

**UNIVERSITÉ DU MALI**

*École Normale Supérieure*

*DER-Biologie*

**IRD**

*Institut de Recherche*

*pour le Développement*

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

THEME

CYCLE GÉOCHIMIQUE DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE

DANS UN ÉCOSYSTÈME INONDÉ : CAS DE LA MARE DE BATAMANI

(DELTA INTÉRIEUR DU NIGER)

*Présenté et Soutenu par : Rabiadou Adolphe DIARRA*

*Pour l'obtention du diplôme de l'École Normale Supérieure*

DER de BIOLOGIE

*Directeur de mémoire:*

Mr Mohamed Sida MAÏGA

*Responsable scientifique :*

Mr Didier Orange

Date de soutenance le 22 juin 1999

Année universitaire 1998-1999

Fonds Documentaire IRD

Cote: A\* 31801 Ex: unique

## DEDICACE

*Ce présent mémoire est dédié à l'intention de :*

*Feue Marie Jeanne SANGARE , ma grand mère . Que la terre lui soit légère.*

*Ma très chère mère Kadiatiou KOITA*

*Mon père Adolphe DIARRA*

*Ma soeur Mariam Viviane DIARRA*

*Qui ont consenti d'énormes efforts pour ma formation et qui m'ont toujours  
comblé par leur présence dans toutes les circonstances.*

## **REMERCIEMENTS**

Ma reconnaissance va à l'endroit de tous ceux qui m'ont aidé et guidé dans la réalisation du présent mémoire.

A mes directeurs de mémoire

- Monsieur Mohamed Sidida MAÏGA , maître de conférence, chef du DER Biologie à la faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Mali (FAST) pour avoir accepté de m'encadrer et son soutien qui n'a jamais fait défaut.
- Monsieur Didier ORANGE , Docteur en Hydrochimie et Erosion, Responsable du LECOM (Laboratoire des Eaux Continentales au Mali) à l'IRD, mon directeur de stage pour ces conseils, et son assistance .

**VEUILLEZ ACCEPTER MESSIEURS MES REMERCIEMENTS LES PLUS SINCERES.**

- A tous les professeurs du Département de Biologie de l'ENSUP pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont donné durant ma formation.
- A toute la famille DIARRA et KOITA
- Mes Tantes
  - Madame Thérèse DIARRA,
  - Madame DROUAULT Véronique,
  - Madame DIARRA Justine,
- A mon très cher ami, Monsieur Amadou MAKALOU,

**POUR TOUTE L'AFFECTION QU'ILS ME PORTENT**

**PAR LEUR SOUTIEN MORAL ET MATÉRIEL.**

---

A l'ensemble du personnel de l'IRD

- Monsieur Claude MONNET, représentant de l'IRD au MALI.
- Monsieur Michel GREARD, Technicien hydrologue.
- Monsieur Bertrand MARIEUX, Ingénieur hydrologue.
- Monsieur Drissa DIALLO, enseignement chercheur à l'IPR pour ces encouragements.
- Monsieur Marcel KUPER, Docteur agro-hydrologue.
- Au groupe SIMES / Pierre MORAND, biométricien pour ces conseils.
- Monsieur Abdul Kader Diallo Informaticien pour son assistance en Informatique.
- Mademoiselle Nafing HAGUINE.
- Madame Sangaré Kankou, secrétaire pour sa disponibilité et ses conseils.
- Monsieur. Mathieu AUDOLLENT pour son assistance en informatique.
- A tous les stagiaires en hydrologie. Pour leur sympathie.
- A l'ensemble des étudiants du département biologie.

**A TOUS, J'ADRESSE MES REMERCIEMENTS LES PLUS AFFECTUEUX QUE TOUS  
SACHENT QUE DANS LA VIE, IL Y A DES VALEURS QUI NE S'OUBLIENT PAS JAMAIS**

**A SAVOIR LA DISPONIBILITE ET LA GENEROSITE.**

# SOMMAIRE

<b><u>INTRODUCTION</u></b> .....	1
<b><u>CHAPITRE I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE</u></b> .....	5
1.1. Localisation géographique de la zone d'étude.....	5
1.2. Population du terroir de Batamani.....	7
1.3. Etude de la végétation.....	7
1.3.1. Les phytocénoses aquatiques naturelles.....	7
1.3.2. Les rizières.....	8
1.4. Les espèces piscicoles de la mare de Débaré.....	9
<b><u>CHAPITRE II : METHODOLOGIE</u></b> .....	10
2.1. Sites de prélèvements.....	10
2.2. Le dispositif expérimental.....	12
2.3. Méthode de filtration.....	12
2.3.1. Filtration du carbone.....	12
2.3.2. Filtration des nutriments azote, phosphore.....	13
2.4. Technique des analyses chimiques.....	13
2.4.1. Dosage des nitrites et nitrates.....	13
2.4.2. Dosage du phosphore minéral dissous.....	14
2.4.3. Dosage du carbone.....	16
2.4.3.1. Mesure du Carbone Organique Particulaire (COP).....	16
2.4.3.2. Mesure du Carbone Organique Dissous (COD).....	17
<b><u>CAPITRE III : HYDROLOGIE DE LA MARE DE DEBARE</u></b> .....	18
3.1. Variabilité hydrologique interannuelle du Niger.....	18
3.1.1. Variabilité actuelle du Niger à la station de Ké-Macina.....	18
3.2. Variabilité saisonnière du Niger.....	19
3.3. Climatologie et hydrologie de la mare de Débaré.....	21
3.3.1. Les principaux aspects de la climatologie.....	21
3.3.2. Les principaux paramètres climatiques.....	21
3.4. Présentation du fonctionnement hydrologique de la mare de Débaré.....	29
3.4.1. Généralités sur les paramètres du bilan hydrologique.....	30
3.4.2. Le dispositif de mesures et le protocole de suivi hydrologique.....	32
3.4.3. Le cycle hydrologique de la mare de Débaré 1998 –1999.....	35
3.4.4. Définition des 6 périodes hydrologiques fonctionnelles 1998-1999.....	38
3.5. Fonctionnement hydrologique de la mare .....	48
3.6. Calcul du bilan hydrologique de la mare.....	49
3.6.1. Apports des précipitations directes.....	51
3.6.2. Apports des précipitations par ruissellement.....	51
3.6.3. Pertes par évaporation.....	53
3.6.4. Pertes et apports par infiltration.....	54
3.6.5. Apports et pertes par écoulement.....	54

3.7. Bilan hydrologique annuel.....	57
-------------------------------------	----

#### **CHAPITRE IV : UTILISATION DE L'ESPACE**

4.1. La pêche.....	59
4.1.1. La pêche de crue.....	59
4.1.2. La pêche des hautes eaux.....	60
4.1.3. La pêche de décrue.....	61
4.4.1. Les pêches d'étiage.....	61
4.1.5. La pêche collective.....	61
4.2. La riziculture.....	61
4.3. L'élevage bovin transhumant.....	61

#### **CHAPITRE V : LES PRINCIPAUX CYCLES GEOCHIMIQUES**.....64

5.1. Le cycle géochimique du carbone.....	65
5.1.1. Les pertes en CO <sub>2</sub> .....	65
5.1.2. les gains en CO <sub>2</sub> .....	65
5.1.3. Action de l'homme sur le cycle du carbone.....	69
5.1.4. Rôles des phénomènes abiotiques dans le cycle du carbone.....	70
5.2. Le cycle de l'azote.....	71
5.2.1. le cycle de l'azote.....	71
5.2.2. La nitrification.....	72
5.2.3. La dénitrification.....	73
5.2.4. Action de l'homme sur le cycle de l'azote.....	75
5.3. Cycle du phosphore.....	77
5.3.1. Cycle du phosphore en milieu terrestre.....	77
5.3.2. Cycle du phosphore en milieu aquatique.....	77

#### **CHAPITRE VI : BILAN GEOCHIMIQUE DES NUTRIMENTS ET DU**

##### **CARBONE ORGANIQUE DANS LA MARE DE BATAMANI.....82**

6.1. Evolution saisonnière des concentrations d'ammoniac.....	82
6.2. Evolution saisonnière des concentrations en nitrate.....	86
6.3. Evolution saisonnière des concentrations en phosphore.....	89
6.4. Evolution saisonnière des concentrations en carbone organique.....	91
6.5. Les paramètres et les contraintes en zone humide tropicale : compartiments et paramètres..	96
6.5.1. Les paramètres.....	96
6.5.2. Les compartiments.....	96
6.5.2.1. Les matières organiques allochtones (apports).....	97
6.5.2.2. Les matières organiques autochtones (dépôts).....	98
6.5.2.3. Les matières organiques de rejets anthropiques.....	98
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>99</b>

## INTRODUCTION

Le fleuve Niger, avec ses 4200 km traverse l'Afrique de l'Ouest entre la Guinée et le Nigéria. Au Mali après sa confluence avec le Bani, il remplit l'immense cuvette lacustre au centre de l'Afrique de l'Ouest appelé Delta Intérieur du Niger qui couvre une superficie de 50 000 km<sup>2</sup> suivant un rectangle orienté SW-NE de 450 km de longueur sur 120 km de largeur (carte figure 1). Le milieu est soumis au climat sahélien et subdésertique avec, au sud, à la station de Ké-Macina, plus de 550 mm de précipitations annuelles et, au Nord, à Diré, seulement 250 mm.

Ce fleuve est une source de revenu important pour les populations locales. Le Delta Intérieur abrite les trois systèmes de productions, la pêche, l'agriculture et l'élevage. C'est également une zone d'importance écologique avec ces grandes mares, comme le lac Débo, des petites comme celle de Débaré, des marigots et des bougoutières constituant des frayères (les poissons), des niches (certains animaux) et pâturage pour le bétail. C'est un endroit idéal pour les oiseaux venant d'Europe qui viennent y passer la mauvaise saison (zone protégée du Wallado).

Historiquement le fleuve est réputé pour la richesse matérielle et culturelle du milieu. C'est également le lieu de rencontre de différentes civilisations : les habitants du Moyen orient, et ceux de l'Afrique noire se rencontraient et troquaient leur marchandise : le sel du Nord contre les denrées alimentaires du Sud : et les cultures de leurs propres ethnies.

Depuis l'arrivée des colons de nombreuses recherches furent effectuées sur l'histoire, le peuplement, l'hydrologie, la faune et la flore naturelle du Delta. Après l'indépendance le gouvernement malien mena également de nombreux projets en vue de la connaissance et de la gestion de ses ressources: OPM (Opération Pêche de Mopti) suivi et évaluation de la production halieutique, ODEM (Opération de développement de l'élevage de Mopti) suivi des itinéraires de pâturages et estimation de la production etc... .

C'est ainsi que pour collecter et actualiser l'ensemble des études concernant le Delta qu'a été défini le projet de recherche pluridisciplinaire GIHREX (Gestion Intégrée, Hydrologie, Ressources et systèmes d'Exploitation), visant à étudier «l'impact de la disponibilité en eau sur le développement viable des sociétés en utilisant les ressources du DIN au Mali» (Olivry et al. :1997). Le projet s'appuie sur une modélisation en terme de production des systèmes

d'exploitation qui sont tous dépendants de l'hydrologie (importance de la crue annuelle du fleuve extension et durée de l'inondation dans les plaines).

Cette modélisation n'est possible que grâce à la recherche fondamentale permettant alors d'acquérir des connaissances scientifiques afin d'aider les acteurs (les politiciens, la population) à prendre des décisions n'allant pas à l'encontre de la protection et la gestion durable des ressources Delta. Puisque tout aménagement d'un cours d'eau, toute modification de l'occupation des sols d'un bassin versant ont des répercussions sur le cycle hydrologique, la qualité des eaux et, en définitive, les systèmes biologiques. C'est pourquoi le Mali a élaboré dans sa politique environnementale le *Programme National de maîtrise des Ressources en Eau* (PNRE, 1998) permettant une connaissance de la dynamique des bassins versants et des fleuves ainsi que leur gestion durable.

Les avantages de la modélisation sont donc énormes et profitables, les agriculteurs et les pêcheurs seront enchantés d'avoir la date de la crue 2 semaines à l'avance afin d'ajuster les dates de semis et de bien préparer la pêche. Cela permettra aussi d'assurer la faisabilité d'une étude d'impact environnementale en cas de besoin d'aménagement.

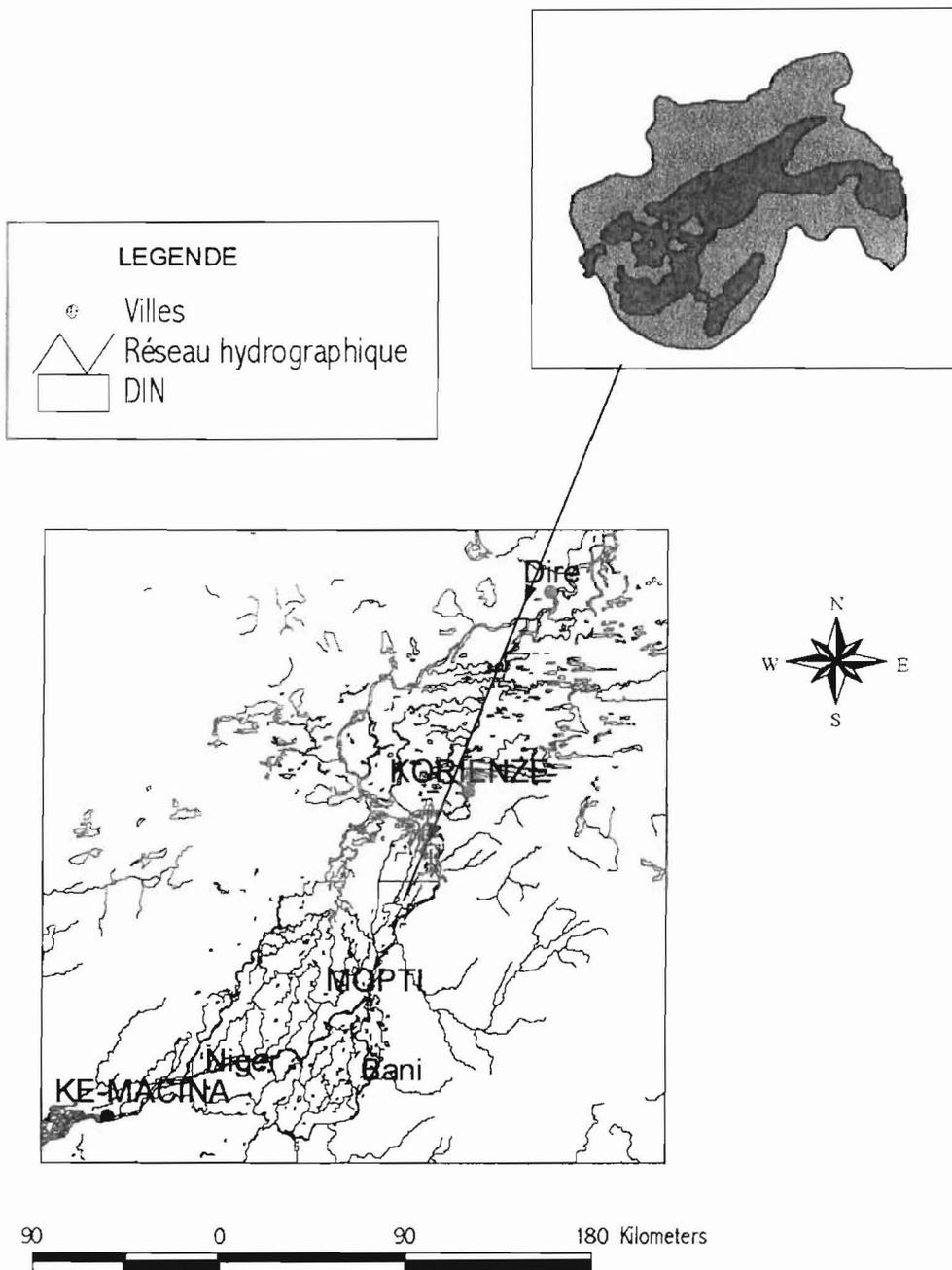
C'est dans ce cadre que se situe la problématique de cette étude qui ressort de la recherche fondamentale, par la connaissance de la dynamique d'un hydrosystème complexe, en l'occurrence la mare de Débaré dans le DIN et par une étude quantitative des flux de matières (MES, COD, COP, les sels nutritifs  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{PO}_4^{2-}$ ) suivant les différentes périodes fonctionnelles du cycle hydrologique. L'eau constitue le moteur du fonctionnement pour un tel système, elle sera donc soumise à des paramètres comme les aménagements hydroélectriques, les variations climatiques (saison des pluies tardives ou précoces), et hydrologiques (crue, décrue, étiage) qui ne sont pas sans effets négatifs. Ceux-ci, influenceront directement sur la disponibilité en eau, qui déterminera la productivité biologique (sels nutritifs, COD etc...) entraînant par là, la biodiversité animale et végétale du milieu. Ces ressources naturelles conditionnent aussi les stratégies adoptées (minimisation des risques) par les 3 systèmes de production.

Pour mener à bien ce travail, l'étude a été divisé en 6 chapitres.

- Le premier est une présentation générale du site d'étude

- Le deuxième. montre les sites de prélèvements, les méthodes utilisées pour la filtration et le dosage des différentes formes du carbone (COD, COP), de l'azote ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) et du phosphore ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) dans la mare.
- Le troisième aborde le fonctionnement hydrologique de la mare (mode de remplissage, vidange etc.), dans lequel le découpage du cycle hydrologique de la mare en 6 périodes fonctionnelles est effectué pour obtenir un bilan hydrologique annuel et un par période. Puisque le bilan hydrologique est aussi nécessaire au calcul des flux.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation du milieu par la population qui se fait comme suit: la pêche est effectuée sur les eaux par les Bozos l'agriculture sur les plaines inondées par les Markas et l'élevage par les Peuls.
- Le cinquième est une étude bibliographique sur les principaux cycles géochimiques (Carbone, Azote, et Phosphore) dans la nature
- Le dernier chapitre sera consacré à l'étude de l'évolution du carbone et des nutriments dans la mare. Les flux de matières (entrants et sortants) seront quantifiés, afin d'avoir une idée sur les flux de matières transportés et l'importance de l'érosion chimique. Ils serviront également à l'élaboration d'un bilan géochimique par période hydrologique en fonction de la disponibilité eau du système. Ensuite on procédera à l'interprétation de la variations temporelle de ces flux.
- Ce dernier chapitre ne sera pas terminé pour des causes indépendantes de notre volonté. L'étude du fonctionnement hydrologique ayant pris plus de temps que prévu: les résultats des analyses chimiques ont aussi pris du retard. Nous procéderons donc à une simple interprétation de l'évolution des concentrations du carbone organique et des nutriments. En fonction des périodes hydrologiques.

## Localisation de la mare dans le Delta Intérieur du Niger

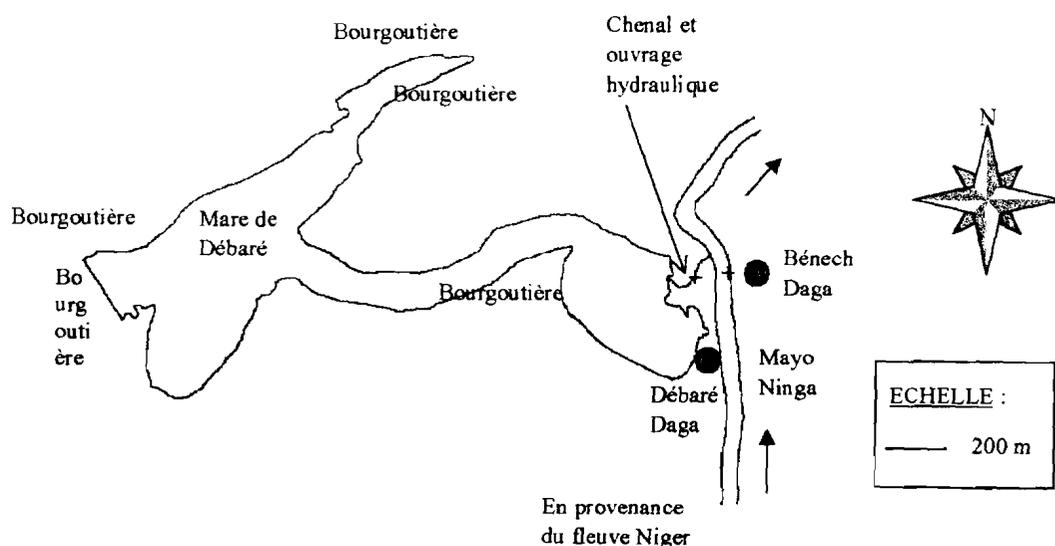


**Figure 4 :** Delta Intérieur du Niger et localisation de la mare de Débaré au MALI

## CHAPITRE I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

### 1.1. Localisation géographique de la zone d'étude

Le terroir étudié a été baptisé "Batamani" du nom de son principal village, et se situe dans le Delta Intérieur du Niger à une cinquantaine de km en aval de Mopti ( $14^{\circ}53'N$  ;  $4^{\circ}03'W$ ). La mare principale, dite mare de Débaré, couvre environ 75 ha, mais peut atteindre 500 ha en période de hautes eaux. La mare était naturellement remplie par le côté Sud-Ouest (canal de Shiéni, carte figure 2). Désormais, elle est reliée par un petit chenal creusé récemment et barré par un ouvrage hydraulique, au Mayo Ninga, défluent de 150 m de long qui dérive du fleuve Niger (voir carte figure 1). L'ouvrage est un simple pont sous lequel peuvent être placés des batardeaux (planches de bois) selon les besoins de gestion de l'eau afin de fermer plus ou moins partiellement la communication entre Débaré et le Mayo Ninga



**Figure 2:** Carte de la mare de Débaré (source enquêtes)

Autour de la mare se trouvent trois villages importants : Batamani, Batamani Daga et Saré Mama (voir carte figure 3), et deux campements de pêcheurs dépendants de Batamani, Débaré Daga au bord de la mare, et Gatal Daga à l'entrée du Mayo Ninga. Plus au nord le long du Mayo, se situe

le village Peul de Ninga, Ces villages délimitent ce que l'on appellera le "terroir" de Batamani, c'est-à-dire l'espace situé sous l'influence anthropique de ces derniers, par le biais de la pêche, de la riziculture, de l'élevage et du commerce qui s'y pratiquent.

Le terme de "zone de Batamani" désigne en revanche un espace plus vaste, correspondant à la zone d'étude de l'équipe du Suivi de la pêche (Morand et Kodio 1996). C'est ainsi que, lorsque cette dénomination sera employée, il faudra comprendre, que l'on parle à la fois de la mare et de la portion de fleuve qui la longe (carte figure 3).

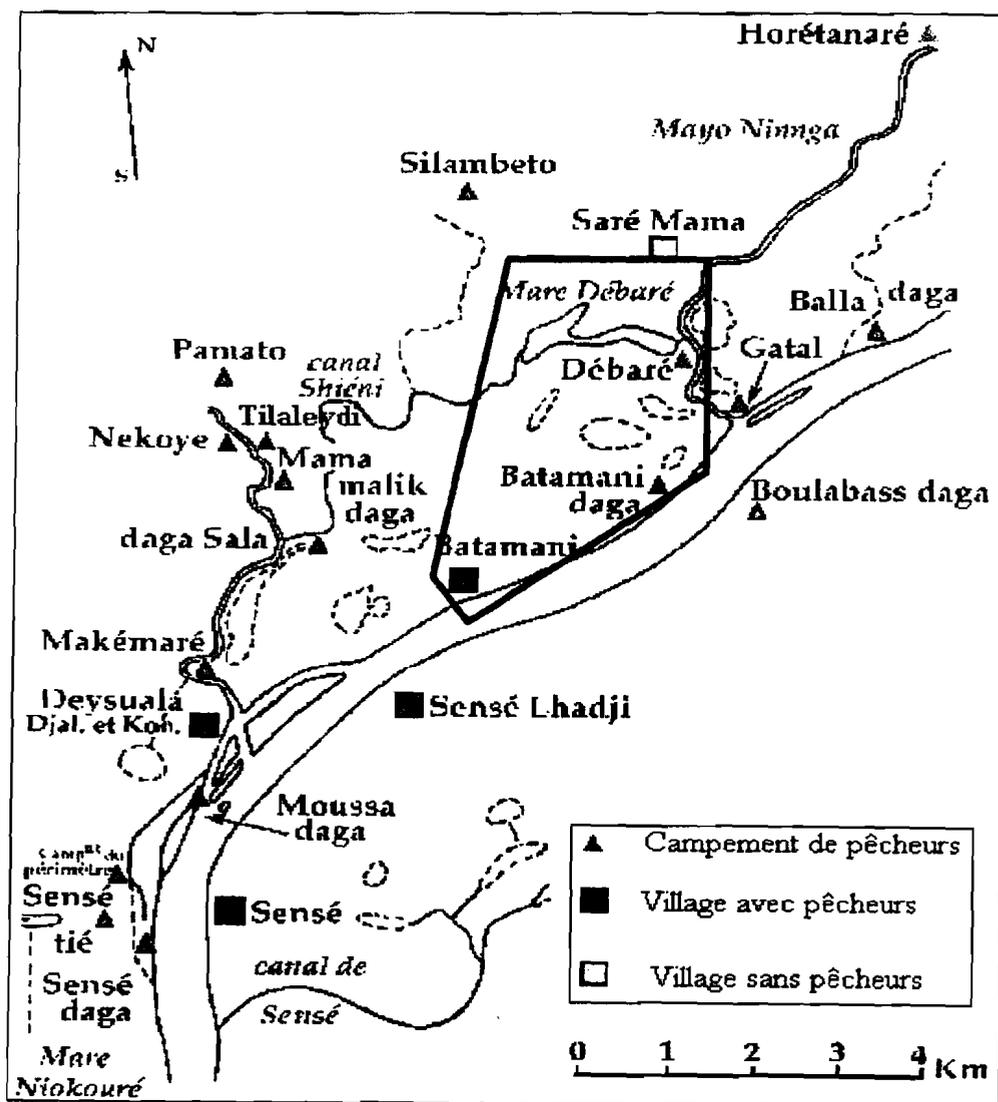


Figure 3 : carte de la zone de Batamani. La surface encadrée correspond au terroir de Batamani (source Morand et Kodio, 1996)

## 1.2. La population du terroir de Batamani

Sur le terroir de Batamani, on rencontre les trois ethnies principales du Delta: les pêcheurs Bozo (Batamani et Batamani Daga), les éleveurs Peuls (Batamani et Ninga) et les agriculteurs Marka (Saré Mama). Quelques agriculteurs Rimaïbé et des esclaves Bella se sont intégrés aux villages. Batamani, fondée avant la Dina par un Bozo et un Peul (Sylla, 1995), a donc vécu les mêmes bouleversements de peuplement et une sédentarisation croissante de tous les pêcheurs et éleveurs sur son terroir, ce qui a entraîné une rapide progression de l'agriculture. Désormais cependant, l'hégémonie des Peuls a disparu légalement ; d'un point de vue coutumier, ce sont cependant toujours les Peuls de Ninga qui gèrent les terres et notamment les pâturages, tandis que les Bozos sont les seuls à pouvoir intervenir sur la mare, pour la pêche ou la gestion de l'eau.

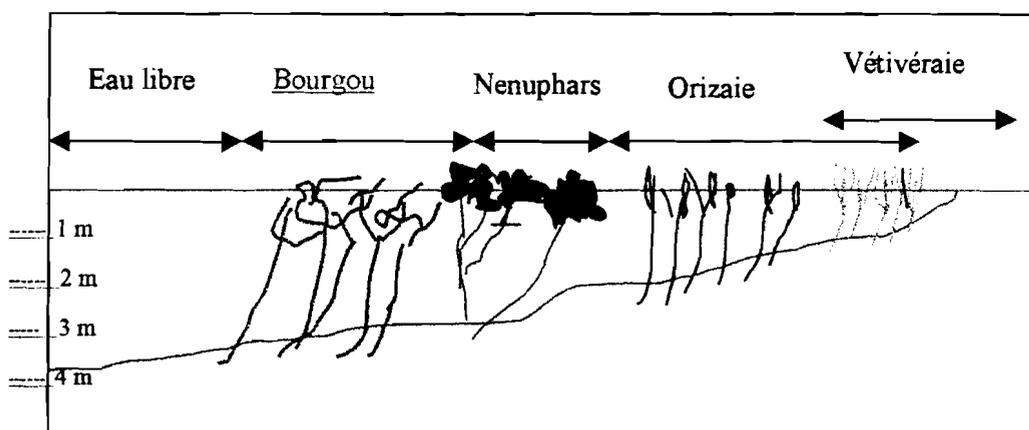
## 1.3. Etude de la végétation:

La richesse du Delta résulte de la très forte productivité de ce milieu et les processus qui entrent en jeu peuvent être schématiquement résumés de la façon suivante :

- Pendant la saison sèche la couverture végétale qui s'est développée pendant la pluie et l'inondation est consommée par les troupeaux ou meurt. Elle est plus rapidement et plus complètement recyclée qu'elle ne le serait en milieu aquatique.
- Pendant les pluies qui précèdent les crues, les sels nutritifs disponibles sont rapidement mobilisés et une végétation abondante se développe. mobilisation. Globalement, on peut distinguer :

### • 1.3.1. Les phytocénoses aquatiques naturelles:

Généralement la végétation hygrophile d'une mare se répartit selon la profondeur maximale de la crue et la durée de l'inondation (figure 4, d'après Wuillot, *in* Quensière, 1994).



**Figure 4 :** Représentation schématique de la répartition des phytocénoses sur une mare type du DCN (d'après Wuillot, *in* Quensière 1994 a)

Au-delà d'une profondeur de 3 à 4 m l'eau est libre de macrophytes enracinées.

- La première phytocénose de profondeur est la bourgoutière, composé en grande partie d'hélophytes vivaces à tiges flottantes *Echinocléa Stagnina* (bourgou) et de *Vossia cuspidata* (faux bourgou) qui domine par endroit sous forme de tâches de quelques centaines de mètres carrés ou de ceinture en bordure de la phytocénose. Il existe deux types de bourgou : *Echinocléa Stagnina* ou bourgou rouge caractérisé par ses tiges très sucrées qui est apprécié par le bétail, ainsi que par les enfants ; et *Echinocléa pyramidalis* appelé également bourgou blanc. La fructification du bourgou commence généralement à la fin de la montée des eaux.

- Le recouvrement des hydrophytes libres à feuilles immergées (*Utricularia inflexa* et *Utricularia reflexa*) varie fortement d'un site à l'autre mois de 5 % à plus de 75%.

Vers 2 m de profondeur nous avons les nénuphars (*Nymphaea* sp) à feuilles et à tiges flottantes mêlées à quelques hydrophytes libres à feuilles immergées.

- L'orizaie où riz sauvage vivace, l'espèce *Oryza longistaminata* domine largement (recouvre une surface toujours supérieure à 75%), et se développe à partir des fonds inférieurs à 2 mètres. L'espèce principale est le riz sauvage *Oryza cuspidata* (Diga) mêlé au bourgou et à d'autres hélophytes herbacées, dont le vétivier (*Vetivera nigriflora*). Plus on remonte la berge, plus cette espèce devient importante, jusqu'à former sa propre végétation : (voir figure 4).

- La mare de Débaré a elle une répartition un peu différente. La zone de nénuphar n'est pas grande il n'y a presque pas de phytocénose à vetiva sauf en un point localisé à l'ouest de la mare (Débaré Fitini). La végétation prédominante est la bourgoutière avec des proportions d'*Echinocléa* et de *Vossia* variant d'un endroit à l'autre, et l'orizaie sauvage est souvent transformé en rizière ou exploité telle qu'elle est. Les arbres sont absents du terroir mis à part 1 ou 2 spécimens et une récente plantation d'eucalyptus. Autour de la mare en saison sèche quelques petits îlots de sables conservent un peu d'humidité et permet à *Leptadania hastata* de pousser. Le bourgou constitue un pâturage de premier choix pour les troupeaux et une frayère pour les poissons. La surface de bourgou de la mare est estimée à 85 ha par l'OPM.

### 1.3.2. Les rizières

Dans le Delta, les variétés de riz sont soit locales, soit sélectionnées.

Les variétés locales (Smo-Oudéo, Gambiaka) sont cultivées en submersion libre ou semi-contrôlées selon le cycle des crues. Les variétés améliorées (Kao Ghaen) en submersion libre ou

semi-contrôlées, ou en périmètre irrigué. Par contre Dans notre zone d'étude les variétés locales sont les plus cultivées.

La production rizicole de la zone a été estimée à 1450 kg/ha en 1990 par l'OPM.

#### **1.4. Les espèces piscicoles de la mare de Débaré**

Le fleuve Niger compte plus de 130 espèces (Daget 1954, annexe 4), dont 3 espèces qui sont les plus représentées dans la mare, les Clarias et les Tilapias regroupant les genres *Tilapia*, *Oreochromis* et *Sarotherodon*. Il existe également une quantité non négligeable de *Labeo Senegalensis*, de *Synodontis* et de *Brycinus leuciscus*.

Ces espèces n'ont pas le même mode de vie. Le Clarias niche de préférence dans des milieux vaseux riches en matière organiques et peu agités, il peut ainsi supporter une faible quantité d'oxygène dissous. Par contre, le Tilapia s'établit près des bourgoutières et des rizières.

Les autres espèces vivent dans le fleuve ou en dans plaines inondées et certaines d'entre elles effectuent de grandes migrations (*Brycinus*, *Labeo Senegalensis*).

La production en poissons de la mare et la variation des différents éléments sont étroitement liées au cycle hydrologique de la mare qui sera donc traité dans le chapitre III.

## CHAPITRE II : METHODOLOGIE

La mare de Débaré est constituée par une mosaïque de cuvettes et de plaines qui ont des caractéristiques écologiques propres. Le choix des sites de prélèvement s'avère un peu difficile et il faudra tenir compte de sa variation spatio-temporelle (fleuve, chenaux, mare etc.)

### **2.1. Sites de prélèvements :**

Les prélèvements ont été effectués dans 9 stations dont 3 journalières (prélèvements effectués tous les jours) et 6 hebdomadaires (prélèvements effectués une fois par semaine) à l'aide d'une pirogue ou du zodiac selon la distance et l'abondance de la phytocénose. Les 9 stations sont respectivement : La mare libre, la mare bourgou, le chenal ; le Niger, Débaré Fitini, Débaré west, Shio, Komina et la Rizière Sauvage. (voir figure 5 carte)

Les prélèvements sont effectués à 30 cm de profondeur dans des bouteilles en plastiques, après les avoir rincées au moins 3 fois avec l'eau à prélever afin d'éviter toute pollution. Cette étude s'intéressera plus particulièrement à la station de la mare et au canal

# Localisation des points de prélèvement et du dispositif de mesures limnimétriques Mare de Débaré

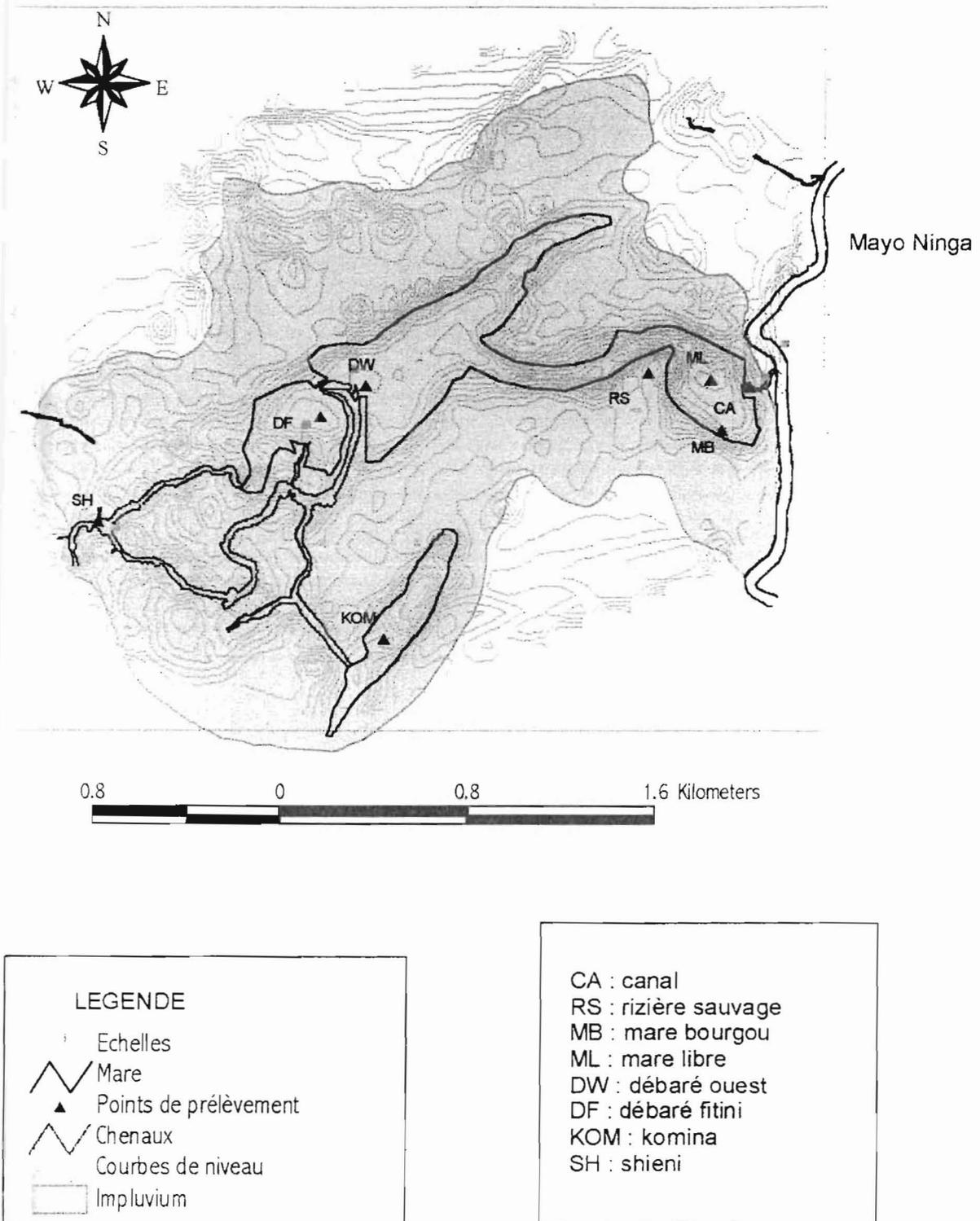


Figure 5 : Emplacement des sites de prélèvement et des échelles limnimétriques.

## **2. 2. Le dispositif expérimental :**

Le matériel est composé par :

- un matériel de filtration NALGENE (fiolle, entonnoir, support filtre )
- une pompe à main
- une pince en acier
- filtres en fibre de verre GF/F de 47 nm de diamètre,
- des flacons de 30 ml pour conserver le filtrat quand il s'agit du carbone organique dissous.
- des sachets plastiques de 90 ml pour les nutriments (azote, phosphore).
- Les filtres et les flacons pour la filtration des échantillons du carbone organique doivent être prégrillés au four à 450 °C pendant au moins 12 heures, ainsi que le haut du système de filtration. Cette opération est effectuée à la DNHE.

Les filtres sont ensuite pesés sur la balance de précision. Le poids initial est inscrit sur l'étiquette, on les conserve ensuite à l'étuve dans des boîtes de Petri individuelles.

Les flacons de 30ml en verre pour les échantillons de nutriments doivent être lavés au laboratoire avec de l'eau acidifiée (1%) et rincés à l'eau distillée, puis séchés à l'étuve.

Le matériel est entouré de papier aluminium, rangé dans des sacs plastiques et stocké dans la boîte grise.

## **2.3. Méthode de filtration**

Les filtrations s'effectuent sur le terrain.

Les échantillons destinés à l'analyse du carbone et des éléments nutritifs doivent être rapidement filtrés sur des filtres de type Whatman GF/F (porosité 47nm).

### **2.3.1. Filtration du carbone**

Le filtre est lavé à l'eau distillée et on fait ensuite passer 200 ml de l'échantillon pour le nettoyage du nécessaire de filtration, enfin les autres 200 ml seront filtrés. Le filtrat est récupéré dans un flacon de 30 ml, empoisonnés avec 0,4 ml d' $\text{HgCl}_2$  (chlorure mercurique) pour éviter toute activité bactérienne. Le filtrat représentera le carbone organique dissous totale (**COD tot**). Les flacons contenant le COD tot sont mis au froid avant son départ à Bordeaux pour une analyse ultérieure afin d'avoir les teneurs.

Pour avoir suffisamment de matière sur le filtre, on filtre encore 200 ml et le filtrat est jeté . Le filtre plein sera conservé dans une boîte de pétri avec toutes les références précises (date, lieu de prélèvement) pour analyse du carbone organique particulaire (**COP**).

### **2.3.2. Filtration des nutriments azote-phosphate**

La technique de prélèvement et d'échantillonnage est la même sinon que cette fois-ci le nettoyage se fait à l'acide chlorhydrique HCl à 5%, et on rince l'action de l'acide avec 20 ml d'eau distillée, les autres 80 ml sont filtrés. Le volume à filtrer ici est de 100 ml. Une fois de plus le filtrat sera empoisonné par du HgCl<sub>2</sub> et gardé dans des sachets plastiques de 90 ml portant la date et l'origine de l'échantillon. Ces derniers seront mis au froid en attendant une analyse ultérieure qui se fera au centre ORSTOM de Bouaké en Côte d'Ivoire.

### **2.4. Technique des analyses chimiques :**

Avant de procéder à l'analyse des échantillons, on doit s'assurer qu'ils sont bien conservés. Il existe plusieurs méthodes pour bloquer l'évolution d'un échantillon. Les plus utilisées sont :

- la congélation (efficace mais difficilement réalisable sur le terrain) ;
- l'empoisonnement. Les poisons couramment utilisés sont le chlorure mercurique (HgCl<sub>2</sub>) et le chloroforme (CHCl<sub>3</sub>). Mieux vaut prendre le chloroforme car il est moins toxique pour l'environnement que le chlorure mercurique. Dans tous les cas, il est préférable de conserver les échantillons à l'abri de la lumière et au frais si possible.

Il n'y a pas de méthode de conservation garantie, l'idéale serait d'analyser les échantillons immédiatement après les prélèvements et c'est la méthode de travail des océanographes qui peuvent facilement se déplacer avec leur laboratoire. Mais pour faute de matériels et de personnels qualifiés, les dosages des différentes matières sont faits dans d'autres laboratoires.

**2.4.1. Dosage des nitrites et nitrates :** Dans le cas des nitrites et nitrates toutes les analyses sont faites par colorimétrie.

- les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) : Les ions nitrites forment un diazoïque avec la sulfanilamide en milieu acide. Puis ce diazoïque réagit avec le N-naphtyl-éthyléthyldiamine pour former un colorant rose. C'est cette coloration que l'on mesure à 543 nm (550 nm sur autoanalyseur Technicon).

- les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sont réduits en nitrites par passage de l'échantillon sur une colonne de cadmium traité au cuivre. C'est donc la somme  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  que l'on mesure en utilisant la même méthode que pour les nitrites.

**2.4.2. Dosage du phosphore minéral dissous ( $\text{PO}_4^{2-}$ )** Le dosage est fait par un spectrophotomètre

**a. Principe de la méthode**

Les ions phosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium, en présence d'antimoine, pour former un complexe phospho-molybdique jaune. Celui-ci est réduit par l'acide ascorbique en un composé bleu qui permet un dosage colorimétrique.

**b. Matériel**

- 10 fioles de 50 ml
- 1 fiole de 100 ml
- 1 fiole de 250 ml
- 2 fioles de 1000 ml
- 1 bēcher de 50 ml
- 1 pipette automatique de 1 ml
- 1 pipette de 5 ml
- 1 pipette de 10 ml
- X tubes à essais de 20 ml
- 1 spectrophotomètre BECKMAN DU640 (cuve de 1 cm et 3 ml)
- 1 balance de PRECISA 40SM-200A (précision 1/10 000 g)
- 

**c. Réactifs**

- **Molybdate** : dans une fiole de 50 ml, on dissout 1,5 g de paramolybdate d'ammonium ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) dans de l'eau déminéralisée.
- Le réactif se conserve en flacon polyéthylène à l'abri de la lumière.
- **Acide sulfurique** : dans une fiole de 1000 ml, on ajoute avec précaution, 140 ml d'acide sulfurique (densité 1,84) dans environ 800 ml d'eau déminéralisée, après refroidissement on complète la solution à 1l.

- **Acide ascorbique** : dans une fiole de 50 ml, dissoudre 2,7 g d'acide ascorbique  $C_6H_8O_6$  dans de l'eau déminéralisée et conserver le réactif au congélateur.

- **Tartrate** : dans une fiole de 100 ml, dissoudre 0,136 g d'oxytartrate de potassium et d'antimoine (III)  $K(SbO)C_4H_4O_6$  dans de l'eau déminéralisée, en chauffant si nécessaire.

Ce réactif est stable et peut être conservé plusieurs mois au réfrigérateur.

- **Réactif mixte** : dans un bêcher de 50 ml, mélanger les réactifs ci-dessus dans les proportions suivantes :

- 10 ml de molybdate,
- 25 ml d'acide sulfurique,
- 10 ml d'acide ascorbique,
- 5 ml de tartrate.

Ce mélange ne se conserve pas plus de 6 heures et doit être préparé extemporanément.

Note : Il est possible de préparer 2 réactifs R1 et R2 :

- R1 est constitué de X fois 10 ml de molybdate, X fois 25 ml d'acide sulfurique et X fois 5 ml de tartrate.
- R2 est l'acide ascorbique.

Ces deux réactifs peuvent se conserver 1 mois au réfrigérateur.

Avant chaque série d'analyses, le réactif mixte est préparé en mélangeant 4 volumes de R1 avec 1 volume de R2.

#### **d. Mode opératoire :**

- **Processus général**

Dans un tube de 20 ml :

- mettre 10 ml d'eau à analyser,
- ajouter 1 ml de réactif mixte,
- agiter,
- attendre 5 mn le développement de la réaction colorée avant de mesurer l'absorbance (A) au spectrophotomètre à 885 nm dans une cuve de 1 cm (une cuve de 5 ou 10 cm serait préférable).

- **Etalonnage**

Solution mère (1 ml contient 1 % $\mu$ atg de P(PO<sub>4</sub>))

sécher 1 h à 110°C du dihydrogénophosphate de potassium anhydre (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), dissoudre 0,1362 g dans 1 l d'eau déminéralisée, puis ajouter 1 ml de chloroforme.

La solution peut se conserver plusieurs mois au réfrigérateur.

Solution fille (1 ml contient 0,05  $\mu$ atg de P(PO<sub>4</sub>))

mettre 12,5 ml de solution mère dans une fiole de 250 ml.

Cette solution est préparée juste avant usage.

Etalons

Dans des fioles de 50 ml introduire : 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2 ml de solution fille ; compléter à 50 ml avec de l'eau déminéralisée afin d'obtenir une gamme de : 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2  $\mu$ atg de P(PO<sub>4</sub>)/l.

Traiter 10 ml de chaque étalon en suivant le processus général.

- **Blanc réactif**

Faire au minimum 3 blancs.

- traiter 10 ml d'eau déminéralisée en suivant le processus général, mesurer l'absorbance de chaque blanc et calculer l'absorbance moyenne des blancs réactifs *Br*

**e. Calcul**

La concentration en  $\mu$ atg / l de P (PO<sub>4</sub>) de l'échantillon est

$$P(\text{PO}_4) \mu\text{atg} / \text{l} = P(A - Br)$$

Avec

A : absorbance de l'échantillon analysé : absorbance moyenne des blancs réactifs

- P : pente de la droite d'étalonnage (concentration en fonction de l'absorbance)

### 2.4.3. Dosage du carbone

Le carbone organique est déterminé dans la fraction dite dissoute totale (COD < 0,2 $\mu$ m) et le COP sur les

#### 2.4.3.1. Mesure du COP

Les filtres sont décarbonatés à l'aide d'HC<sub>1</sub> 2N, puis séchés pendant une nuit sous une hotte afin d'éliminer les excès d'acide. La mesure est faite ensuite à l'aide d'un analyseur LECO CS 15

basé sur une combustion à 850°C dans un four à induction et sous flux d'oxygène pur, qui, associé, à un catalyseur (mélange Cu/Pt), assure à la fois une combustion complète et transport du CO<sub>2</sub> produit vers une cellule infrarouge non dispersive (Cauwet et al. 1990). La calibration est faite sur des anneaux d'acier, teneur en C connue. La reproductibilité, sur deux filtres différents est de 0,1% MES. Elle est principalement affectée par les erreurs sur la détermination des MES : mauvaise homogénéisation lors de l'étape de filtration ou présence de résidus de sels sur les filtres.

#### **2.4.3.2. Mesures du COD :**

Dans les filtrats acidifiés, les concentrations en COD sont mesurées à l'aide d'un analyseur Shimadzu TOC 5000, dont le principe est l'oxydation thermique après une étape de décarbonatation (Sharp 1992 ; Cauwet, 1994). L'appareil comprend une unité de décarbonatation ; le CO<sub>2</sub> contenu dans l'échantillon acide est purgé en y faisant barboter de l'oxygène ultra-pur pendant 5-6 minutes juste avant analyse. L'appareil prélève ensuite un aliquote de 100 µl à l'aide d'une seringue calibrée et l'injecte dans un four à 680°C contenant un catalyseur de platine dans une matrice de silice (Cauwet 1994). Le CO<sub>2</sub> produit par la combustion du COD est transporté par un flux d'azote pur vers une cellule infrarouge munie d'un intégrateur qui mesure l'aire des pics. Entre 3 et 5 injections sont effectuées, selon la qualité des reproductibilités. L'appareil est étalonné à l'aide d'une solution de phtalate de potassium (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(COOK)(COOH), diluée à différentes concentrations comprises entre 0 et 10 mgC.l<sup>-1</sup>

## **CHAPITRE III HYDROLOGIE DE LA MARE DE DEBARE**

### **3.1. Variabilité hydrologique interannuel du Niger**

Troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 km) le fleuve Niger s'étend de 8°30' à 14° N et de 7°30' à 11°30' O (voir figure 1 chapitre I). Il prend sa source dans les montagnes du Fouta Djallon et de la dorsale guinéenne à 800 m d'altitude. Il est rejoint à Mopti par le Bani, né en Côte d'Ivoire et son régime dépend donc de la pluviométrie en Guinée, en Côte d'Ivoire et enfin au Mali. Depuis le vingtième siècle, ce fleuve est caractérisé par des changements très importants de la pluviométrie et de l'écoulement visible au niveau de la plupart de ces bassins fluviaux.

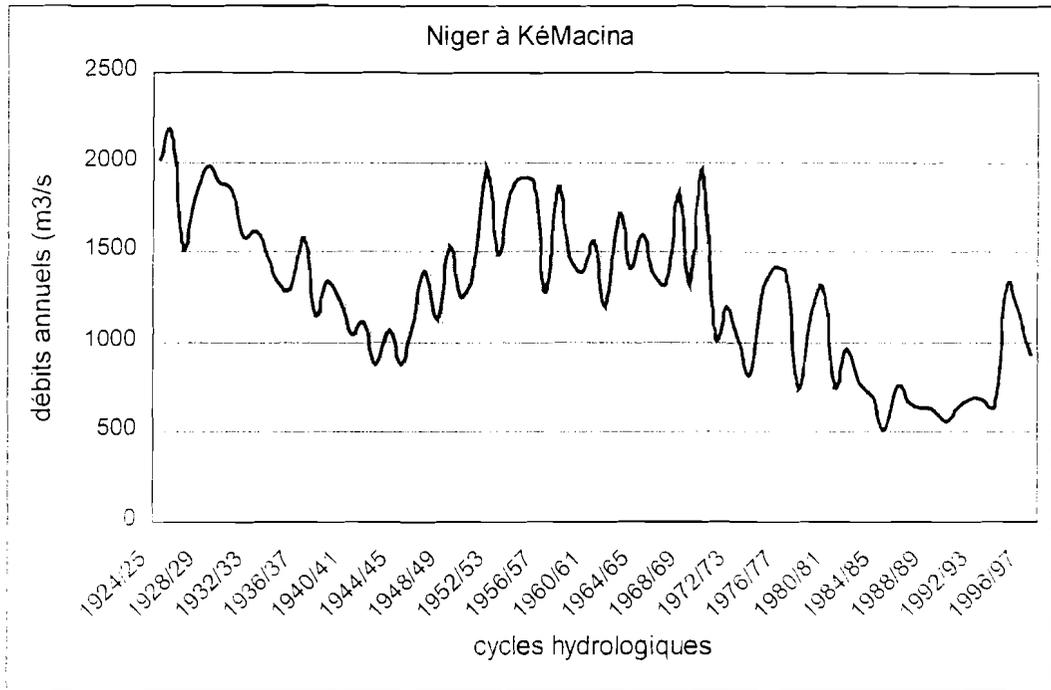
Si la période de début du siècle peut être considérée comme étant humide, à partir de 1970 la sécheresse s'est installée dans toute l'Afrique de l'Ouest (Mahe et Olivry, 1995). (L'Hôte et Mahé, 1996). En effet on constate à partir de cette période une baisse continue de la pluviométrie et de l'écoulement (Olivry et al 1993 ; 1995 ; Bricquet et al. 1995). Certains auteurs comme Olivry al (1995) sont arrivés à la conclusion selon laquelle, la continuation de la baisse de l'écoulement malgré, un retour à la hausse de la pluviométrie, serait liée à l'amenuisement du volume des nappes souterraines suite à la sécheresse. L'analyse de l'évolution du coefficient de tarissement confirme ce fait qui est directement lié aux réserves souterraines.

Dans la présente étude, cette variabilité du Niger est présentée à partir des données hydrologiques de la station de Ké-Macina, station d'entrée du Niger dans la zone inondable du Delta .

#### **3.1.1. Variabilité actuelle du Niger à**

##### **a. Station de Ké-Macina**

L'étude faite à partir de la chronique des débits moyens annuels montre une variation temporelle de l'écoulement avec des cycles d'écoulement abondant et déficitaire (figure 6). Après un début de siècle à écoulement fort (supérieur à 1500 m<sup>3</sup>/s, de 1924 à 1932), on assiste à une période moyenne autour de 1250 m<sup>3</sup>/s de 1932 à 1952



Le fleuve Niger enregistre donc une baisse hydrique depuis la sécheresse de 1970 : On continue toujours à avoir de faibles maximums de crue pour des précipitations équivalentes dans le passé qui auraient donné une forte crue. Malgré un retour à de bonnes précipitations le tarissement de ces cours d'eau ne cesse d'augmenter. Les conséquences se sont traduites par un appauvrissement continu des nappes phréatiques. sèche.. par contre 1994 est une année moyenne par rapport à la précipitation et au débit.

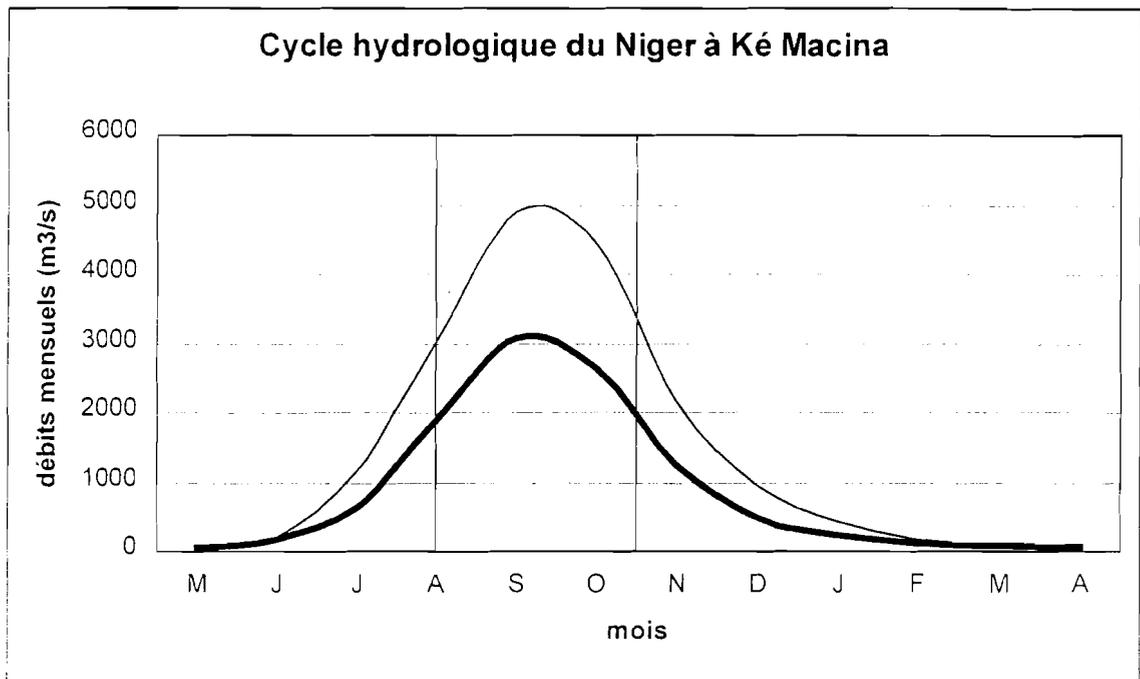
Une image de cette variabilité du Niger sera donc la mare de Débaré qui retracera les mêmes problèmes (déficits pluviométriques, faiblesses des crues etc.). L'unique solution possible selon J.C Olivry est : "pour qu'il ait reconstitution des réserves souterraines des fleuves malades d'Afrique: il faudra "dix années de bonnes conditions climatiques". Ce qui se révèle presque inimaginable.

### **3.2.1. Variabilité saisonnière du Niger :**

Comme tous les fleuves tropicaux, le Niger a une crue unique au cours de l'année. Le cycle hydrologique annuel commence dans notre zone d'étude en mai. Quel que soit la période climatique considérée (humide ou sèche), la saison des hautes eaux est toujours centrée sur mi-août fin octobre (figure 7). On a donc une montée des eaux en juin-juillet et une descente des eaux en novembre –décembre.

A partir de janvier jusqu'à mai soit 5 mois de l'année, c'est l'étiage ou la saison des basses eaux.

Il faut bien noter que les débits du Niger à Ké Macina, qui sont les débits principaux d'apport au Delta varient au cours de l'année dans un rapport de 10 à 300 m<sup>3</sup>/s dans la période sèche actuelle. Cette énorme variabilité de volumes d'eau au cours de l'année doit avoir un impact fort sur l'écologie du système deltaïque.



**Figure. 7 :** Cycle hydrologique moyen annuel du Niger à Ké Macina (1924-1971 : période humide ; 1972-1996 : période sèche)

### 3.3. Climatologie et hydrologie de la mare de Débaré (1998-1999)

#### 3.3.1. Les principaux aspects de la climatologie :

Le climat de la zone de Batamani est de type sahélien, caractérisé par une saison des pluies placée sous l'influence des vents humides de mousson d'Atlantique Sud, et une saison sèche agitée par l'harmattan, vent chaud et sec en provenance de l'anticyclone Saharien.

#### 3.2.1. Les principaux paramètres climatiques :

L'étude des paramètres climatiques a été faite grâce aux données de la station CIMEL à Batamani.

##### a. La température

La courbe (figure 8) montre des variations remarquables : à partir de février la température commence à augmenter jusqu'à atteindre son maximum en avril (45.8°C en température maximale) et en mai (et 24,4 °C en température minimale). Cela nous emmène à distinguer au cours de l'année :

- La saison sèche et froide de novembre à février ; le mois le plus froid est le mois de décembre et janvier respectivement 10.5 et 9.9 (température minimale).

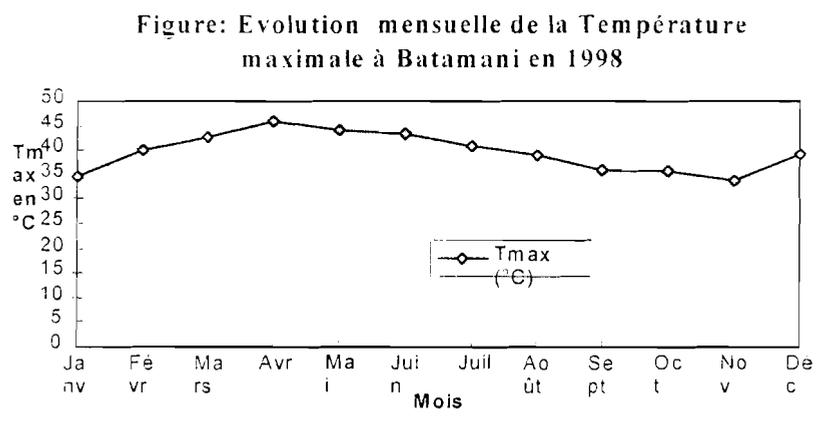
- Le mois de mars étant une transition thermique indiquant le début de la saison chaude.

- La saison chaude d'avril à mai caractérisé par un accroissement des températures tandis que les écarts diminuent ce qui signifie une chaleur constante et accablante.

Le mois de juin pourrait être considéré comme un mois de transition faisant la jonction entre les très fortes températures annonçant les pluies et les premières pluies abaissant les températures.

- La saison des pluies de juin à septembre :

Le mois d'octobre est aussi une transition thermique caractérisé par une baisse régulière des températures amenant celles-ci vers une situation plus fraîche.

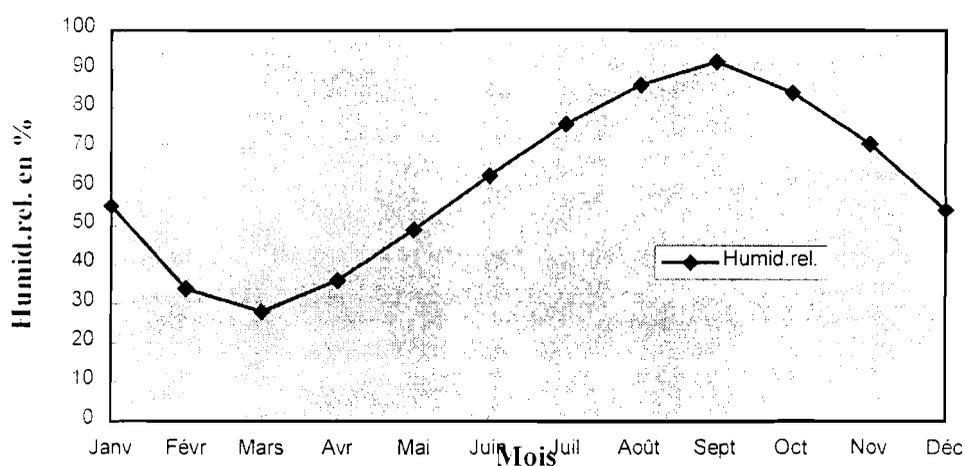


- L'humidité relative :

Elle donne une courbe unimodale (figure 9) se caractérisant par l'alternance de deux saisons.

Une saison sèche où l'humidité enregistre ses plus faibles valeurs avec un minima en mars (28%). Une saison pluvieuse avec une augmentation s'accroissant progressivement avec l'arrivée des pluies : le pic d'humidité (92%) correspond au pic des précipitations (174,5mm) en septembre.

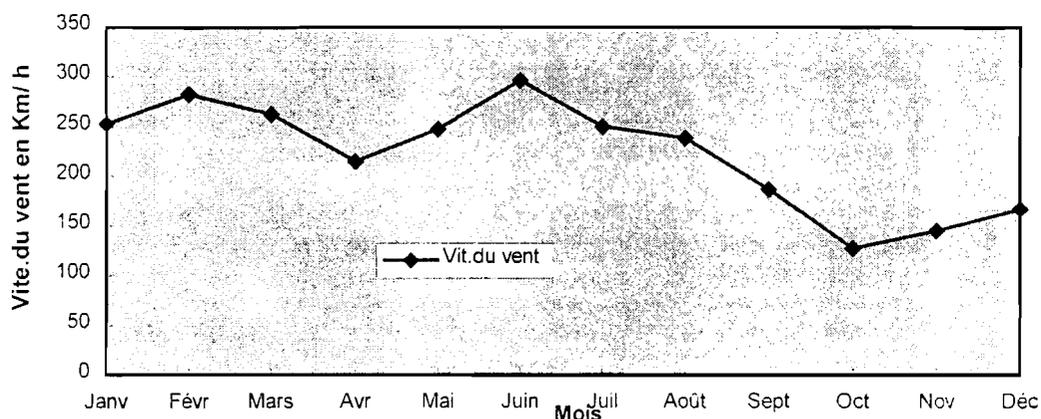
**Figure 9 : Courbe mensuelle de l'humidité relative à Batamani en 1998**



- La vitesse du vent :

- Les mois les plus venteux vont de janvier à août avec un petit maximum en février et un grand maximum en juin correspondant à l'arrivée des lignes de **grins** (du FIT). Le minimum de vent est enregistré en octobre –novembre.(figure 10).

**Figure 10 : Variation mensuelle de la courbe de la vitesse du vent à Batamani**

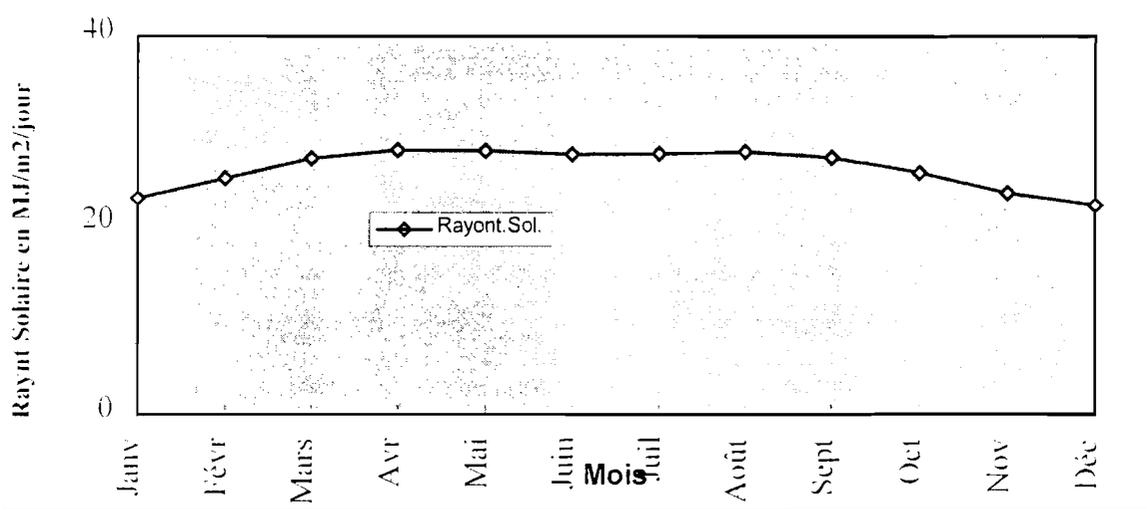


- Rayonnement solaire :

De décembre à janvier (saison sèche et froide) on observe les mois les moins ensoleillés avec une moyenne de  $22.5 \text{ MJ/m}^2/\text{jour}$  (figure 11).

Les mois de juin à octobre sont les plus ensoleillés avec un maxima en mars ( $28 \text{ MJ/m}^2/\text{jour}$ ).

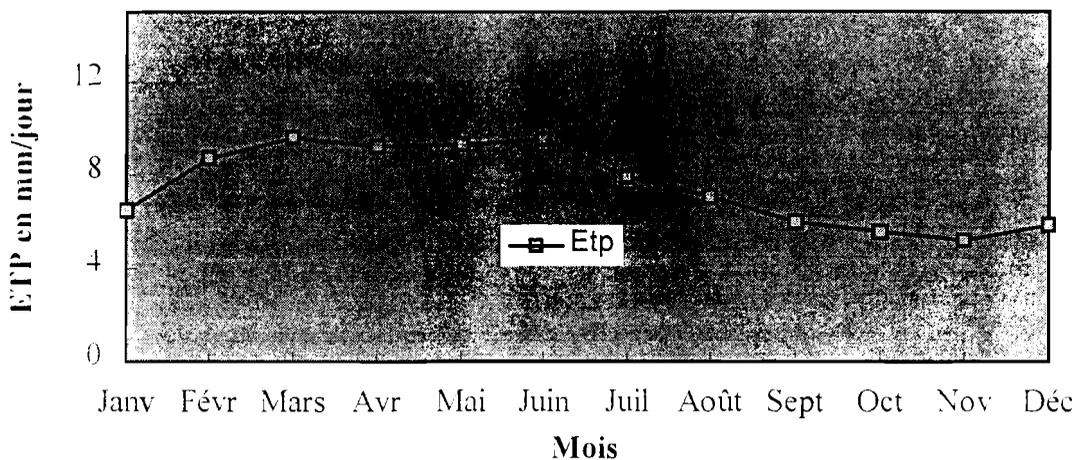
**Figure 11 : Courbe du Rayonnement solaire à Batamani en 1998**



L'évaporation :

La courbe d'évaporation (figure 12) indique un minima en novembre (5.2 mm/jour) et un maxima en mars (9.6 mm/jour). L'évaporation diminue en saison pluvieuse due à la baisse des températures pour alors augmenter en saison sèche.

**Figure 12: Evolution de la courbe de l'ETP mensuelle à Batamani**



- Les précipitations :

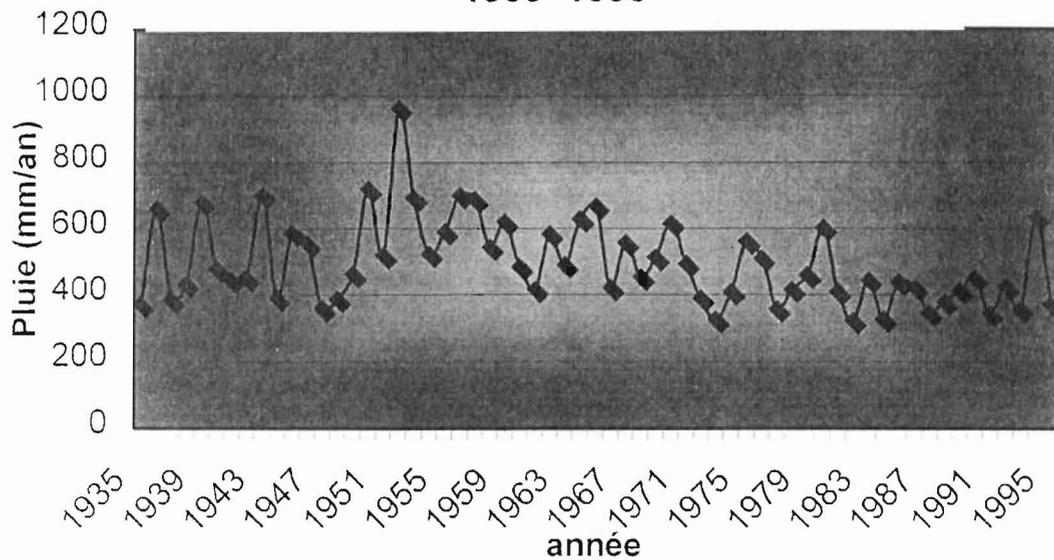
Le delta est soumis au climat sahélien et subdésertique avec l'alternance d'une saison pluvieuse de juin à septembre et une saison sèche sur le reste de l'année.

### 3.3.2. Fluctuations des précipitations dans deux stations à Mopti et à Batamani

- Station de Mopti

Au cours de ces vingt-deux dernières années on a pu observer des fluctuations sur le régime des précipitations avec deux années caractéristiques : d'une part l'année 1987 qui fut particulièrement sèche avec un cumul de 345.1 mm, tandis que 1994 fut une année exceptionnellement humide cumulé de 635.4 mm, par rapport à la moyenne comprise entre 1921 – 1975. La courbe montre une variation très nette des précipitations : à partir de la sécheresse de 1975 et 1984 on remarque une baisse irrégulière de la pluviométrie (figure 13) jusqu'aux précipitations de l'année 1994 qui fut remontée la courbe.

**Figure 13 : Pluviométrie à Mopti sur la période 1935- 1995**



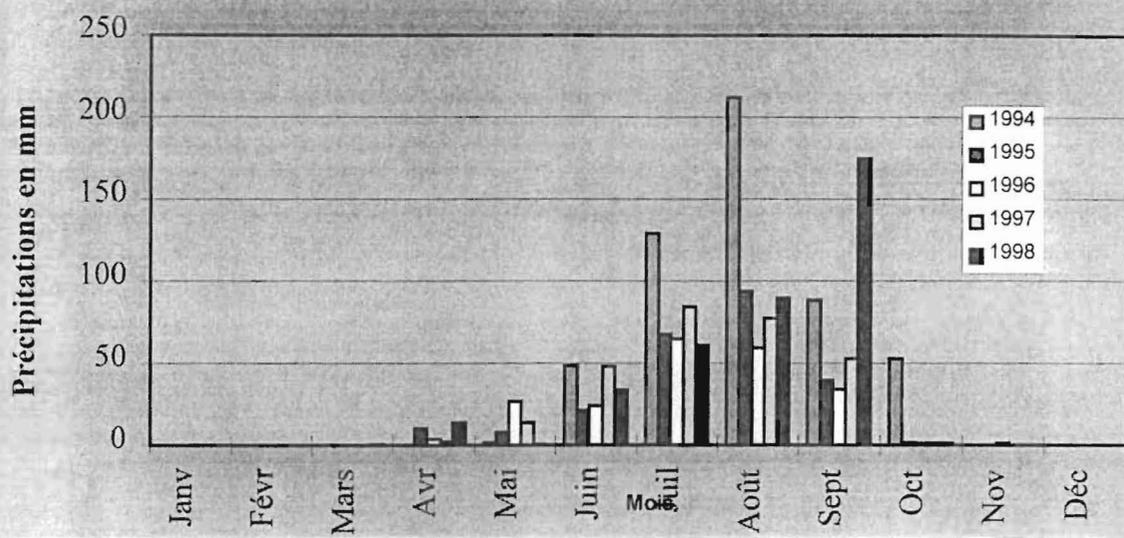
- Station de Batamani

Depuis la date l'installation de la station cimel en 1993, on note comme précédemment une année très pluvieuse à la même année. soit 533 mm par rapport aux années 1995,1996.1997,1998 (figure 14). L'année1996 a enregistré la plus faible précipitation.

La saison pluvieuse s'étend de juin à septembre et le maximum pluviométrique se situe généralement au mois d'août mais cette année septembre a été le mois le plus pluvieux. Les précipitations également peuvent affecter également la saison sèche qui n'est autre que la " pluie des mangues" survenant février-mars

Les fluctuations climatiques *inter-annuelles* seront par la suite intéressante. pour l'interprétation des variations hydrologiques de la mare dont elle dépend.

Figure 14 : Précipitations à Batamani de 1994 à 1998



### 3.4. Présentation du fonctionnement hydrologique de la mare de Débaré :

La mare de Débaré dans le terroir de Batamani fait partie du Delta intérieur du Niger à 50 Km au Nord de Mopti sur la rive gauche du Niger. On peut individualiser son bassin versant. Un bassin versant est défini comme un collecteur concentrant les pluies en écoulement vers un exutoire. En général on peut se contenter des lignes topographiques hautes pour délimiter le bassin versant.

Ici nous avons le cas d'un bassin versant topographique et le chemin de l'eau n'est déterminé que par la topographie

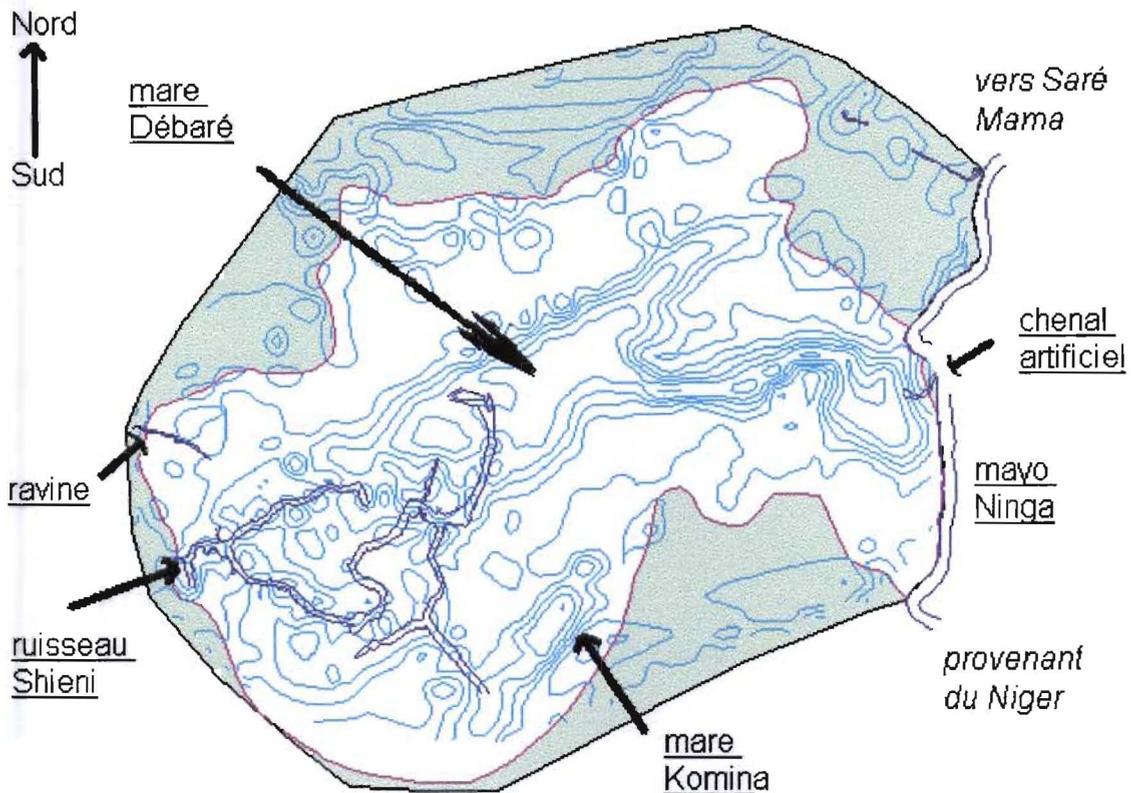
Le régime hydrologique de la mare est annuel et suit les mouvements du fleuve Niger à Mopti (après sa confluence avec le Bani). L'année hydrologique débute en mai pour se terminer en avril

Le réseau hydrologique du terroir de Batamani est constitué d'un ensemble de canaux à géométrie complexe coulant entre les buttes et un système de bourrelets de berge, alimentant des dépressions constituant des mares plus ou moins grandes et plus ou moins individualisées selon la période du cycle hydrologique et selon l'hydraulicité de l'année. Sur le fond topographique (MAMAN et MARIEU, 1998) on distingue bien la mare de Débaré (la plus grande et toujours en eau) et la mare de Komina (au sud) non pérenne (figure 15). Ces 2 mares, reliées entre elles par un système de canal compliqué représente une entité hydrologique dont la limite de partage des eaux est indiquée sur la figure 15.

Les points d'entrées d'eau dans cette entité hydrologique sont

- le chenal artificiel construit en 1984, reliant le mayo Ninga (affluent direct du Niger au lieu dit de Gatal) à la mare de Débaré .
- le ruisseau Shiéni à l'ouest provenant du mayo Kobossi ;
- une ravine importante à l'ouest au Nord du Shiéni.

En fait, les mesures hydrologiques ont montré que l'alimentation de la mare s'effectue en grande partie par un chenal artificiel (encore appelé canal) qui la relie au mayo Ninga. On note que le Shiéni qui était l'alimentation naturelle de cet ensemble de mare, (août 1984) est devenu non fonctionnel du fait de la construction du chenal artificiel. Bien sur, les mares ou dépressions sont également remplies par les précipitations et des ruissellements par les précipitations, et ~~pendant~~ pendant la période des hautes eaux par de nombreux points d'entrée liés à une nappe d'eau d'inondation généralisée .



**Figure 15 :** Carte topographique du terroir de Batamani indiquant la limite de partage des eaux (bassin versant de Débaré)

Le cycle hydrologique de la mare comporte

4 phases distinctes (à partir desquelles seront établies les bilans hydrologiques) :

- Une phase de remplissage correspondant à la mise en eau du canal d'août à septembre.
- Une phase d'inondation généralisée en crue en septembre- novembre correspondant aux plus hautes eaux, c'est la crue.
- Une phase de vidange par le canal de décembre à mars, c'est la décrue.
- Une phase d'assèchement par évaporation en saison sèche à partir de la fin de l'écoulement dans le canal, jusqu'à la prochaine crue.

Les 2 dernières sont divisées en 2 sous phases en fonction de la date d'arrivée de la saison des pluies (en juin), ce qui a directement un impact sur l'utilisation du terroir par les 3 systèmes

de production : la pêche, l'agriculture et l'élevage. Le cycle hydrologique est donc divisé en 6 périodes.

### **3.4.1. Généralités sur les paramètres du bilan hydrologique :**

Le cycle de l'eau, de la mer à la mer était déjà mentionnée dans les textes bibliques et même si nos ancêtres l'ont peu cité, au cours des derniers siècles, cette notion ne leur était pas inconnue. Le bilan quantitatif des précipitations, du ruissellement ou de l'évaporation ne fait au contraire l'objet d'une surveillance de qualité d'ailleurs très variable suivant les pays depuis moins d'un siècle.

Une bonne connaissance des paramètres comme l'infiltration, les précipitations, l'écoulement et l'évaporation permet de calculer le bilan hydrologique d'une région déterminée. De façon succincte nous donnons ici les généralités des composantes du bilan hydrologique.

#### **a. Les précipitations**

La pluie représente l'intrant principal d'un bilan hydrologique. Sa formation est liée à la circulation de l'atmosphère, et à l'éloignement par rapport à la mer et aux océans, au relief du milieu et à beaucoup d'autres facteurs.

Elles englobent sous la dénomination générale de précipitations atmosphériques des phénomènes naturels tels que la pluie qui est de l'eau qui tombe du ciel sous forme liquide (en gouttes) ou sous forme solide (neige, grêle), les averses, les orages etc.... Le mot sert aussi à exprimer numériquement une quantité, un volume. En météorologie, on le définit comme "la quantité d'eau " météorique liquide ou solide, qui traverse une surface horizontale donnée, la section pluviométrique.

En divisant cette quantité qui est un volume par la surface réceptrice du pluviomètre on obtient "une hauteur " que l'on appelle la hauteur de précipitation : elle s'exprime habituellement en millimètre.

Enfin, si l'on trace d'après les indications de plusieurs pluviomètres répartis sur le bassin versant les lignes d'égales précipitation ou isohyètes (qui peuvent être annuelles ou mensuelles ou journalières), on peut par planimétrie déterminer la hauteur d'eau moyenne reçue par le bassin versant total. Certains hauteurs appellent cette précipitation la lame d'eau tombée.

#### **b. Infiltration :**

L'infiltration ne désigne pas seulement le phénomène de passage de l'eau à l'intérieur d'une substance poreuse, son sens s'est étendu et désigne aussi la petite quantité d'eau soumise au phénomène. C'est ainsi que l'on dit : sur tel bassin et dans telle condition déterminée l'infiltration est de tant de millimètres. C'est en somme la hauteur d'une lame d'eau uniformément répartie sur le bassin, et qui aurait pénétré dans le sol.

Pour l'utilisateur des eaux de surface, la perte est la différence entre la quantité d'eau qui tombe du ciel et celle qu'il retrouve à l'exutoire du bassin ; on parlera donc de pertes par évaporation, de pertes par infiltration. Les pertes par infiltration sont le terme du bilan dont l'estimation pose généralement plus de difficulté à estimer correctement.

c. Écoulement :

D'une manière générale, on désigne le mouvement d'un fluide liquide ou gazeux dans certaines conditions bien déterminées ; l'air s'écoule autour d'un obstacle, l'eau s'écoule dans le lit des rivières sur le sol, à l'intérieur du sol.

En hydrologie, le mot écoulement employé seul se rapporte aux eaux de surfaces ; lorsqu'il s'agit d'eau circulant dans le sol, on lui adjoint un adjectif et l'on dit écoulement souterrain.

On peut du mot écoulement faire la même remarque que précédemment, il désigne à la fois un phénomène et une quantité.

Au cours d'une période de temps donné, un an par exemple, il s'écoule dans une section de jaugeage x mètres cubes d'eau, on dira que l'écoulement annuel a été de x mètres cube d'eau.

Certains auteurs l'appellent l'abondance annuelle, d'autres encore les apports annuels, il vaut mieux dire le débit annuel.

**Le débit est en effet défini comme le volume d'un liquide qui traverse une section droite du cours d'eau, la station de jaugeage, pendant un intervalle de temps donné : l'année, le mois, le jour, la seconde.**

$$VC = Qm * dt * \text{jours} / 86400 \text{ s}$$

VC = volume écoulé

Qm = débit moyen annuel (ou mensuel ou journalière)

Jours = intervalle de temps

S = secondes

d. Évaporation et évapotranspiration (ETP) :

L'évaporation fait partie des extrants essentiels dans un bilan hydrologique en zone sahélienne. Le Delta intérieur du Niger est même considéré comme une formidable machine

évaporatoire de l'Afrique. Les chroniques des apports amonts des sorties avales du Delta montrent que les pertes annuelles sont dues essentiellement à l'évaporation (J.C.Olivry, 1993).

Les phénomènes d'évaporations interviennent dans le cycle hydrologique dès le moment où les précipitations atteignent la surface du sol. L'eau s'évapore aussi des surfaces d'eau stagnantes, ou courante de toutes dimensions (flaques, mares, étangs, lacs, ruisseaux, rivières, et fleuves). L'évaporation a lieu aussi au niveau des couches superficielles des terrains, soit que l'eau provienne des récentes infiltrés à de faible profondeur, soit qu'elle provienne par capillarité de la nappe phréatique.

Par définition l'hydrologue désigne *par évaporation l'ensemble des phénomènes qui transforment l'eau évaporée par un processus spécifiquement physique ; de même l'évaporation qui a lieu par processus biologique au niveau des plantes est appelée "transpiration"*.

On appelle évapotranspiration (ETP) *le phénomène combiné de perte en eau par transpiration des plantes et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. Cela correspond au phénomène physique de passage de l'état liquide à l'état gazeux dans les conditions naturelles.*

L'évapotranspiration, comme les précipitations, s'évalue en hauteur d'eau équivalente sur une période donnée (ex : mm par jour).

#### e. Définition du bilan hydrologique :

Le bilan hydrologique d'un bassin versant est réparti entre les différents compartiments du bassin et les masses d'eaux présentes. Ils s'exprime par l'équation générale suivante :

$$Q=P-ETP+\Delta R$$

Ce qui signifie que l'écoulement Q est égale à la quantité de pluie moins la quantité évapotranspirée ETP et la variation du stock d'eau dans le sol  $\Delta R$  (on peut assimiler ce terme à la variation du niveau de la nappe phréatique). L'infiltration influe donc directement le  $\Delta R$ .

Dans le cas particulier de notre étude, on estime que ce dernier terme est négligeable :

$$\Delta R=0$$

Le bilan hydrologique du bassin versant de Batamani se résume dans l'expression :

$P - Q = ETP$

En d'autres termes, la part des précipitations non écoulée retourne dans l'atmosphère.

### **3.4.2 Le dispositif de mesures et le protocole de suivi hydrologique**

Le dispositif de mesures limnimétriques se compose de quatre stations d'observation des hauteurs d'eau :

- Débaré sur le Mayo Ninga : 2-7 m, cote du « zéro » 253,84 m,
- Canal au pont (chenal artificiel) : 1-3 m, cote du « zéro » 256,82 m,
- Mare-Est : 0-4 m, cote du « zéro » 256,82 m identique à la station du pont,
- Chenal-Ouest : 0-3 m, cote du « zéro » 258,02 m.

A noter que les cotes fournies sont des altitudes relatives, déterminées à partir de la borne située près du pont (borne n° 0) dont l'altitude a été fixée arbitrairement à 260 m, aucune borne du Nivellement Général n'existant à proximité.

Une cinquième échelle 0-2 m est implantée dans la mare dite « Débaré Fitini » séparée de la mare principale en saison sèche. Elle est très rapidement noyée au cours de la phase de crue et présente donc un intérêt limité.

La station météo automatique Cimel, installée en 1993, enregistre les précipitations ainsi que les paramètres physiques de l'air permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Le dispositif de mesures pluviométriques a été complété en mai 1998 par deux pluviomètres totalisateurs implantés au Nord et au Sud de la zone dans le but d'identifier une éventuelle variabilité spatiale de la pluviométrie sur l'ensemble du site. Un troisième pluviomètre totalisateur, installé en même temps que les deux autres, a disparu entre temps. Ce dispositif a montré que les précipitations pluviométriques étaient homogènes sur l'ensemble du bassin considéré. L'enregistrement de la station Cimel est donc suffisant.

Les observations limnimétriques sont :

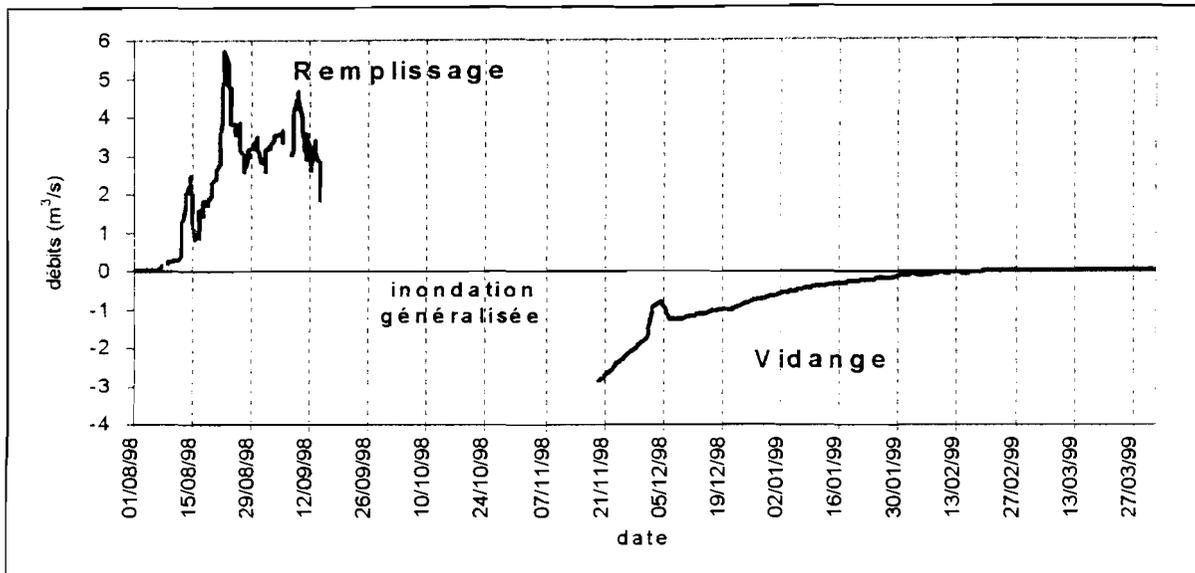
- bi-quotidiennes (6h00, 18h00) sur le mayo Ninga, dans le canal et dans la mare-est,
  - tous les deux jours dans le chenal-ouest (shieni).

Les mesures de débit (ou jaugeages) ont été quotidiennes, voire bi-quotidiennes en cas de forte variation de niveau dans le canal (associées à des lectures d'échelles dans le canal et sur le mayo Ninga) et occasionnelles, en fonction de l'écoulement, dans le chenal ouest. Toutes les mesures sont effectuées par exploration du champ des vitesses au moyen d'un moulinet ou d'un micro-moulinet relié à un compteur d'impulsion. Lors des jaugeages effectués dans le canal, les éventuelles interventions humaines (mise en place de batardeaux ou de barrages à poissons en terre) sont notées.

### **3.4.3 Le cycle hydrologique de la mare de Débaré en 1998-1999**

Le cycle hydrologique de la mare de Débaré est calqué sur celui du mayo Ninga dès que l'eau coule dans le chenal artificiel, c'est-à-dire dès que le lien est établi entre les deux. Il faudra noter que le niveau d'eau du mayo Ninga est directement lié au niveau d'eau du Niger.

Le canal a deux types de fonctionnement hydrologique : une première phase de remplissage de la mare (les débits vont du mayo Ninga vers la mare, les débits sont alors comptés positivement), et une phase de vidange de la mare (les débits vont alors de la mare vers le canal, les débits sont comptés négativement) (fig. 16). Entre ces deux phases, il y a une période de transition correspondant à une phase d'inondation généralisée : on ne peut plus individualiser le canal dans le paysage, tout est inondé.



**Figure 16 :** Écoulements du cycle hydrologique 98/99 dans le canal (d'alimentation et de vidange de la mare de Débaré)

Pour le cycle hydrologique 1998/1999, les écoulements dans le canal ont débuté le 7 août. Les débits ont varié de 0 à 6 m<sup>3</sup>/s en phase de remplissage et de -3 à 0 m<sup>3</sup>/s en phase de vidange. Les écoulements se sont arrêtés le 8 mars 1999.

La mare de Débaré a donc été mise en contact avec le mayo Ninga à partir du 7/08/98, date à laquelle elle commence à se remplir. Avant cette date, seul les pertes par évaporation ou infiltration et les apports par les pluies directes ou le ruissellement de versant influent sur son niveau d'eau. N'ayant pas de lectures d'échelles entre le 18 mai 1998 et le 9 août 1998, on considère dans une première approximation que durant ce laps de temps l'évolution du niveau d'eau dans la mare suit une décroissance linéaire (tableau 3), ce qui revient à formuler l'hypothèse que les événements pluvieux durant cette période ne sont pas efficaces pour le remplissage de la mare.

Sur la figure 17, les altitudes des plans d'eau du mayo Ninga et de la mare de Débaré sont représentés. Au point 1 (le 7/08/98), le mayo Ninga remplit le canal puis la mare. Les deux plans d'eau ont alors à peu près 1 m d'écart en altitude (le mayo Ninga est 1 mètre plus haut que la mare de Débaré). Au 26/08/98, les deux plans d'eau sont à la même altitude. Au point 2 (vers le 20/09/98), le débit du canal s'annule puis s'inverse ; à cette date, on rentre dans la phase d'inondation généralisée : le terroir de Batamani n'est qu'une immense nappe d'eau jusque vers le 25/11/98 (fig. 16). La cote maximale est atteinte du 29 octobre au 4 novembre, date à laquelle le canal commence à jouer son rôle de vidange. Au point 3 (le 2/12/98, figure.17), les courbes des deux plans d'eau se séparent alors qu'il y a toujours de l'eau dans le

canal (fig. 16). En fait cela correspond à la mise en place par les pêcheurs et agriculteurs (décision commune) de 8 batardeaux qui barrent les écoulements du canal durant une semaine. Notons qu'à partir de cette date, l'histoire des deux plans d'eau devient distincte : le niveau d'eau du mayo Ninga descend beaucoup plus vite que celui de la mare. Au point 4 (le 10/03/99), le canal est à sec et les deux plans d'eau ont alors une différence d'altitude de 1,5 m

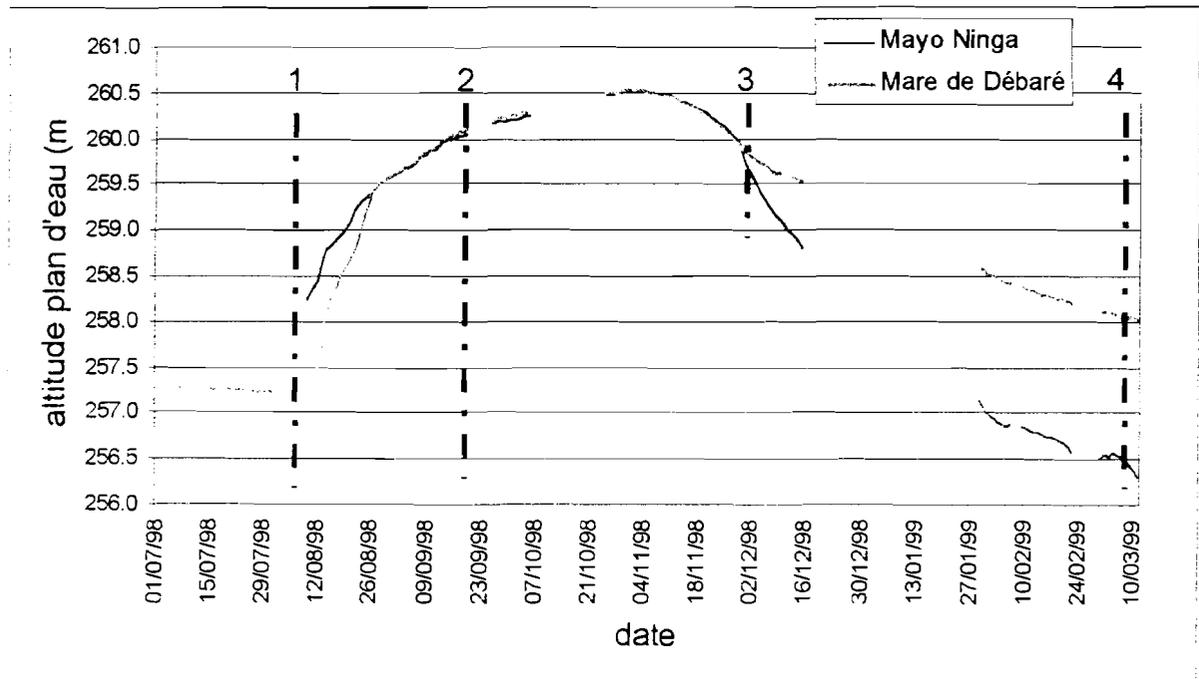


Figure 17 : Evolution du niveau d'eau de la mare de Débaré et du mayo Ninga (terroir de Batamani) lors de la crue 1998-1999

**Tableau 1: Hauteur d'eau moyenne journalière (cm) en 1998-1999**  
dans la mare de Débaré lue et estimée

jour	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	Janv	Fevr	Mars	Avri
1	-	<u>68</u>	<u>60</u>	<u>45</u>	281	344	369	301	<u>232</u>	169	129	-
2	-	<u>67</u>	<u>60</u>	<u>44</u>	283	344	369	297	<u>230</u>	167	128	-
3	-	<u>67</u>	<u>59</u>	<u>43</u>	286	345	369	294	<u>228</u>	164	127	-
4	-	<u>67</u>	<u>59</u>	<u>42</u>	288	347	369	291	<u>226</u>	162	126	-
5	-	<u>67</u>	<u>59</u>	<u>41</u>	290	<u>348</u>	368	288	<u>224</u>	160	126	-
6	-	<u>66</u>	<u>59</u>	<u>39</u>	292	<u>349</u>	367	285	<u>222</u>	159	124	-
7	-	<u>66</u>	<u>58</u>	<u>39</u>	300	<u>350</u>	<u>367</u>	283	<u>220</u>	<u>157</u>	123	-
8	-	<u>66</u>	<u>58</u>	<u>39</u>	301	<u>351</u>	<u>366</u>	281	<u>218</u>	<u>155</u>	122	-
9	-	<u>66</u>	<u>58</u>	41	304	<u>352</u>	365	279	<u>216</u>	154	121	-
10	-	<u>65</u>	<u>58</u>	48	307	<u>353</u>	364	277	<u>214</u>	153	121	-
11	-	<u>65</u>	<u>57</u>	55	309	<u>354</u>	363	275	<u>212</u>	151	120	-
12	-	<u>65</u>	<u>57</u>	65	312	<u>355</u>	361	274	<u>210</u>	150	-	-
13	-	<u>65</u>	<u>57</u>	85	315	<u>356</u>	359	273	<u>208</u>	148	-	-
14	-	<u>64</u>	<u>56</u>	118	319	<u>357</u>	358	272	<u>206</u>	147	-	-
15	-	<u>64</u>	<u>56</u>	143	322	<u>358</u>	356	270	<u>204</u>	146	-	-
16	-	<u>64</u>	<u>56</u>	151	324	<u>359</u>	354	268	<u>202</u>	145	-	-
17	-	<u>64</u>	<u>56</u>	160	325	<u>360</u>	351	266	<u>200</u>	144	-	-
18	72	<u>63</u>	<u>56</u>	170	326	<u>361</u>	349	264	<u>198</u>	142	-	-
19	<u>72</u>	<u>63</u>	<u>55</u>	178	328	<u>362</u>	346	262	<u>196</u>	141	-	-
20	<u>72</u>	<u>63</u>	<u>55</u>	187	<u>329</u>	<u>363</u>	343	260	<u>194</u>	140	-	-
21	<u>71</u>	<u>62</u>	<u>54</u>	197	<u>331</u>	<u>364</u>	340	258	<u>192</u>	139	-	-
22	<u>71</u>	<u>62</u>	<u>54</u>	208	<u>332</u>	<u>365</u>	337	255	<u>190</u>	137	-	-
23	<u>71</u>	<u>62</u>	<u>53</u>	225	<u>334</u>	<u>365</u>	333	253	<u>188</u>	<u>136</u>	-	-
24	<u>70</u>	<u>61</u>	<u>53</u>	240	<u>336</u>	366	329	251	<u>186</u>	<u>135</u>	-	-
25	<u>70</u>	<u>61</u>	<u>52</u>	252	338	367	326	248	<u>184</u>	<u>134</u>	-	-
26	<u>70</u>	<u>61</u>	<u>51</u>	259	339	368	322	246	<u>182</u>	133	-	-
27	<u>69</u>	<u>61</u>	<u>50</u>	265	340	368	318	244	<u>180</u>	<u>132</u>	-	-
28	<u>69</u>	<u>60</u>	<u>49</u>	269	341	368	314	241	178	<u>131</u>	-	-
29	<u>69</u>	<u>60</u>	<u>48</u>	273	342	369	309	239	176	-	-	-
30	<u>68</u>	<u>60</u>	<u>47</u>	276	343	369	305	237	174	-	-	-
31	<u>68</u>	-	<u>46</u>	278	-	369	-	234	171	-	-	-

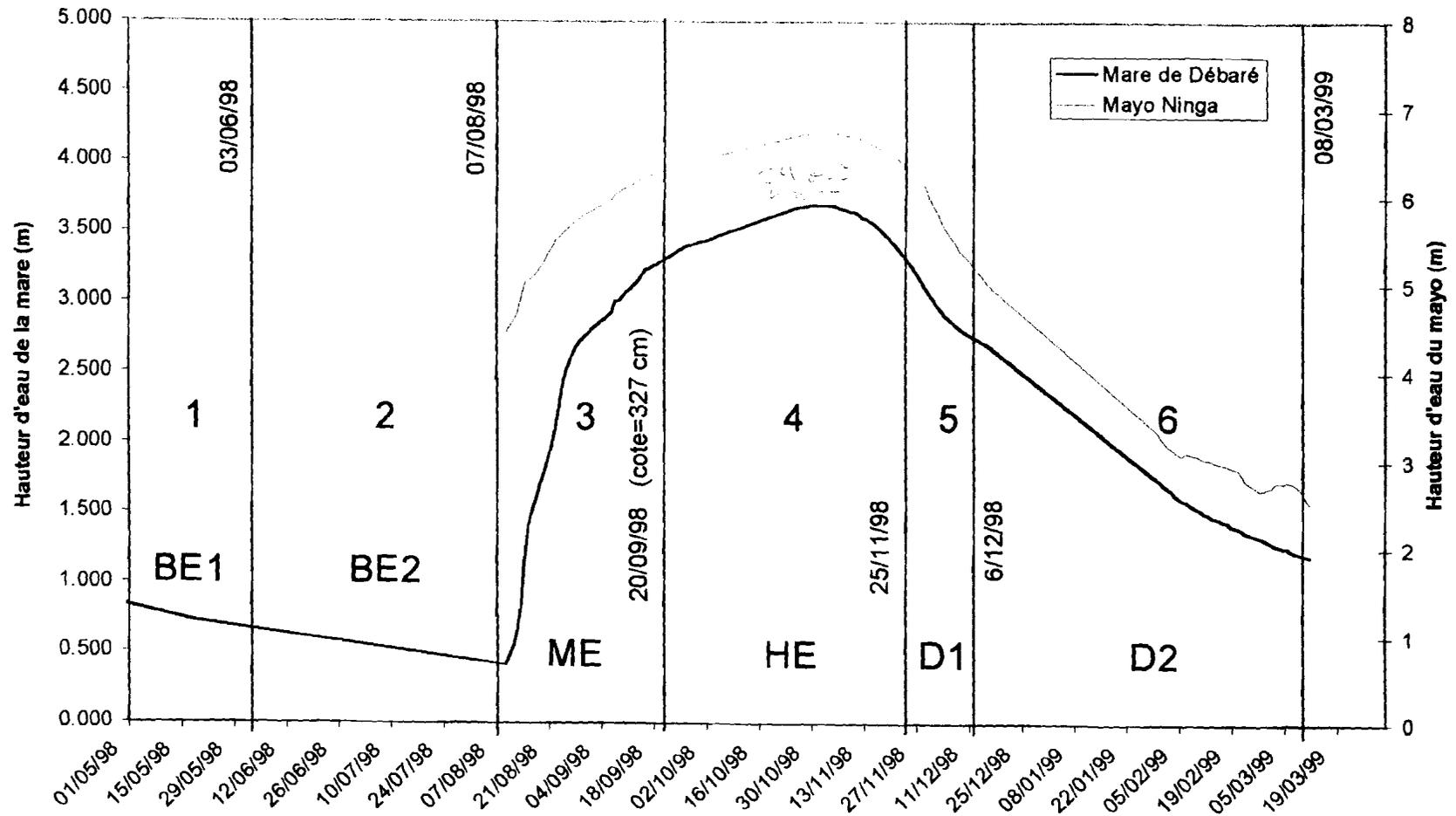
- Valeurs estimées

Jours de pluies

#### **3.4.4. Définition des 6 périodes hydrologiques fonctionnelles en 1998 :**

Afin de relier les différents systèmes de production au rythme de la mare , le cycle hydrologique de la mare a donc été découpé en 6 périodes (voir figure 18) : Basses eaux 1 et 2 (BE1, BE2), Montée des eaux (ME), Hautes eaux (HE), Décrue 1 et 2 (D1, D2).

**Evolution du niveau d'eau à Batamani  
(crue 1998-99)**



**Figure 18 :** Définition des périodes hydrologiques fonctionnelles et évolution comparée des hauteurs d'eau de la mare de Débaré et du mayo Ninga (terroir de Batamani) lors de la crue 1998-1999

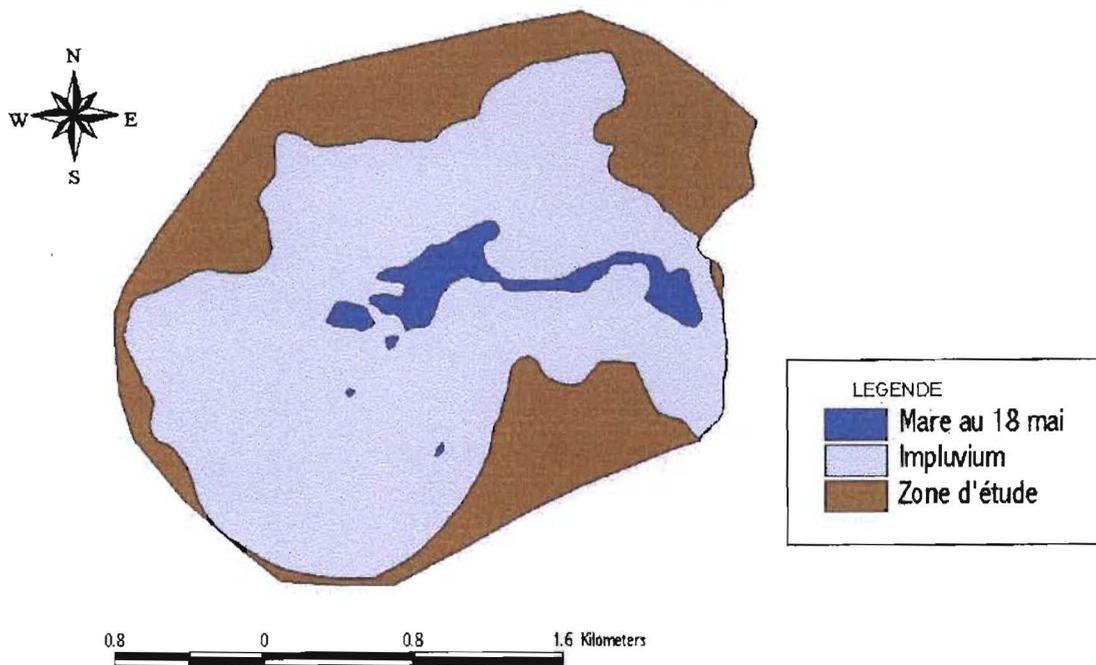
Basses Eaux 1 : du 08 mars 1998 au 02 juin 1998

Cette période commence dès que le chenal artificiel ne reçoit plus d'eau de la mare et qu'il est à sec avec un débit très faible voir nul. A la date du 11 mars, la cote à l'échelle de la mare est de 120 cm, ce qui correspond à un volume d'eau résiduel de 270 000 m<sup>3</sup>.(figue 19)

Basses Eaux : 2 du 03 juin au 06 août 1998

C'est l'arrivée des premières pluies jusqu'à l'arrivée de l'eau du mayo Ninga dans le canal. La hauteur d'eau de la mare diminue de quelques centimètres malgré la pluie, à cause du phénomène d'évaporation qui est très intense à cette période. Le 06/08/98, la cote de la mare est de 39 cm, ce qui correspond à un volume d'eau résiduel de 5000 m<sup>3</sup>.

## Etendue de la mare aux Basses Eaux 1



## Etendue de la mare aux Basses Eaux 2

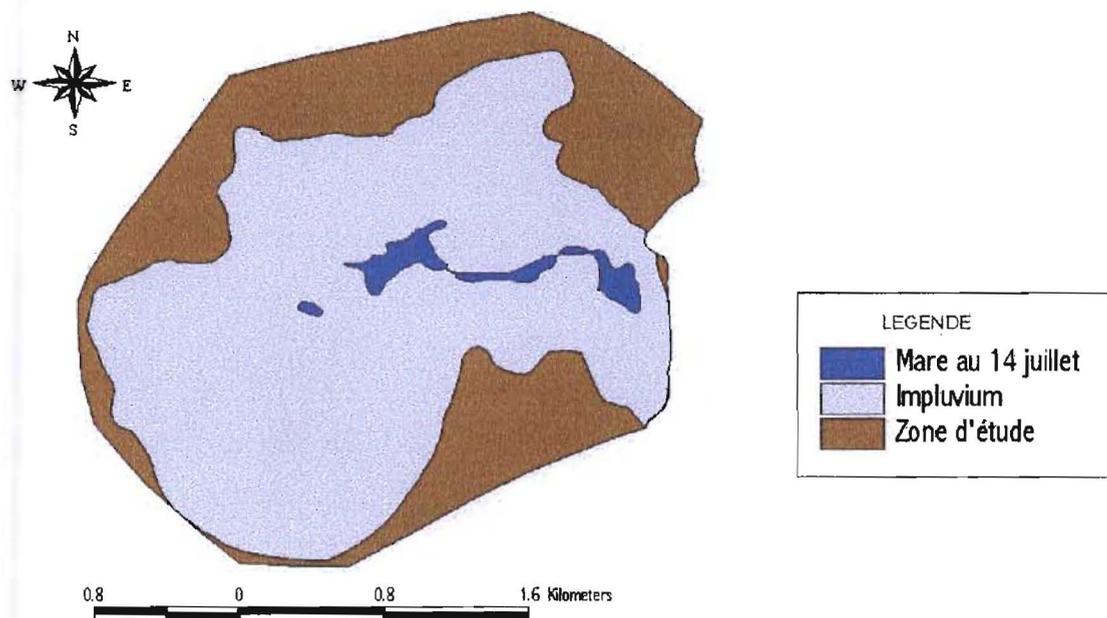


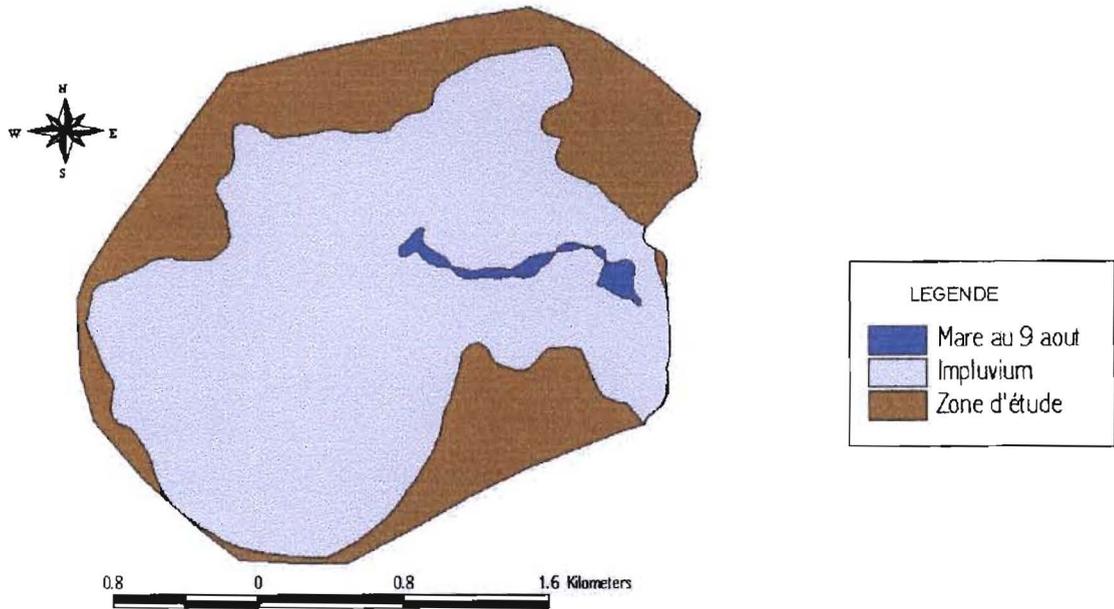
Figure 19 : Etat de remplissage des mares et dépressions du terroir de Batamani en basses eaux en 1998.

Montées des Eaux : du 07 août au 19 septembre 1998

Elle débute donc avec un volume d'eau de 5000 m<sup>3</sup> et progressivement on constate une remontée de la hauteur du niveau des eaux de la mare et de la crue suite aux pluies.

la mise en eau s'effectue principalement par le canal se fait dans le sens mayo Ninga - mare (est - ouest), c'est l'arrivée de l'eau par le chenal artificiel à la mare. Le remplissage par le chenal naturel (sensouest - est) est inexistant : les débits mesurés donnent des vitesses très faibles, de l'ordre du cm.s<sup>-1</sup>. Cela laisse à supposer que le chenal naturel actuellement ne joue aucun rôle actif dans cette phase. La première alimentée est celle de la mare de Débaré, puis Débaré Fitini et enfin Komina. A partir de la cote approximative de 600 cm dans le Mayo de nombreux chenaux naturels se mettent en eau à la périphérie du site.(figure 20).

### Etendue de la mare à la Montée des Eaux



### Etendue de la mare à la Montée des Eaux

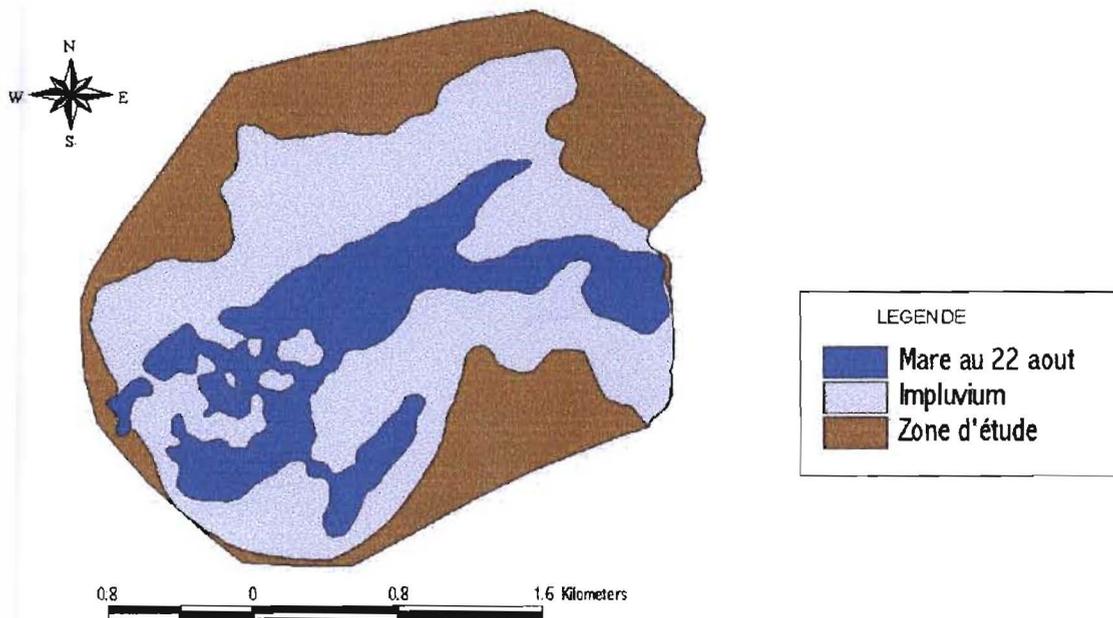


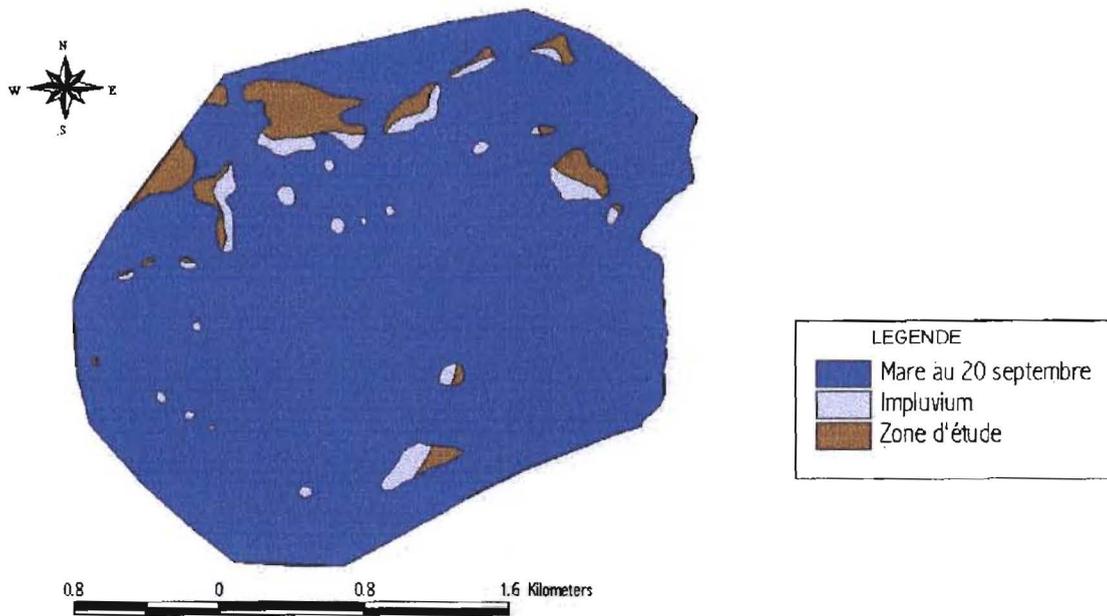
Figure 20 : Etat de remplissage des mares et dépressions du terroir de Batamani à la montée des eaux en 1998.

### Hautes Eaux : du 20 septembre au 24 novembre 1998

Elles correspondent à l'inversion du sens du courant lorsque le niveau d'eau dans le Mayo Ninga atteint la cote de 654 cm (=327 cm dans la mare). Mais à partir de la cote 580 cm dans le Mayo Ninga (le 30 septembre), l'eau drainée par celui-ci s'engouffre dans la mare par des points bas situés le long des berges. Le plus important est de ces chenaux se situe environ à 200 m au sud de village de Débaré.

A ce stade, on remarque dans le canal une diminution du débit (voir tableau 2) et une augmentation de la hauteur d'eau, ce qui est un phénomène rare dénotant la complexité de l'hydrosystème. On sait par ailleurs, que la vitesse d'un cours d'eau augmente avec sa hauteur : et le cas particulier de la mare peut s'expliquer par le fait que le niveau des eaux continu à monter par l'apport du Niger entraînant une élévation de la hauteur d'eau qui est phénomène purement physique du au relief, et dès que l'on dépasse une certaine cote le courant s'inverse. La mare se vide par le canal mais aussi par de nombreuses fuites : et il devient très difficile d'estimer le débit entrant de la mare. On peut considérer que commence alors une phase de d'inondation générale ou pseudo-permanente (figure 21).

## Etendue de la mare aux Hautes Eaux



## Etendue maximale de la mare aux Hautes Eaux

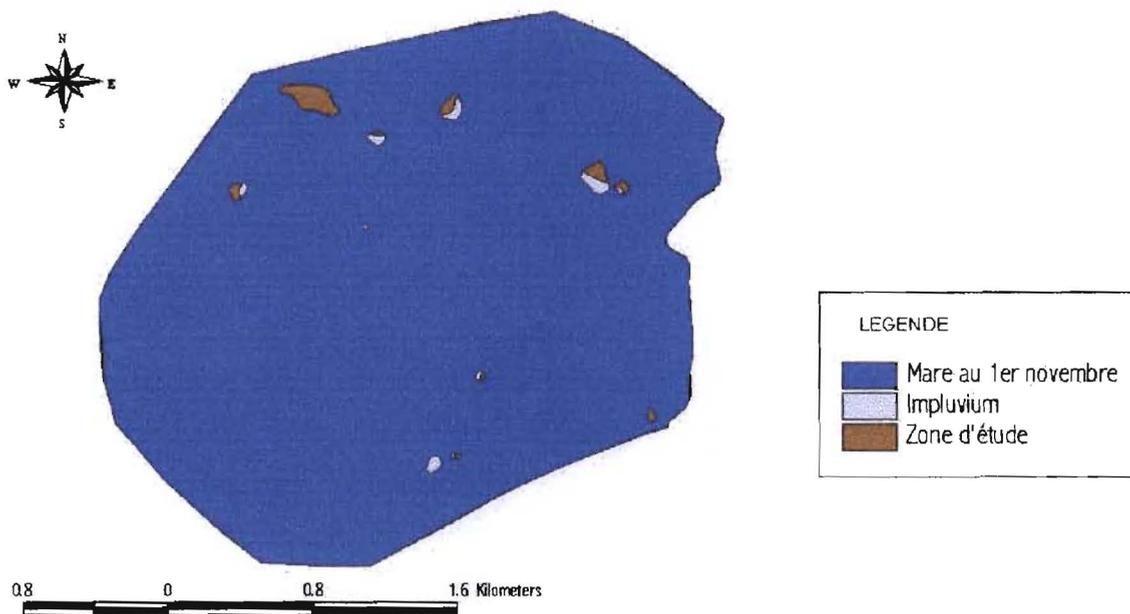


Figure 21 : Etat de remplissage des mares et dépressions du terroir de Batamani en hautes eaux en 1998.

Décrue 1 : du 25 novembre au 05 décembre 1998

Il s'agit d'une vidange rapide de la mare, uniquement par le canal correspondant au début de la décrue du Niger le 05/11/98. Le débit dans le canal n'est mesurable qu'à partir du 20/11/98 environ et il n'y a plus de fuites.

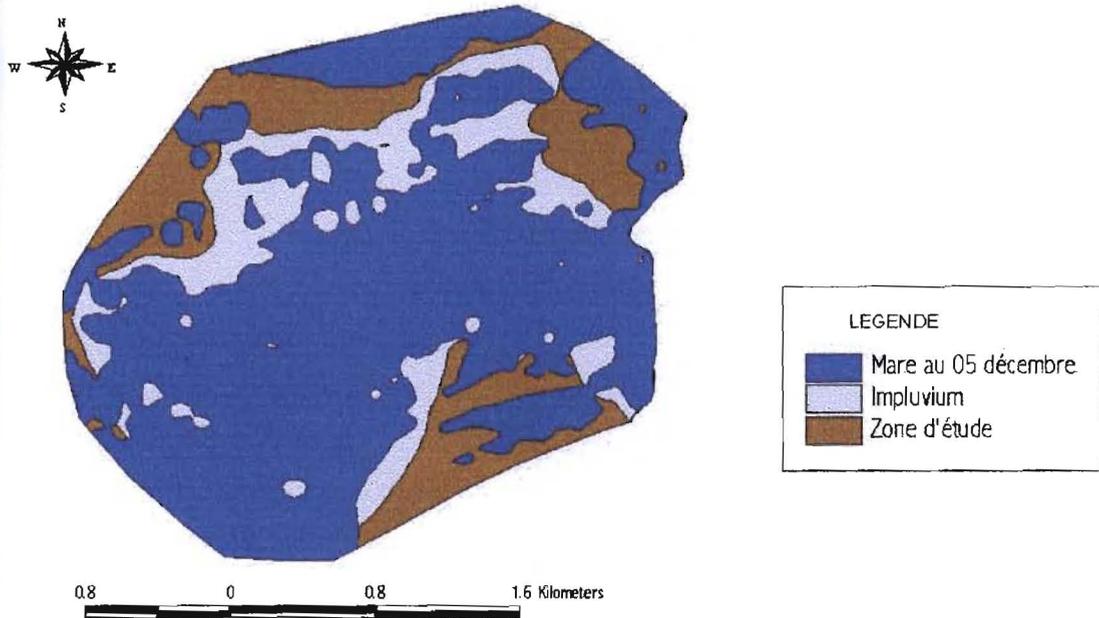
Décrue 2 : du 06 décembre au 07 mars 1999

L'eau circule dans le sens mare mayo Ninga, mais beaucoup plus faiblement : avec une diminution progressive de la hauteur d'eau de la mare. Durant cette période, mayo Ninga et la mare ont deux histoires hydrologiques différentes (figure 22).

Remarques :

La pluie du 03 juin a été choisie comme début des premières pluies dans la période Basses Eaux 2 parce qu'elle correspond à une pluie utile qui est définie comme étant la première averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement.

## Etendue de la mare à la Décrue 1



## Etendue de la mare à la Décrue 2

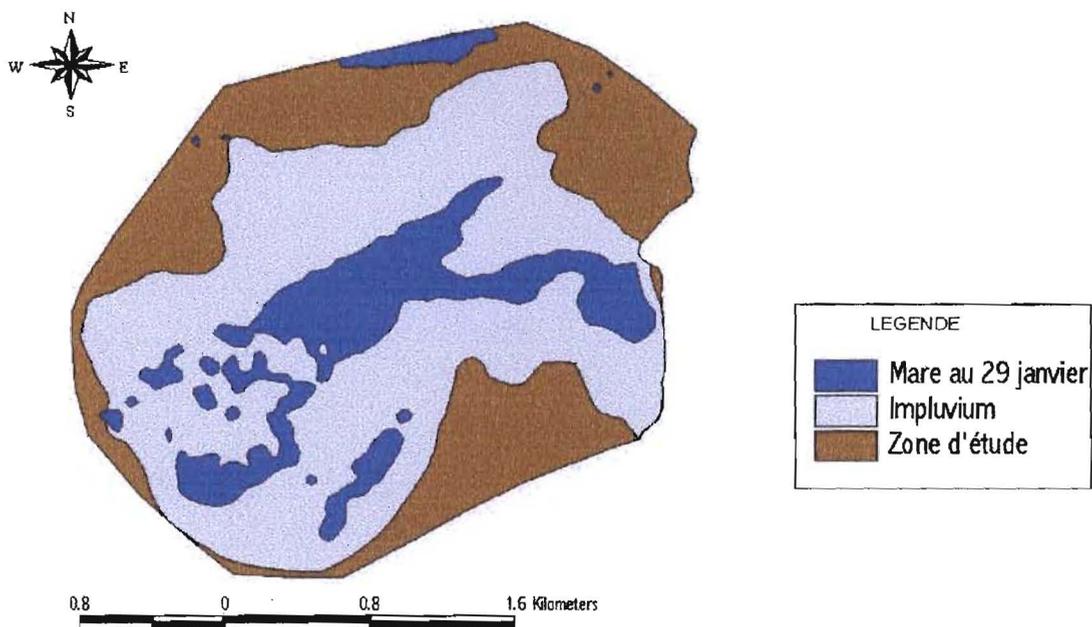


Figure 22 : Etat de remplissage des mares et dépressions du terroir de Batamani à la décrue en 1998/1999.

### 3.5. Fonctionnement hydrologique de la mare

D'après l'équation du bilan hydrologique, on sait que 4 paramètres interviennent dans les bilans de l'eau au niveau d'un bassin au cours du cycle hydrologique, à savoir :

- la pluie (**P**),
- l'écoulement (**Q**)
- l'évapotranspiration réelle (**ETR**),
- l'infiltration (**I**).

Dans le cas particulier du terroir de Batamani, les paramètres **P** et **ETR** sont tout au long du cycle hydrologique respectivement apports et pertes. Par contre, **Q** et **I** sont l'un ou l'autre selon la période considérée.

En effet, pour l'écoulement, nous avons vu que :

- en début de cycle (BE1, BE2), le terroir est isolé du réseau hydrologique : l'écoulement est donc nul ;
- ensuite, durant la période de remplissage (ME), l'écoulement correspond à un apport ;
- pendant la période d'inondation généralisée (HE), on considère que l'écoulement équilibre les pertes par évapotranspiration et les apports par les pluies : les apports sont égaux aux pertes, l'écoulement résultant est donc égal à la somme **P+ETR** ;
- pendant la période de vidange (D1, D2), l'écoulement correspond à une perte ;
- enfin, en fin de cycle (BE1), le terroir est à nouveau isolé du réseau hydrologique, l'écoulement est à nouveau nul.

Pour l'infiltration, nous n'avons pas de mesures directes. Mais le sol étant essentiellement argileux sur l'ensemble de la zone, on peut considérer d'après la littérature que sa porosité est de l'ordre de 15% (ROOSE, 1994)<sup>1</sup>. Dans notre modèle, on attribue la variation d'infiltration à la variation de volume de sol inondé, ce qui revient à dire que : lorsque l'eau monte, on remplit d'eau les sols anciennement exondés qui se retrouvent alors inondés, et inversement. Ainsi, on peut distinguer au cours du cycle hydrologique les trois états suivants :

- lorsque l'eau monte (période ME), on infiltre de l'eau dans les sols : l'infiltration est alors une perte :

---

<sup>1</sup> ROOSE E. (1994) – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bull. pédologique de la FAO, n°70, 420 p.

- lorsque l'eau descend (périodes BE et D), les sols nouvellement exondés restituent de l'eau : l'infiltration est un apport ;
- lorsque l'eau recouvre tous les sols (inondation généralisée, période HE), l'infiltration est nulle.

A partir du rôle (perte ou apport) des paramètres du bilan hydrologique dans les différentes périodes hydrologiques fonctionnelles, on en déduit 5 cas distincts de calcul du bilan des flux hydrologiques au cours d'un cycle hydrologique (tableau 2).

Tableau 2 : Schématisation du rôle des paramètres du bilan hydrologique en fonction des périodes hydrologiques fonctionnelles

	Cas 1 (BE1, BE2)	Cas 2 (ME)	Cas 3 (HE)	Cas 4 (D1, D2)	Cas 5 (BE1)
<b>Signification hydrologique</b>	système isolé, descente des eaux	système ouvert, montée des eaux	système ouvert, inondation généralisée	système ouvert, descente des eaux	système isolé, descente des eaux
<b>P</b>	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
<b>ETR</b>	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0
<b>Q</b>	= 0	> 0	P + ETR	< 0	= 0
<b>I</b>	> 0	< 0	= 0	> 0	> 0

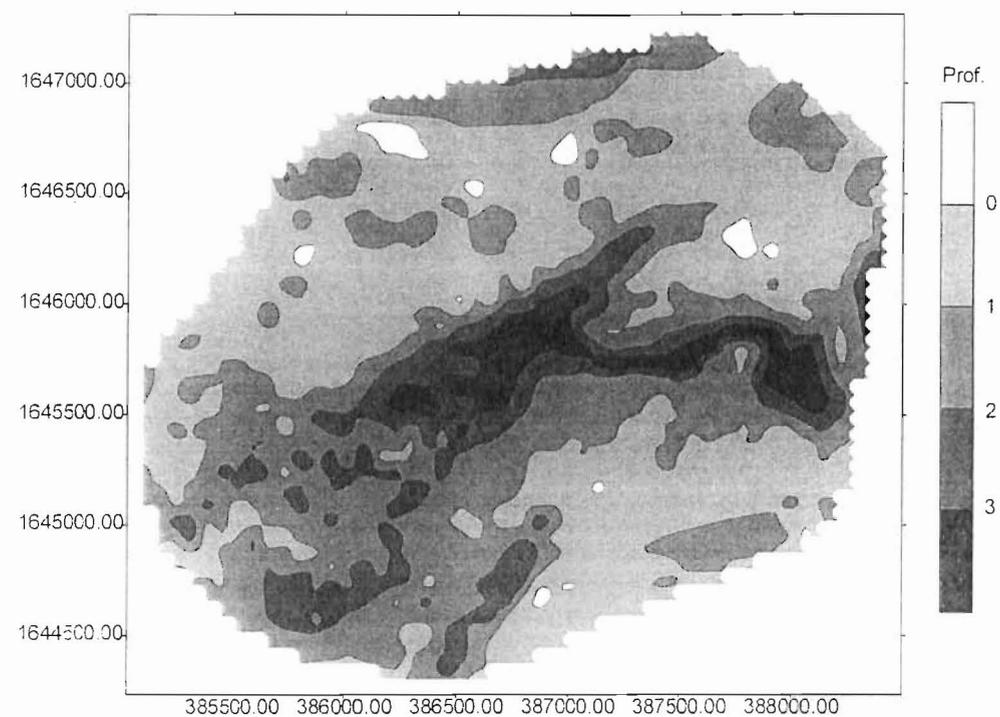
### 3.6. Calcul du bilan hydrologique de la mare

Afin de pouvoir déterminer les flux de matières entrants et sortants du système Batamani, il convient de calculer les différents termes de l'équation du bilan hydrologique selon les 6 périodes hydrologiques fonctionnelles définies ci-dessus. Ce calcul est largement réalisé à partir d'un fichier numérisé de points cotés (environ 1200 points) sur le logiciel *Surfer*, représentant la topographie du terroir de Batamani et permettant de représenter l'extension de l'inondation à partir de la cote lue à l'échelle de Débaré (travaux de K. Maman & B. Marieu, 1998 ; L. Dembélé, 1998). La figure 23 montre une image de l'inondation de la plaine de Batamani au maximum de la crue de 1998 ( $H_{\text{Débaré}}=369$  cm).



### Plaine de Batamani

Situation de l'inondation du 29/10 au 4/11/98 (maximum de crue)

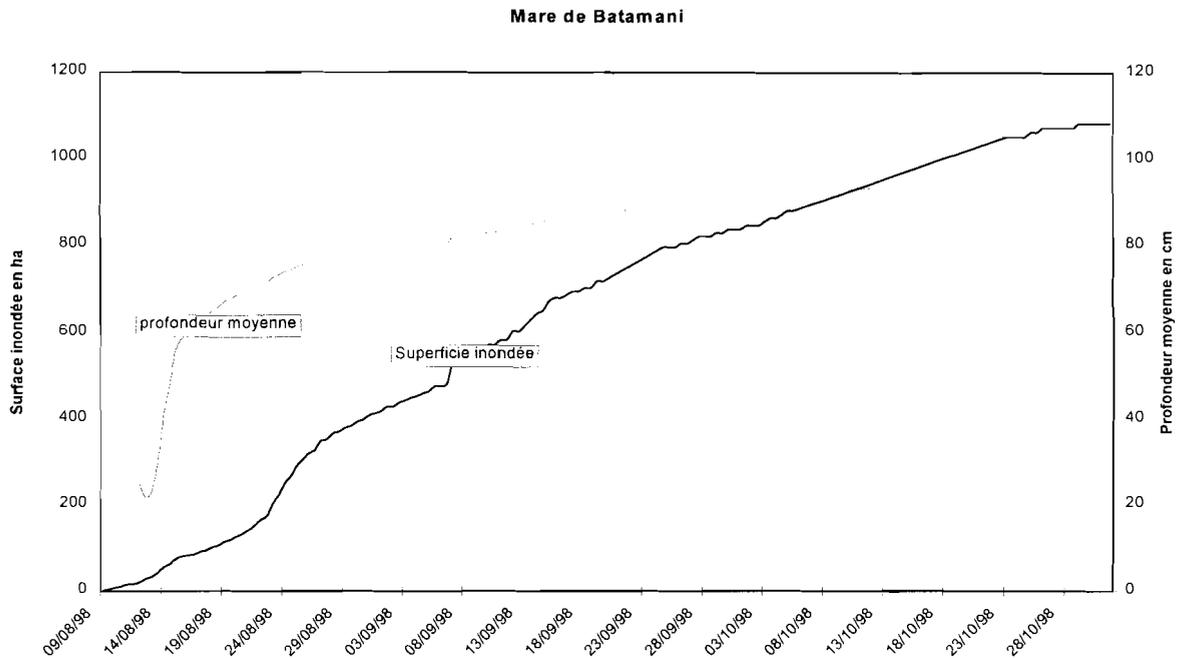


Coordonnées UTM 30

Courbes de niveau tracées par triangulation/interpolation linéaire

**Figure. 23** : Profondeur du plan d'eau de la plaine de Batamani à la cote d'inondation maximale en 1998

A partir de cette couverture topographique, une abaque de remplissage donnant la superficie inondée ou le volume inondé a pu être établi en fonction de la date choisie dans le cycle hydrologique 1998/1999 étudiée (figure. 24).



**Figure.24 :** Abaque de superficie inondée et volume inondée de la plaine de Batamani lors du cycle hydrologique 1998/1999

### 3.6.1 Apports des précipitations directes

Les apports des précipitations directes correspondent aux volumes d’eaux apportés directement par les événements pluvieux sur les surfaces inondées, qui bien sûr dépendent de la date de l’événement considéré. Ses superficies sont déterminées à partir de l’abaque figure 24. Le tableau 3 donne la pluviométrie journalière de Batamani lors du cycle 1998/99. Le volume d’eau précipité obtenu pour l’année est de  $1,14.10^6 \text{ m}^3$ .

### 3.6.2 Apports des précipitations par le ruissellement de versant

Mais les précipitations apportent également un volume d’eau à la mare par ruissellement sur les versants. La superficie totale (c’est à dire. la somme des surfaces inondées et exondées) de l’impluvium de la mare de Batamani est de  $16 \text{ km}^2$ . Pour chaque pluie susceptible de provoquer du ruissellement ( $P > 10 \text{ mm}$ ), on calcule à partir des cartes d’inondation tracées automatiquement à l’aide du logiciel *Surfer*, la superficie exondée du bassin.

Il faut également prendre en compte un coefficient de ruissellement qui représente la partie de l'eau précipitée au sol qui s'infiltre dans le sol. Aussi, on attribue à chaque pluie un coefficient de ruissellement conforme aux caractéristiques de ce type de bassin (méthode Rodier in "bulletin d'irrigation et de drainage FAO n°54 : Crues et apports – Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugeés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche, Rome 1996"). Le détail de ce calcul est donné dans le tableau 4. On obtient un volume annuel de 48 780 m<sup>3</sup>, ce qui représente à peu près 5% du volume apporté directement par les pluies.

Tableau 3 : Pluies journalières (en mm) à Batamani lors du cycle hydrologique 1998/99

MOIS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE
1					9		
2							1
3			7		30		
4		0,5				10	
5			7	5	9		
6						3,5	
7				15		72	
8							
9			5,5				
10					4		
11					4	18	
12					23		
13							
14						16	
15				16			
16			5	1		1	
17							
18						4,5	
19							
20					2	14	
21	8			19			
22						17,5	
23						6	
24							
25	5,5					12	
26			0,5	5			
27			0,5				
28							
29			8				
30							
31					8,5		
Cumul	13,5	0,5	33,5	61	89,5	174,5	1

Tableau 4 : Estimation du volume d'eau apporté par ruissellement dans la mare

	H mare	Surface exondée	P (mm)	Kr (%)	Vr (m <sup>3</sup> )
3/08/98	40	480	30	15	21 500
12/08/98	65	460	23	10	10 500
4/09/98	288	95	10	5	500
7/09/98	300	52	72	40	15 000
11/09/98	309	32	18	10	600
14/09/98	319	20	16	10	300
20/09/98	329	12,5	14	10	180
22/09/98	333	11	17,5	10	200
				Total	48 780 m <sup>3</sup>

### 3.6.3 Pertes par évaporation

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à l'aide du logiciel *Cropwat* édité par la FAO, à partir de la formule de Penman-Monteith en utilisant les paramètres climatologiques enregistrés par la station CIMEL (tableau 5). Il convient maintenant de déterminer l'évapotranspiration réelle (ETR).

Sur une surface d'eau libre, l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle. En admettant que ce principe s'applique à des zones envahies de végétation telles que les bourgoutières, il est possible d'estimer le volume total évaporé à partir du plan d'eau, en utilisant la relation  $S(H)$  précédemment établie (figure. 24) et la chronique d'observation des hauteurs d'eau (tableau 1). On obtient un volume total annuel évaporé de  $6,24 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

Tableau 5 : ETP journalière moyenne mensuelle à Batamani pour le cycle hydrologique 1998/99

Mois	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humid. rel. (%)	Vit. tot. du vent (Km)	Rayon <sup>t</sup> Sol. (MJ/m <sup>2</sup> /jour)	Etp PenMon (mm/jour)
Mai	44,0	24,4	49	247	27,9	9,3
Juin	43,3	19,3	63	296	27,5	9,5
Juillet	40,9	21,0	76	250	27,6	7,9
Août	38,9	20,8	86	238	27,8	7,1
Septembre	36,0	21,7	92	186	27,2	6,0
Octobre	35,8	23,3	84	127	25,5	5,6
Novembre	33,7	16,1	71	145	23,4	5,2
Décembre	39,2	10,5	54	167	22,2	5,9
Janvier	34,6	9,8	55	252	22,9	6,5
Février (1)	40,0	13,3	34	282	25,0	8,7
Mars (1)	42,7	12,4	28	266	27,1	9,6
Avril (1)	45,8	19,1	36	215	28,0	9,2

(1) données 1998 car données climatiques 1999 non disponibles

### 3.6.4 Pertes et apports par infiltration

Durant les périodes de basses eaux (BE1 et BE2), on considère que la variation de volume de sol exondée est de l'ordre de précision de la méthode utilisée. Aussi on néglige l'infiltration durant cette période.

Pour la période de montée des eaux ME (phase de remplissage, du 7/08 au 19/09), le volume de sol supplémentaire inondée est de  $15.10^6 \text{ m}^3$ , ce qui donne un volume d'eau stockée dans le sol de  $-2,25.10^6 \text{ m}^3$  (pour une porosité de 15%). A l'opposé, lors de la phase de vidange (D1 et D2, du 25/11/98 au 7/03/99), la variation du volume d'eau stockée dans le sol est de  $1.5.10^6 \text{ m}^3$ .

### 3.6.5 Apports et pertes par écoulement

Comme indiqué dans le tableau 4, les apports par écoulement se font :

- en période de montée des eaux, soit du 7/08/98 au 19/09/98 (phase de remplissage) : il s'agit des écoulements du canal comptés positivement (figure 16) .

Tableau 6 : Débits moyens journaliers dans le canal en 1998/99 (en l/s)

jour	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	Janv	Febr	Mars	Avri
1	0	0	0	0	2880	?	?	-1620	-611	-120	-9,1	0
2	0	0	0	0	3210	?	?	-956	-587	-99,0	-10,4	0
3	0	0	0	0	3490	?	?	-865	-563	-111	-11,4	0
4	0	0	0	0	3530	?	?	-834	-540	-127	-6,0	0
5	0	0	0	0	3470	?	?	-1100	-519	-124	-4,6	0
6	0	0	0	0	2880	?	?	-1260	-498	-117	-4,6	0
7	0	0	0	9,0	2920	?	?	-1270	-478	-99,6	-2,2	0
8	0	0	0	71,9	3670	?	?	-1270	-459	-65,8	0	0
9	0	0	0	173	4540	?	?	-1250	-440	-56,3	0	0
10	0	0	0	241	3840	?	?	-1220	-422	-68,7	0	0
11	0	0	0	268	3240	?	?	-1190	-406	-61,1	0	0
12	0	0	0	399	2860	?	?	-1160	-389	-50,5	0	0
13	0	0	0	1380	3140	?	?	-1140	-374	-55,7	0	0
14	0	0	0	2170	2280	?	?	-1120	-358	-61,3	0	0
15	0	0	0	1980	1620	?	?	-1100	-344	-65,8	0	0
16	0	0	0	933	1320	?	?	-1080	-330	-57,2	0	0
17	0	0	0	1480	993	?	?	-1060	-317	-39,7	0	0
18	0	0	0	1770	598	?	?	-1040	-304	-24,6	0	0
19	0	0	0	1920	199	?	-2850	-1020	-292	-16,4	0	0
20	0	0	0	2330	?	?	-2760	-1000	-278	-12,4	0	0
21	0	0	0	2700	?	?	-2670	-960	-264	-12,1	0	0
22	0	0	0	4280	?	?	-2590	-921	-250	-13,5	0	0
23	0	0	0	5520	?	?	-2490	-884	-238	-8,6	0	0
24	0	0	0	4800	?	?	-2390	-849	-226	-7,8	0	0
25	0	0	0	3860	?	?	-2280	-814	-215	-6,9	0	0
26	0	0	0	3670	?	?	-2180	-782	-204	-9,3	0	0
27	0	0	0	3070	?	?	-2080	-750	-194	-13,0	0	0
28	0	0	0	2850	?	?	-1980	-720	-184	-9,4	0	0
29	0	0	0	3160	?	?	-1880	-691	-170		0	0
30	0	0	0	3330	?	?	-1780	-663	-119		0	0
31	0	0	0	3040	?	?		-637	-134		0	
Moy.	0	0	0	1790	-	-	-	-1010	-345	-54	-1,56	0

$Q > 0$  : écoulement  $E \rightarrow O$  (remplissage) ;

$Q < 0$  : écoulement  $O \rightarrow E$  (vidange)

?

: débit impossible à déterminer (écoulement  $O \rightarrow E$  non canalisé, inondation généralisée)

- et en période de hautes eaux, du 20/09/98 au 24/11/98 (phase d'inondation généralisée), pour équilibrer les apports et pertes liés aux précipitations et à l'évaporation ; il s'agit alors d'apport venant en direct du Niger par le Sud (et non par le canal).

Par contre, les pertes par écoulements ont lieu durant la période de descente des eaux, soit du 25/11/98 au 7/03/99 (phase de vidange) ; cette fois, ce sont les débits du canal comptés négativement (figure 16). Durant les autres périodes, à savoir basses eaux (canal sans eau) et hautes eaux (inondation généralisée), le bilan des écoulements est nul.

Le tableau 6 donne les débits moyens journaliers du canal lors du cycle hydrologique 1998/99, calculés à partir des lectures limnimétriques de l'échelle du pont. A partir de ces chiffres, on estime les apports par écoulement dans le canal à  $9,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  et les pertes par écoulement dans le canal à  $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

### 3.7. Bilan hydrologique annuel

A partir de la décomposition du bilan hydrologique que nous venons de réaliser, on peut calculer le volume d'eau stocké ou perdu  $V_{stock}$  dans le terroir de Batamani par :

$$V_{stock} = P + ETR + Q + I$$

Cela correspond au bilan des volumes du tableau 7. On rappelle que le bilan des volumes de la période des hautes eaux est nul par définition.

Tableau 7 : Bilan hydrologique (en  $10^3 \text{ m}^3$ ) du terroir de Batamani lors du cycle 1998/99 en fonction des périodes hydrologiques fonctionnelles

Date	1/05/98 – 6/08/98	7/08/98 – 19/09/98	20/09/98 – 24/11/98	25/11/98 – 7/03/99	8/03/99 – 30/04/99	1998/1999
Période	BE1 + BE2	ME	HE	D1 + D2	BE1	année
Signification hydrologique	système isolé, descente des eaux	système ouvert, montée des eaux	système ouvert, inondation généralisée	système ouvert, descente des eaux	système isolé, descente des eaux	Tout le cycle hydrologique
P (direct)	21,8	733,6	382,0	0	0	1 137,4
P (ruissell <sup>6</sup> )	21,5	26,9	0,38	0	0	48,78
ETR	-196,4	-938,9	-3 417,3	-1 428,1	-258,5	-6 239,2
Q	0	9 200	3 035,3	-5 200	0	7 035
I	0	-2 250	0	1 500	0	-750
<b>Bilan des volumes</b>	<b>-150</b>	<b>6 770</b>	<b>0</b>	<b>-5 130</b>	<b>-260</b>	<b>1 230</b>

Par ailleurs, ce bilan des volumes correspond à la variation du volume de la mare entre le Debut et la fin de la période considérée (tableau. 8). On constate qu'il y a une bonne adéquation entre les résultats de ces deux méthodes indépendantes. Notre modèle hydrologique semble donc correcte.

Ainsi, on peut conclure à partir du tableau 7 que le bilan hydrologique annuel lors du cycle 1998/99 est un stockage d'eau dans le terroir de Batamani : au 30/04/99, il reste un apport

positif de  $1,23.10^6 \text{ m}^3$  stocké. Dans le détail des paramètres hydrologiques, les apports par écoulement diminués des pertes par infiltration équilibrent les pertes par évapotranspiration réelle sur l'ensemble du cycle annuel ; ainsi, il en résulte que les apports par les pluies correspondent en 1998/99 au volume d'eau stocké dans le terroir.

Enfin, en fonction des périodes hydrologiques, les basses eaux sont des périodes de pertes en eau faibles. La montée des eaux est une période de stockage d'eau avec  $6,77.10^6 \text{ m}^3$  en 1998, alors que la descente des eaux est une période de restitution des eaux avec une perte de  $5,13.10^6 \text{ m}^3$  lors du cycle 1998/99.

Tableau 8 : Variation du volume d'eau de la mare (en  $10^3 \text{ m}^3$ ) dans le terroir de Batamani lors du cycle 1998/99 en fonction des périodes hydrologiques fonctionnelles

<b>Date</b>	1/05/98 – 6/08/98	7/08/98 – 19/09/98	20/09/98 – 24/11/98	25/11/98 – 7/03/99	8/03/99 – 30/04/99	1998/1999
<b>Période</b>	<b>BE1 + BE2</b>	<b>ME</b>	<b>HE</b>	<b>D1 + D2</b>	<b>BE1</b>	<b>année</b>
Vmare début	75	5	6 335	6 092	286	75
Vmare fin	5	6 335	6 092	286	?	
<b>Bilan Vmare</b>	-70	6 330	-243	-5 806	?	?

Vmare : volume de la mare

Après l'étude du fonctionnement hydrologique de la mare, l'utilisation de cette ci sera évoqué dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE IV : UTILISATION DE L'ESPACE

Dans le Delta intérieur l'écoulement spasmodique des eaux fluviales, sous forme de crue saisonnière chaque année engendre et fertilise l'eau et le sol. Cette fertilisation se fait par l'alternance des transformations minérales et organiques, faisant du Delta une machine à fabriquer des sols fertiles, de l'herbe et du poisson. Ces ressources naturelles de l'hydrosystème sont exploitées par les par trois systèmes : la pêche, l'agriculture et l'élevage : qui constituent les préoccupations fondamentales de la population de Batamani. Les systèmes d'exploitation sont tous dépendant du cycle hydrologique de la mare ; ainsi que les stratégies adaptées pour réduire les risques de pertes matérielles et l'élaboration des calendriers d'exploitation.

### 4. 1. La pêche

C'est l'activité principale du terroir, puisqu'elle se passe quatre fois par an. On distingue la pêche de crue au moment de l'entrée de l'eau dans la mare, la pêche des hautes eaux au maximum de l'inondation (20 septembre en 1998), la pêche de décrue à partir de l'inversion de sens du courant et la pêche collective lors de l'étiage (Basses eaux 1 et 2).

#### 4.1.1. La pêche de crue

La montée de l'eau par le chenal est contrôlée chaque matin par les habitants de Soulyman Daga. Ils procèdent à l'aménagement de la mare par pose d'un batardeau le 11 aout (planche de 30 à 35 cm de hauteur), puis un second est placée (figure 26). Pendant ce temps d'autres pêcheurs placent des barrages de *Durankoro* (nasse rectangulaire) dans le chenal du côté de la mare. Dans l'après midi (vers 14 heures), les deux planches sont enlevées une à une entraînant une entrée brusque de l'eau dans la mare : les poissons sont alors pris au piège à leur passage dans les barrages. Les poissons trop petits sont remis à l'eau.

Vers minuit les deux batardeaux sont replacés, jusqu'à ce que la hauteur de l'eau atteigne environ 70 cm. La même opération est alors effectuée jusqu'à ce que le niveau de l'eau s'équilibre entre le chenal et la mare.

Ils peuvent aussi construire devant l'ouvrage un barrage de terre au lieu de placer des batardeaux. Les poissons sont capturés en attendant l'assèchement de l'eau déversée. En aval un grand filet triangulaire *Swanya* est placé pour éviter toute fuite de poissons.

Relation Mayo Ninga - Mare en crue (1998)

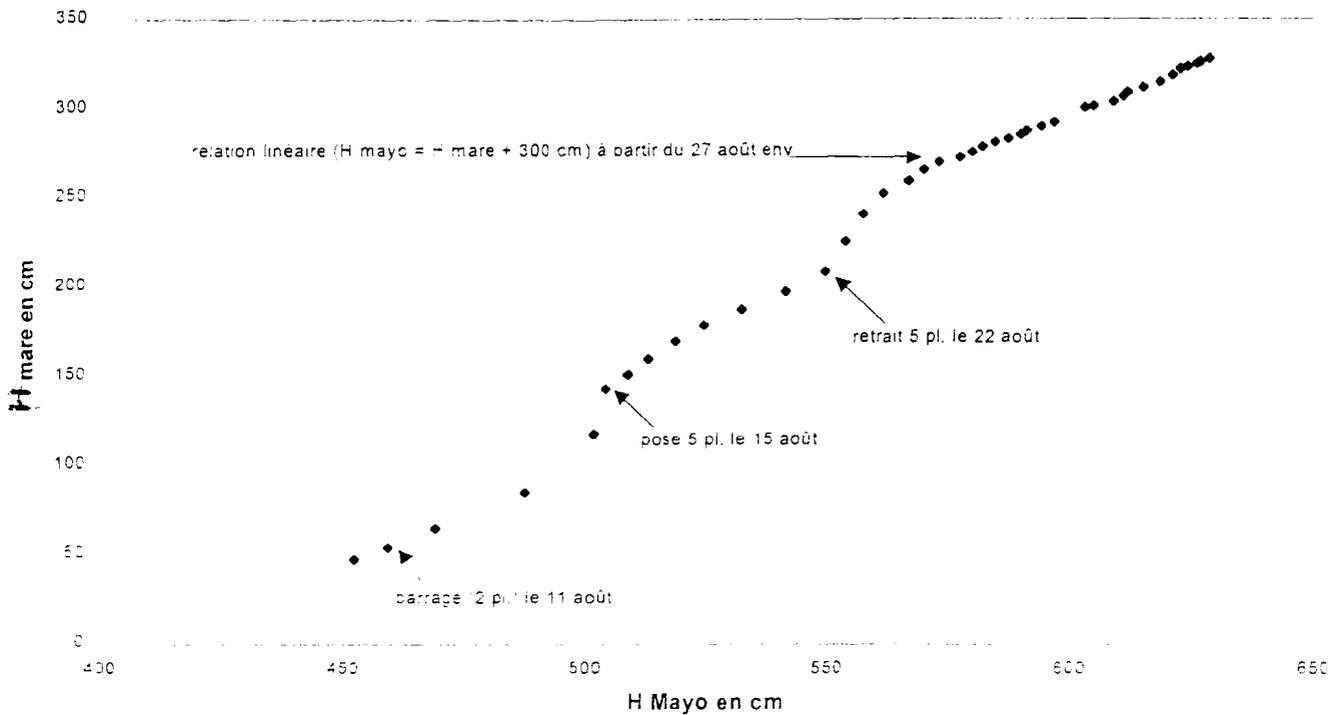


Figure 26 : Aménagement du barrage pour la pêche

#### 4.1.2. La pêche des hautes eaux

Afin de fermer complètement l'ouvrage 8 planches sont placées : en hautes eaux le niveau de l'eau dépasse celui de l'ouvrage et du pont qui le recouvre. il est alors impossible de réguler les entrées et sorties d'eau et de poissons. Deux sortes de pêche sont alors pratiquées selon les villages :

Les pêcheurs de Batamani et Souleyman migrent en forêt et utilisent des palangres lorsque l'eau commence à monter et les filets lorsque le niveau s'est stabilisé.

Les pêcheurs de Gatal pêchent dans les eaux de la plaine inondée à l'aide de filets dormants posés le soir et retiré le matin.

#### **4.1.3. La pêche de décrue**

Au début, le swanya (grand filet triangulaire à maille très fine), filtre tout ce qui peut transiter par le chenal entre la mare et le mayo ninga.

Lorsque le niveau de l'eau atteint le quatrième batardeau, les barrages de *durankoro* sont remis en place comme pour les pêches de crue.

#### **4.1.4. Les pêches d'étiages**

C'est la mise en défens de la mare entre la fin de la pêche de décrue et la pêche collective. La pêche vivrière seule est autorisée.

#### **4.1.5. La pêche collective**

Cette pêche se déroule un jeudi et la date est fixée par le maître des eaux, en fonction du niveau de la mare, de la position des étoiles, de l'avis des autres pêcheurs et également de l'avis du chef de Batamani. Les villages voisins sont invités de la même que ceux de Batamani sont conviés aux pêches collectives de la région. Les engins de pêches utilisés sont les filets à deux mains, les harpons et les kango.

### **4.2. La riziculture**

Dans le Delta en plus de la culture du riz, la culture maraichère sont aussi pratiqués, par contre le terroir de Batamani ne s'occupe que de la riziculture.

Les zones de culture se situent des deux cotés de la mare. Au Nord de Debaré nous avons les cultivateurs de Sare mama; au Sud les terres sont gérés par Batamani. L'altitude de la plaine varie entre 258 et 259 m pour les zones basses, et 260 m pour les zones hautes. Dès la venue des premières pluies de Juin et Juillet qui humidifient la terre les agriculteurs permet un labour et un premier désherbage; suivi d'un semis à la volée. Les agriculteurs utilisent à 90% des variétés locales pour minimiser les risques de perte car elles sont très résistantes aux caprices pluviométriques et hydrologiques ( les Marka de Saremama ). Les agriculteurs de Batamani choisissent les variétés locales parcequ'elles nécessitent également moins de travail. Ces variétés locales sont donc semées en premier et les variétés améliorées quinze jours avant la crue; le temps que les plants puissent atteindre une taille suffisante. Quand les plants sont inondés, les premières adventices sont arrachées; un second désherbage est parfois négligé par manque de main d'œuvre.

### **4.3. Elevage bovin transhumant**

L'élevage dans le Delta est basée sur la transhumance. L'espace est divisé en Leyde : grandes unités traditionnelles qui sont sous la responsabilité d'un ou plusieurs Jowro (maître des pâturages).

La zone de Batamani appartient aux Leydi Diallobé- Djenneri: ce Leydi de 960 km est divisé en cinq sous-jowro et le troupeau en trois parties aux fonctions bien définies et différentes:

- le *Garti*. transhume vers les pâturages de décrue (converge vers le bourgou).
- le *Benti*. pâture longtemps près du village ; de la fin de la transhumance au début de la crue.
- le *Dounti*. troupeau de vaches laitières et de veaux qui restent toute l'année au village et causent d'énormes dégâts aux agriculteurs; surtout le Dounti qui a tendance à brouter les jeunes pousses de riz pendant l'hivernage.

Du mois de Mars et durant cinq mois, le Leydi reçoit près de 100.000 bovins transhumants (soit environ 10% des troupeaux du Delta). Les troupeaux arrivent en Janvier et partent en fin Juillet vers Mema et le Sahel.

Il faudra noter que des conflits peuvent survenir quelquefois entre les agriculteurs et les éleveurs.

## CHAPITRE V : LES PRINCIPAUX CYCLES GEOCHIMIQUES

L'unité de la biosphère apparaît particulièrement lorsque l'on considère le cycles des divers éléments nécessaires à la manifestation et au déploiement de la vie. Le cycle de ces éléments s'effectue entre les divers compartiments de la biosphère et de la biomasse. Les cycles du carbone de l'azote et du phosphore en sont des illustrations.

un cycle biogéochimique comprend un cycle biologique proprement dit, qui se fait sous l'action de différents transformateurs (les champignons et les bactéries par exemples) qui décomposent les organismes morts (animaux et végétaux) en substances assimilables pour les consommateurs dans les réseaux trophique. Ce cycle est constitué par 3 phases :

- une phase d'absorption des éléments du sol par les racines,
- une phase de restitution au sol d'une partie de ces éléments(chute des feuilles, bois mort, cadavre et excréments) et
- une rétention (accumulation dans les organes pérennes :  
(rétention = absorption – restitution), et le flux qui le relie au mode extérieur.

Ce flux fait partie d'un cycle géochimique qui peut être défini comme continentale et ou océanique, comprenant des phénomènes d'import ou d'entrée dans le système, et des phénomènes d'exports, ou de sortie du système.

- L'import provient soit de l'atmosphère (transports par le vent ou par la pluie), soit de la lithosphère (par décomposition de la roche-mère).des apports d'origine antropique tels que les engrais et les ordures peuvent s'y ajouter. Il faudra noter aussi certains microorganismes qui sont capables de fixer le dioxyde d'azote ( $N_2$ ) de l'air et donc de faire entrer l'écosystème (voir cycle de l'azote en 5.2.).
- L'export comprend les pertes par les eaux de drainage et les pertes par exploitations humaines.

Parmi les principaux cycles biogéochimiques d'importance écologique majeure, il faut citer les cycles de l'eau, de l'azote, du carbone du phosphore et du soufre. Dans ce mémoire nous essayerons de voir ainsi les 3 premiers cycles; tout en quantifiant les flux importés et exportés dans le site à étudier, notamment la mare de Débaré à Batamani.

## 5.1. Cycle géochimique du carbone

Le cycle du carbone représente le cycle géochimique majeur puisque le carbone constitue l'élément clef de toutes les substances biochimiques et le moteur des autres cycles d'éléments biogènes. En effet le carbone rentre dans la constitution de la matière vivante et il influe beaucoup dans l'ajustement des climats terrestres au travers de certains gaz à effet de serre, le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et le méthane ( $\text{CH}_4$ ).

Ce cycle est régulé par deux processus antagonistes : la photosynthèse et la respiration (figure 27). Le carbone effectue un circuit continu avec comme point de départ et d'arrivée le  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

Après la mort des différents animaux et végétaux, les composés organiques sont attaqués selon la complexité de leur structure et les conditions du milieu par les champignons, des actinomycètes et des bactéries spécialisées. Les diverses catégories glucidiques : amidon, cellulose, hemicellulose, lignine, pectine etc... sont respectivement dégradés par des micro-organismes amylolytiques, ligninolytiques, pectinolytiques etc..

Ces phénomènes de dégradation en chaîne conduisent à une minéralisation plus ou moins complète donnant l'eau et du  $\text{CO}_2$  qui seront utilisés par ailleurs par les micro-organismes chimiotrophes et les organismes photosynthétiques.

Le  $\text{CO}_2$  libre de l'air et le  $\text{CO}_2$  dissous dans les eaux (surtout l'océan qui est un puits de carbone) forment les 2 principales sources de carbone.

### 5.1. 1. Les pertes en $\text{CO}_2$ :

Annuellement les plantes vertes et les bactéries chimiotrophes utilisent de grandes quantités de  $\text{CO}_2$  pour la synthèse de leurs matières organiques (60 M de tonnes).

D'autre part un certain pourcentage du  $\text{CO}_2$  se fixe sous forme de calcaire par des êtres vivants : coquilles de mollusques, calcaires du squelette des animaux supérieurs (processus de calcification). Le carbone impliqué dans ce processus de calcification est presque définitivement immobilisé car, le  $\text{CaCO}_3$  est un corps stable. Par ailleurs, une grande partie des débris d'organismes calcifiés sédimente au fond des mers au cours des temps géologiques et donne des roches calcaires.

### 5.1. 2. Les gains en $\text{CO}_2$ :

Les animaux et végétaux non chlorophylliens (hétérotrophes) tout comme les organismes phototrophes non soumis à l'action de la lumière dégagent d'énormes quantités de  $\text{CO}_2$  par

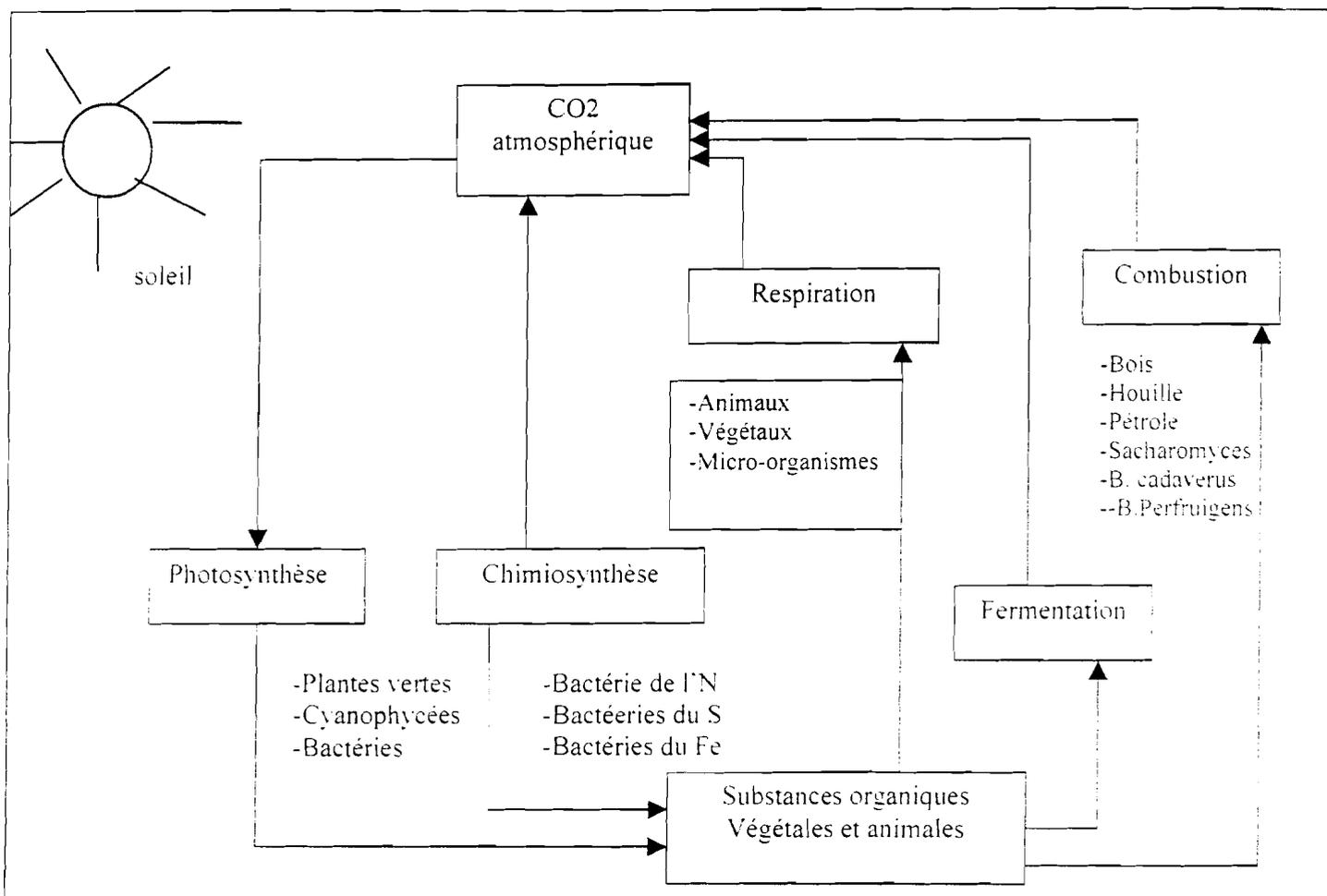
respiration et par la fermentation. On estime environ à  $4,5 \cdot 10^8$  tonnes la quantité de  $\text{CO}_2$  rejetée annuellement par l'humanité. Il convient d'ajouter à cela la quantité rejetée par la respiration des poissons, des batraciens, des reptiles, des oiseaux, des mammifères, des arthropodes, des végétaux et micro-organismes. Par ailleurs, la combustion vive du bois de chauffe, du pétrole, de la houille, des lignites etc... produit de grandes quantités de  $\text{CO}_2$ . Il est à noter également les énormes quantités de  $\text{CO}_2$  engendrées par les volcans (fumerolles volcaniques), les eaux thermales etc...

Les processus de gain et de perte en  $\text{CO}_2$  constituent de longues chaînes de réactions chimiques fermées dont les produits s'équilibrent dans un cycle faisant que la teneur globale de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  reste constante (voir figure 28).

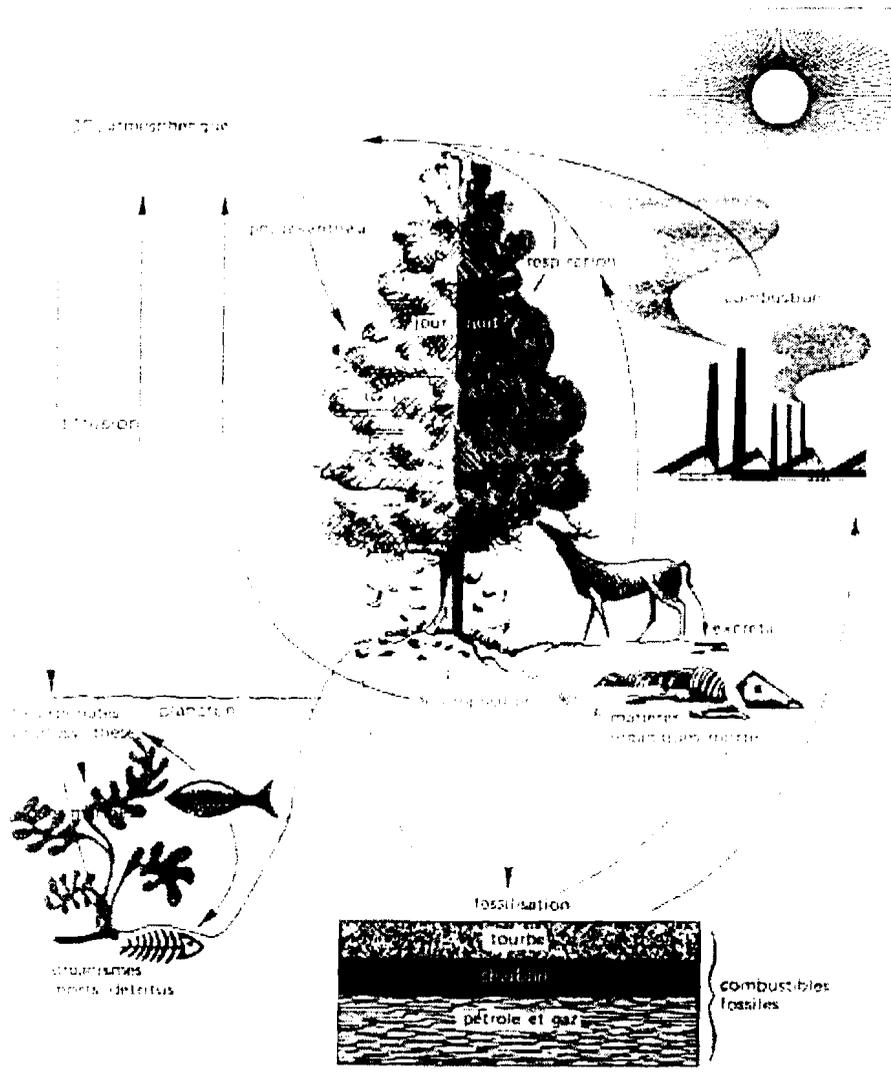
On observe un certain découplage entre le cycle du carbone dans les écosystèmes continentaux et les océans. En effet les échanges de  $\text{CO}_2$  entre l'air et les biocénoses sont relativement rapides : au contraire ceux entre hydrosphère et atmosphère sont plus lents car l'océan mondial renferme un très important stock de  $\text{CO}_2$  ( $390000 \cdot 10^9$ ). de sorte que ce gaz y est largement en excès et ne constitue pas un facteur limitant pour la photosynthèse en milieu aquatique.

Il existe cependant des échanges abiotiques de carbone entre les trois compartiments de la biosphère : dissolution et dégazage à l'interface océan-atmosphère, entraînement de bicarbonates des continents vers l'hydrosphère par suite des phénomènes de dissolution et par le jeu du cycle de l'eau, sédimentation de ces carbonates au fond de l'océan.

L'atmosphère renferme 750 GtC d'équivalent carbone de sorte que le flux photosynthétique annuel des biomes continentaux correspond à environ 12% du stock gazeux de  $\text{CO}_2$  (Ramade dictionnaire d'écologie).



**Figure 27 :** Schéma du cycle général du carbone



**Figure 28 :** Schéma du cycle du carbone au niveau des organismes vivants autotrophes et hétérotrophes mettant en évidence des effets inverses de la photosynthèse et de la respiration (d'après Smith et RamadeF..Ecologie fondamentale )

### 5.1. 3. Action de l'homme sur le cycle du carbone :

Les activités anthropiques perturbent le cycle du carbone selon plusieurs modalités. La principale tient à l'usage des combustibles fossiles. A l'heure actuelle les industries brûlent plus de 11 milliards de tonnes d'équivalent charbon, auxquels s'ajoutent plusieurs centaines de tonnes par an d'équivalent carbone provenant du CO<sub>2</sub> produit par les cimenteries. A cela doit être ajoutée une quantité de CO<sub>2</sub> due à la déforestation estimée à 1.3 GtC. (Amiotte Suchette 1994).

En conséquence la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique stable depuis des millénaires s'est mise à croître depuis le début de l'ère industrielle (milieu du 19<sup>em</sup> siècle), passant d'environ 270 ppmv à 335 ppmv (1991). Elle s'accroît à l'heure actuelle à raison de 1.5 ppm/an (figure 29). Ce phénomène biogéochimique est d'une très grande importance car il influe sur les climats par des modifications liées à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère : en effet, le dioxyde de carbone fait partie des gaz à effet de serre et l'accroissement de sa concentration dans l'atmosphère entraîne une augmentation de la température, avec de nombreuses conséquences sur le cycle de l'eau, la végétation ou le niveau des océans.

*Evolution à l'échelle globale  
des rejets anthropiques de CO<sub>2</sub>  
dans l'atmosphère depuis 1860  
(combustion de l'énergie fossile  
+ production de ciment +  
forçages), d'après les données  
distribuées par le CDIAC (sous  
la responsabilité scientifique de  
G. Marland et T.A. Boden).*

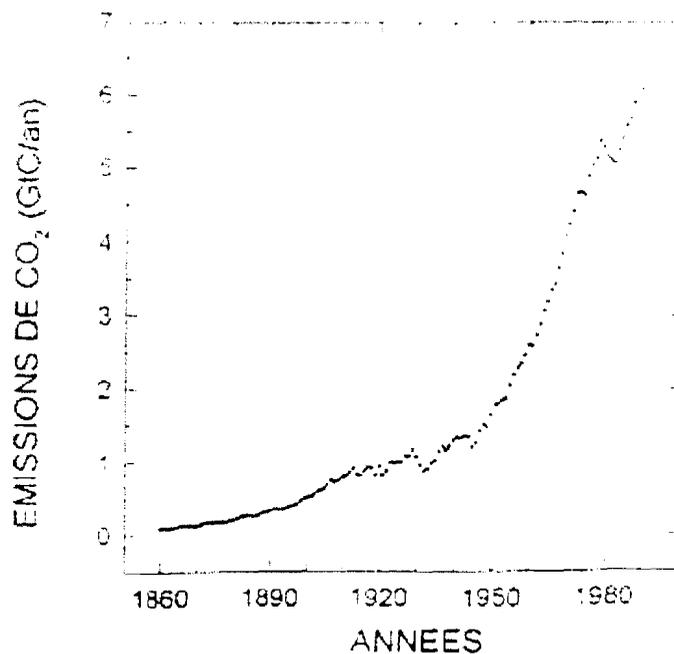


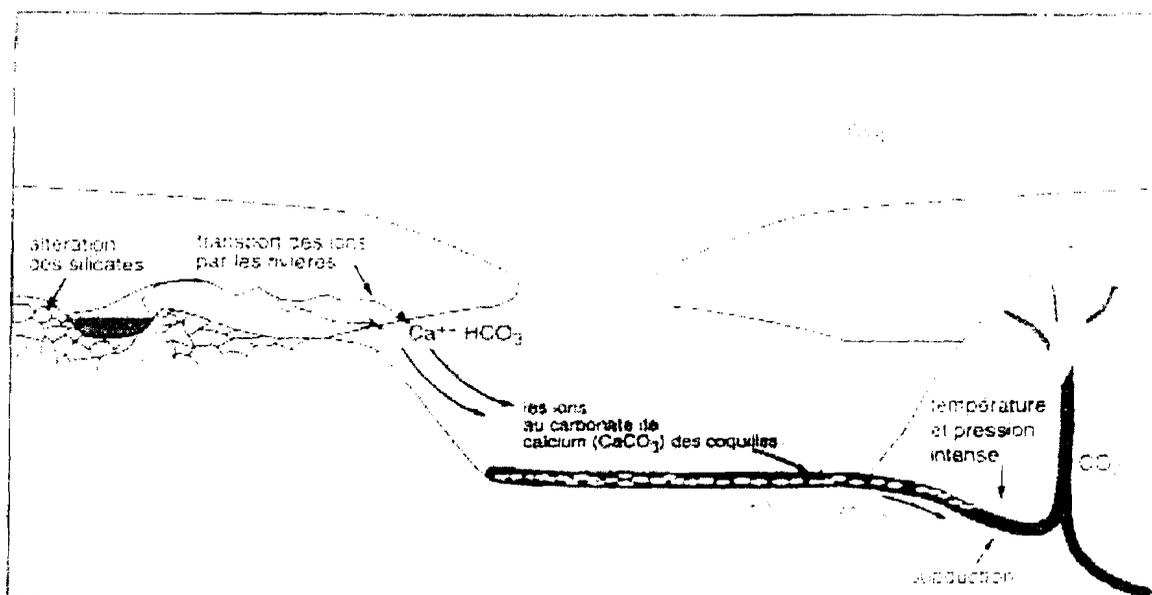
Figure 29 : Evolution du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis 1860 G. Marland et T.A. Boden

#### 5.1. 4. Rôles des phénomènes abiotiques dans le cycle du carbone :

Il a été montré que des phénomènes géochimiques sont susceptibles d'expliquer les variations de taux de  $\text{CO}_2$  atmosphérique observées sur une longue période de temps. En effet, la dissolution de  $\text{CO}_2$  atmosphérique sous forme de bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) diminue sa concentration dans l'air. L'érosion liée au lessivage des roches carbonatées superficielles des continents amène ce carbone dans l'océan lequel est fixé sous forme de carbonate insoluble dans les squelettes de protistes et d'invertébrés marins qui constituent des roches sédimentaires carbonatées. Après un certain temps passé dans les couches lithosphériques profondes, les carbonates exposés au métamorphisme se transforment en silicates avec dégagement de  $\text{CO}_2$  sous l'effet conjugué du réchauffement et de la compression. Le taux atmosphérique de ce gaz se remet alors à croître via le volcanisme.

L'explication des fluctuations climatiques peut être donnée en couplant le cycle du carbone et du silicium (figure 4) qui correspond à un cycle d'une période de 500.000 ans. En effet, les périodes avec un taux élevé de  $\text{CO}_2$  atmosphérique provoquent un intense effet de serre et seraient marquées par un climat chaud et pluvieux, qui augmenterait le lessivage et tendrait à diminuer le taux de  $\text{CO}_2$  atmosphérique à long terme.

A l'opposé, le climat froid et sec qui résulterait de cette action concomitante d'effet de serre ralentirait le lessivage de sorte que le taux de  $\text{CO}_2$  dans l'air se remettrait à monter et ainsi de suite alternativement.



**Figure 30 :** Couplage du cycle du carbone et du silicium dans l'écosphère ( d'après Kasting F, Too O.B, Pollack J. B.)

## 5.2. Cycle de l'azote

### L'azote dans le monde vivant

L'azote est le principal composant des protéines, des acides nucléiques et de nombreux coenzymes cofacteur. Les animaux ne sont pas capables d'utiliser l'azote minéral, mais ils le trouvent sous forme organique dans les plantes dont ils se nourrissent. En général, il est fourni à l'organisme par les protéines et éliminé sous forme d'ammoniac, d'urée et d'acide urique dans les urines et de composés azotés simples dans les selles. La quantité minimale de l'azote éliminée correspond à la quantité minimale métabolisée : chez l'homme environ 25 à 30 g de protéine par jour. Cette quantité est appelée valeur d'usure. La perte d'azote doit être compensée par l'introduction d'une quantité d'équivalente avec les aliments : c'est seulement ainsi que l'organisme est en équilibre azoté. L'équilibre est rompu quand les pertes en azote sont plus élevées que les gains.

Les plantes ont à leur disposition dans leur milieu de l'azote sous diverses formes : N moléculaire, N<sub>2</sub> atmosphérique, N inorganique dans les terres (nitrates et sols ammoniacaux) et composé organiques azotés provenant de résidus diversement décomposés d'organismes morts. Les plantes supérieures utilisent surtout les sels inorganiques, nitriques et ammoniacaux : elles sont incapables d'utilisées directement de l'azote atmosphérique. Dans ces conditions il s'ensuit directement un appauvrissement des réserves en N inorganiques combinés dans les sols s'il n'intervenait pas, pour régler l'équilibre entre les diverses formes de l'azote, une série de phénomènes biologiques et physiques qui rendent possible le cycle de l'azote.

### 5.2.1 . Le Cycle de l'azote

Par ce terme on entend par l'ensemble complexe des transformations continues et à caractères cycliques de l'azote inorganique (atmosphérique moléculaire ou inorganique des sols) en N et organique par minéralisation des composés organiques azotés. Le trajet suivi par N dans un tel ensemble de transformation (N dans le sol sous forme inorganique et organique, N atmosphérique moléculaire et N dans la matière vivante) n'est pas unique mais présente une série de voies secondaires. Le bilan de N dans le sol résulte d'un équilibre entre les gains et les pertes. Les gains sont dus en partie à l'azote. Enfin une certaine quantité de N (4 à 8 kg/h/an) peut parvenir au sol avec les eaux de pluie, inorganique ou encore comme produit

d'oxydation de l'azote formé sous l'action des décharges électriques dans l'atmosphère. Des quantités plus élevées peuvent être enfin fournies par l'homme comme fertilisants azotés inorganiques. Un certain pourcentage de N. pourtant quitte le sol, toujours sous forme de composés inorganiques sans l'intervention directe de facteurs biologiques, comme l'ammoniac à l'état gazeux ou les nitrates extraits du sol par l'action montée des eaux. Cette partie du cycle de N est aussi connu comme cycle secondaire inorganique de l'azote.

Le cycle de l'azote comprend donc dans son complexe une production d'ammoniac, une nitrification (soit nitrosation ou nitritation ou formation de nitrites de l'ammoniac, soit nitratisation ou formation de nitrate à partir de nitrites), une dénitrification (formation de N à partir de nitrate) et une fixation de l'azote moléculaire ( Figure 31).

### **5.2.2. La nitrification :**

Elle se produit tant dans les sols que les écosystèmes aquatiques et résulte de l'existence de micro-organismes qui absorbent l'azote atmosphérique et le transforment en nitrates. Elle est le fait de bactéries libres ou symbiotiques, des actinomycètes symbiotiques, et à l'action desquels s'ajoutent en milieu aquatique celle des cyanobactéries photosynthétiques ( Nostoc, Anabaena, Trichodesmun par exemple).

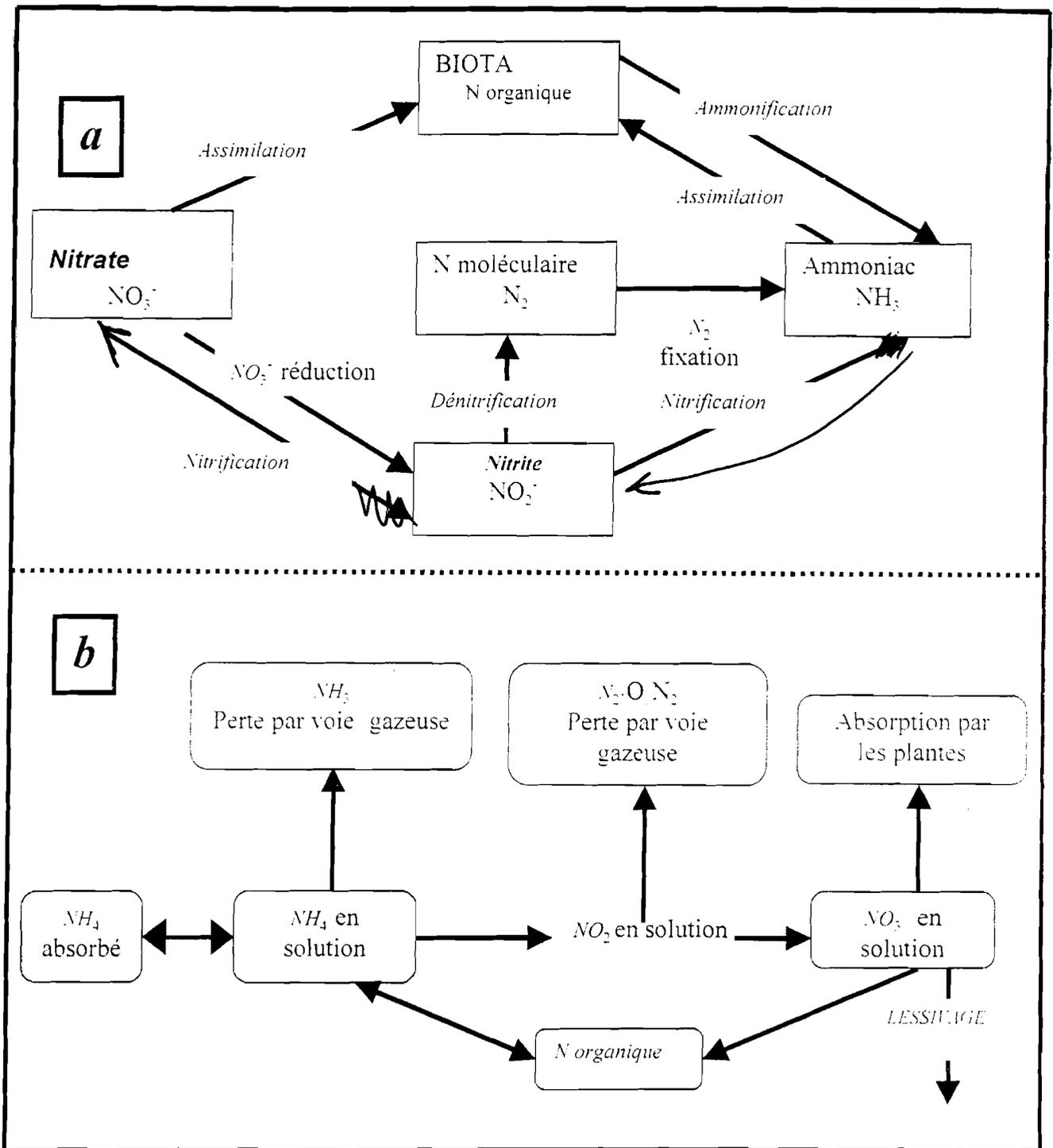
Dans les biotopes terrestres les principaux fixateurs de l'azote sont les Nitrobacters, les Azobacters et des Clostridium. En outre existent des bactéries symbiotiques des légumineuses (Ryzobium leguminosarum) qui vivent dans les nodosités situées sur les racines de ces plantes.

Chez d'autres végétaux aulne, casuarina par exemple, des actinomycètes symbiotiques du genre Frankia, fixent aussi l'azote de l'air.

Dans les biotopes aquatiques en plus des Nitrobacters (AZO.BACTER ) et des clostridium existent des cyanobactéries nitrifiantes, soient libres, soient symbiotiques, ainsi que des bactéries autotrophes propres au milieu marin telle que Nitrocystis océanus qui se suffit d'ammoniac comme source d'énergie qu'elle transforme en nitrate. Diverses bactéries des sols et des eaux peuvent aussi retransformer en nitrites puis en nitrates, l'ammoniac provenant de la dégradation des matières organiques mortes. L'essentiel des nitrates formés dans la biosphère provienne de l'action de micro-organismes édaphiques ou aquatiques : une faible fraction est inorganique et provient de l'action des éclairs en temps d'orages et de volcanisme.

### **5.2.3. La dénitrification :**

Les nitrates ainsi formés sont absorbés par les végétaux et transformés en acides aminés puis en protéines. Après la mort des organismes, les protéines vont être décomposées par des bactéries et des acides aminés transformés par diverses bactéries en ammoniac. Celui-ci peut subir une nitrosation qui l'oxyde en  $\text{NO}_2$  (nitrite), lequel peut être à son tour réduit en  $\text{N}_2\text{O}$  et même  $\text{N}_2$  (diazote) par des bactéries dénitrifiantes (*Pseudomonas* dénitrifiant). Cette dernière emploie les nitrates comme source d'oxygène pour oxyder le glucose, dans le sol les bactéries telles que *Nitrobacter* peuvent achever la réoxydation de l'azote en  $\text{NO}_3$ .



**Figure 31** : cycle schématique de l'azote :processus majeur (a-d'après Heathwaite et al.. 1996) et cycle de l'azote dans les sols(b-modifié d'après Caussade et al.. 1984)

#### 5.2.4. Action de l'homme sur le cycle de l'azote

Le cycle de l'azote est un des plus complexes et des plus parfaits à l'échelle de la biosphère : mais de nos jours l'action de l'homme déséquilibre le cycle de l'azote par l'utilisation annuelle de plusieurs dizaines de tonnes de nitrates de synthèses comme engrais chimique en agriculture : en plus de ceux produits indirectement à partir du  $\text{NO}_2$  formé lors de combustion des divers hydrocarbures et de la houille dans les véhicules à moteurs et les foyers (voir figure 32). Comme la dénitrification ne peut assimiler la totalité de ces nitrates, leur concentration augmente de façon ininterrompue ; ou l'agriculture intensive soulèvent de nombreux problèmes de pollution. En plus de cela, cette dénitrification transforme vers l'atmosphère une partie de la pollution de l'eau et du sol en donnant de nombreux composés intermédiaires ; or le rendement de la dernière de ces réactions, transformant l'oxyde nitreux en azote est faible dans de nombreux milieux. Cet oxyde nitreux qui est un gaz stable dans la basse atmosphère (temps de résidence moyen de 150 ans) serait responsable d'un fort effet de serre (6% de l'effet additionnel depuis 1975) et qui contribuerait à la destruction de l'ozone dans la stratosphère à cause de sa longue durée de vie. Sans oublier ses effets sur les eaux souterraines et de surfaces pouvant provoquer une dystrophisation.

Il est estimé à l'heure actuelle que l'excès de nitrates produits par transformation des oxydes d'azotes formés dans les combustions et ceux provenant des engrais chimiques correspond à plus de 20 millions de tonnes par an (André Mariotti, *pour la science* n° 249 Juillet 1998).

Le problème à résoudre pour la pollution du nitrate sera: quelles voies de recherche permettront de relever le défi de l'agronomie écologique et économiquement rentable ? L'exemple de l'oxyde nitrique montre que nous devons prendre en compte l'ensemble des cycles biogéochimiques de la surface (cycles de l'eau de l'azote, de carbone), dans le sol dans la plante et dans l'atmosphère, ainsi que leurs couplages.

Enfin pour remédier aux pollutions associées à l'azote, il reste à inventer de nouvelles pratiques (dont nous savons que les résultats ne seront pas visibles qu'après de longues années, tout comme l'interdiction de chlorofluorocarbones )dont les effets bénéfiques ne seraient aussi apparents que dans plusieurs décennies, seraient un exemple à suivre.



### **5.3. Cycle du phosphore**

Le phosphore est un élément biogène d'une grande importance écologique car il n'existe qu'en faible quantité tant dans les biotopes terrestres qu'aquatiques. Le phosphore minéral reste un élément assez rare dans la biosphère dont il ne représente en masse qu'environ 1% de la composition en corps simple de la lithosphère. Il constitue en effet un des composants essentiels de la matière vivante dans laquelle il se rencontre à un taux relativement élevé. Il intervient indispensablement à l'édification des nucléotides et, partant, des acides nucléiques, ainsi que des adénylates énergétiques (ATP, ADP, AMP). Il tend de ce fait à devenir un facteur limitant primordial dans de nombreux écosystèmes dont il conditionne ipso facto la productivité (écosystème aquatique. Christian Lévêque)

#### **5.3.1 Cycle du phosphore en milieu terrestre**

Le stock phosphore minéral disponible pour les êtres vivants est entièrement contenu dans la lithosphère. Il s'y trouve essentiellement dans les roches ignées comme les apatites et les dépôts sédimentaires (phosphorique par exemple). Ce phosphore minéral est mis en circulation par dissolution dans l'eau interstitielle sols est ensuite introduit par lessivage dans les eaux continentales. Tant dans les écosystèmes terrestres qu'aquatique, le phosphore est absorbé par les végétaux autotrophes qui le transforment en phosphates organiques. Ces derniers passent dans les réseaux trophiques des consommateurs puis des décomposeurs.

Les phosphates inorganiques restitués aux sols par les déchets végétaux, les cadavres et les excréta des animaux, sont attaqués par les organismes saprophages et finalement les micro-organismes décomposeurs pour être transformé en orthophosphates minéraux.

#### **5.3.2. Cycle du phosphore en milieu aquatique**

Le phosphore est introduit dans les écosystèmes aquatiques continentaux par le ruissellement. Les fleuves l'amènent plus tard dans la mer qu'ils fertilisent perpétuellement par leur apport d'eaux riches en phosphates minéraux solubles (5 à 10%) et particulaires (90 à 95%). Ce transport intervient surtout lors des crues. Les

phosphates (solubles et particulaires) permettent donc la prolifération des algues marines et du phytoplancton, ce qui explique pourquoi les eaux littorales et, de façon générale, celles du plateau continental sont les plus productives.

Notons que dans les régions agricoles comme le terroir de Batamani ces proportions pourraient être beaucoup modifiées de manière conséquente par les apports en phosphore soluble provenant des engrais, des eaux usées et des excréments (les études sont en cours).

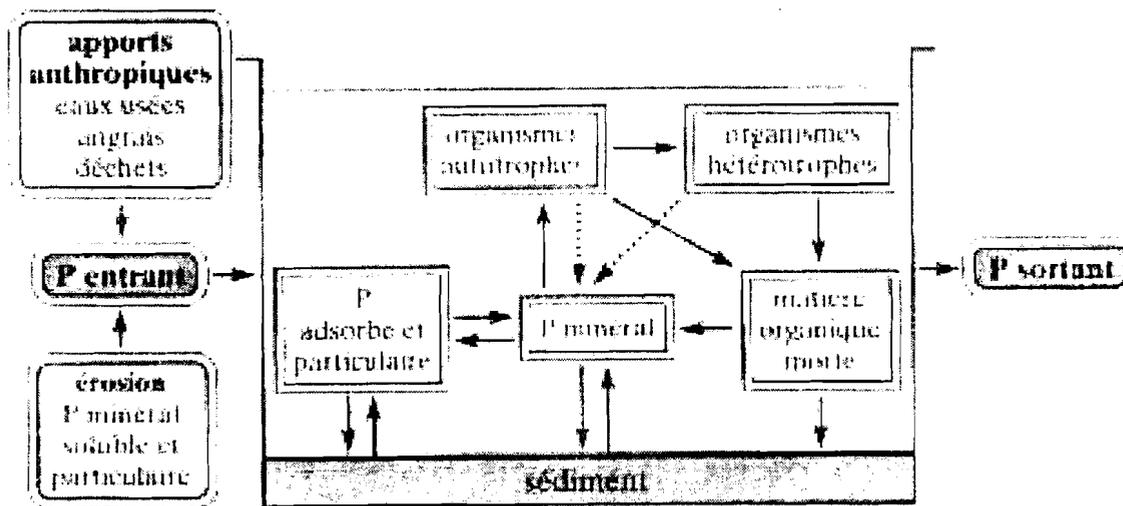
Dans les milieux lacustres, le phosphore est présent dans l'eau sous diverses formes :

- Une forme minérale dissoute (orthophosphate) qui provient en majeure partie du phosphore minéral apporté par les eaux de ruissellement du bassin versant :
- Une forme organique soluble qui provient des excréments ou de la décomposition des organismes vivants.
- Une forme particulaire, minérale ou organique (phosphate total)

D'une manière générale dans les eaux naturelles, les teneurs en phosphates dissous sont faibles : elles sont de  $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$  pour les orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et de  $0,025 \text{ mg.L}^{-1}$  pour le phosphore dissous incluant les formes organiques. Les végétaux n'utilisent que la forme minérale dissoute. (figure 31).

La quantité de phosphate disponible pour la production végétale, en milieu aquatique dépend donc des apports directs sous forme minérale et de la vitesse de transformation, sous forme minérale soluble, du phosphore organique soluble ou particulaire. Ce phosphore minéral est rapidement assimilé par les végétaux de sorte que les concentrations dans les eaux non polluées sont très faibles. Cela ne signifie pas qu'il n'existe pas de phosphate minéral mais qu'il est rapidement recyclé.

La biodisponibilité du phosphore traduit plus ou moins grande à quitter la phase particulaire, pour la phase soluble assimilable par les végétaux. Elle constitue l'expression d'une dynamique globale du système et de l'ensemble des processus physico-chimiques et biologiques impliqués dans le cycle du phosphore.



**Figure 31 :** Représentation simplifiée des principales composantes du cycle du phosphore en milieu aquatique

Le phosphore est essentiellement recyclé par des processus d'excrétion du phosphore soluble et organique par les organismes vivants, et par la décomposition bactérienne de la matière organique. Le zooplancton et les poissons excrètent de grandes quantités de phosphore utilisable par les végétaux. Ainsi le zooplancton peut excréter chaque jour environ 10% de la quantité de phosphore stocké dans la biomasse sous forme de phosphate et du phosphore organique en quantités équivalentes (Lévêque, écosystème aquatique). Cette excrétion varie selon la température, le taux de consommation, la composition du plancton, etc...

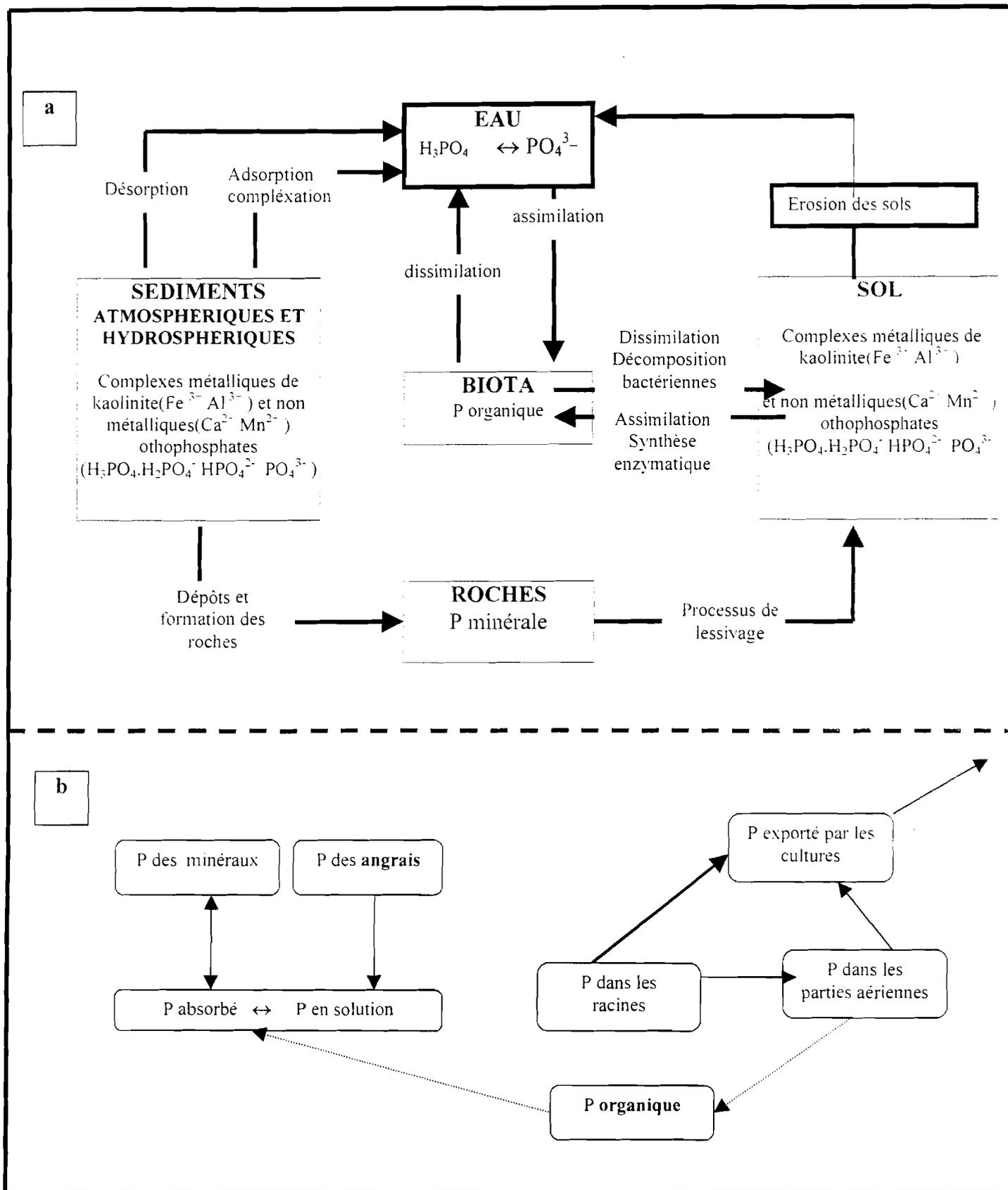
Les poissons contiennent une grande proportion du phosphore total d'un milieu aquatique, et leur excrétion contribue également à l'enrichissement du milieu en phosphore minéral dans une proportion généralement inférieure à celle du zooplancton, car le taux de renouvellement de la biomasse est plus faible.

Il faudra toutefois noter qu'une certaine quantité de phosphore est perdue pour la production biologique. En effet une grande partie de la matière organique sédimente sur le fond ou, dans les milieux aquatiques bien oxygénés. Le phosphore se combine à d'autres éléments (fer, aluminium, calcium) pour former des composés insolubles qui précipitent au niveau du sédiment. (figure 32). Ce dernier fonctionne comme un piège à phosphore qui

emmagasine le phosphore particulaire. Il peut se produire également des phénomènes d'absorption des ions phosphates sur des argiles, sur des constituants organiques et surtout sur des hydroxydes et oxydes métalliques (fer, manganèse, aluminium).

Ce piégeage n'étant pas toujours définitif : l'immobilisation du phosphore particulaire piégé dans le sédiment dépend essentiellement de l'oxygénation et du PH de ces milieux.

Dans des conditions réductrices, c'est à dire dans une période de déficit en dioxygène par exemple, il y a solubilisation d'une partie du phosphore immobilisé, notamment par réduction et solubilisation des formes oxydées du manganèse et du fer, et par hydrolyse des phosphates de fer, et d'aluminium, conduisant au relargage du phosphore absorbé. Ces phénomènes interviennent dans les sédiments anaérobies de l'hypolimnion (zone où la température reste basse et relativement homogène résultant du refroidissement en surface), riche phosphore minéral dissous. Le phosphore précédemment piégé dans le sédiment, est reminéralisé en condition anaérobie : devient ainsi disponible pour la production primaire.



**Figure 32 :** Schématisation des processus majeurs du Cycle du phosphore (a-d'après Heatwaite et al. 1996.) et cycle du phosphore dans les sols (b-d'après Fardeau et Conesa. 1994)

## CHAPITRE VI : BILAN GEOCHIMIQUE DES NUTRIMENTS ET DU CARBONE ORGANIQUE DANS LA MARE DE BATAMANI

Lors de la crue 1998/99, une campagne géochimique de prélèvements d'eau pour la détermination des flux d'azote, de phosphore et de carbone organique a été effectuée sur le terroir de Batamani. Nous présentons ici les résultats acquis en trois points géographiques permettant de faire le bilan des entrées-sorties de matières de l'écosystème Batamani. Il s'agit du Niger à Sensé, du canal au pont et de la mare Débaré en eau libre (centre de la mare).

6.1. Présentation des résultats Les prélèvements ont débuté en août au début de la période de remplissage de la mare par les eaux du Niger via le mayo Ninga puis le canal, avec une interruption du suivi entre la mi-décembre et la mi-janvier. L'échantillonnage a été journalier pour les nutriments sur le canal et la mare, hebdomadaire pour les nutriments sur le Niger et pour le carbone organique (dissous et particulaire) sur l'ensemble des points de prélèvements (tableaux 9 et 10).

Les nutriments étudiés sont les phases dissoutes de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), d'ammoniac ( $\text{NH}_4^+$ ) et de phosphate ( $\text{PO}_4^{2-}$ ). On étudie également le carbone organique dissous (COD) et le carbone organique particulaire (COP) avec la quantité de matières en suspension associée (MES).

Tableau 9 : Nombre d'analyse pour la détermination des nutriments

	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Total
Niger	3	5	4	4	3	0	4	2	25
Canal	23	25	21	30	16	3	24	10	152
Mare	19	24	20	29	16	4	23	11	146

Tableau 10 : Nombre d'analyse pour la détermination du carbone organique

	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Total
Niger	3	2	1	3	2	0	0	0	11
Canal	11	3	1	3	2	0	0	0	25
Mare	11	3	1	3	2	0	0	0	25

### 6.1. Evolution saisonnière des concentrations en ammoniac

La concentration en  $\text{NH}_4$  varie entre 0,7 et 28  $\mu\text{mol/l}$  sur le Niger, 1,4 et 26  $\mu\text{mol/l}$  dans le canal et de 1,4 à 20  $\mu\text{mol/l}$  dans la mare (tableau. 11). Les moyennes sont respectivement de 14,5  $\mu\text{mol/l}$ , 7,8  $\mu\text{mol/l}$  et 7,6  $\mu\text{mol/l}$ .

Tableau 11 : Principales caractéristiques des concentrations en ammoniac (en  $\mu\text{mol/l}$ )

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	9/03/99	28,0	5/10	0,7	20/02	14,5	7,9
Canal	10/08/98	11/03/99	25,9	13/09	1,4	21/02	7,8	3,9
Mare	10/08/98	11/03/99	20,3	27/01	1,4	15/02	7,6	3,6

C'est dans la mare que les concentrations sont les plus faibles et les moins variables au cours de la crue. On note un niveau moyen de 8  $\mu\text{mol/l}$  d'août à janvier, puis un niveau à 3  $\mu\text{mol/l}$  à partir de février au début des périodes de basses eaux (figure 33). Les plus fortes concentrations sont observées au début de la période d'inondation généralisée (autour du 21/09/98), autour du 14/12/98 en période de descente des eaux et fin janvier-début février ; les pics enregistrés sont de l'ordre de 15  $\mu\text{mol/l}$ . On retrouve ces fortes concentrations sur le canal et le Niger. Dans le canal, les pics de concentration enregistrés sont légèrement supérieurs à

ceux de la mare, d'où une moyenne légèrement supérieure. Mais la forme d'évolution est similaire (figure.34). On passe d'un niveau à 8  $\mu\text{mol/l}$  en hautes eaux à un niveau à 3  $\mu\text{mol/l}$  en basses eaux. On note que les fortes concentrations précède le début de la période d'inondation généralisée.

Les évolutions sont beaucoup plus contrastées dans le fleuve Niger (figure 35). En août-septembre, on a un système à 12  $\mu\text{mol/l}$ , puis durant la période des hautes eaux une moyenne de l'ordre de 18  $\mu\text{mol/l}$  avec des pics supérieurs à 25  $\mu\text{mol/l}$  ; enfin, à partir de février un niveau moyen de 3  $\mu\text{mol/l}$ , comme dans la mare ou le canal.

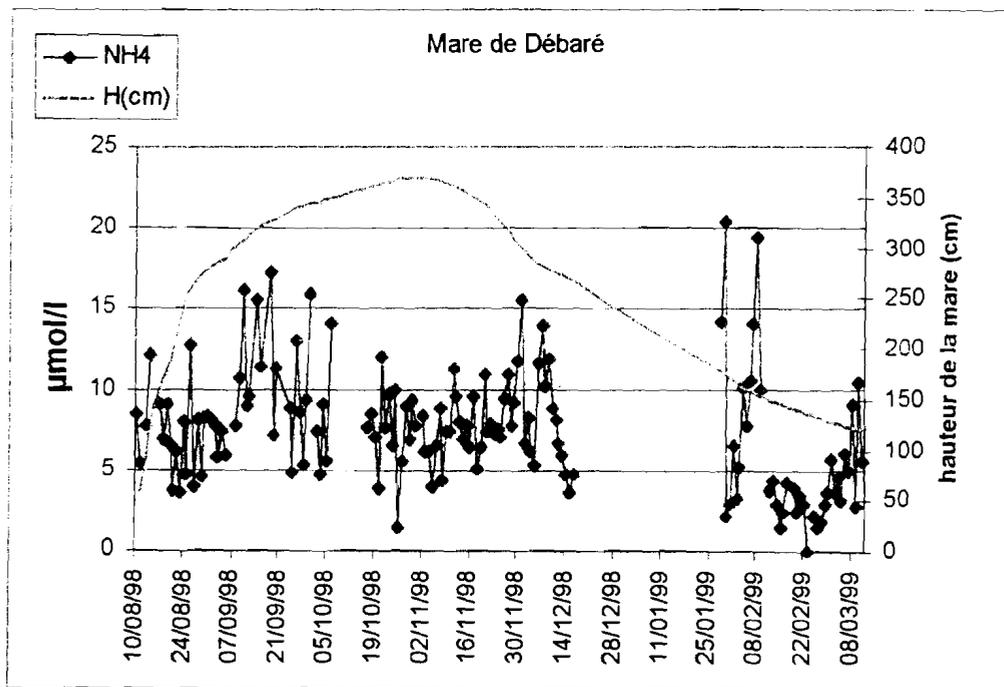


Figure 33 : Evolution des concentrations en nutriments de  $\text{NH}_4^+$ , -), dans la mare de Batamani

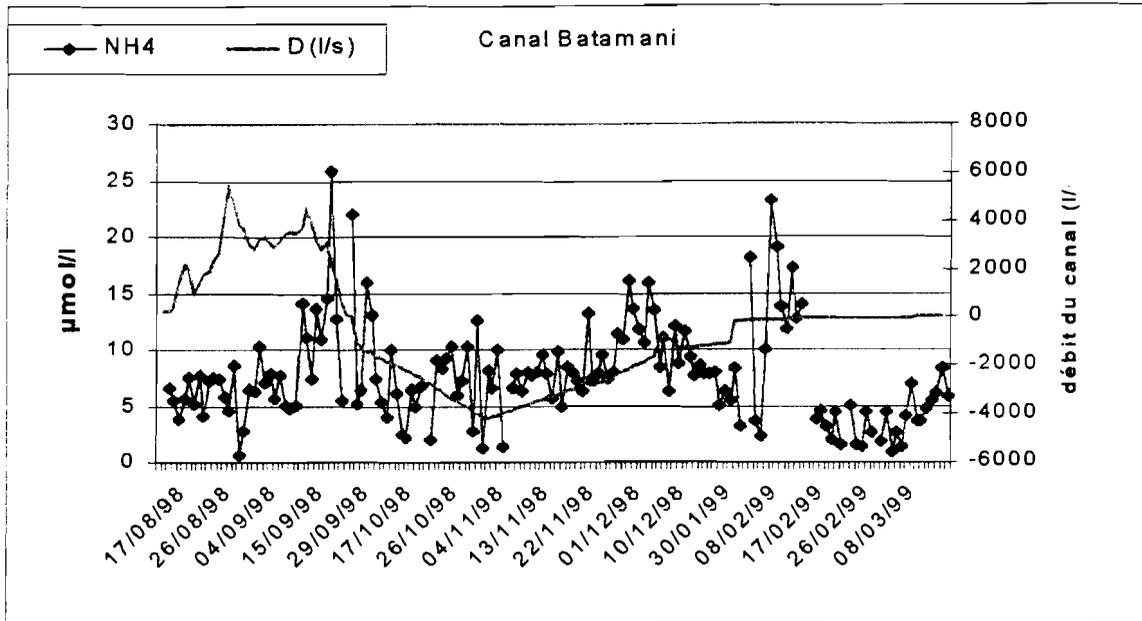


Figure 34.: Evolution des concentrations en nutriments de  $\text{NH}_4^+$ , dans le canal

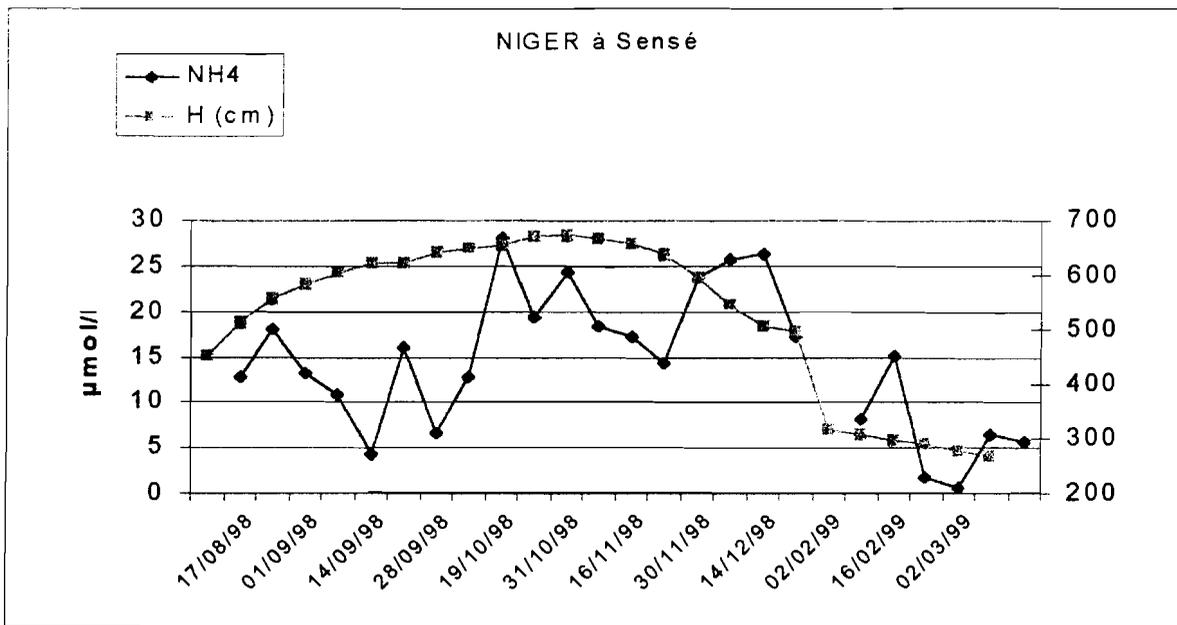


Figure 35 : Evolution des concentration de  $\text{NH}_4^{3+}$  dans le Niger

## 6.2. Evolution saisonnière des concentrations en nitrate

Sur les trois sites de prélèvements, les concentrations en nitrate les 5 premiers jours d'écoulement sont extrêmement élevées par rapport aux concentrations du reste de l'année. En effet, entre le 10 et 14 août, elles sont de 9  $\mu\text{mol/l}$  pour un maximum le reste de l'année de 4,7 pour le Niger et 6,3 pour le canal ; dans la mare, la concentration dépasse les 15  $\mu\text{mol/l}$  avec un pic à 37  $\mu\text{mol/l}$ , pour un maximum le reste de l'année d 5,5  $\mu\text{mol/l}$ . Ces fortes concentrations sont liées à des phénomènes d'évaporation et de surconcentration des rejets anthropiques induite par l'absence ou quasi-absence d'écoulements. Cette période n'a aucune influence sur les flux de matières transitant entre le terroir de Batamani et le reste du système hydrologique du Niger, de plus ses concentrations sont non représentatives de l'évolution des concentrations au cours de l'année. On a donc retiré ces 5 jours de mesures des moyennes présentées ci-dessous.

La concentration en  $\text{NO}_3$  varie entre 0,5 et 9  $\mu\text{mol/l}$  sur le Niger, 0,4 et 9,4  $\mu\text{mol/l}$  dans le canal et de 0,3 à 5,5  $\mu\text{mol/l}$  dans la mare (tableau. 12). Les moyennes sont respectivement de 1,6  $\mu\text{mol/l}$ , 1,7  $\mu\text{mol/l}$  et 1,3  $\mu\text{mol/l}$ . Comme pour l'ammoniac, c'est dans la mare que les concentrations sont les plus faibles et les moins variables au cours de la crue. Cependant, cette variabilité est nettement plus faible, aussi bien d'un point de prélèvements à l'autre qu'au cours de l'année.

Dans la mare, on note un niveau de base autour de 0,9  $\mu\text{mol/l}$  toute l'année, à l'exception de la fin de la période de montée des eaux (du 24/08 au 21/09) où les teneurs sont très variables entre 2 et 4  $\mu\text{mol/l}$  (figure.36). Le reste de l'année, les teneurs de 2  $\mu\text{mol/l}$  sont exceptionnelles.

On a le même type d'évolution dans le canal, à la seule exception que le niveau de base est légèrement supérieur, de l'ordre de 1,1  $\mu\text{mol/l}$  (fig. 6.2). On retrouve aussi le même schéma d'évolution dans le Niger, avec cette fois plutôt des teneurs plus faibles (figure 37).

Tableau 12 : Principales caractéristiques des concentrations en nitrate (en  $\mu\text{mol/l}$ )

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	9/03/99	4,7	14/09	0,47	9/11	1,6	1,2
Canal	10/08/98	11/03/99	6,4	10/08	0,35	3/12	1,7	1,4
Mare	10/08/98	11/03/99	5,5	14/09	0,3	9/03	1,3	0,8

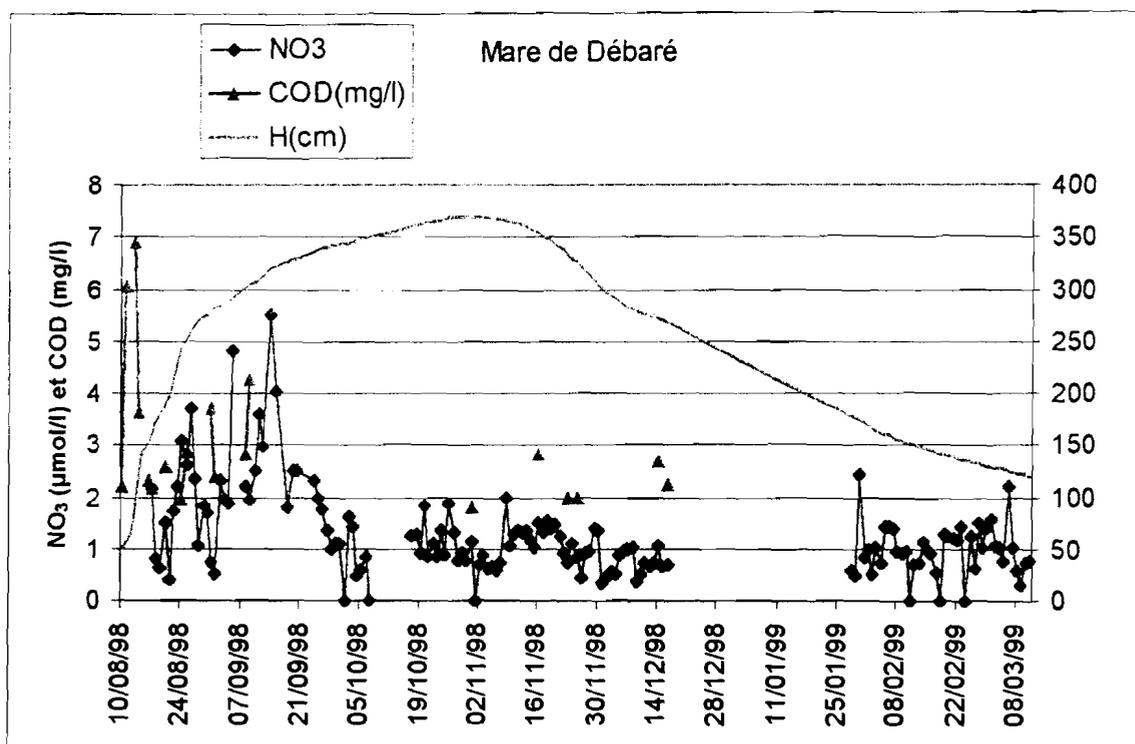


Figure 36 : Evolution de la concentration de NO<sub>3</sub> et de COD

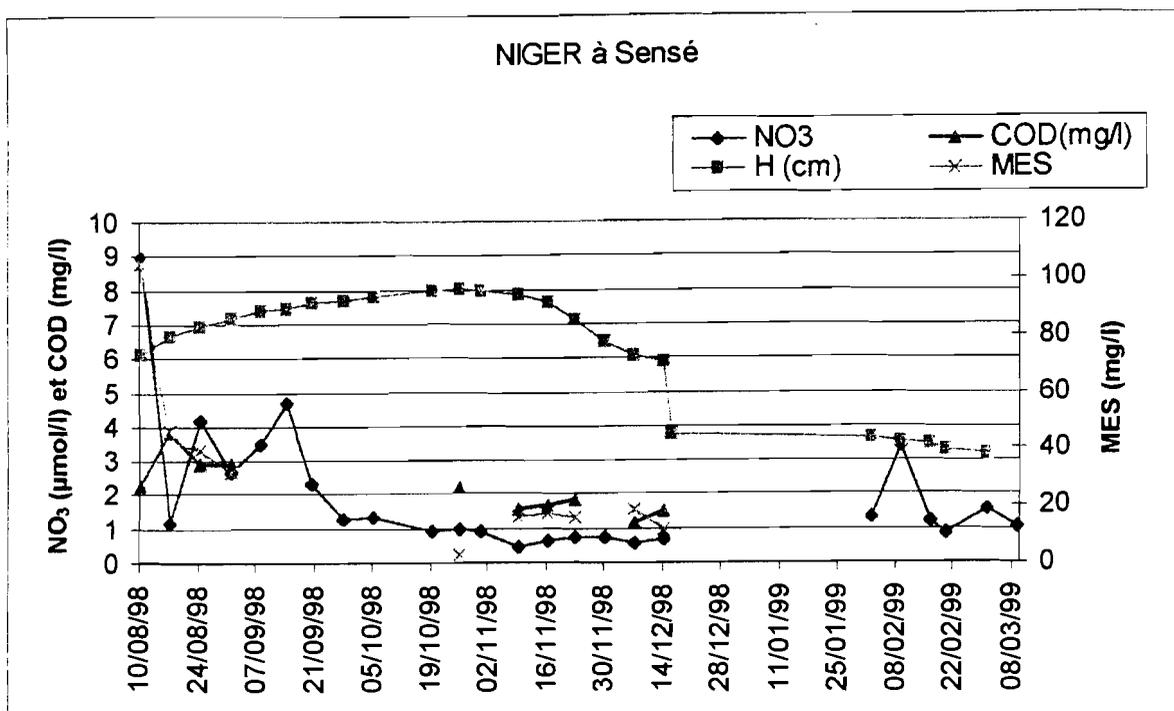


Figure 37 : Evolution des concentrations de NO3 et COD dans le Niger

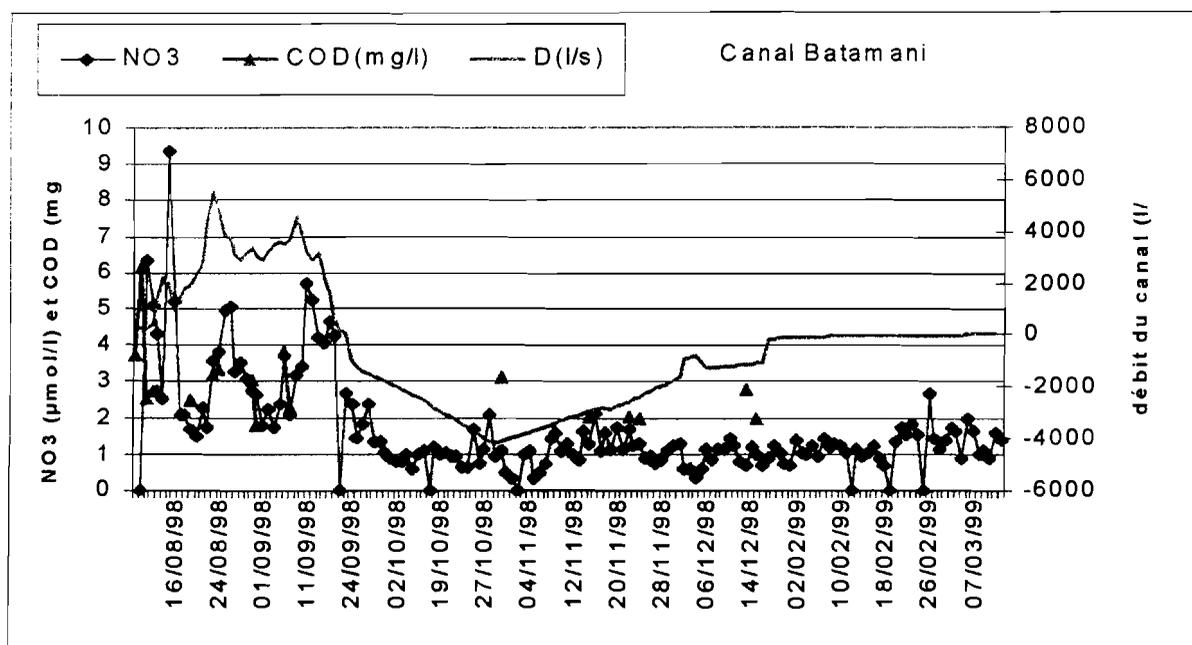


Figure 38 : Evolution des concentrations de NO3 et COD dans le canal

### 6. 3. Evolution saisonnière des concentrations en phosphate

La concentration en  $PO_4$  varie entre 0,08 et 0,55  $\mu\text{mol/l}$  sur le Niger, 0,07 et 0,24  $\mu\text{mol/l}$  dans le canal et de 0,05 à 0,71  $\mu\text{mol/l}$  dans la mare (tableau. 13). Les moyennes sont respectivement de 0,24  $\mu\text{mol/l}$ , 0,22  $\mu\text{mol/l}$  et 0,20  $\mu\text{mol/l}$ .

On note la même évolution des concentrations en phosphate sur les 3 sites de prélèvements (figure.39. 40.41 )avec des niveaux de concentrations identiques :

- de très fortes concentrations (de 0,6  $\mu\text{mol/l}$ ) les 4 premiers jours d'écoulements, comme pour les nitrates (mais ces fortes valeurs n'ont aucune influence sur la moyenne) ;
- un niveau de concentrations moyen (de 0,3  $\mu\text{mol/l}$ ) durant la montée des eaux puis à nouveau de fortes concentrations (de 0,6  $\mu\text{mol/l}$ ) au début de la période d'inondation généralisée (autour du 20/09) ;
- enfin, une diminution constante de type logarithmique de début octobre à mars jusqu'à un niveau de base légèrement supérieur à 0,1  $\mu\text{mol l}$ .

Tableau 13 : Principales caractéristiques des concentrations en phosphate ( $\mu\text{mol l}$ )

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	9/03 '99	0,55	1/09	0,08	9/02	0,24	0,16
Canal	10/08/98	11/03 '99	0,67	15/08	0,07	3/02	0,22	0,11
Mare	10/08/98	11/03 '99	0,71	13/08	0,05	26/11	0,20	0,12

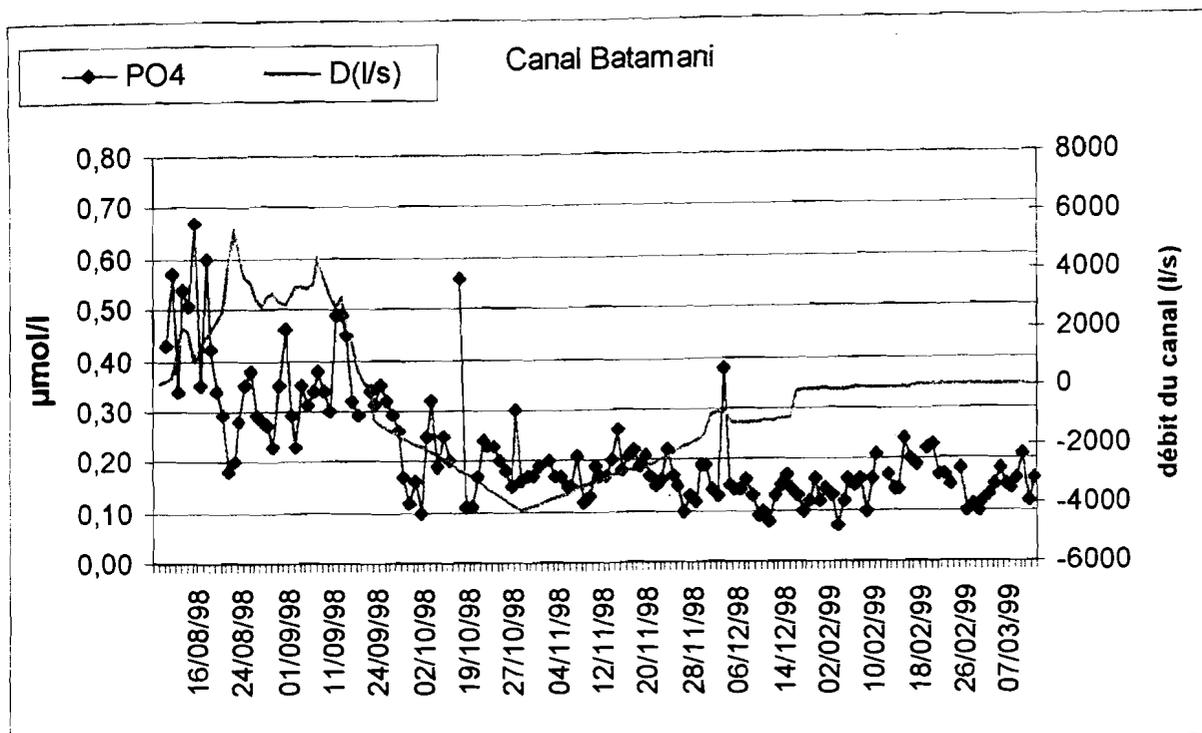


Figure 39 : Evolution ces concentrations de phosphate dans le canal

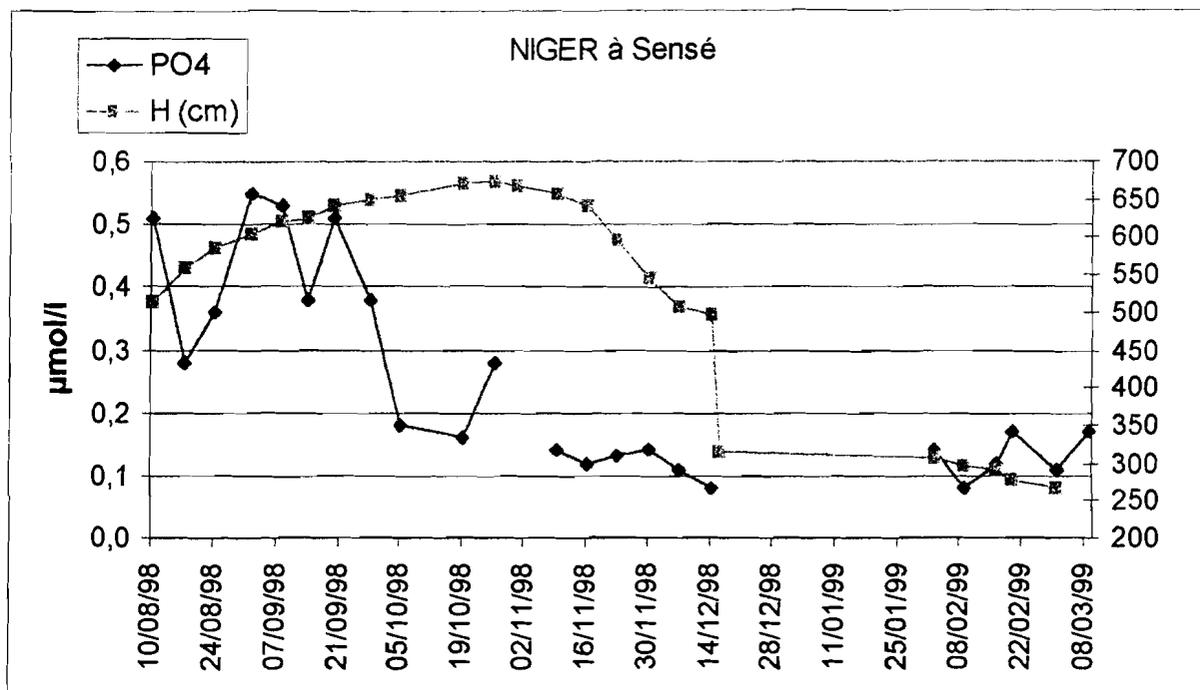


Figure 40 : Evolution des concentrations de phosphore dans le Niger

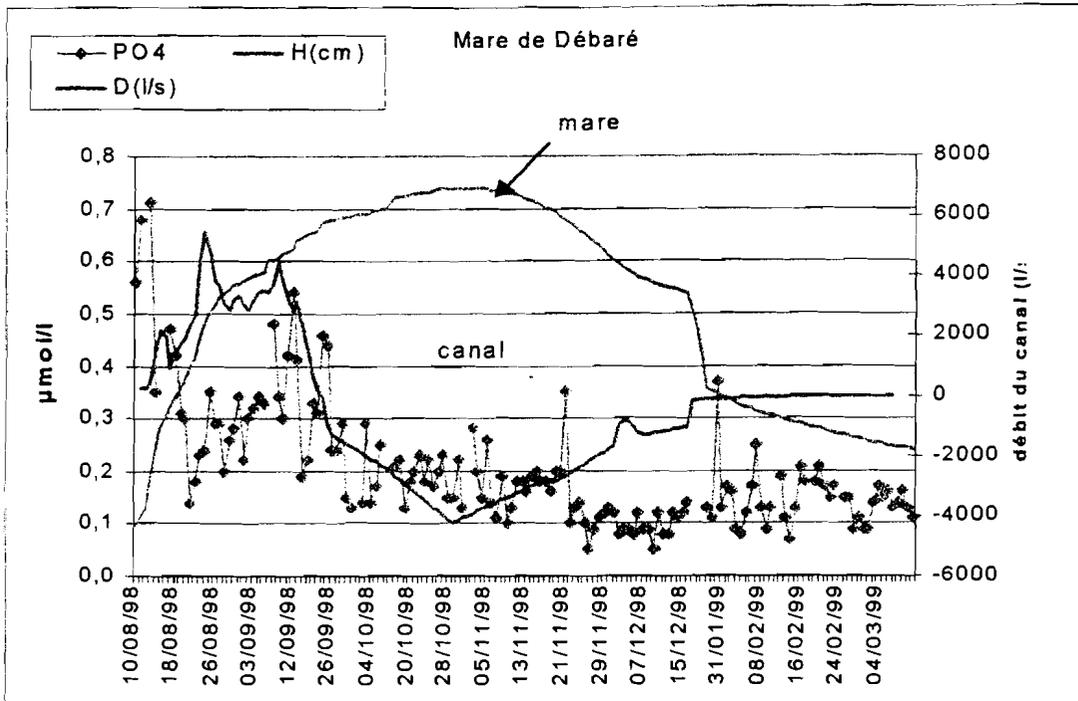


Figure 41 : Evolution des concentrations de phosphore dans la mare

#### 6.4. Evolution saisonnière des concentrations en carbone organique

Les concentrations en carbone organique sont étudiées à partir des teneurs en carbone organique dissous (COD) et particulaire (COP). Les teneurs sont ici données en mg/l (et non en µmol/l comme dans les paragraphes précédents). Les concentrations en matières en suspension (MES) sont également étudiées puisque le COP est très largement dépendant des teneurs en matières en suspension (ORANGE, 1992) ; d'ailleurs, le tableau 14 donne le pourcentage de COP présent dans les MES (matières en suspension).

Pour le COD, sur les trois sites de prélèvements (figure 42, 43, 44.), on identifie trois périodes :

- une période à fortes concentrations (de 3,8 mg/l) correspondant aux fortes turbidités des premiers jours d'écoulement (valeurs retirées de la moyenne) ;
- une période à niveau moyen centrée sur la fin de montée des eaux (de 3,0 mg/l) ;

- enfin, une période de faible concentration à partir de début novembre (de 2 mg/l sur la mare et le canal, de 1 mg/l sur le Niger).

Le schéma est identique pour le COP et les MES (figure 42, 43, 44) 6. Enfin, les pourcentages de COP dans les MES permettent de bien identifier le changement d'origine du carbone organique particulaire au cours du cycle annuel. En effet, on passe de l'ordre de 1.5 % de COP dans les MES en début d'écoulement à des teneurs de l'ordre de 5 % en décembre. Les fortes concentrations sont associées à une sortie de phytoplancton produit dans la mare vers le système hydrologique Niger. Lorsque le COP représente un faible pourcentage des MES, il est uniquement allochtone : il provient alors de l'érosion des versants.

En moyenne, pour le Niger, le canal et la mare (tableau. 14, 15, 17), les teneurs moyennes sont respectivement :

- pour le COD, de 2.2 mg/l, 2.9 et 2.6 mg/l :
- pour le COP, de 0.6 mg/l, 0,9 et 0.6 mg/l :
- pour les MES, de 22 mg/l, 44 et 25 mg/l.

Tableau 14 : Principales caractéristiques des concentrations en carbone organique dissous (mg l)

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	16/12/98	3,8	24/08	1,2	14/12	2,2	0,8
Canal	10/08/98	16/12/98	3,8	7/09	1,8	1/09	2,6	0,6
Mare	10/08/98	16/12/98	4,2	9/09	1,8	31/10	2,6	0,7

\* valeurs annuelles ne prenant pas en compte la période du 10-14 août 1998

Tableau 15 : Principales caractéristiques des concentrations en carbone organique particulaire (mg/l)

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	16/12/98	0,9	24/08	0,3	16/12	0,6	0,2
Canal	10/08/98	16/12/98	1,6	16/08	0,3	31/10	0,8	0,4
Mare	10/08/98	16/12/98	1,3	16/08	0,2	9/09	0,6	0,3

\* valeurs annuelles ne prenant pas en compte la période du 10-14 août 1998

Tableau 16 : Principales caractéristiques du pourcentage de carbone organique particulaire dans les matières en suspension (en %)

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	16/12/98	4,7	25/11	1,7	8/09	2,5	0,9
Canal	10/08/98	16/12/98	5,5	31/10	1,3	31/08	2,7	1,6
Mare	10/08/98	16/12/98	8,6	14/12	1,6	17/08	4,1	2,6

\* valeurs annuelles ne prenant pas en compte la période du 10-14 août 1998

Tableau 17: Principales caractéristiques des concentrations en matières en suspension (mg/l)

	date début	date fin	max	date max	min	date min	moyenne	EC
Niger	10/08/98	16/12/98	46	24/08	3,0	31/10	22	14
Canal	10/08/98	16/12/98	95	16/08	5,5	31/10	44	32
Mare	10/08/98	16/12/98	84	16/08	3,5	14/12	25	25

\* valeurs annuelles ne prenant pas en compte la période du 10-14 août 1998

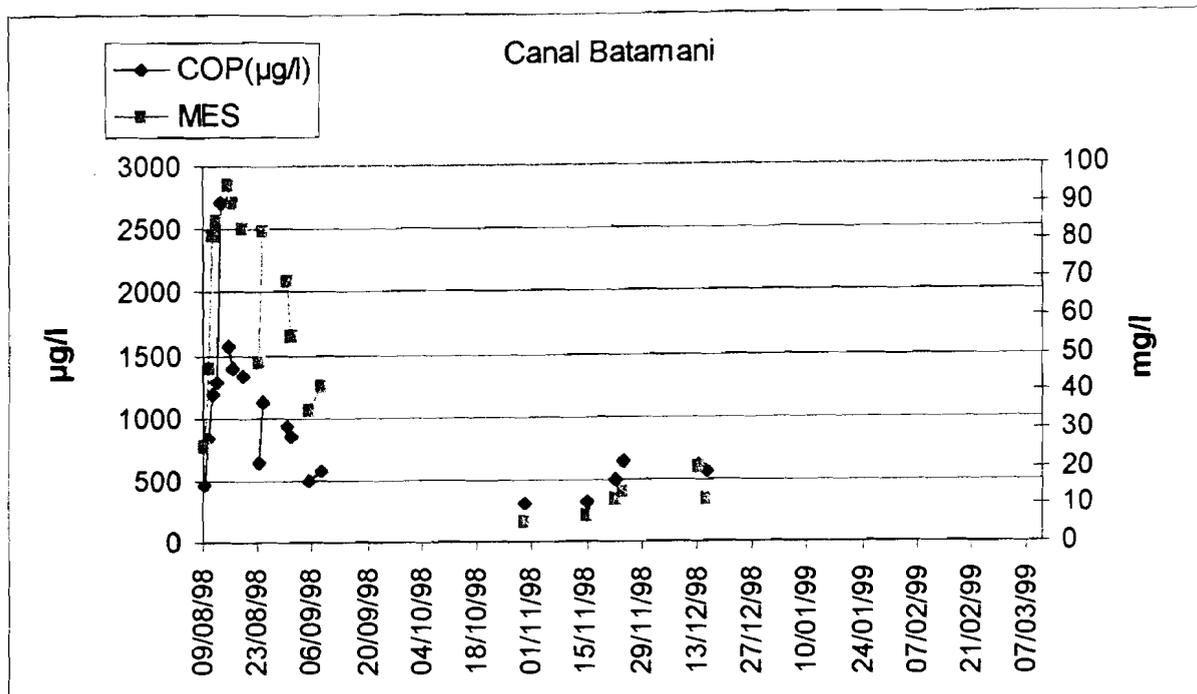


Figure 42 : Evolution des concentrations du CO dans le canal

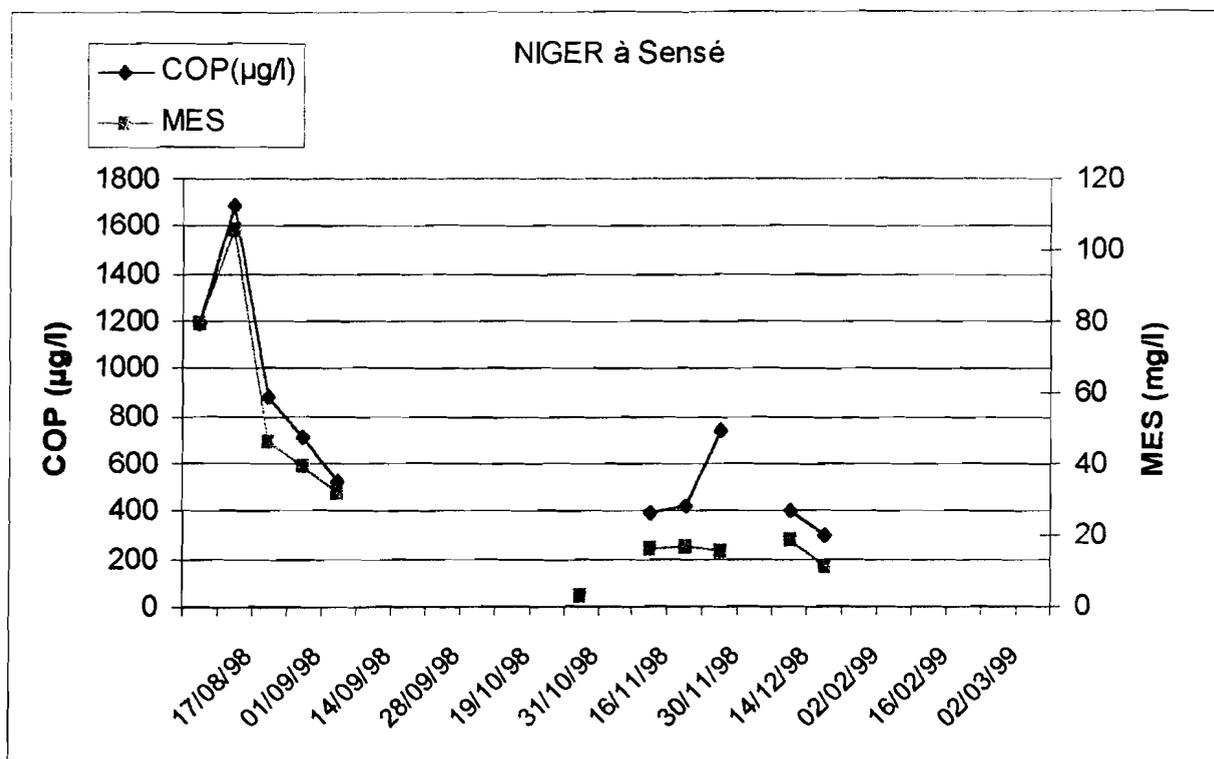


Figure 43 : Evolution des concentrations du CO dans le Niger

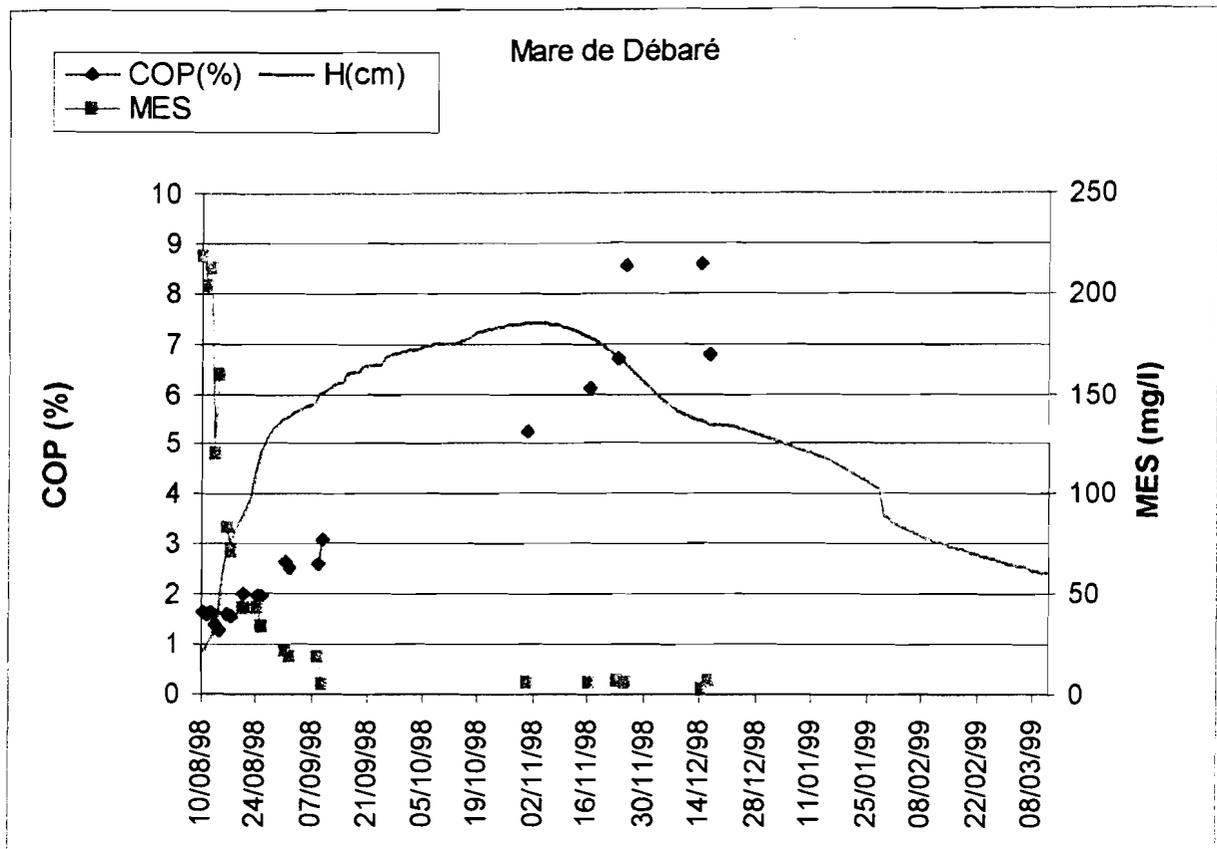


Figure 44 : Evolution du COP dans la mare libre

#### **6.4. Les cycles et les contraintes en zone humide tropicale: compartiments et paramètres**

Comme nous l'avons déjà mentionné la zone d'étude se situe dans un climat sahélien avec l'alternance d'une saison sèche (7 à 6 mois) qui dure plus longtemps que la saison pluvieuse (3 à 4 mois). Le climat constituera donc par la pluviométrie le principal paramètre qui agira directement sur le cycle hydrologique annuel (crue précoce ou rapide) et biologique de la mare auquel on pourra ajouter l'action anthropique.

##### **6.4.1. Les paramètres**

*Précipitations et hydrologie:* En hydrologie milieu sera contraint par le fonctionnement même de la mare qui se comportera différents par rapport aux 6 périodes hydrologiques: montées des eaux, hautes eaux, décrue 1 et 2, basses eaux 1 et 2. Des études physico-chimiques ont par conséquent montré que cette mare est une zone polymictique dont les eaux de surface se mélangent à quotidiennement à celle du fond, ce qui entraîne la montée des éléments nutritifs et l'oxygénation des couches profondes, créant un milieu propice à la vie aérobie. Pendant l'hivernage le potentiel productif de la mare est important ; cependant lors des hautes eaux , elle devient pauvre en nutriments, en oxygène et en matière organique (biomasse algale qui peut être assimilée au carbone organique). En basses eaux la production est alors interrompue à cause de l'assèchement total de la mare.

*Action anthropique:* une autre contrainte est l'action de l'homme sur le milieu notamment l'aménagement de la mare par les 3 systèmes de production (voir chapitre IV). Les agriculteurs peuvent agir sur le cycle des éléments par apport d'engrais chimique phosphaté ou azoté, et d'engrais organique produit par le bétail lors des transhumances (élevage). L'utilisation des pesticides se trouve être aussi nocive pour l'écosystème. Tout cela perturbe le cycle biogéochimique des éléments (détaillés au chapitre V)

##### **6.4.2. Les compartiments :**

Les eaux qui restent pendant quelques temps dans la mare permettent aux matières en suspension de se déposer et de s'accumuler au fond ; les apports aux rivières en matière organique (MO) se font donc par deux façons :

*la voie synthétique* : qui est une synthèse des matières organiques par les végétaux chlorophylliens ou photosynthèse. Les cellules végétales utilisent à cet effet des pigments photorécepteurs (chlorophylle ou carotènes) pour capter les photons. Chaque pigment a un spectre d'absorption spécifique à l'égard de certaine longueur d'onde. Les glucides ainsi fournis par la photosynthèse sont utilisés pour édifier une biomasse nouvelle qui mobilise une vingtaine d'autres éléments minéraux.

*Les vecteurs hydrologiques éoliens* : les épisodes hydrologiques jouent un rôle déterminant dans l'évolution des processus de transport de matériaux. C'est ainsi qu'en période pluvieuse, les eaux de ruissellement participe à l'érosion du bassin par action mécanique, emmènent des matières en suspension dans la rivière.

Les interactions entre la masse d'eau et les sédiments sont des déterminants importants du budget chimique d'une cuvette. les sédiments constituent des sources ou des réservoirs pour des solutés et particules minérales et organiques .Cependant dans notre zone d'étude trois compartiments sont à l'origine de la matière organique (MO) : les matières organique allochtones , les matières organiques autochtones et les matières organiques anthropique.

Les MO sont stockées dans aussi 3 réservoir avant leur utilisation (dégradation, reminéralisation, des éléments nutritifs) par les organismes autotrophes.

#### **6.4.2. 1. Les matières organiques allochtones (apports)**

D'origine minérale ce sont des matériaux roulés et les matériaux en suspension (MES). Les matériaux roulés sont amenés par roulement sur le fond du lit des affluents, au moment des crues (graviers, sables et sablons). Les matières en suspension d'origine minérales: des argiles, des particules minérales les plus fines avec un diamètre de moins des 0,001mm et qui peuvent rester dans les eaux pendant longtemps avant la sédimentation (turbidité). Ils peuvent aussi provenir par les courants éoliens (poussières), et du ruissellement du bassin de réception (érosion). Les matières en suspension d'apports organiques: pollen et feuilles transporté par le, composants de la végétation terrestre et littorale par le ruissellement.

#### **6.4.2.2. Les matières organiques autochtones (dépôts)**

Matières minérales ( $\text{CaCO}_3$ , soufre, silice par exemple) et des matières organiques (débris, cadavres des animaux et plantes morts, déchets de métabolisme, des matières organiques décomposables lentement), (détritiques = des matières organiques aux différents stades de décomposition). Le mode de dépôt varie non seulement avec la nature des populations qui ont donné naissance à ce produit du métabolisme, mais également avec les caractéristiques du climat et l'état trophique de la mare qui reçoit une grande quantité des substances nutritives comme les Nitrates ou Phosphore donnant une production de biomasse plus grande et par conséquent un dépôt organique plus grand qu'un lac qui est pauvre en substances nutritives avec une faible production autochtone. Il existe également des composants inorganiques des squelettes des animaux : coquilles calcaires des mollusques et des frustules siliceux des diatomées.

#### **6.4.2.3. Les matières organiques des rejets anthropiques**

Elles sont issues de la décomposition des déchets produite par les activités des populations (ordures ménagères, déjections humaines).

## CONCLUSION

Au Mali, les plaines d'inondation constitue un potentiel de richesse pour les populations. C'est ainsi que dans notre zone d'étude le terroir de Batamani avec sa mare la population a adopté 3 systèmes de production (pêche, agriculture et élevage) étroitement liée au régime hydrologique annuel de la mare et aux variations pluviométriques.

Ce mémoire s'est donc intéressé au fonctionnement hydrologique de la mare par découpage de son cycle hydrologique en 6 périodes hydrologique fonctionnelles (Basses eaux 1 et 2 ; Montées des eaux ; Hautes Eaux ; Décrue 1 et 2) expliquant de façon simplifiée le comportement hydrologique de la mare. C'est ainsi que la construction du chenal artificiel a permis l'exploitation judicieuse de la mare, mais elle a eu comme conséquence le remplissage brutal de la mare. Ce qui montre une fois encore l'effet de l'homme sur les zones humides et la nécessité d'un modèle hydrologique qui par simulation pourra prévenir certains désastres.

Les résultats des analyses chimiques montrèrent également que la concentration du carbone et des nutriments varie selon les périodes hydrologiques. A la montée des eaux les concentrations de carbone organique sont très élevées, puis elles se stabilisent, pour enfin diminuer en début novembre.(de 2 mg/l sur la mare et le canal, et 1 mg/l sur le Niger). Il en est de même des nutriments qui sont en teneurs élevés à la montée des eaux et diminuent lors des décrues L'étude réalisée pas encore fait ressortir les actions anthropiques sur les cycles géochimiques naturels du carbone et des nutriments. Ceci fera l'objet d'une étude ultérieure (étude en cours). Celle consacré au fonctionnement de l'hydrosystème montre son hétérogénéité, ce qui fait que toutes les perturbations dans le cycle naturel hydrologique sont répercutées dans la zone entraînant des impacts en ce qui concernent les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Ramade F, **Dictionnaire d'écologie.**
- Philippe Amiotte SUCHET thèse, 1994. **Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les continents. 19**
- Christian Lévêque 1996. **Ecosystème Aquatique. 76-78.**
- B. Dussart. **Limnologie. L'étude des eaux continentales.**
- R ; BARBAULT. **Structure et fonctionnement de la biosphère, 2<sup>em</sup> édition 1993. 35-40**
- J.P BRIQUET, G. MAHE, F. BAMBA. **Bilan hydrologique du Niger depuis le début du siècle Acta Hydrotechnica 15/8(1997), 191-200.**
- M. ROCHE **hydrologie de surface.1963 104, 143-144**
- Tiékkoura Sounkara . **Suivi de la physico-chimie de l'eau et de la biomasse algale du phytoplancton Mémoire de maîtrise, 1998-IRD.**
- Cécile Rousseau. **Le système de production halieutique du terroir de Batamani (Delta Intérieur du Niger) : préconception d'un modèle intégré de fonctionnement, 1998-IRD. 7-10, 26-29.**
- Cauwet G., Gadel F., De Souza Sierra M.M., Donard O. and Ewald M. 1990. **Contribution of the Rh"ne river inputs to the north western Mediterranean Sea. Cont. Shelf Res. 10. 1025-1037.**
- Cauwet, G. 1994. **HTCO method for dissolved organic carbon analysis in seawater: influence of catalyst on blank estimation. Mar. Chem. 47: 55-64.**
- Sharp J.H. 1993. **The dissolved organic carbon controversy: an update. Oceanography 6 : 45-50.**