filtres en acétate de cellulose ou en nitrate de cellulose et polymères d'acétate de cellulose (MSI[®]) de $0,22 \mu\text{m}$ sont utilisés.

Les filtres sont d'abord passés à l'étuve à une température comprise entre 40 et 50° C durant 24 heures puis 20 minutes au dessiccateur. En effet, au bout d'un certain temps à l'air, le poids du filtre augmente sous l'effet de l'humidité. Le poids d'eau absorbé est proportionnel à la durée d'humidification et au taux d'humidité. Ce problème est important surtout en saison des pluies (Billon, B., 1968). Après le passage au dessiccateur (silicagel[®]), les filtres doivent être pesés rapidement. Les membranes sont alors pesées (poids P_i) sur une balance de précision Sartorius[®] (capacité 202g +/- 0.0001). Après filtration, les membranes sont de nouveau placées à l'étuve durant 24 h, au dessiccateur durant 20 minutes pour être ensuite pesées rapidement afin d'éviter l'humidification de ces filtres hydrophiles (poids P_f).

Le calcul des concentrations de matières en suspension se fait par le calcul

$$C = \frac{P_f - P_i}{V} \left[\text{g.m}^{-3} \right]$$

Plusieurs séries de mesures ont permis de définir l'erreur standard commise pour chacune de ces manipulations.

Les erreurs de type systématique affectent de façon identique tous les résultats. Pour la mesure du volume filtré, la lecture sur les colonnes en verre montre une erreur systématique importante.

Vingt mesures de volumes ont été faites avec de l'eau filtrée puis pesées sur la balance de précision.

moyenne $\bar{x} = 496.925$, écart-type $s(x) = 1.32$, écart-type de la moyenne $s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.295$.

terme correctif $d = 500 \text{ ml} - 496.925 = 3.075$.

$$\frac{d}{s(\bar{x})} = 10.42.$$

Pour la probabilité $\alpha = 0.1$ et pour $\nu = 19$ degrés de liberté, la table de Student donne $t_{0.1}(19) = 1.729$.

t est inférieur à d donc l'erreur systématique ne peut être négligée. Elle est de 3.075ml.

Le volume moyen des échantillons est de 0,9 litres. Deux mesures sur des colonnes de 500 ml sont donc nécessaires.

Une double pesée pour 80 filtres montre que l'écart ne dépasse pas les 0,1 mg. L'écart faible calculé sur la pesée des filtres est multiplié par deux car le filtre doit être pesé avant et après la filtration.

Soit V le volume filtré, P_i le poids initial du filtre, P_f le poids final du filtre et ΔV , ΔP_i , ΔP_f les erreurs faites lors des mesures sur chacun de ces paramètres, l'erreur globale faite lors de la filtration au laboratoire est:

$$D = \frac{\Delta V(P_i + P_f) + V(\Delta P_i + \Delta P_f)}{V^2}$$

Suivant les concentrations mesurées, l'importance de l'erreur systématique lors des manipulations en laboratoire est variable.

Pour le calcul de l'erreur (tableau a), les variables utilisées sont :

$\Delta V = 0.003$ [l], $\Delta P_i = 0.14$ [mg], $\Delta P_f = 0.14$ [mg], $P_i = 69$ [mg], $V = 0.9$ [l]

Poids final (Pf)	concentration [mg.l ⁻¹]	D	erreur [%]
80	12.2	0.9	7.1
100	34.4	0.9	2.7
150	90	1.1	1.2
200	145.5	1.3	0.9

tableau a: calcul statistique de l'erreur de laboratoire pour la mesure des MeS

Annexe 8

A ces erreurs inhérentes au matériel s'ajoutent les problèmes de manipulation comme des pertes de volumes d'eau lors de la filtration ou des dépôts de MeS sur les parois des fioles des rampes de filtration.

Pour évaluer les incertitudes dues à la manipulation, plusieurs filtrations d'un litre d'eau recueilli dans des bidons de 10 litres ont été faites. Les résultats sont reportés dans le tableau b. Pour chaque série, les valeurs qui s'écartent de la moyenne de $\pm 1\sigma$ ont été mises en gras. Il est important de noter que la fréquence d'apparition de ce type de valeur est ici de 1 pour 5. Le coefficient de variation sur chaque série de mesures varie de 1,5 à 46.2%. La reproductibilité pour les quatre séries où le coefficient de variation est supérieur à 20% est médiocre. Il semble que des très forts écarts dus à une mauvaise manipulation sont assez fréquents.

Ces erreurs pourraient être dues à la filtration d'un élément étranger ou grossier (algue, sable, débris d'insecte), d'une erreur d'attribution du filtre ou de notation du volume filtré, d'une perte importante d'eau lors de la filtration (fuite ?), d'un dépôt de sédiment au fond de la bouteille. Rappelons qu'une goutte représente un volume de 0.1 ml et qu'un petit "éclat" de filtre pèse 0,4 mg. Lorsque la filtration est terminée, si le filtre n'est pas retiré immédiatement, il sèche et devient plus difficile à retirer du support. De minces parties du filtre peuvent alors rester collées au support.

Toutes ces erreurs de manipulations sont décelables mais le laps de temps nécessaire pour obtenir la concentration finale (temps de filtration et du séchage du filtre) ainsi que la quantité d'échantillon filtré journalièrement ne permettent pas une vérification immédiate lorsqu'une erreur s'est produite.

station	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	essai 5	essai 6	moyen.	σ	CV%
Tonka	81.1	105.2	108.3				98.2	14.9	15
Tonka	38.5	52.5	42.4	20	20.2	30.9	38.4	12.9	38
Kona	31.1	31.1	29.9				30.7	0.7	2
Kona	69.8	71.3					70.6	1.1	2
Batam	23.8	24.2	33.6				27.2	5.5	20
Dire	60.4	66.9	58.9	73.3	71.1	69.3	66.7	5.8	10
Dire	45.6	53.4	51.9	44.6	51.8		49.5	4.0	10
Dire	2.3	1.6	2.5	3	3.6		2.6	0.8	29
Dire	55	66.4	60.1	69.8	75.9	54.3	63.6	8.6	10
Nantaka	71.3	84.1					77.7	9.1	12
Nantaka	83.9	85.9					84.9	1.4	2
Akka	60.8	55.5					58.2	3.7	6
Akka	38.9	65.5	31.6	22.2	70		45.6	21.1	46
Akka	116.4	106.2	104.5	105	107.3	109.8	108.2	4.4	4
Akka	54.8	57.9	37.4				50	11.1	22

tableau b: reproductibilité des mesures de concentrations de MeS (g m⁻³) à plusieurs stations

Annexe 8

c) Filtration 200ml/1 litre

Lors des tournées, un grand nombre d'échantillons est collecté et filtré immédiatement à l'aide d'une pompe manuelle Nalgène. Les pressions obtenues n'atteignent pas celles des pompes électriques de laboratoire. Les filtres se colmatent rapidement et le temps de filtration d'un litre d'eau dépasse plusieurs heures lorsque les concentrations sont élevées. C'est pour ces diverses raisons qu'il a été décidé de ne filtrer que 200 ml. L'éprouvette utilisée pour la détermination du volume est plus précise que celles du laboratoire. Les sédiments n'ont pas le temps de se déposer au fond de la bouteille de prélèvement. Il n'y a pas de dépôts sur les parois des récipients car le temps de filtration est très court (moins d'une demi-heure). Les manipulations sont réduites du fait du petit volume à filtrer.

Les écarts entre les concentrations obtenues en filtrant 0.9 l ou 0.2 l sont importants (tableau c). Le coefficient de variation maximal est de 56%. Pour 35% des mesures, il est supérieur à 20%.

station	date	0.2l	0.9l	s	%
Waki	août-93	83.5	76.8	4.7	5.9
Sebi		79.5	79.9	0.3	0.4
Niafunke		83	87.1	2.9	3.4
Attara		94	83.8	7.2	8.1
Aore		102.5	78.3	17.1	18.9
Bouna		99	94.4	3.3	3.4
Nantaka	sep-93	38	36.4	1.1	3.0
Batamani		75	73.8	0.8	1.1
Kona		91	109.2	12.9	12.9
Mbouna		69	102.6	23.8	27.7
Debo		58	69.8	8.3	13.1
Awoye		42.5	98.1	39.3	55.9
Sah		45.5	66.6	14.9	26.6
Sarafere		79	97.9	13.4	15.1
Bougoubery		97	134.8	26.7	23.1
Dire		73.5	76.8	2.3	3.1
Tonka		46	74.9	20.4	33.8
Niafunke		25.5	54.8	20.7	51.6
Sebi		32	52.1	14.2	33.8
Attara		39.5	49.4	7.0	15.7
Akka		58.5	65.2	4.7	7.7
Youvarou		29.5	26.4	2.2	7.8
Niafunke	nov-93	12.5	13.2	0.5	3.9
Sebi		12.5	11.3	0.8	7.1
Attara		9.5	14.4	3.5	29.0
Bouna		21.5	37.6	11.4	38.5
Bougoubery		31	25.4	4.0	14.0

tableau c: analyse comparée entre la filtration de 0.2 l et 0.9 l d'eau

7. PREMIERE MISE AU POINT

La première mesure appliquée pour éviter les erreurs aléatoires qui se produisent au laboratoire a été de faire deux ou trois prélèvements chaque semaine selon la largeur du fleuve en RD, RG et au milieu. La moyenne de ces trois valeurs sera utilisée pour le calcul de transport de sédiments. Les valeurs s'écartant trop de la moyenne pourront être éliminées.

Les premiers résultats obtenus (tableau d) sur les stations aval indiquent qu'à Dire, Nantaka et Akka, la répartition des concentrations de matières en suspension est homogène de la rive droite à la rive gauche en surface. Il semble que, sur la station de Awoye, les MeS soient plus fortes en rive droite.

STATION	RG	M	RD	s	%
AWOYE	100.5		129	20.2	17.6
	80.8		91.2	7.4	8.6
	100.4		109.5	6.4	6.1
	136.4		148.7	8.7	6.1
	137.7		211.8	52.4	30.0
	137.1		153.5	11.6	8.0
	134.8		109.8	17.7	14.5
	77		90.5	9.5	11.4
DIRE	81.1	98.2	90.2	8.6	9.5
	82.3	83.7	80.4	1.7	2.0
	93.6	111.3	104.7	8.9	8.7
	71.5	69.6	67.3	2.1	3.0
	96	83.1	86.1	6.8	7.6
	130.2	117.9	114	8.5	7.0
	116	118	109.2	4.6	4.0
	108.4	94.2	89.3	9.9	10.2
	97.2	74.3	82.2	11.6	13.8
	NANTAKA	74.6		68.2	4.5
145.3			138.3	4.9	3.5
39.7			41.3	1.1	2.8
92.2			82	7.2	8.3
85.5			90	3.2	3.6
77.2			77.3	0.1	0.1
52.3			57.7	3.8	6.9
53.2			49.3	2.8	5.4
AKKA	105.1	92.9	75.3	15.0	16.4
	68.4	78	85.3	8.5	11.0
	79.7	123.7	94.7	22.4	22.5

tableau d: comparaison des concentrations de MeS mesurées en rive droite, au centre ou en rive gauche

Ces prélèvements n'ont débuté qu'en août 1993 et ne permettent une comparaison que sur peu de valeurs. Les corrélations entre les jaugeages et les points uniques de rive droite, rive gauche ou centre sont bonnes.

RESUME

Ce travail regroupe les données de 1990 à 1994 et s'intègre dans le programme EQUANIS, Environnement et QUalité des Apports du NIGER au Sahel mené par l'ORSTOM et le CNRST.

La faiblesse actuelle des précipitations dans la zone Sahélienne entraîne une diminution des ressources en eau. Ce phénomène est particulièrement important dans la cuvette du fleuve Niger, vaste dépression dont les superficies inondées dépendent directement de la crue.

Vu la relative faiblesse des transports et des variations hebdomadaires, une étude préliminaire a été nécessaire afin de connaître la sensibilité et la bonne représentativité des méthodes d'analyse chimiques et de mesures de matières en suspension.

L'étude débute par un suivi des flux hydriques et la détermination des bilans à l'aide des méthodes isotopiques (oxygène-18 et deutérium). L'évaporation est le principal moteur de l'évolution des eaux dans la cuvette. L'apport des nappes est influent en amont durant l'été.

Les flux et bilans de matières en suspension confirment la faiblesse des transports mais la dominance des dépôts sur les reprises dans le delta central. Ceci accentue le comblement des mayos et mares, réduisant ainsi les superficies inondées.

Les bilans des éléments dissous soulignent également l'abondance des pertes dans le delta dues aux dépôts de sels sous l'effet de l'évapotranspiration dans les zones périphériques les moins soumises à l'inondation. L'enrichissement en sel des sols des plaines inondées devient un réel problème pour l'agriculture.

Enfin, les flux élevés de méthane dans la cuvette soulignent le rôle qu'a pu jouer, au cours des temps géologiques, ce bassin sur la concentration mondiale de CH_4 et ainsi son impact probable sur le réchauffement de la planète.

Les résultats sur les flux et bilans annuels doivent être remis dans leur contexte actuel. Il est certain que de tels dépôts ne sont significatifs que des années étudiées. Cette étude peut être extrapolée à d'autres périodes climatiquement similaires et à d'autres bassins endoreïques.

SUMMARY

This research builds on data collected from 1990 to 1994 and is part of the EQUANIS programme (Environment and Quality of the Niger river Inputs in the Sahel) being conducted by ORSTOM (French Institute of Scientific Research for Development and Cooperation) and CNRST (National Scientific and Technological Research Centre).

In recent year, the rainfall deficits in the Sahelian region results in a lessening of the water resources. This is particularly the case in the Niger river basin, a large depression where the flooding areas depends directly on the volume of the flood.

As the flows and weekly variations are relatively weak, a preliminary study had to be conducted to ascertain the sensitivity and representativeness of chemical analysis methods and of suspended sediment measurements.

The study begins by identifying the pattern of water flows and establishing water balances by means of isotopic methods (oxygen-18 and deuterium). Evapotranspiration is the main factor in water changes in the basin.

The input of groundwater is significant upriver when the water level is low.

The flux pattern and the balances of suspended sediment confirm the weakness of materials transport but the predominance of deposits over erosion in the inland delta. This accelerates the filling of the « mayos » (brooks) and ponds, thus diminishing flood areas.

The balances of dissolved materials also testify to the significance of the water loss in the delta due to salt deposits resulting from evapotranspiration in peripheral areas less subject to flood. Soil salinization in flood plains becomes a major problem for agriculture.

Lastly, high methane flux in the wetland reflect the role which the delta may have played in geological times in methane concentration worldwide and its likely impact on global warming.

The figures for the annual flows and balances must be placed in their present context. Such deposits are obviously representative only of the years concerned. However, this study can be extrapolated to other periods that are climatically similar and to other endoreic basins.