



UNIVERSITE D'ABIDJAN – COCODY

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
HOUPHOUET BOIGNY (INP – HB )  
YAMOOUSSOUKRO



( UFR – SSMT )

DEPARTEMENT GENIE CHIMIQUE  
ET AGRO – ALIMENTAIRE

**THESE**

Présentée à  
L'UNIVERSITE D'ABIDJAN – COCODY  
Pour obtenir le grade de  
**DOCTEUR 3<sup>ème</sup> cycle**  
Spécialité : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Par

**MAMA DAOUDA**

**EUTROPHISATION DES LACS  
DE YAMOOUSSOUKRO**

Soutenue le 14 Août 1998 devant la commission d'examen :

**Président** : M. N'GUESSAN YAO Thomas : Professeur à l'UFR – SSMT ( Université d'Abidjan – COCODY )

**Membres** : MM. SESS Daniel : Professeur à l'UFR des Sciences Médicales ( Directeur du CIAPOL)

DIAKO Thomas : Maître de conférence à l'UFR – SSMT ( Université d'Abidjan – COCODY )

ADO Gossan : Maître de conférence à l'INP – HB de Yamoussoukro

DESHAYES Henri Maître de conférence à l'INP – HB de Yamoussoukro

***A cœur vaillant, rien n'est impossible...***

A M. ADO Professeur à l'INP-HB Yamoussoukro,

A la mémoire de mon feu père,

A ma mère,

A M et Mme ZATO Ali et famille,

A la famille KOURIE et ISSA,

A ABDUL-HALICK et sa mère,

**A tous les chercheurs qui, au prix de maintes sacrifices contribuent à l'amélioration des conditions de vie des hommes.**



## AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Procédés Industriels de Synthèse et de L'Environnement (LAPISEN) au Département Génie Chimique et Agro-alimentaire de l'Institut National Polytechnique Houphouët Boigny de Yamoussoukro.

Monsieur le Professeur G. ADO Directeur de ce laboratoire, a assuré la Direction de cette thèse, et a suivi au jour le jour l'évolution de ce travail. Je le prie de trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour l'aide et les conseils qu'il n'a cessé de m'apporter tout au long de ces recherches.

Je tiens à remercier Monsieur YAO N'GUESSAN Thomas Professeur à l'Université d'ABIDJAN Cocody de l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury, mais aussi pour les sages conseils qu'il m'a donnés au début de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont à Messieurs les Professeurs SESS Daniel et DJACO de l'Université d'ABIDJAN Cocody qui ont bien voulu examiner ce travail et accepter de participer à ce jury de thèse.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Monsieur H. DESHAYES Maître de conférences au Département Génie Chimique et Agro-alimentaire de l'INP-HB Yamoussoukro qui a suivi régulièrement cette thèse, pour les conseils qu'il m'a donnés et aussi pour le caractère amical et cordial qu'il a su donner à nos relations.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de Monsieur NAHOUNOU BOBOUO Directeur Général de l'INP-HB qui a accepté la tenu de cette thèse et qui a mis à notre disposition les installations de l'institut.

Je remercie également Monsieur GBONGUE Madé Anatole Directeur du Département Génie Chimique et Agro-alimentaire pour son aide et ses conseils.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude à Monsieur B. PARINET Maître de conférence à l'Université de POITIER, précédemment en



service à l'INP-HB qui a suivi le début de cette thèse avec beaucoup de passion et a su créer un groupe de recherche qui nous a aidé dans la suite des travaux.

Je prie Messieurs BASSIGNY, GOUGOU ET SANDE de l'I.N.P – SUD, de trouver ici mes sentiments de profondes reconnaissances pour leurs aides.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Messieurs . BAMBBA, ZATO, S. ADAM, I.DANGOU, KONAN et MENSAH pour les facilités qu'ils m'ont accordées lors de ces recherches.

Je remercie aussi tous les amis du Département Génie Chimique et Agro-alimentaire, pour l'ambiance cordiale qu'ils ont su entretenir tout au long de cette thèse.

Enfin que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de la présente thèse trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

# SOMMAIRE

Titre

Pages

## INTRODUCTION

### PREMIERE PARTIE :

#### YAMOOUSSOUKRO ET SON ENVIRONNEMENT

##### A/ CITE ET CLIMAT

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 1- Situation géographique  | 3 |
| 2- Données climatologiques | 3 |

##### B/ GEOLOGIE ET HYDROLOGIE DE YAMOOUSSOUKRO

|               |   |
|---------------|---|
| 1- Géologie   | 7 |
| 2- Hydrologie | 7 |

##### C/ ACTIVITES RURALES ET URBAINES

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 1- Activités rurales  | 7 |
| 2- Activités urbaines | 7 |

##### D/ DEMOGRAPHIE

|  |   |
|--|---|
| 1- Evolution de la ville                     | 8 |
| 2- Situation épidémiologique de Yamoussoukro | 9 |

##### E/ DONNEES SUR LES LACS ETUDIES

### DEUXIEME PARTIE :

#### APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES

##### A/ MESURES PRELIMINAIRES

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1- Température           | 14 |
| 2- pH                    | 14 |
| 3- Oxygène dissous       | 14 |
| 4- Matière en suspension | 15 |
| 5- Conductibilité        | 15 |

##### B/ MESURE DES NUTRIMENTS

|  |    |
|--|----|
| 1- Dosage des nitrates                         | 17 |
| 2- Azote total : procédé KJELDHAL              | 20 |
| 3- Dosage des orthophosphates; phosphore total | 24 |

##### C/ MESURE DE LA POLLUTION ORGANIQUE

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1- Indice permanganate            | 27 |
| 2- Demande chimique en oxygène    | 29 |
| 3- Demande biochimique en oxygène | 33 |

##### D/ MESURE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1- Dosage de la chlorophylle a | 36 |
| 2- Disque de SECCHI            | 38 |

**TROISIEME PARTIE :**

**ETUDE DU MECANISME D'EUTROPHISATION DES LACS  
DE YAMOUSSOUKRO**

**CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'EUTROPHISATION**

**A/ INTRODUCTION AUX PROBLEMES D'EUTROPHISATION**

|  |    |
|--|----|
| 1- Définition -----                        | 40 |
| 2- Manifestation -----                     | 40 |
| 3- Problèmes liés à l'eutrophisation ----- | 40 |

**B/ QUELQUES MECANISMES DE L'EUTROPHISATION**

|   |    |
|---|----|
| 1- Les principales cause de l'eutrophisation -----  | 41 |
| 2- Quelques mécanismes de l'eutrophisation-----   | 42 |
| 3- Détermination de l'état trophique des plans d'eau -----  | 42 |
| 4-Comparaison de l'eutrophisation des lacs et réservoirs<br>des zones tropicales et tempérées ----- | 45 |

**CHAPITRE 2 : DETERMINATION DE L'ETAT TROPHIQUE DES LACS**

**(Etude statique)**

**A/ RESULTATS DES ANALYSES ET INTERPRETATION**

|   |    |
|---|----|
| 1- Résultats des paramètres physico-chimiques ----- | 47 |
|---|----|

**B/ ETUDE DES PARAMETRES NUTRITIFS**

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1- Azote -----     | 52 |
| 2- Phosphore ----- | 53 |
| 3- Résultats ----- | 56 |

**C/ PARAMETRES INDICATEURS DE LA POLLUTION ORGANIQUE**

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1- Indice permanganate -----     | 67 |
| 2- DBO <sub>5</sub> et DCO ----- | 71 |

**D/ PARAMETRES INDICATEURS DE LA PRODUCTION PRIMAIRE**

|   |    |
|---|----|
| 1- Chlorophylle a et profondeur au disque de SECCHI :-----                              | 74 |
| 2- Etude comparée de l'eutrophisation algale et de l'eutrophisation à macrophytes ----- | 74 |

**CHAPITRE 3 : ETUDE DYNAMIQUE**

**A/ INTRODUCTION**

**B/ RESULTATS ET INTERPRETATION**

|   |    |
|---|----|
| 1- Résultats liés au phosphore -----                      | 81 |
| 2- Résultats liés à l'azote -----                         | 87 |
| 3- Evolution liée à la pollution organique -----          | 89 |
| 4- Evolution des couleurs des feuilles de Jacinthes ----- | 92 |

**QUATRIEME PARTIE :**

**IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SOURCES  
D'EUTROPHISATION**

**A/ INTRODUCTION**

**B/ METHODE EXPERIMENTALE**

**C/ GENERALITES**

|  |     |
|--|-----|
| 1- Origine, définition et qualité des eaux usées ----- | 100 |
| 2- Estimation de la composition organique -----        | 100 |



|   |     |
|---|-----|
| 3- Caractéristique des eaux usées urbaine ----- | 101 |
|---|-----|

**D/ RESULTATS DES ANALYSES DES EAUX USEES DES EGOUTS DU LAC V**

|   |     |
|---|-----|
| 1- Présentation des coins de prélèvement -----            | 102 |
| 2- Paramètres physico-chimiques -----                     | 103 |
| 3- Paramètres nutritifs -----                             | 109 |
| 4- Paramètres indicateurs de la pollution organique ----- | 116 |
| 5- Analyse des excréments des caïmans -----               | 119 |
| 6- Analyse de quelques lessives -----                     | 122 |

**CINQUIEME PARTIE :**

**METHODOLOGIE DE LUTTE CONTRE L'EUTROPHISATION DES LACS DE YAMOOUSSOUKRO**

**CHAPITRE 1 : ETUDE DES SYSTEMES ACTUELS D'EPURATION DES EAUX RESIDUAIRES**

**A/ ETUDE THEORIQUE DES METHODES DE TRAITEMENT DES EAUX USEES**

|   |     |
|---|-----|
| 1- Nécessité de traitement des eaux -----                                     | 127 |
| 2- Procédés de traitement des eaux -----                                      | 127 |
| 3- Précisions théoriques sur quelques procédés de traitement biologique ----- | 129 |

**B/ ETAT DES OUVRAGES DES STATIONS D'EOPURATION DES EAUX RESIDUAIRES YAMOOUSSOUKRO EN MARS 1996**

|  |     |
|--|-----|
| 1- Station d'épuration à l'abandon ou en panne -----                           | 131 |
| 2- Station d'épuration en fonctionnement en 1996 : station de l'ex-ENSTP ----- | 131 |
| 3- Conséquences sur l'eutrophisation des lacs -----                            | 131 |

**CHAPITRE 2 : TYPOLOGIE D'EPURATION ENVISAGEE**

**A/ ETUDE DE LA POLLUTION ORGANIQUE**

|  |     |
|--|-----|
| 1- Etude de la réaction dans un flacon de DBO des eaux de Yamoussoukro ----- | 135 |
|--|-----|

**B/ ANALYSE DFES RESULTATS DE LA DBO ET DE LA DCO**

**C/ EFFET EPURANT DES JACINTHES D'EAU**

|  |     |
|--|-----|
| 1- Conditions expérimentales -----                             | 147 |
| 2- Résultats des essais -----                                  | 147 |
| 3- Interprétation des essais de laboratoire en aquarium -----  | 148 |
| 4- Résultats de la deuxième série des essais en aquarium ----- | 154 |

**D/ DESCRIPTION DU PLAN DE TRAITEMENT DES EAUX**

|  |     |
|--|-----|
| 1- Considération d'ordre théorique -----                             | 163 |
| 2- Description du plan de traitement des eaux usées au charbon ----- | 166 |
| 3- Proposition de solutions à long terme -----                       | 171 |

**CONCLUSION GENERALE**

## *Introduction.*

On rencontre souvent dans les agglomérations des plans d'eau envahis par des plantes aquatiques de toutes sortes. Les cours d'eau même en zone rurale offrent les mêmes observations. Cet état de fait, lié à un apport d'éléments fertilisants au plan d'eau, est connu sous le terme technique d'eutrophisation. Ce terme traduit l'état de fertilité du plan d'eau.

Le système lacustre de Yamoussoukro n'échappe pas à ce phénomène. Dans ce cas précis, le phénomène connaît une ampleur telle qu'il n'est plus naturel, mais la réponse d'un déséquilibre de l'écosystème.

Il s'agit donc d'un cas particulier de pollution des eaux qui ne peut être séparé des problèmes de pollution globale du milieu. De ce fait, l'eutrophisation ne pose pas que des problèmes d'ordre esthétique, mais aussi des problèmes sanitaires.

Ce travail vise à la compréhension du phénomène environnemental ainsi posé dans ses différents aspects afin d'aboutir à des propositions de solutions.

Nous avons, dans une première phase abordé l'étude du phénomène à travers des généralités tirées de la bibliographie après avoir présenté le milieu d'étude. Une étude en statique et en dynamique des apports d'éléments fertilisants dans le lac, s'est avérée opportune. Ces études ont donné l'occasion d'une comparaison entre les différentes formes d'eutrophisation ( eutrophisation algale et eutrophisation à macrophyte ).

Dans une seconde phase, on a identifié et caractérisé les sources potentielles d'eutrophisation des lacs à Yamoussoukro. L'Homme, à travers ses activités quotidiennes, apparaît comme le premier responsable en amont de ce phénomène.

Enfin, nous avons, à travers l'état actuel de l'assainissement et des méthodes de traitement des eaux à Yamoussoukro, recherché et proposé une solution pratique à court terme tout en faisant une projection sur le long terme.

Première partie :

**YAMOUSOUKRO ET SON ENVIRONNEMENT**



# YAMOOUSSOUKRO ET SON ENVIRONNEMENT

## A)- CITE ET CLIMAT

### 1- Situation géographique

Yamoussoukro, capitale politique de la République de Côte d'Ivoire est située à 240 km d'Abidjan sur l'axe international Abidjan - Ouagadougou-Bamako - Niger.

Son relief est peu accidenté. On observe des bas-fonds çà et là. Il n'y a pas de cours d'eau de grande importance, mais seulement des ruisseaux reliés aux bas-fonds et communiquant parfois avec des lacs artificiels destinés à l'irrigation ou à l'agrément de la ville.

### 2- Données climatologiques.

Le climat à Yamoussoukro est influencé par la position du Front Intertropical (FIT); ainsi les migrations du FIT sont:

- Décembre à Février stagnation au sud du littoral ivoirien.
- Mars à Juin: remontée lente et traversée de la Côte d'Ivoire du Sud au Nord.
- Juillet à Septembre: stagnation sur le pays du Sahel.
- Octobre à Novembre: retrait rapide de la Côte d'Ivoire du nord au sud.

#### a) Pluviométrie

La ville de Yamoussoukro est située au sud du « V Baoulé » qui correspond à la zone de savane. Le climat est caractérisé par:

- une grande saison sèche de novembre à mi-mars
- une grande saison des pluies de mi-mars à mi-juillet
- une intersaison pluvieuse de mi-juillet à mi-août
- et la petite saison de pluie de mi-août à fin octobre.

**Tableau 1**

Caractéristiques des précipitations de la ville de Yamoussoukro  
(sur une période de 10 ans.)

| Hauteur moyenne annuelle | Hauteur minimale | Hauteur maximale |
|--------------------------|------------------|------------------|
| 1100 mm                  | 856,5 mm         | 1438,9 mm        |

Sur cette période d'observation, on note une grande irrégularité mensuelle avec moins de disproportion pour les mois de Mai et Juin, où la pluviométrie est toujours abondante.

Moyenne de 1985 à 1995:  
Mai: 157,8 mm. Juin: 164,0 mm.

### **b) Hauteurs des pluies ou des averses.**

Elle est obtenue par la relation suivante:  $H = I.t$  où:

- I : intensité moyenne des averses;
- H: hauteur de pluie;
- t: durée ou période.

Les hauteurs maximales connues pour les pluies de courte durée sont les suivantes:

- hauteur d'eau de 108 mm pour une durée de 30 minutes
- hauteur d'eau de 73,3 mm avec une durée de 30 minutes
- hauteur d'eau de 64 mm avec une durée de 60 minutes

La chronique des différents éléments pluvieux pour des durées supérieures donne des maxima dégressifs de 47,3 mm à 20 mm pour une pluie de 4 heures.

### **c) Température et humidité.**

#### **- Température.**

Les variations thermiques ne dépassent guère 7°C. Entre 1985 et 1995 les températures minimale et maximale enregistrées en moyenne sont respectivement, 19,5°C et 29,5°C. La température moyenne annuelle pour une période de 10 ans (de 1985 à 1995) est de 25,6°C (1).

#### **- Humidité.**

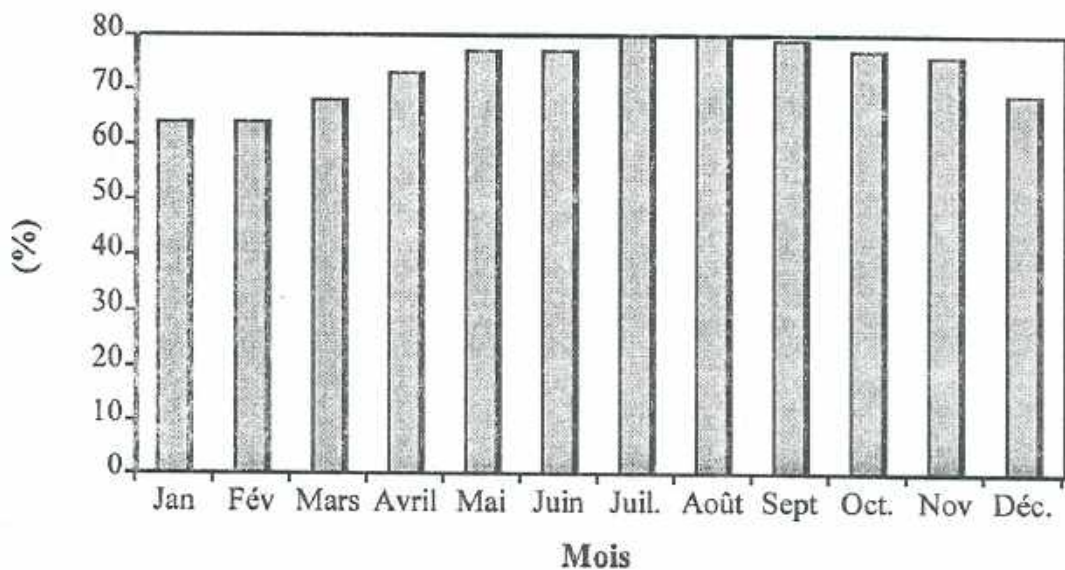
L'humidité de l'air enregistrée de 1985 à 1995 permet d'obtenir des moyennes annuelles consignées dans le tableau.2 et représenté par la fig.1. page 6 décrit en fonction des saisons des pluies avec un pourcentage maximum durant la petite saison des pluies. Dès novembre ce pourcentage diminue pour atteindre un minimum en saison sèche entre janvier et février.

Le début de la saison des pluies aux environs de mi-mars entraîne une augmentation moyenne du degré d'humidité qui se culmine en août pour décroître progressivement jusqu'à son minimum en janvier.



**Tableau 2**  
Degrés hygrométriques en pourcentage<sup>(1)</sup>

| Années | Jan | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sep | Oct | Nov | Déc | Ann. |
|--------|-----|-----|------|-------|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| 1985   | 66  | 63  | 69   | 75    | 79  | 61   | 82    | 84   | 83  | 80  | 79  | 65  | 74   |
| 1986   | 62  | 70  | 73   | 75    | 77  | 74   | 74    | 79   | 81  | 78  | 72  | 61  | 73   |
| 1987   | 66  | 66  | 63   | 71    | 75  | 80   | 79    | 81   | 80  | 77  | 76  | 69  | 74   |
| 1988   | 57  | 61  | 70   | 73    | 78  | 80   | 81    | 82   | 79  | 77  | 77  | 65  | 73   |
| 1989   | 57  | 59  | 66   | 72    | 74  | 80   | 80    | 81   | 82  | 79  | 75  | 71  | 73   |
| 1990   | 64  | 61  | 61   | 70    | 76  | 77   | 79    | 78   | 77  | 76  | 76  | 74  | 72   |
| 1991   | 66  | 66  | 71   | 75    | 77  | 77   | 79    | 80   | 78  | 76  | 75  | 70  | 74   |
| 1992   | 56  | 65  | 67   | 74    | 76  | 78   | 80    | 75   | 75  | 75  | 73  | 72  | 72   |
| 1993   | 60  | 64  | 71   | 75    | 78  | 79   | 81    | 79   | 77  | 77  | 77  | 70  | 74   |
| 1994   | 62  | 66  | 68   | 72    | 75  | 80   | 83    | 81   | 80  | 77  | 78  | 64  | 74   |
| 1995.  | 59  | 61  | 72   | 75    | 78  | 79   | 81    | 77   | 79  | 78  | 76  | 73  | 74   |
| moy.   | 64  | 64  | 68   | 73    | 77  | 77   | 80    | 80   | 79  | 77  | 76  | 69  | 73   |



**Fig.1 :** Degré hygrométrique mensuel en pourcentage <sup>(1)</sup>.

#### d) Insolation

Pendant 10 ans la moyenne annuelle d'heure de soleil est de 1942 heures, avec un minimum en Août ( soit le début de la petite saison des pluies ) et un maximum en mai (début de la grande saison des pluies ). Durant le mois de mai<sup>(1)</sup> la hauteur mensuelle des précipitations était l'une des plus grandes. On peut donc penser que cette hauteur de pluie avec un maximum d'ensoleillement est la conséquence d'averses de courte durée mais de forte intensité suivie généralement d'un « ciel totalement dégagé ».



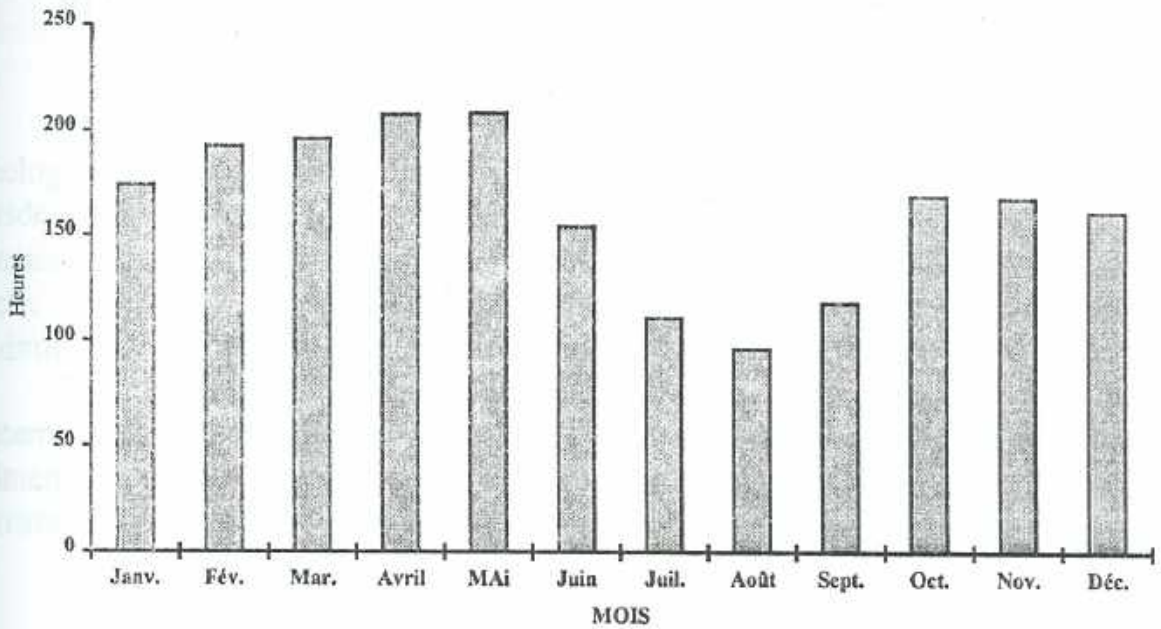


Fig. 2 : Insolation mensuelles en heure à Yamoussoukro<sup>(1)</sup>

e) Direction et vitesse des vents.

Tableau 3

Vitesses moyennes mensuelles et les directions prépondérantes à Yamoussoukro<sup>(1)</sup>.

| Mois          | J.       | F.       | M.       | A.       | Mai      | J.       | Juil.    | Août     | S.       | O.       | N.       | D..          |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| vitesse(km/h) | 4,1      | 8,8      | 5,2      | 5,2      | 6,0      | 3,6      | 5,4      | 6,3      | 4,6      | 4,0      | 7,7      | 3,6          |
| direction     | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | N<br>S-O | S-O à<br>N-E |

paraît comme la direction principale du vent à Yamoussoukro. Les plus grandes vitesses sont 8,8km/h en février (au début des saisons de pluies) et 7,7 km/h en novembre (au début de l'harmattan).

La direction Nord Sud-ouest apparaît comme la direction principale du vent à Yamoussoukro. Les plus grandes vitesses sont 8,8km/h en février (au début des saisons de pluies) et 7,7 km/h en novembre (au début de l'harmattan).

## B) GEOLOGIE, ET HYDROLOGIE DE YAMOOUSSOUKRO

### 1-Géologie

Yamoussoukro appartient à la zone « Baoulé -Mossi » dont les formations géologiques ont un âge moyen de 2 millions d'années. La ville est située sur une « ride » de granitoïdes, précisément celle allant de Sassandra au sud jusqu'à Nansian au nord pour se prolonger au Burkina Faso en passant par Bouaké. Cette « ride » de granitoïdes est limitée à l'ouest par le sillon volcanosédimentaire de Yaouré et à l'est par celui de Toumodi-Fétékro (1).

Par ailleurs, la ville fortement urbanisée n'a pas fait l'objet de détermination de coefficient de ruissellement, mais la plupart des projets récents admettent qu'au regard de l'urbanisation poussée, et aux travaux de terrassement, la quasi-totalité des eaux pluviales sont entraînées dans les lacs.

### 2 - Hydrographie

Ici les bas-fonds constituent des cuvettes de réception des eaux de pluie, drainées en amont par des pont. Aussi assiste-t-on à un comblement à faible vitesse de ces bas-fonds par des détritiques du drainage pluvial. Dans la ville, il existe des ruisseaux qui communiquent avec des lacs de la ville. Yamoussoukro n'a pas de grands cours d'eau; par contre il faut citer le fleuve Bandama qui se trouve à 25 km de Yamoussoukro (source d'approvisionnement de l'eau de la SODECI).

## C) ACTIVITES RURALES ET URBAINES

### 1-Activités rurales

Ce sont des activités purement agricoles les cultures vivrières (igname, maïs, riz pluvial, bananiers, caféiers, cacaoyers et de quelques parcelles cotonnières). Les cultures vivrières sont pratiquées en rotation avec jachère, qui assure le retour de fertilité, avec souvent utilisation d'engrais et d'herbicide, pour les cultures d'exportation.

La savanisation affecte aujourd'hui une bonne partie de la zone de Yamoussoukro. La conquête des îlots forestiers et la pratique des feux de brousse favorisent l'extension des graminées. Cette pratique n'est pas sans effets sur l'eutrophisation en début de la saison de pluie (22) (cf.: évolution dans le temps des apports de nutriments).

### 2-Activités urbaines

Sur le plan agricole, la ville se retrouve avec un système périurbain de maraîchage aux abords des lacs. Certains bas-fonds sont exploités pour la riziculture. Ces activités fournissent à la ville de Yamoussoukro la majeure partie des crudités. Sur le plan économique si elles montrent la possibilité de bonnes performances dues surtout à la fertilisation d'eau par contre sur le plan sanitaire,



ce phénomène est tout de même un danger. Il est à remarquer que dans le cas particulier de Yamoussoukro, les activités rurales et urbaines se côtoient et les réflexes sur le plan de l'assainissement, sont plus teintés des habitudes des zones rurales.

En outre, du fait que la ville constitue un centre de transit pour les voyageurs, il apparaît une floraison de « maquis » et de restaurants de divers standing qui utilisent l'eau des lacs pour se débarrasser de tout ce qui les gêne (eaux usées, débris d'aliments, déchets de tous genres.).

## D) DEMOGRAPHIE

### 1-Evolution de la ville

Selon le rapport des travaux de M<sup>Bassigny</sup> (1) en rapport avec le plan directeur de l'assainissement de la ville, Yamoussoukro en 1952 était un petit village et n'a connu son essor qu'à partir de 1970.

A partir de 1975 la ville est structurée et de grands équipements s'implantent; en 1989, la population atteint 110.000 habitants soit un taux de croissance de 9,1%/an entre 1975 et 1988. Actuellement la population agglomérée de Yamoussoukro est estimée à environ 177.000 habitants en 1995 et à 190.000 habitants en 1996 avec un taux de croissance annuel de 7,1% de 1988 à 1996 (1).

Il est important de remarquer que si Yamoussoukro venait à jouer pleinement son rôle de capitale administrative ( avec implantation de ministères et services administratifs ) il faudrait s'attendre à un « boum » démographique.

La répartition de la population de Yamoussoukro pour les quartiers versants des lacs victimes de l'eutrophisation en 1996 est donnée par le tableau ci-dessous.

**Tableau 4**

Répartition estimative en 1996 de la population dans les grands quartiers versants des lacs victimes de l'eutrophisation<sup>(1\*)</sup>

| Quartier               | Population estimative | Superficie | Densité Habitants/ha |
|------------------------|-----------------------|------------|----------------------|
| Dioulakro              | 63106                 | 529        | 119                  |
| Nzuessy<br>(220 logts) | 44625                 | 507        | 88                   |
| N'GOKRO<br>(Assabou)   | 17056                 | 153        | 111                  |
| Habitat                | 16431                 | 119        | 133                  |
| EECI<br>(Energie)      | 2445                  |            |                      |
| Résidence<br>Houphouet | 1114                  | 304        | 4                    |



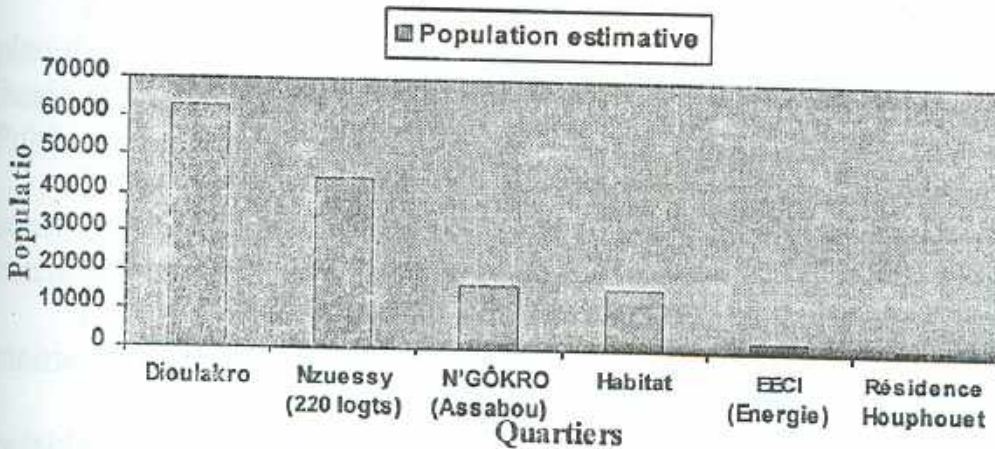


Fig. 3 : Répartition de la population estimative des quartiers de Yamoussoukro<sup>(1\*)</sup>

La répartition estimative en 1996 de la population dans les grands quartiers versants des lacs victimes de l'eutrophisation, faite à partir de la population électorale de 1995 et de la population projetée de 1995 faite plus haut est donnée par la Fig.3. La population électorale est estimée à 17% de la population globale.

En considérant le rôle de transit de la gare d'Abidjan et le flux humain du grand marché de l'habitat et de l'hôpital, on se rend compte de la difficulté de la quantification des charges polluantes. Le raisonnement fait avec les données ci-dessus nous permettra tout de même une bonne formulation.

## 2-Situation épidémiologique de Yamoussoukro liée à l'hygiène et aux problèmes environnementaux.

Selon une étude épidémiologique menée par l'institut d'hygiène de Yamoussoukro<sup>(1)</sup>, la situation de l'insalubrité dans certains quartiers entraîne la prolifération d'une multitude de vecteurs propagateurs des maladies ; en l'occurrence les mouches, les moustiques, les rongeurs de tous genres.

Les talwegs, fils d'eau, caniveaux et lacs pollués par les effluents domestiques traversent l'ensemble de l'agglomération. Ces points d'eau sont les exutoires des eaux usées, de matières de vidange, de déchets de toutes sortes, voire des matières fécales. D'où la présence de plusieurs maladies d'origine hydrique d'une part et des maladies dues au biotope aquatique d'autre part.

## E- DONNEES SUR LES LACS ETUDIES

Les lacs étudiés communiquent en partie entre eux comme l'indique le plan des lacs qui va suivre. A l'origine existaient à ces emplacements des bas-fonds alimentés par des ruisseaux. Les lacs ont été construits par les Travaux Publics; sauf ceux voisins du palais de la Présidence.

Selon les informations que nous avons pu recueillir, lors de la construction, les bas-fonds ont été curés, les digues et déversoirs ont été construits sans système de vidange car cela apparassait inutile à l'époque.

La numérotation des lacs que nous avons adoptée est celle donnée par la mairie de Yamoussoukro.

Le lac I d'une superficie d'environ 9 ha, se situe en amont des lacs de la présidence et ne présente pas de couvert végétal. Un seul point de prélèvement (n°1) a été choisi au niveau de son déversoir aval.

Les lacs II (6ha environ); III (3 ha environ) et le lac IV (7 ha environ) sont constitués d'une enceinte bétonnée comportant des caïmans. Leurs eaux sont respectivement représentées par les points de prélèvement 2, 3, et 4, 5 en amont et en aval pour les lacs II et III.

Le lac IV (bétonné également) est le plus grand de la résidence présidentielle. Il comporte le point 6 en amont et le point 7 en aval. Son eau présentait une forte coloration verte au début de l'étude en février.

Le lac V, le plus grand, (superficie 30 ha environ) est ceinturé sur 1,6km par le quartier « Energie » et le quartier « Dioulakro » sur 800 m environ. Il a une forme de fer à cheval et comporte beaucoup de variétés de plantes. La jacinthe d'eau occupaient une place de choix (80% environ de la surface couverte jusqu'en juin où les plantes ont commencé à être arrachées). Les points 8, 9, 10, 11, 12, et 13 pour les eaux propres du lac, les points 18, 19, 20, 21, 22 et 23 pour les eaux usées ont été étudiés.





**Fig.4 :** Vue du lac VI au pied de la basilique Notre dame de la paix de Yamoussoukro entièrement couvert de jacinthes d'eau <sup>(2\*)</sup>

Le lac VI ( 6 ha environ ), en partie recouvert de jacinthes d'eau ( 2/3 environ voir Fig.4 ) comporte le point 14 en amont et 15 en aval.

Le lac VII, de superficie voisine de 5 ha, n'existait que de nom jusqu'en juillet 1997 où il a été curé. Pendant presque toute la durée de l'étude il était un véritable marécage. Il comporte le point N°16 à son déversoir.

Le lac VIII est en amont du lac V et a une superficie d'environ 5 ha. Il est couvert partiellement de lotus en amont ; on note cependant la présence de nénuphars et de jacinthes naines par endroit. Il y a été analysé aux points 17 (aval) et 18 (amont).

Le lac IX d'environ 6 ha est bordé des quartiers « Assabou » et « N°Zuessy ». Il est couvert de nénuphars et de quelques jacinthes naines. Le point 19 est le seul point de prélèvement qui y est effectué à son déversoir.

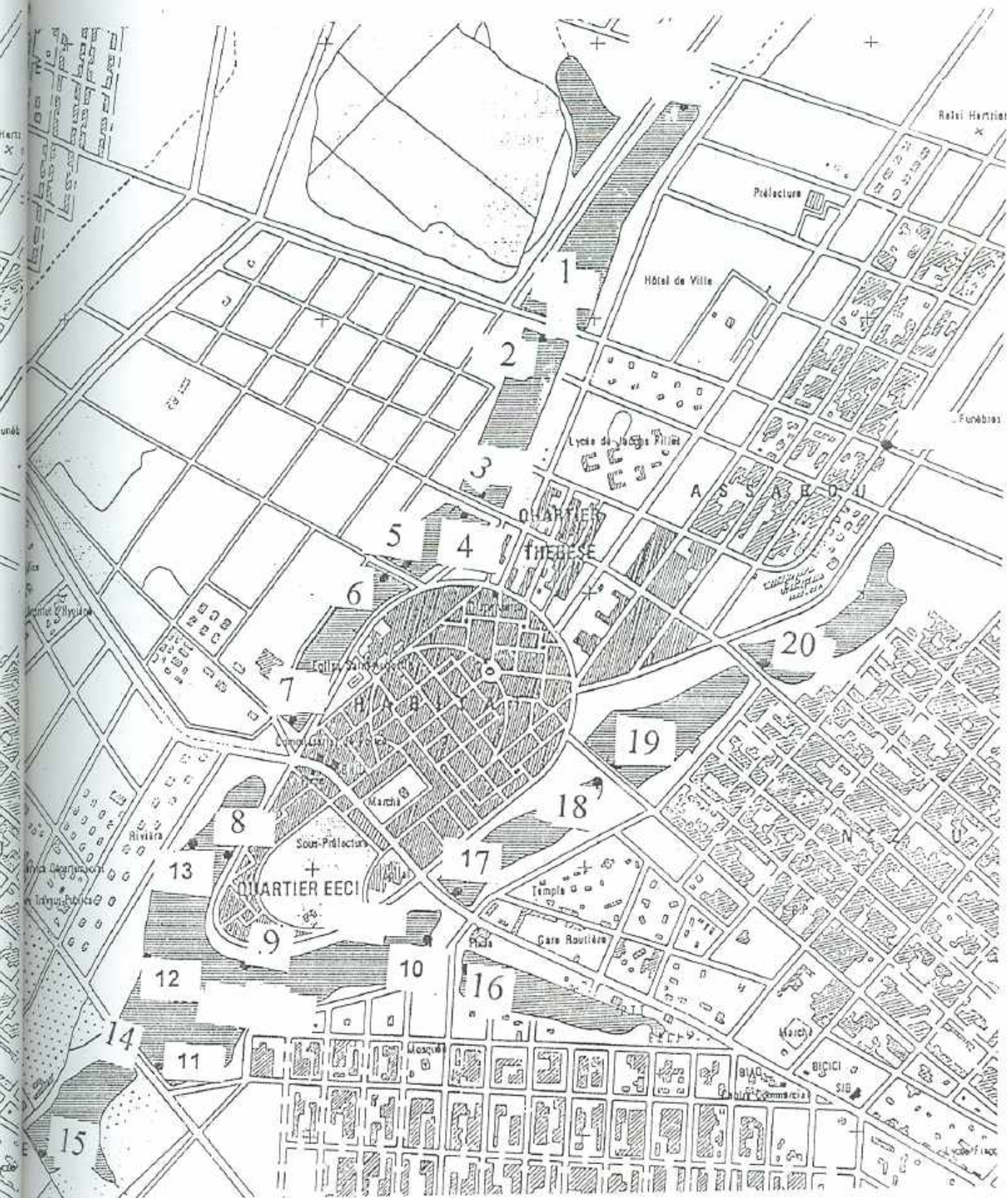
Le lac X est en amont du lac IX et présente une surface d'environ 6 ha. Il est bordé par les quartiers « Assabou » et « 220 logement ». On y trouve les mêmes types de végétaux que dans le lac IX ( voir fig.5 ). Il est entièrement couvert et comporte le point 20 à son déversoir.







# Plan de prélèvement des échantillons d'eau de surface





**Fig.5 :** Vue du lac IX partiellement recouvert de lotus<sup>(2\*)</sup>

A partir de Septembre 1995, les jacinthes et les lotus ont été enlevés sur les lacs excepté les lacs VI et X ; le lac VII restant toujours dans le même état marécageux. Les plans de numérotation des lacs et des points de prélèvement qui suivent illustrent la description ci – dessus



Deuxième partie

APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES.

## APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES

### A) MESURE PRELIMINAIRES : pH, CONDUCTIVITE, OXYGENE DISSOUS, MATIERES EN SUSPENSION ( MES).

Les échantillons ont été prélevés à l'aide des perches dans des boîtes en polyester à une profondeur de 0,5 m puis transportés dans une glacière.

La température, le pH, la conductivité et l'oxygène dissous sont mesurés sur place. Les autres paramètres sont mesurés au laboratoire sitôt après les prélèvements. Dans certains cas les échantillons sont conservés dans une chambre froide à une température de l'ordre de 4°C, le temps de conservation n'excédant pas 24 heures.

#### 1 – Température

La mesure a été faite au cours des prélèvements, soit avec un thermomètre à mercure, soit à l'aide de l'oxymètre. Dans les deux cas, la précision de la mesure était de 1/10°C selon la norme AFNOR NF T90 – 100<sup>(24)</sup>.

#### 2 – pH

##### a) Appareillage



#### 4- Matière En Suspension ( M.E.S).

On filtre généralement 200ml d'échantillon (100 ml lorsque la charge en M.E.S est importante, dans un système de filtration de type « nalgène » sous vide avec un filtre « GF6 » ( 0,47 $\mu$ m) préalablement mis à l'étuve à 105°C une heure avant le prélèvement, en respectant la norme AFNOR NF 90-105.

#### 5- Conductivité.

##### a)- Objet et domaine d'application.

La présente méthode reprend celle décrite par la norme NF T 90-0310 de décembre 1977 et a pour but la détermination de la résistivité (ou de son inverse, la conductivité) électrique des eaux naturelles de résistivité inférieure ou égale à 50000 ohms - centimètres

##### b)- Principe.

Le principe est basé sur la mesure de la résistance ou de la conductance électrique d'une colonne d'eau délimitée par deux électrodes de platine (ou recouvertes de noir de platine) maintenues parallèles.

Si R est la résistance de la colonne d'eau en ohms, S sa section en mètres carrés et l sa longueur en m, la résistivité électrique en ohms - mètres est:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

La conductivité électrique est:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \frac{l}{S}$$

$\frac{l}{S}$  est appelé conductance de l'élément de mesure et est le plus souvent exprimé "par centimètre" (cm<sup>-1</sup>).

La résistivité ou la conductance varie avec la température. La température de référence pour l'expression de la résistivité ou de la conductivité est de 20°C. Pour les eaux naturelles dont la conductivité est supérieure à 20 $\mu$ S/cm, ( $\rho < 50000\Omega.cm$ ) la conductivité  $\gamma_1$  à la température  $T_1$  est liée à la conductivité  $\gamma_2$  à la température  $T_2$  par une relation linéaire.

$$\gamma_1 = \gamma_2 [1 + \alpha(T_1 - T_2)]$$

$\alpha$  est un coefficient qui dépend de la nature et de la concentration des éléments contenus dans l'eau.

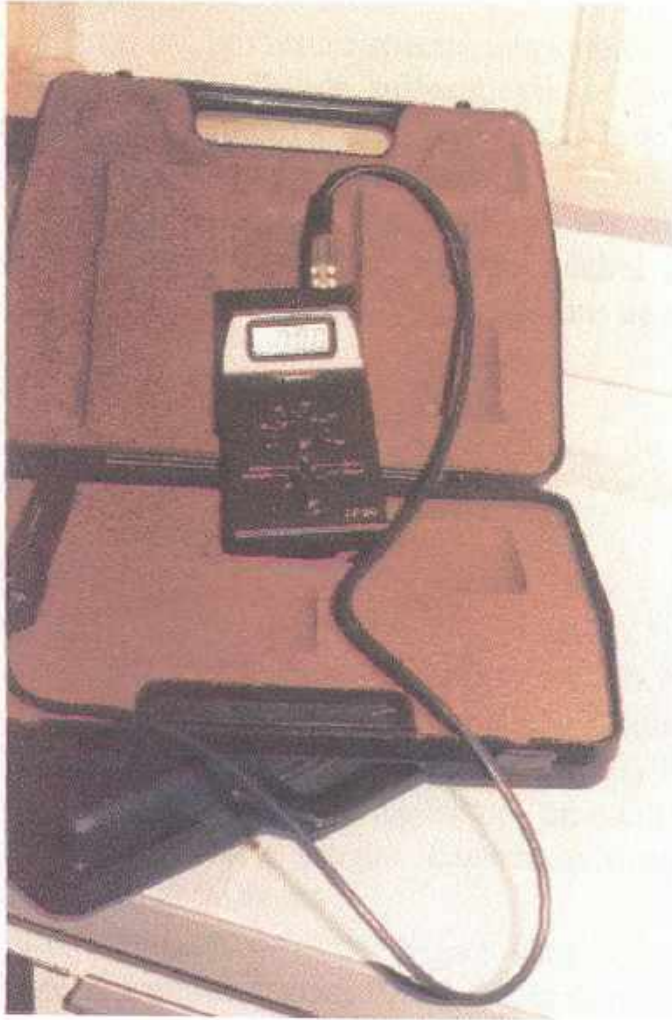
##### c)- Réactifs.

- eau déminéralisée (conductivité inférieure ou égale à 1 $\mu$ S/cm à 20°C)
- solutions étalons de chlorure de potassium.

En utilisant du chlorure de potassium pur pour analyse préalablement séché jusqu'à masse constante à la température de 105°, on prépare 3 solutions étalons 0,1mol/l, 0,01mol/l, 0,001mol/l. de conductivités respectives 11680, 1277 et 137  $\mu$ S/cm;(référence).

#### d) Appareillage

L'appareil utilisé est un conductimètre portatif WTW LF 90 équipé d'un dispositif de compensation de température, à action automatique et d'un programme qui par impression numérique permet d'obtenir la valeur de la conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou  $\text{S}/\text{cm}$  selon le calibre choisi. L'utilisation pratique de l'appareil étant indiqué par le constructeur ( voir Fig.7 ).



**Fig.7** : Une vue du conductimètre portatif à affichage numérique utilisé lors des analyses <sup>(2\*)</sup>



## B) MESURE DES NUTRIMENTS ( AZOTE, PHOSPHORE).

### 1-Dosage des nitrates par la méthode spectrométrique avec l'acide sulfosalicylique.

#### a) - Objet

(F). La présente méthode reprend la norme internationale ISO 7890-3 : 1988

#### b) - Principe.

Le principe est basé sur la mesure spectrométrique du composé jaune issu de la réaction des nitrates avec l'acide sulfosalicylique (formé par addition à l'échantillon de salicylate de sodium et de l'acide sulfurique) après traitement à l'alcali.

En même temps que l'alcali, on ajoute du sel disodique de l'acide éthylènediamine-tétraacétique ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ) pour empêcher la précipitation des sels de calcium et de magnésium. L'adjonction d'azoture de sodium vise enfin à neutraliser l'interférence des nitrites.

#### c) - Réactifs

Les réactifs sont préparés à partir de produits de qualité analytique reconnue et de l'eau distillée.

- Acide sulfurique,  $\rho = 1,84 \text{ g/ml}$ .

- Acide acétique cristallisable,  $\rho = 1,05 \text{ g/ml}$ .

- Alkali, solution,  $\rho_{\text{NaOH}} = 200 \text{ g/l}$ ,  $\rho_{\text{Na}_2\text{EDTA}} = 50 \text{ g/l}$  obtenu par dissolution avec précaution  $200 \pm 2 \text{ g}$  de pastilles d'hydroxyde de sodium dans environ 800 ml d'eau. Ajouter  $50 \pm 0,5 \text{ g}$  de sel disodique de l'acide éthylènediamine-tétraacétique ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ) dihydraté ( $(\text{CH}_2\text{-N}(\text{CH}_2\text{COOH})\text{CH}_2\text{-COONa})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), laisser refroidir à la température ambiante et compléter à 1 litre avec de l'eau dans une fiole jaugée. Conserver dans une bouteille en polyéthylène. Il est stable indéfiniment.

- Azoture de sodium, solution,  $\rho_{\text{NaN}_3} = 0,5 \text{ g/l}$ .

On dissout avec précaution  $0,05 \pm 0,005 \text{ g}$  d'azoture de sodium dans une fiole jaugée de 100 ml et complétée au volume. La solution est conservée dans une bouteille en verre; il est stable indéfiniment.

- Salicylate de sodium, solution,  $\rho_{\text{HO-C}_6\text{H}_4\text{-COONa}} = 10 \text{ g/l}$ .

On dissout  $1 \pm 0,1 \text{ g}$  de salicylate de sodium dans 100 ml d'eau. Cette solution est préparée au moment de l'emploi.

- Nitrate, solution mère étalon à 1000 mg/l.

On dissout  $7,215 \pm 0,001 \text{ g}$  de nitrate de potassium ( $\text{KNO}_3$ ), (préalablement séché à  $105^\circ\text{C}$  pendant au moins 2 heures) dans une fiole jaugée de 1 litre, avec environ 750 ml d'eau puis on complète au volume avec de l'eau. La solution est conservée dans une bouteille en verre pendant une durée ne dépassant pas 2 mois.

- Nitrate, solution étalon à 100 mg/l.

La solution mère est transvasée à la pipette de 5 ml dans une fiole jaugée de 50 ml et complétée au volume avec de l'eau.

- Nitrate solution étalon d'essai à 1 mg/l.

Dans une fiole jaugée de 500 ml, on ajoute à l'aide d'une pipette 5 ml de la solution étalon de nitrate ; puis on complète au volume avec de l'eau. La solution est préparée au moment de l'emploi.

#### d) Appareillage

- Matériel courant de laboratoire, et
- - Spectromètre à double faisceau ( est la méthode à l'acide sulfosalicylique. La limite de détection est comprise dans la gamme 0,003 à 0,013 mg/l avec des cuves de 40 mm et une prise d'essai de 25 ml maximum ( les cuves qui ont été utilisées sont de 10 mm ). Pour les échantillons très colorés, une correction est prévue.

Les mesures ontb été faites à l'aide d'un spectrophotomètre KONTRON UV. Visible UNIKON 810 ( voir Fig.8) de marque Kontron permettant d'effectuer des mesures à 415nm et équipé de cuves de 50 mm d'épaisseur.



**Fig.8** : Spectrophotomètre KONTRON UV. Visible UNIKON 810<sup>(2\*)</sup>



- Capsules d'évaporation de volume environ 50 ml.
- Bain d'eau bouillante.
- Bain d'eau, thermoréglable, pouvant maintenir une température de  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

#### e) - Echantillons

Après leur prélèvement, les échantillons sont transportés au laboratoire où ils sont aussitôt analysés après être filtrés sur du filtre en fibre de verre.

#### f) - Mode opératoire

- Prise d'essai

Le volume de la prise d'essai est de 20 ml de l'échantillon filtré.

- Essai à blanc

Un essai à blanc est effectué parallèlement au dosage, en utilisant 5 ml d'eau distillée à la place de la prise d'essai. Soit  $A_b$  unités l'absorbance mesurée.

- Etalonnage

Dans une série de capsules d'évaporation propres, on introduit respectivement, 1;2;3;4 et 5 ml de la solution étalon d'essai de nitrate correspondant respectivement à des quantités de nitrate de  $m(\text{N}) = 1;2;3;4$  et 5  $\mu\text{g}$  dans les capsules respectives.

- Développement de la coloration

On ajoute  $0,5 \text{ ml} \pm 0,005 \text{ ml}$  de solution d'azoture de sodium et  $0,2 \text{ ml} \pm 0,002 \text{ ml}$  d'acide acétique cristallisable ; après au moins 5 minutes, on fait évaporer le mélange à sec dans le bain d'eau bouillante puis on ajoute  $1 \text{ ml} \pm 0,01 \text{ ml}$  de solution de salicylate de sodium. Après avoir homogénéisé et fait à nouveau évaporer à sec, on retire la capsule du bain d'eau et on laisse refroidir à la température ambiante. On ajoute  $1 \text{ ml} \pm 0,01 \text{ ml}$  d'acide sulfurique puis on dissout le résidu dans la capsule en agitant légèrement. Le mélange est ensuite laissé au repos pendant environ 10 mn. On ajoute alors 10 ml d'eau, puis 10 ml de la solution d'alcali.

Le mélange est transvasé quantitativement dans une fiole jaugée de 25 ml, sans compléter au volume. La fiole est placée dans le bain d'eau à  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  pendant 10 mn puis on retire en complétant au volume avec de l'eau.

- Mesurages spectrométriques

L'absorbance de la solution est mesurée à 415 nm dans des cuves de 50mm d'épaisseur, par rapport à de l'eau dans la cuve de référence. Soit  $A_s$  unités l'absorbance mesurée.

- Etablissement de la courbe d'étalonnage

L'absorbance de l'essai à blanc est soustraite des absorbances de chaque solution étalon et on trace la courbe d'étalonnage en faisant apparaître l'absorbance en fonction de la masse de nitrate,  $m(N)$ , en microgrammes.

- Dosage

Dans une capsule d'évaporation on introduit la prise d'essai de volume  $V = 20$  ml et on poursuit comme indiqué plus haut.

- Correction tenant compte de l'absorption de la prise d'essai

Pour les échantillons très colorés, on effectue les opérations prévues sur une seconde prise d'essai, en l'absence toutefois de solution de salicylate de sodium. Soit  $A_t$  l'absorbance mesurée.

**g) - Expression des résultats**

L'absorbance due aux nitrates dans la prise d'essai,  $A_r$ , est donnée par la relation

$$A_r = A_s - A_b - A_t$$

La masse de nitrate,  $m(N)$ , exprimée en microgrammes, correspondant à la valeur  $A_r$  de l'absorbance est déterminée à l'aide de la courbe d'étalonnage.

La teneur en nitrate de l'échantillon, exprimée en milligrammes par litre, est donnée par la formule:

$$\frac{m(N)}{V}$$

$V$  est le volume en millilitres, de la prise d'essai.

Cette méthode à l'acide sulfosalicylique a pour limite de détection comprise dans la gamme 0,003 à 0,013mg/l avec des cuves de 40mm et une prise d'essai de 25 ml maximum; il a été utilisé cette fois-ci des cuves de 10 mm.

Les mesures ont été faites à l'aide d'un spectrophotomètre KONTRON UV. visible UVIKON 810 (voir photo N°5)

2- Azote total procédé Kjeldhal

La présente méthode d'analyse reprend la norme française NF T 90-110 de Décembre 1981.(24)

**a) - Objet et domaine d'application.**

La méthode décrit le dosage de l'azote présent dans les eaux par le procédé Kjeldahl. Le procédé ainsi utilisé est celui du dosage par titrimétrie après minéralisation et distillation.

Le procédé de dosage Kjeldahl ne permet pas de doser l'azote total mais seulement les composés non oxydés de l'azote.

Par conséquent, ne sont pas ou ne sont que partiellement dosés : les composés nitrés; les composés nitrosés; les composés azoïques; les oximes; l'hydrazine et ses dérivés; et les hétérocycles azotés.



### b)- Principe

La méthode utilisée est basée sur la minéralisation des matières organiques en milieu acide et en présence de catalyseur ; sur l'entraînement à la vapeur en milieu alcalin de l'azote ammoniacal obtenu et dosage direct par titrimétrie.

### c)- Réactifs

Au cours de l'analyse et de la préparation des réactifs, n'utiliser que de l'eau récemment déminéralisée dont la teneur en azote est négligeable. Les réactifs doivent être de pureté analytique.

Outre l'acide sulfurique concentré ( $d= 1,84$ ), il faut l'hydroxyde de sodium à 400g/l, l'acide borique à 10g/l, un catalyseur de minéralisation obtenu à partir du sulfate de potassium ( $K_2SO_4$ ) et sélénium en poudre et une solution de rouge de méthyle et de vert de bromocrésol dans l'éthanol comme indicateur coloré.

### d)- Appareillage

Outre le matériel courant de laboratoire, on utilise un ballon de Kjeldahl de 250 ml et une rampe de minéralisation utilisant des cuves adaptées à l'appareil de distillation ci – dessous ( voir Fig.9 )



Fig.9 : Distillateur Kjeldahl Kjeltec System 1002 Distilling Unit ( TECATOR ) (2\*)

## Principe de fonctionnement

Cette distillation se fait par le principe de l'entraînement à la vapeur comme l'indique le schéma de la fig.10. ci-dessous.

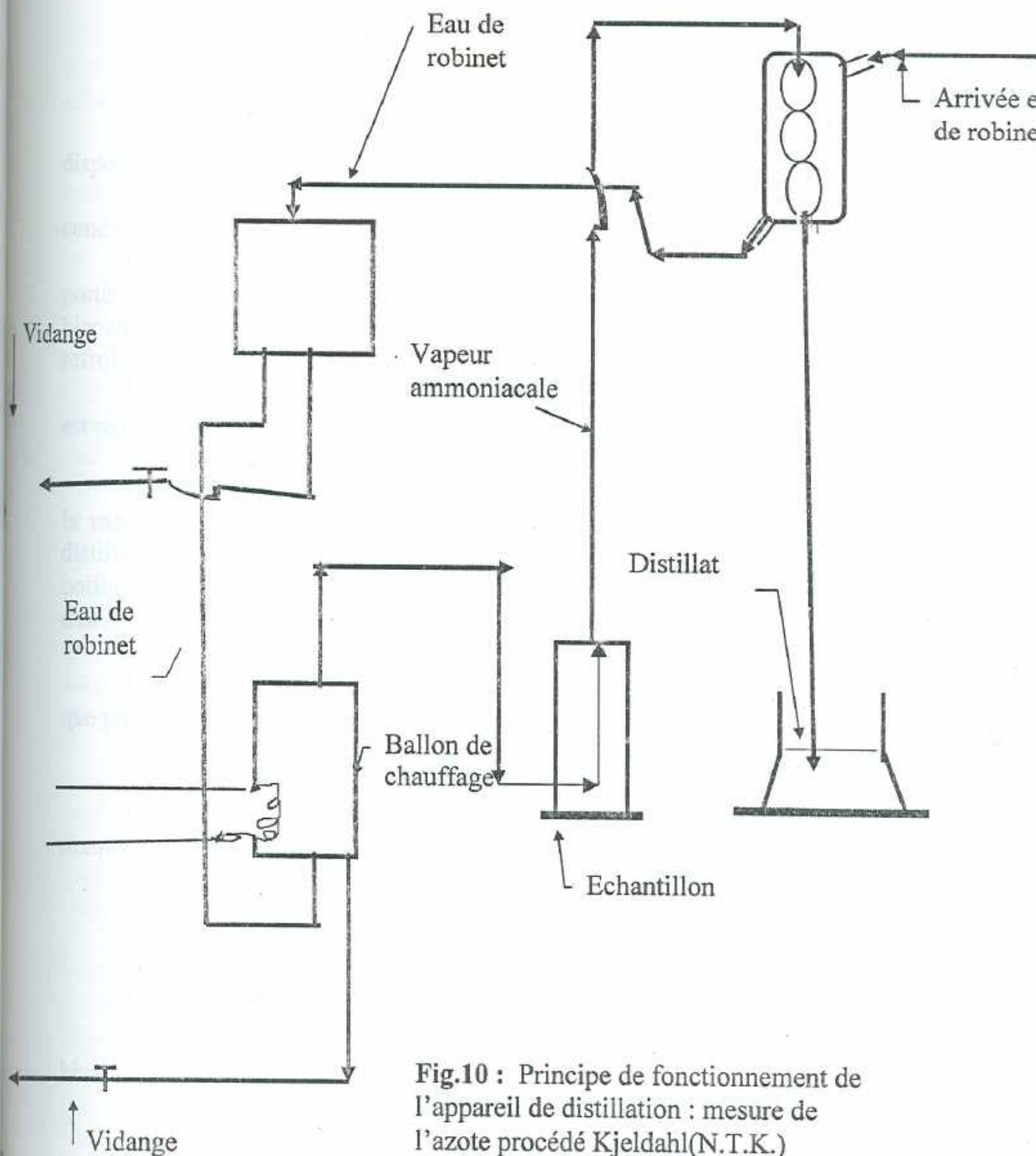


Fig.10 : Principe de fonctionnement de l'appareil de distillation : mesure de l'azote procédé Kjeldahl(N.T.K.)



### e) - Echantillons

Les échantillons destinés au laboratoire d'analyse sont acidifiés à  $\text{pH} < 2$  à l'aide de l'acide sulfurique concentré et conservés au froid (environ  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) jusqu'au moment de l'analyse.

### f) - Mode opératoire

- Prise d'essai

La prise d'essai de l'échantillon est de 50 ml.

- Minéralisation

La prise d'essai est introduite dans un ballon de Kjeldahl muni d'un dispositif régulateur d'ébullition (pierre ponce).

On ajoute 1 g de catalyseur de minéralisation, 10 ml d'acide sulfurique concentré.

On place un dispositif de collecte de condensats de vapeur d'eau; qu'on porte lentement à ébullition et puis on évapore jusqu'à apparition de fumées blanches. Le chauffage est ensuite Forcé pendant 2 heures; puis on laisse refroidir à la température ambiante.

Lorsque l'échantillon est trouble en fin de minéralisation, la minéralisation est reprise en diminuant la prise d'essai.

- Distillation et dosage

On introduit 50 ml d'hydroxyde de sodium dans le minéralisat et on admet la vapeur qui assure l'entraînement de l'azote ammoniacal. 200 ml environ du distillat sont recueillis dans un récipient contenant 10 ml de la solution d'acide borique et 4 gouttes d'indicateur. Le titrage est fait à l'aide la solution titrée d'acide sulfurique. On note le volume  $V_1$  nécessaire.

- Essai à blanc

Un essai à blanc dans les mêmes conditions de minéralisation et de dosage que pour la prise d'essai.

### g) - Expression des résultats

La teneur en azote Kjeldahl, exprimée en milligramme de N par litre est donnée par l'expression :

$$\frac{(V_1 - V_0) * C * 1000 * 14}{V}$$

où :

$V_1$ : est le volume, en millilitres, d'acide sulfurique utilisé pour le dosage.

$V_0$  est le volume, en millilitres, d'acide sulfurique utilisé pour l'essai à blanc.

C: est la concentration, en mole par litre, de la solution titrée d'acide sulfurique utilisé pour le dosage.

V: est le volume, en millilitres, de la prise d'essai.

### **3-Dosage des orthophosphates et du phosphore total**

La présente méthode d'analyse reprend la norme française NF T90-023 du 23 Septembre 1982(24). La méthode a pour objet le dosage spectrométrique du phosphore présent dans les eaux sous diverses formes. Elle comporte les phases suivantes:

- Dosage des orthophosphates;
- Dosage du phosphore total après minéralisation en ballon Kjeldahl en présence du persulfate de sodium.

Les échantillons destinés au laboratoire sont aussitôt analysés.

#### **a)- Dosage des orthophosphates**

La méthode a pour principe: la formation en milieu acide d'un complexe avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium; la réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu qui présente deux valeurs maximales d'absorption, l'une vers 700nm, l'autre, plus importante à 880nm puis dosage spectrométrique.

Au cours de l'analyse, les réactifs utilisés sont préparés à partir de l'eau distillée exempte de phosphore. On utilise entre autres: l'acide sulfurique concentré ( $d=1,84g/ml$ ); l'acide sulfurique: solution à 15%(v/v); l'hydroxyde de sodium: solution à 120g/l; l'acide ascorbique: solution à 20g/l. Cette dernière solution est toujours préparée au moment de l'emploi; le tartrate de potassium et d'antimoine: solution à 2,8g/l.

#### **Appareillage**

- Matériel courant de laboratoire

La verrerie utilisée pour les dosages est lavée au sulfochromique (mélange à parts égales d'acide sulfurique concentré et de dichromate de potassium à 10%(V/V)) et rincée à l'eau distillée.

- Spectrophotomètre à double faisceaux de marque Kontron. Outre la verrerie, on utilise la rampe de minéralisation et un spectrophotomètre KONTRON U.V visible type UVIKON 810 (réglable aux longueurs 700 nm à 880 nm) équipé de cuves de 10 et de 50 mm d'épaisseur.(cf fig.8 ; et 9. ci-dessus)



### Mode opératoire

La prise d'essai est égale à 20 ml. Pour les échantillons trop concentrés, (supérieure à 1 mg de P par litre) nous avons effectué des dilutions avant de prélever la prise d'essai.

### Dosage

On introduit la prise d'essai dans une fiole jaugée de 25 ml.

Après avoir ajouté 1,0 ml d'acide ascorbique, on agite énergiquement en ajoutant 4,0 ml de réactif combiné. On attend 30 minutes après avoir agité pour le développement de la coloration bleue.

La mesure spectrométrique à 880 nm est effectuée après avoir réglé l'appareil au zéro d'absorbance par rapport au terme zéro de la gamme d'étalonnage.

## Mode opératoire

### - Prise d'essai

En général, prélever 50ml de l'échantillon. Si l'échantillon est chargé, prélever une prise d'essai de volume inférieur et effectuer une dilution.

### - Minéralisation

On introduit la prise d'essai dans un ballon de Kjeldahl de 250 ml, puis on ajoute 5 ml d'acide sulfurique concentré et 5 ml de la solution de persulfate de sodium

Le mélange est porté à ébullition et évaporé jusqu'à apparition de fumées blanches. On poursuit ensuite le chauffage pendant 90 minutes et on laisse refroidir. On reprend le résidu avec de l'eau et on rince plusieurs fois de façon à obtenir un total de 150 ml de solution. Le pH est ajusté à une valeur comprise entre 1,5 et 2,5, en contrôlant au pH-mètre avec la solution d'hydroxyde de sodium à 120 g/l.

Refroidir à la température ambiante, filtrer si nécessaire. Transvaser dans des fioles de 200 ml et compléter au volume avec de l'eau distillée.

### - Dosage

On prélève 20 ml de cette solution ou un volume inférieur de façon à ce que la quantité de phosphore dans cette prise n'excède pas 20 µg (comprise dans la gamme d'étalonnage), puis on l'introduit dans une fiole de 25 ml.

On effectue le dosage spectrométrique par rapport au terme zéro de la gamme d'étalonnage en ajustant éventuellement au volume après l'ajout des réactifs.

### - Essai à blanc

Un essai est effectué à blanc dans les mêmes conditions de minéralisation et de dosage en remplaçant la prise d'essai par de l'eau distillée.

### Expression des résultats

La teneur en phosphore,  $C_2$ , de l'échantillon, exprimée en milligramme de P par litre, est donnée par l'expression:

$$C_2 = k * d_1 * d_2 * \frac{200}{V} * (A_e - A_b)$$

où:

$k$  est la pente de la courbe d'étalonnage, en milligrammes de P par litre et par unité d'absorbance.

$d_1$  est le facteur de dilution de la dilution éventuelle de l'échantillon avant minéralisation.

$d_2$  est le facteur de dilution dû au prélèvement dans le minéralisat du volume utilisé pour le dosage..

$V$  est le volume, en millilitres, de la prise d'essai.

$A_e$  est l'absorbance de la solution de l'essai spectrométrée.

$A_b$  est l'absorbance de l'essai à blanc



## C) MESURE DE LA POLLUTION ORGANIQUE

### 1-Détermination de l'oxydabilité au permanganate de potassium (indice permanganate)

#### a) Objet et domaine d'application

b)

La présente norme reprend la norme française NF T 90-050 d'Octobre 1989.

Elle est directement applicable à des eaux dont l'indice permanganate se situe entre 0,5 mg/l et 10 mg/l. Des eaux ayant un indice permanganate supérieur à 10 mg/l peuvent faire l'objet d'une dilution.

#### b) Définition

Indice permanganate (d'une eau) : concentration en masse d'oxygène équivalente à la quantité d'ions permanganate consommée quand un échantillon d'eau est traité par le permanganate de potassium dans des conditions définies.

Remarque : l'indice permanganate est généralement exprimé en mg/l d'oxygène. C'est un paramètre qui correspond à une mesure conventionnelle de la contamination d'un échantillon d'eau par des matières organiques.

#### c) Principe

Chauffage à ébullition douce d'un échantillon d'eau en présence d'une quantité connue de permanganate de potassium et d'acide sulfurique pendant une période donnée (10 mn).

Réduction d'une partie du permanganate par les matières organiques de l'échantillon.

Réduction de l'excès de permanganate par l'oxalate de sodium en excès et titrage en retour de l'excès d'oxalate par le permanganate de potassium.

#### d) Réactifs

- Eau distillée dont la consommation en permanganate de potassium est négligeable.

- Acide sulfurique,  $C(H_2SO_4) = 7,5 \text{ mol/l}$

- Acide sulfurique,  $C(H_2SO_4) = 2 \text{ mol/l}$

- Oxalate de sodium, solution mère,  $C(Na_2C_2O_4) = 0,05 \text{ mol/l}$

Cette solution est stable pendant environ 6 mois si elle est conservée à l'obscurité.

- Oxalate de sodium, solution  $C(Na_2C_2O_4) = 5 \text{ mmol/l}$

- Permanganate de potassium, solution mère,  $C(KMnO_4) = 20 \text{ mmol/l}$

- Permanganate de potassium, solution  $C(KMnO_4) = 2 \text{ mmol/l}$

### e) Appareillage

Matériel courant de laboratoire et notamment :

- Bain d'eau permettant de porter les récipients d'essais à une température comprise entre  $96^\circ\text{C}$  et  $98^\circ\text{C}$  et de les maintenir à cette température.
- Récipients d'essai et des erlenmeyers de 100 ml.
- Burette de précision, de 10 ml de capacité, graduée en 0,02 ml.

### f) Echantillonnage

Immédiatement après réception au laboratoire ajouter 5 ml d'acide sulfurique par litre d'échantillon et stocker à l'obscurité et à environ  $5^\circ\text{C}$ .

### g) Mode opératoire

- La prise d'essai est de 25 ml. Si l'indice permanganate de l'échantillon est supérieur à 10 mg/l, on effectue une dilution.

- On transvase la prise d'essai dans le récipient d'essai, puis on ajoute  $5 \text{ ml} \pm 0,05 \text{ ml}$  d'acide sulfurique et on mélange en agitant doucement.

Le récipient est placé dans le bain d'eau pendant  $10 \text{ mn} \pm 2 \text{ mn}$ .

On ajoute  $5 \text{ ml} \pm 0,05 \text{ ml}$  de solution de permanganate de potassium (4-7) et on démarre le chronométrage.

Après  $10 \text{ mn} \pm 0,15 \text{ s}$ , on ajoute  $5 \text{ ml} \pm 0,05 \text{ ml}$  de la solution d'oxalate de sodium et on attend que la solution se décolore.

Le titrage est fait pendant que la solution est encore chaude, avec la solution de permanganate de potassium, jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistante pendant environ 30 s.

On note le volume de solution de permanganate consommé, soit  $V_1$ .

On effectue, parallèlement à l'essai, un essai à blanc en utilisant le même mode opératoire mais en remplaçant la prise d'essai par 25 ml d'eau.

On note le volume de solution de permanganate consommé, soit  $V_0$ .

$V_0$  ne doit pas dépasser 0,3 ml.

La solution obtenue est conservée pour le titrage de la solution de permanganate.

- Titrage de la solution de permanganate de potassium

On ajoute  $5 \text{ ml} \pm 0,05 \text{ ml}$  de la solution d'oxalate de sodium à la solution.

La solution est réchauffée, si nécessaire, jusqu'à environ  $80^\circ\text{C}$  et on titre avec la solution de permanganate jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistante pendant 30 s.

On note le volume de solution de permanganate consommé, soit  $V_2$ .

### h) Expression des résultats

L'indice permanganate, PI, exprimé en milligrammes par litre d'oxygène, est donné par la formule suivante :



$$PI = \frac{16(V_1 - V_0)}{V_2}$$

où :

16 est l'équivalent en oxygène, exprimé en milligrammes par millimole, d'oxalate,

$V_0$  est le volume, en millilitres, de la solution de permanganate consommé dans l'essai à blanc,

$V_1$  est le volume, en millilitres, de la solution de permanganate consommé lors de l'essai,

$V_2$  est le volume, en millilitres, de la solution de permanganate consommé lors du titrage de la solution de permanganate de potassium.

Si l'échantillon a été dilué, tenir compte du facteur de dilution pour calculer les résultats.

## 2-Détermination de la demande chimique en oxygène(D.C.O.)

### a) Objet

La présente méthode d'analyse reprend la norme française NF T 90-101 d'Octobre 1988. Elle décrit un procédé de détermination de la demande chimique en oxygène (D.C.O.). Elle est applicable aux eaux dont la D.C.O. est comprise entre 30 mg/l et 700 mg/l.

### b) Définition

La demande chimique en oxygène (D.C.O.) est la concentration, exprimée en milligrammes par litre, d'oxygène équivalente à la quantité de dichromate consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies.

1 mole de dichromate ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) est équivalente à 1,5 moles d'oxygène  $O_2$  (24)

### c) Principe

Ebullition à reflux, dans les conditions définies, d'une prise d'essai de l'échantillon, en milieu acide, en présence d'une quantité connue de dichromate de potassium, de sulfate d'argent jouant le rôle d'un catalyseur d'oxydation et de sulfate de mercure (II) permettant de complexer les ions chlorures.

Détermination de l'excès de dichromate avec une solution titrée de sulfate de fer (II) et d'ammonium.

Calcul de la DCO à partir de la quantité de dichromate de potassium réduite

#### d) Réactifs

- Acide sulfurique concentré ( $d=1,83\text{g/ml}$ )
- Acide sulfurique,  $C(\text{H}_2\text{SO}_4) = 4\text{ mol/l}$

On ajoute à environ 500 ml d'eau, avec précaution et par portions, 220 ml d'acide sulfurique ; on laisse refroidir et on complète à 1000 ml avec de l'eau.

- Acide sulfurique - sulfate d'argent

Cette solution est préparée en ajoutant 10 g de sulfate d'argent ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) à 40 ml d'eau. On ajoute avec précaution et par portions au mélange, 960 ml d'acide sulfurique L'ensemble agité est laissé au repos pendant 1 ou 2 jours.

-Sulfate de fer (II) et d'ammonium, solution titrée  $C((\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 0,12\text{ mol/l}$ .

On dissoudre 47,0 g de sulfate de fer (II) et d'ammonium hexahydraté dans de l'eau ; puis on ajoute 20 ml d'acide sulfurique ; le tout est ensuite refroidi et dilué à 1000 ml.

Cette solution est étalonnée journallement de la manière suivante : diluer 5,0 ml de la solution étalon de dichromate de potassium à 100 ml avec de l'acide sulfurique à 4 mol/l. Titrer avec la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium en présence de 2 à 3 gouttes de la solution d'indicateur ferroïne.

La concentration, C, exprimée en mole par litre de solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium est donnée par la formule :

$$C = \frac{5 \times 0,04 \times 6}{V} = \frac{1,2}{V}$$

où V est le volume, en millilitres, de solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium consommé.

- Sulfate de mercure (II) ( $\text{HgSO}_4$ ) en cristaux.
- Dichromate de potassium, solution étalon,  $C(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 0,040\text{ mol/l}$  contenant le sulfate de mercure (II).

On dissout 80 g de sulfate de mercure (II) (4-5) dans 800 ml d'eau.

On ajoute avec précaution 100 ml d'acide sulfurique qu'on laisse refroidir et on ajoute 11,767 g de dichromate de potassium, préalablement séché à  $105^\circ\text{C}$  pendant 2 h. La solution est transvasée quantitativement dans une fiole jaugée de 1000 ml et complétée au volume. Cette solution est stable pendant un mois.

- Hydrogénophthalate de potassium, solution de référence  $C(\text{KC}_8\text{H}_5\text{O}_4) = 2,0824\text{ mmol/l}$

On dissout 0,4253 g d'hydrogénophthalate de potassium, préalablement séché à  $105^\circ\text{C}$ , dans de l'eau et compléter à 1000 ml dans une fiole jaugée. La solution a une valeur théorique de DCO de 500 mg/l. Elle reste stable au moins une semaine si elle est conservée à  $4^\circ\text{C}$  ; ferroïne, solution indicateur commerciale ; granules régulateurs d'ébullition.



### e) Appareillage

Matériel courant de laboratoire, appareil à reflux constitué de ballons à fond plat de 250 ml rodé surmontés de réfrigérant ( voir Fig .11 ci -dessous ).



**Fig.11 :** Appareil à reflux constitué de ballon à fond plat de 250 m, à fond rodé<sup>(2\*)</sup>

### f) Echantillonnage

Les échantillons sont prélevés dans des bouteilles en polyéthylène et sont aussitôt analysés

### g) Mode opératoire

#### - Prise d'essai

Dans l'appareil à reflux, on introduit 10,0 ml de l'échantillon pour analyse. Si la valeur de la DCO de l'échantillon est supérieure à 700 mg/l, on effectue une dilution.

Avant le prélèvement de la prise d'essai, l'échantillon est bien homogénéisé.

#### - Essai à blanc

On effectue un essai à blanc parallèlement à la détermination, en suivant le même mode opératoire que pour l'essai, mais en remplaçant la prise d'essai par 10,0 ml d'eau distillée.

La consommation de la solution de dichromate de potassium lors de l'essai à blanc ne doit pas excéder 0,1 ml.

#### - Essai témoin

On vérifie régulièrement la technique opératoire, de même que la pureté des réactifs et la propreté de la verrerie, par analyse de 10 ml de la solution de référence en suivant le même mode opératoire que pour la prise d'essai.

La DCO théorique de cette solution est de 500 mg/l; le procédé expérimental est satisfaisant si on obtient au moins 96 % de cette valeur.

#### - Détermination

On ajoute 5 ml de la solution de dichromate de potassium et quelques granules régulateurs d'ébullition à la prise d'essai et homogénéiser soigneusement.

On met, lentement et avec précaution, 15 ml d'acide sulfurique - sulfate d'argent en agitant soigneusement le ballon d'un mouvement circulaire et en le refroidissant sous l'eau courante froide de façon à éviter toute perte de substances organiques volatiles.

Le réfrigérant au ballon est relié, et porté à ébullition à reflux pendant 2 heures. (Le mélange réactionnel doit bouillir doucement, sans soubresauts. Des soubresauts indiquent une surchauffe locale de la solution). On laisse refroidir et on lave la paroi interne du réfrigérant à l'eau distillée en recueillant les eaux de lavage dans le ballon. On débranche le réfrigérant du ballon, et on complète à environ 75 ml avec de l'eau et refroidir à la température ambiante.

On titre l'excès de dichromate avec la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium, en présence de 1 ou 2 gouttes de la solution de ferroïne.

On note comme point de virage le changement brusque de couleur du bleu - vert au brun- rouge, même si le bleu - vert réapparaît au bout de quelques minutes.



## h) Expression des résultats

La demande chimique en oxygène, DCO, exprimée en milligrammes par litre, est donnée par la formule:

$$DCO = \frac{8000C(V_1 - V_2)}{V_0}$$

où :

C est la concentration, exprimée en moles par litre, de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium calculée selon;

$V_0$  est le volume, en millilitre, de la prise d'essai avant dilution éventuelle;

$V_1$  est le volume, en millilitre, de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium, utilisé pour l'essai à blanc;

$V_2$  est le volume, en millilitre, de la solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium, utilisé pour la détermination.

## 3- DBO (Demande Biochimique en Oxygène).

### a) Appareillage: description du DBO-mètre.

C'est un appareil complet de laboratoire spécialement conçu pour la détermination de la DBO par contrôle et mesure du  $CO_2$  rejeté. Cet appareil permet de réaliser simultanément six mesures de DBO. Chaque poste se compose:

- d'un flacon de réaction en verre coloré
- d'un carquois recevant l'alcali pour la fixation du  $CO_2$ .
- d'un bouchon vissé sur le flacon et solidaire d'un tube flexible fixé à l'autre extrémité sur le capillaire du dépressiomètre.
- d'un dépressiomètre à mercure permettant la mesure de la dépression suite à la consommation par l'alcali d  $CO_2$ . Il se compose d'un capillaire et d'un réservoir à mercure
- d'une échelle dont le zéro est réglable, graduée directement en mg/l de DBO.

Chaque poste est monté sur un bloc muni d'un système d'agitation magnétique et d'un système de régulation de température par circulation d'eau. La température est maintenue à  $20^\circ C$ .

### b) Mode opératoire.

La manipulation doit être réalisée avec soin en suivant le chronogramme ci-dessous:

- Vérification de la propreté des flacons et des joints des bouchons.
- On met un agitateur magnétique dans chaque flacon .
- On dose exactement le volume de l'échantillon à analyser et on le verse dans le flacon. Le volume est déterminé en utilisant les valeurs et les plages de mesure du tableau.5. ci-dessous.

**Tableau 5**

| Plage de mesure (mg/l DBO <sub>5</sub> ) | Volume (ml ) | Facteur multiplicatif |
|--|--------------|-----------------------|
| 0-35                                     | 428          | 0,1                   |
| 0-70                                     | 360          | 0,2                   |
| 0-175                                    | 244          | 0,5                   |
| 0-350                                    | 157          | 1,0                   |
| 0-700                                    | 94           | 2,0                   |
| 0-1400                                   | 56           | 4,0                   |

l'échantillon d'analyse doit être si possible à 20°C.

On met 4 pastilles d'hydroxyde de potassium (KOH )dans chaque carquois au moyen d'une pincette et on fixe les carquois sur les flacons.

- On place les flacons dans l'appareil et on branche les flexibles des manomètres.

- On ne visse pas à fond les bouchons des flacons et des manomètres.

- L'appareil est branché et mis en service.

- Après 1 heure de fonctionnement on visse à fond les bouchons des flacons et des manomètres pour assurer une parfaite étanchéité.

- Le zéro de l'échelle est ajusté et on note l'heure.

- On relève et note les valeurs obtenues tous les jours à la même heure. La DBO<sub>5</sub> sera obtenu après 5 jours d'observation.



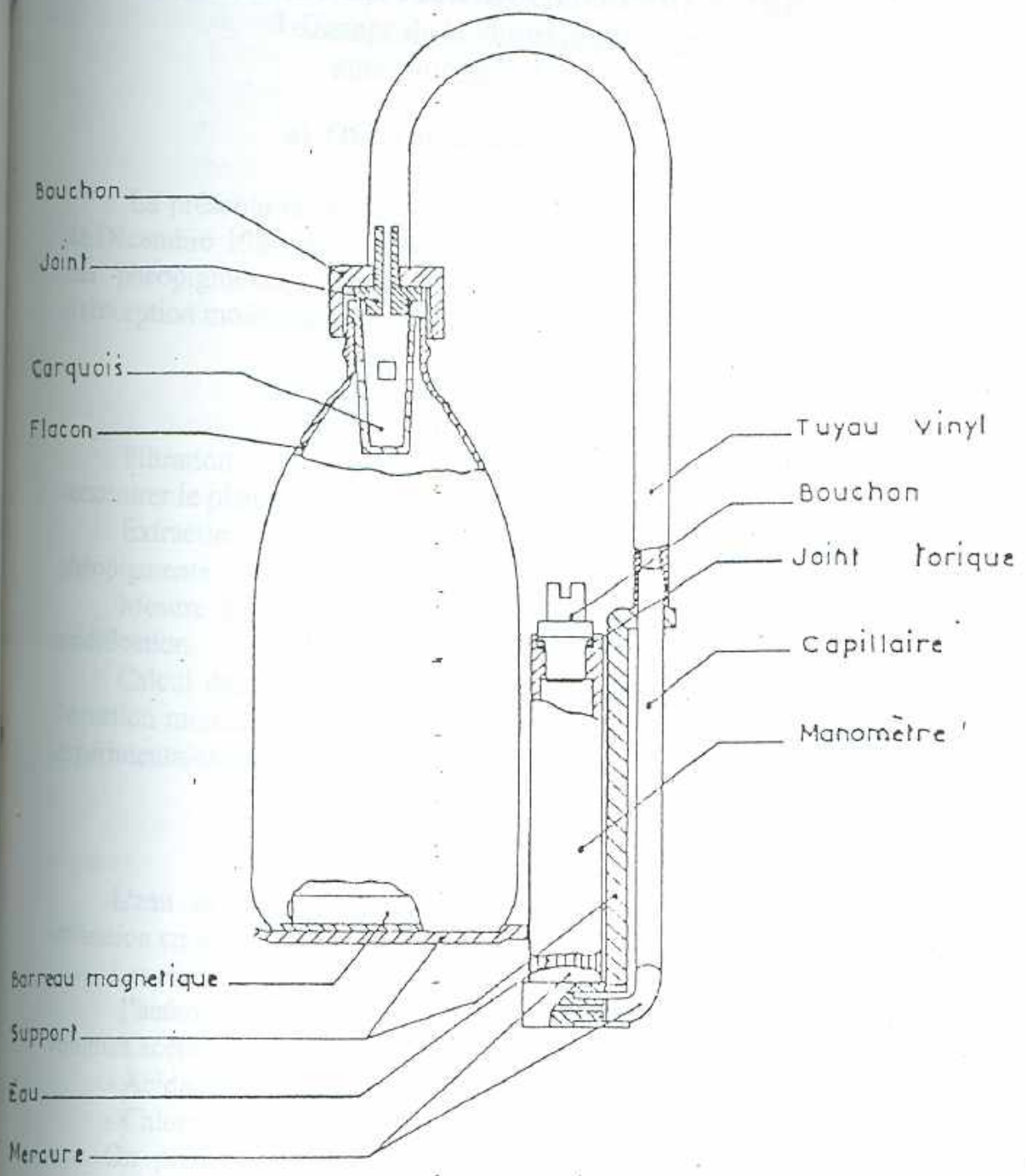


Fig.12 : Détail d'un poste d'analyse du D.B.O.mètre

## D) MESURE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE

### 1-Dosage de la chlorophylle a et des phéopigments par spectrométrie d'absorption moléculaire.

#### a) Objet et domaine d'application

La présente norme reprend la norme française (expérimentale) T 90-117 de Décembre 1984. Elle décrit une méthode de dosage de la chlorophylle a et des phéopigments, applicable aux eaux de surfaces, par spectrométrie d'absorption moléculaire.

#### b) Principe

Filtration de l'échantillon d'eau sur membrane afin d'isoler et de concentrer le plancton végétal.

Extraction par l'acétone à 90 % (V/V) de la chlorophylle a et des phéopigments.

Mesure de l'absorbance de l'extrait à 665 nm et 750 nm avant et après acidification.

Calcul des concentrations en chlorophylle a et en phéopigments d'après l'équation monochromatique de Lorenzen dont les coefficients sont déterminés expérimentalement à partir de solution étalon de chlorophylle a.

#### c) Réactifs

L'eau et les solvants sont de pureté analytique suffisante pour une utilisation en spectrométrie d'absorption moléculaire.

Les réactifs utilisés sont:

l'acétone qui permet de préparer l'acétone à 90 % (V/V) : mélanger 9 volumes acétone (3-1) à 1 volume d'eau distillée.

- Acide chlorhydrique C = 5 mol/l

- Chlorophylle a, solution d'étalonnage Ca = 10 mg/l

On prépare cette solution par dissolution d'1 mg de chlorophylle a purifiée, pesé à l'aide d'une microbalance, dans 100 ml d'acétone dilué (3-2). Cette solution est conservée à - 20 °C et à l'obscurité pendant au plus un mois.

#### d) Appareillage

- Matériel courant de laboratoire et en particulier :

- Filtres en acétate de cellulose de diamètre de pore 1 µm et de diamètre 5 cm.



- Pompe de filtration sous vide ; centrifugeuse; chronomètre; microbalance et un spectromètre à double faisceaux (de marque KONTRON), équipé de cuves de parcours optique de 10 mm.

### e) Echantillonnage

Les échantillons sont prélevés dans des bouteilles en verre brun de 250 ml, remplies à ras bord et bouchées sans laisser d'air. Ils sont aussitôt transportés au laboratoire et filtrés.

### f) Mode opératoire

#### - Filtration

On homogénéise le contenu des flacons avant la filtration. On filtre 150 ml de l'échantillon sur filtre en acétate de cellulose. La dépression nécessaire à la filtration doit être la plus faible possible pour éviter l'éclatement des cellules sur le filtre. La durée de la filtration ne doit pas dépasser 10 min.

#### - Extraction

Le filtre est placé dans un tube en verre contenant 10 ml d'acétone à 90 %. Le tube en verre est maintenu à l'obscurité dans un tube métallique. le filtre est écrasé avec une baguette en verre et la solution est agitée pendant 30 s sur une agitation électrique afin de solubiliser le filtre. La solution est ainsi conservée à 5°C environ pendant au moins 8 heures.

#### - Centrifugation

Centrifuger les extraits pendant 10 mn afin d'éliminer les particules en suspension.

Après centrifugation, transvaser le surnageant dans un tube au volume initial et compléter au volume avec de l'acétone à 90 %. On conserve le tube à l'obscurité et on effectue la mesure dans les minutes qui suivent la centrifugation.

#### - Mesure

On règle le zéro d'absorbance de l'appareil utilisé avec une solution de référence constituée par un filtre en acétate de cellulose dissous dans 10 ml d'acétone à 90% puis centrifugée.

On effectue une mesure de l'absorbance de l'extrait à 750 nm et 665 nm en utilisant une cuve de parcours optique de 10 mm. Dans le cas où la solution mesurée est trop concentrée, on dilue avec de l'acétone 90%. L'absorbance à 750 nm ne doit pas excéder 0,010.

On ajoute 10 µl d'acide chlorhydrique dans la solution d'extrait. Boucher le tube et mélanger. On déclenche le chronomètre. Après 2 min, on effectue à nouveau une mesure de l'absorbance de l'extrait acidifié à 750 nm et 665 nm.

### - Etalonnage

On effectue une mesure selon le mode opératoire décrit précédemment sur la solution d'étalonnage de chlorophylle a en utilisant une cuve de parcours optique de 10 mm.

### g) Calcul et expression des résultats

#### - Formule de calcul

La concentration en chlorophylle a Ca, en microgrammes par litre, dans l'échantillon d'eau analysée est calculée selon l'équation de Lorenzen (équation monochromatique) :

$$C_a = \frac{[(A_{0.665} - A_{0.750}) - (A_{a.665} - A_{a.750})]}{V.L} \cdot v.K \frac{R}{R-1}$$

où :

$A_{0.665}$  et  $A_{0.750}$  sont respectivement les absorbances à 665 nm et 750 nm avant acidification.

$A_{a.665}$  et  $A_{a.750}$  sont respectivement les absorbances à 665 nm et 750 nm après acidification.

v est le volume d'extrait en millilitre.

V est le volume d'eau filtrée en litres.

L est le parcours optique de la cuve utilisée en centimètres.

$K = 1000/K_c$   $K_c$  étant le coefficient spécifique d'absorbance massique en l/g.cm de la chlorophylle a dans l'acétone à 90% à 665 nm.

$$R = \left( \frac{A_{0.665} - A_{0.750}}{A_{a.665} - A_{a.750}} \right) \text{ est le coefficient d'acidification maximal.}$$

#### - Détermination des coefficients K et R

Les coefficients K et R sont déterminés à partir des mesures effectuées sur la solution étalon de chlorophylle a de concentration connue  $C_a = 10 \text{ mg/l}$ .

D'après le calcul,  $\frac{K.R}{R-1}$  est égal à 27,3.

#### 2-Disque de secchi.

La mesure est faite à l'aide d'un disque peint en blanc et relié à un fil gradué. Le disque est introduit jusqu'à un niveau où il n'est plus visible ; puis on lit la profondeur correspondante. Cette mesure permet d'apprécier la transparence de l'eau



**Troisième partie :**

**ETUDE DU MECANISME D'EUTROPHISATION  
DES LACS DE YAMOUSSOUKRO**

## A) INTRODUCTION AUX PROBLEMES D'EUTROPHISATION

**1) Définition**

L'eutrophisation est l'enrichissement d'un milieu ou d'un plan d'eau en une certaine catégorie de sels dissous, qui induisent une surproduction végétale, conduisant à la destruction de ce plan d'eau.

**2) Manifestation**

La première phase de la manifestation de l'eutrophisation se caractérise par l'apparition des algues qui font place par la suite aux macrophytes.

Ces manifestations visibles du phénomène d'eutrophisation sont liés aux modifications physico-chimiques et biologiques de l'eau.

**3) Problèmes liés à l'eutrophisation**

Le phénomène d'eutrophisation n'est qu'une forme de la pollution des eaux liée à la fertilité du plan d'eau. En zone urbaine, il est souvent le fait des activités des hommes à travers les eaux usées, les rejets industriels et urbains; alors qu'en zone rurale il est due aux activités agricoles.

On assiste donc à un accroissement de la biomasse, très fréquemment à une augmentation rapide des plantes aquatiques ( algues et macrophytes ) surtout dans les zones littorales. La qualité de l'eau à tout point de vue (chimique et microbiologique) se trouve être affectée la rendant ainsi inutilisable pour de nombreuses activités humaines. Les gênes mécaniques qui en résultent du fait de l'existence des macrophytes, enlèvent aux retenues d'eau leurs aspects esthétiques.

Par ailleurs les réactions chimiques et microbiologiques qui s'en suivent donnent des substances nauséabondes ainsi que des germes pathogènes de tous genres.

La vie aquatique est affectée par le fait de la désoxygénation qui caractérise l'eutrophisation. De plus la faune aquatique contaminée peut poser des problèmes sanitaires aux consommateurs. Le cas de Yamoussoukro ne fait pas exception.



## B) QUELQUES MECANISMES DE L'EUTROPHISATION

### 1) Les principales causes de l'eutrophisation

#### a) Causes physiques

Les facteurs physiques suivants ont un rôle sur le phénomène d'eutrophisation :

- l'éclairement est nécessaire à la photosynthèse et constitue un facteur favorisant l'eutrophisation.

- la température, selon Ryding et Rast <sup>(2)</sup>, joue un rôle dans la solubilité, dans la dissociation des sels dissous et dans l'activité bactériologique. Elle joue également un rôle dans le relarguage des nutriments (phosphore) à partir des sédiments.

- la morphologie des retenues d'eau telle que la surface, la profondeur, l'hydrologie, la géologie et la pédologie des terrains ont également une action sur le phénomène d'eutrophisation. Ces facteurs n'ont que des effets favorisants ou défavorisants sur le phénomène.

#### b) Causes chimiques

L'eutrophisation accélérée de l'eau des lacs est due à une pollution par les substances nutritives telles que l'azote et le phosphore principalement; mais aussi à certaines formes de pollution, notamment: les sédiments, les matières inorganiques telles que les engrais, et organiques telles que les hydrocarbures, ainsi que les organismes pathogènes. L'eutrophisation est une forme de pollution du milieu aquatique beaucoup plus en rapport avec les nutriments comme l'azote et le phosphore qui conduisent à un déséquilibre de l'écosystème dû à une plus grande insatisfaction de la demande des végétaux aquatiques comme le montre le tableau 6 suivant :

**Tableau 6**  
Ordre d'insatisfaction des principaux éléments  
dans les tissus des végétaux aquatiques <sup>(4)</sup>.

| Eléments  | % dans le tissu végétal<br>= demande | % dans l'eau naturelle<br>= apport | Demande / Apport |
|-----------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Phosphore | 0,08                                 | 0,000001                           | 80.000           |
| Azote     | 0,7                                  | 0,000023                           | 30.000           |
| Carbone   | 6,5                                  | 0,0012                             | 5.000            |
| Silicium  | 1,3                                  | 0,000065                           | 2.000            |
| potassium | 0,3                                  | 0,00023                            | 1.300            |

## 2°) Quelques mécanismes de l'eutrophisation

Le phénomène d'eutrophisation suit chronologiquement (selon BIERNAUX <sup>(4)</sup>) les étapes suivantes:

a)- la présence dans l'eau d'excès d'éléments nutritifs et en particulier du phosphore.

b)- une augmentation de la biomasse végétale du plan d'eau avec, quand les conditions sont favorables ( température, éclaircissement.), la prolifération rapide de certaines espèces particulières non contrôlée par les organismes prédateurs.

c)- Au cours de ces phénomènes, l'activité synthétique est très forte ce qui entraîne une sursaturation anormale en oxygène (jusqu'à 200%). Inversement la nuit, où la photosynthèse s'annule, cette énorme biomasse utilise pour sa respiration l'oxygène du milieu. La teneur en oxygène dissous peut alors s'abaisser au dessous du seuil critique pour espèces animales (5mg/l pour les samonidés selon les travaux de Biernaux<sup>(4)</sup>).

Corrélativement, la photosynthèse utilise le gaz carbonique du milieu, le pH peut augmenter à des valeurs élevées ( 9,2 à 9,3 ) dans le cas d'une eutrophisation alguale.

Ces variations et ces valeurs élevées peuvent nuire à la vie aquatique; de plus, du fait de la libération d'ammoniac non ionisé à partir des ions ammonium la toxicité du milieu augmente fortement avec le pH.

d)- l'activité oxydante des bactéries lors de la dégradation microbienne de cette masse végétale entraîne une surconsommation d'oxygène du milieu qui ne peut être compensée par l'aération naturelle et la photosynthèse. Ceci peut entraîner l'asphyxie des poissons.

e)- production possible d'ammoniac, de nitrites, de sulfure d'hydrogène, toxiques pour les poissons (doses létales d'environ 0,5mg/l pour l'ammoniac, 0,1mg/l pour les nitrites et 10 mg/l pour le sulfure d'hydrogène).

Nous reviendrons sur ces aspects dans l'étude des différents lacs.

## 3 - Détermination de l'état trophique des plans d'eau.

D'une façon générale, les lacs et les réservoirs d'eau peuvent être classés comme oligotrophes ou eutrophes (peu riches ou riches en nutriments) avec des cas intermédiaires: mésotrophes et des cas d'excès de nutriments: hypereutrophes.

Bien que ces conceptions du degré de trophie n'aient pas une signification précise, elles sont couramment employées pour caractériser les



effets des nutriments sur la qualité de l'eau ou pour désigner le potentiel trophique d'un plan d'eau. Le programme coopératif international de surveillance de l'O.C.D.E.<sup>(5)</sup> a fixé des valeurs limites pour la teneur totale en phosphore, en chlorophylle a, et pour les mesures de transparence au disque de Secchi (tableau 7).

L'emploi des valeurs fixes pour spécifier le potentiel trophique d'un lac ou d'un réservoir présente toutefois quelques inconvénients : un certain recouvrement est inévitable, un plan d'eau peut en effet être classé dans un état trophique sur la base d'un paramètre, mais dans un autre sur la base d'un second paramètre. Le système « ouvert » de classification de l'O.C.D.E. (tableau 8) permet de pallier cet inconvénient.

**Tableau 7**  
Valeur des seuils du système fixe de classification de l'état trophique établi par l'O.C.D.E. <sup>(5)</sup>

| Degré trophique    | P <sub>tot.</sub> | Chl. moy. | Chl. max. | Sch. moy. | Sch. max. |
|--------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ultra-oligotrophe. | <4,0              | <1,0      | <2,5      | >12,0     | >6,0      |
| Oligotrophe        | <10,0             | <2,5      | <8        | >6,0      | >3,0      |
| Mésotrophe.        | 10 - 35           | 2,5 - 8   | 8 - 25    | 6 - 3     | 3 - 1,5   |
| Eutrophe.          | 35 - 100          | 8 - 25    | 25 - 75   | 3 - 15    | 1,5 - 0,7 |
| Hyper-eutrophe.    | >100              | >25       | >75       | <1,5      | <0,7      |

Légende: P<sub>tot.</sub>: moyenne annuelle de la concentration en phosphore (µg/l)

Chl. moy.: moyenne annuelle en chlorophylle a.

Sch. moy.: profondeur moyenne de transparence au disque de Secchi (en m).

Sch. max.: profondeur maximale de transparence au disque de Secchi (en m).

Tableau 8

Valeurs des seuils du système ouvert de classification du potentiel trophique (moyenne annuelle) d'après O.E.C.D. <sup>(5)</sup>

| Donnée (valeur moyenne annuelle)        |         | Oligotrophie | mésotrophie | eutrophie | hypereutrophe |
|---|---------|--------------|-------------|-----------|---------------|
| Phosphore total<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | x       | 8,0          | 26,7        | 84        |               |
|   | x±1     | 4,85-13,3    | 14,5-49     | 48-189    |               |
|   | x±2s    | 2,9-22,1     | 7,9-90,8    | 16,8-424  |               |
|   | étendue | 3,0-17,7     | 10,9-95,6   | 16,2-386  | 750-1200      |
|   | n       | 21           | 19 (21)     | 71 (72)   | 2             |
| Azote total<br>(mg/m <sup>3</sup> )     | x       | 661          | 753         | 1875      |               |
|   | x±1     | 371-1181     | 485-1170    | 861-4081  |               |
|   | x±2s    | 208-2103     | 313-1816    | 395-8913  |               |
|   | étendue | 307-1630     | 361-1387    | 393-6100  |               |
|   | n       | 11           | 8           | 37 (38)   |               |
| Chlorophylle a<br>(mg/m <sup>3</sup> )  | x       | 1,7          | 4,7         | 14,3      |               |
|   | x±1     | 0,8-3,4      | 3,0-7,4     | 6,7-31    |               |
|   | x±2s    | 0,4-7,1      | 4,9-11,6    | 3,1-66    | 100-150       |
|   | étendue | 0,3-4,5      | 3,0-11      | 2,7-78    | 2             |
|   | n       | 22           | 16 (17)     | 70 (72)   |               |
| teneur maximale en<br>chlorophylle a    | x       | 4,2          | 16,1        | 42,6      |               |
|   | x±1     | 2,6-7,6      | 8,9-29      | 16,9-107  | 1,5           |
|   | x±2s    | 1,5-13       | 4,9-52,5    | 6,7-270   |               |
|   | étendue | 1,3-10,6     | 4,9-49,5    | 9,5-275   |               |
|   | n       | 16           | 12          | 46        |               |
| profondeur de<br>Secchi (m)             | x       | 9,9          | 4,2         | 2,45      |               |
|   | x±1     | 5,9-16,5     | 2,4-7,4     | 1,5-4,0   |               |
|   | x±2s    | 3,6-27,5     | 1,4-13      | 0,9-6,7   |               |
|   | étendue | 6,4-28,3     | 1,5-8,1     | 0,8-7,0   | 0,4-0,5       |
|   | n       | 13           | 20          | 70 (72)   | 2             |

x = moyenne géométrique

s = écart - type

() = le chiffre entre parenthèses indique le nombre de valeurs utilisées lors du calcul initial

Une classification qui tient compte de l'utilisation directe du plan d'eau a été établie sur la base des apports liés aux activités humaines



L'ensemble des critères trophiques décrit l'équilibre des éléments dans les eaux stationnaires, ils sont divisés en trois groupes: l'équilibre de l'oxygène, l'équilibre des nutriments et la production biologique.

La présence d'éléments nutritifs dissous est indispensable à la production primaire. Il est possible de prévoir de manière assez fiable la production primaire et la biomasse algale d'un plan d'eau à partir des concentrations en éléments nutritifs dissous présents avant la période de croissance végétale.

Dans les plans d'eau riches en carbonates, une partie du phosphore dissous peut précipiter au cours de la décalcification biologique. La production primaire sera alors inférieure à celle prévue. C'est la raison pour laquelle la classification basée sur les concentrations en phosphore dissous doit être effectuée séparément pour les eaux à faible et à forte alcalinité. Il est à souligner cependant, que la concentration en éléments nutritifs dissous mesurée durant la période de stagnation estivale présente souvent une variabilité telle qu'une classification basée uniquement sur ce paramètre manquerait de fiabilité.

#### 4 - Comparaison de l'eutrophisation des lacs et réservoirs des zones tropicales et tempérées

Les lacs et réservoirs des régions tropicales sont caractérisés par une production végétale qui se fait tout au long de l'année, des précipitations saisonnières, et des variations annuelles de température limitées à 10°C maximum. Leur température moyenne est plus élevée (environ 28°C) que les régions tempérées (environ 10 à 15°C). On y observe des gradients stables de températures mais ils sont moins prononcés que dans les lacs tempérés.

Quel que soit le degré trophique du lac ou réservoir tropical, l'hypolimnion présente parfois des signes de désoxygénation. Un déficit en oxygène dans la zone de l'hypolimnion n'indique donc pas forcément un problème d'eutrophisation selon MICHELL et MARSHAL<sup>(23)</sup> d'une part, WALMSLEY et TOERIEN<sup>(24)</sup> d'autre part.

Le tableau 9 ci-dessous permet la comparaison des manifestations de l'eutrophisation dans les deux zones.

**Tableau 9**  
 Comparaison des seuils des eaux mésotrophes et eutrophes dans les régions tempérées et tropicales.

| Indicateur de l'état trophique   | Valeurs moyennes des seuils entre les états mésotrophes et eutrophes. |                |  |
|--|---|----------------|--|
|  | Lacs tempérés   | Lacs tropicaux | Références                             |
| Production primaire moyenne de matière carbonée (g/m <sup>2</sup> /jour) | 1,0   | 2 - 3          | Robarts <sup>(26)</sup>                |
| Chlorophylle a (µg/l)  | 10 - 15   | 10 - 15        | Walmsley et Dritti <sup>(27)</sup>     |
| Phosphore total (µg/l)   | 30  | 50 - 60        | J.A. Thornton et Nduku <sup>(20)</sup> |
| Azote total (µg/l)   | 50 - 100  | 20 - 100       | Wood <sup>(28)</sup>                   |
| Principal facteur limitant   | phosphore   | azote          | Toerien et col. <sup>(29)</sup>        |
| Algues prédominantes   | diatomées   | cyanophycées   | J.A. Thornton <sup>(30)</sup>          |
| Efficacité de la photosynthèse   | < 1%  | > 2 - 3%       | Wetzel <sup>(31)</sup>                 |

Les macrophytes aquatiques posent souvent plus de problèmes dans les pays tropicaux que dans les régions tempérées. Dans les pays tropicaux ils peuvent être flottants subaquatiques ou enracinés alors qu'ils sont rarement flottants dans les pays tempérés. Le temps de séjour de l'eau et les variations de sa qualité semblent avoir les mêmes influences dans les deux zones.



**ETUDE STATIQUE DE LA DETERMINATION  
DE L'ETAT TROPHIQUE  
DES LACS DE YAMOUSSOUKRO**

Chapitre 2 :

**Introduction**

Cette étude permet de déterminer l'état trophique des lacs lié à leur degré de fertilisation en rapport avec leur environnement géographique et leur production primaire. Les moyennes des paramètres indicateurs d'eutrophisation pour chaque lac ont été pris en considération.

Les lacs étudiés communiquent entre eux. L'écoulement se fait d'une part dans le sens Lac I → Lac II → Lac III → Lac IV → Lac V et d'autre part dans le sens Lac X → Lac IX → Lac VIII → Lac V.  
Le lac V reçoit également les eaux du lac VII et se déverse dans le lac VI

**A) RESULTATS DES ANALYSES ET INTERPRETATION.**

**1) Résultats et interprétations de l'analyse des paramètres physico-chimiques.**

**Tableau 10**

Moyennes annuelles des paramètres physico-chimiques pour chaque lac et moyennes générales.

| Paramètres<br>Lac | T°C  | pH   | Oxygène<br>Dissous (mg/l) | M.E.S(mg/l) | conductivité<br>μS/cm |
|-------------------|------|------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| lac I             | 28   | 7,3  | 3,8                       | 11,4        | 144                   |
| lac II            | 28,2 | 8,2  | 4                         | 18,8        | 130,5                 |
| lac III           | 28,2 | 7,92 | 3,45                      | 24,05       | 147                   |
| lac IV            | 28,5 | 8,42 | 3,6                       | 31,55       | 164,5                 |
| lac V             | 28   | 7,15 | 2,35                      | 19,78       | 303,3                 |
| lac VI            | 28,1 | 6,86 | 0,9                       | 13,85       | 280                   |
| lac VII           | 26,9 | 7,19 | 1,9                       | 37,9        | 405                   |
| lac VIII          | 28,3 | 7,37 | 3                         | 18,85       | 255,5                 |
| lac IX            | 27,5 | 6,92 | 1,6                       | 8,4         | 212                   |
| Lac X             | 26,8 | 6,68 | 1                         | 27,5        | 187,5                 |
| moyenne           | 28   | 7,4  | 2,7                       | 19,85       | 237                   |

## a). - Température

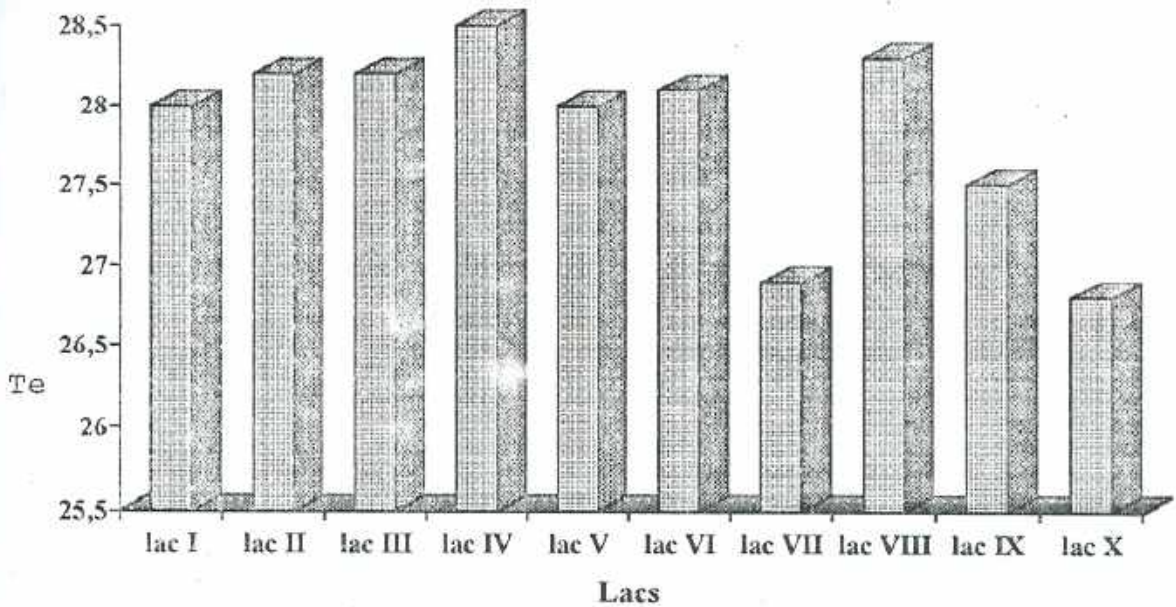


Fig 13 Moyenne des températures pour chaque lac.

La moyenne annuelle de température est voisine de 28°C excepté pour le lac VII (26,5°C). Ces valeurs sont influencées par la température atmosphérique dont la variation ne dépasse guère 2°C. Les différences observées d'un lac à un autre sont liées au couvert végétal. Ce sont les lacs à macrophytes moins exposés aux rayons solaires qui ont les moyennes les plus faibles (lac VI, lac VII; lac X...) comme le montre la figure 13. Ceux qui ne possèdent pas de macrophytes donc plus exposés aux rayons solaires (lac IV; III; II...) présentent les valeurs relativement plus élevées.

## b) Le pH.

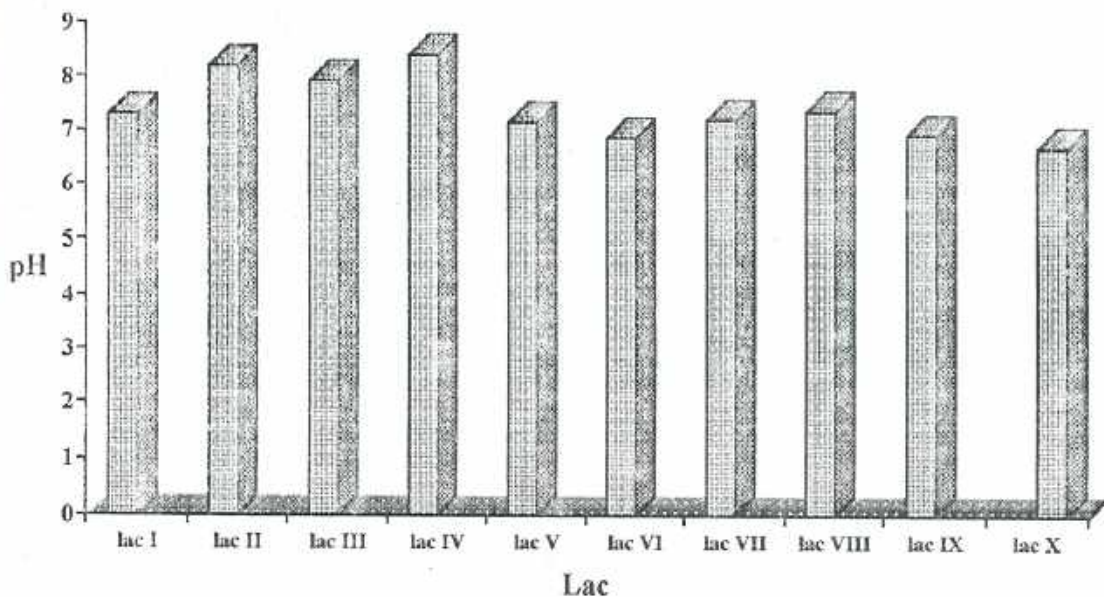


Fig. 14 : Moyenne du pH par lac.



Les équilibres physico-chimiques, les transformations biologiques, et les réactions chimiques, sont en général liés au pH. Certaines valeurs de pH peuvent favoriser les réactions physico-chimiques bien déterminées.

Au vu des résultats obtenus pour nos lacs, le constat suivant se dégage:

- Pour un même lac il n'y a pas de variation brutale du pH d'un prélèvement à un autre car les équilibres acido-basiques des eaux font ressortir un effet tampon des différents couples acide/base du milieu. Par contre, d'un lac à un autre la valeur moyenne du pH est liée à la présence ou non des plantes aquatiques et surtout à la nature des plantes.

Les lacs II; III et IV ont des eaux dont le pH tourne autour de 8 (milieu basique). Pour ces lacs surtout le lac IV on a la présence des algues qui semblent être responsables de ce fait comme il a été établi par d'autres études<sup>(17)</sup> et comme le confirment les résultats de l'étude. Les lacs à macrophytes présentent un pH légèrement acide lié aux réactions diverses entre les plantes et l'eau.

Au total les différentes valeurs de pH nous permettent déjà de mettre en relief le parallélisme entre l'eutrophisation alguale et l'eutrophisation liée à l'existence des macrophytes.

### c) Oxygène dissous.

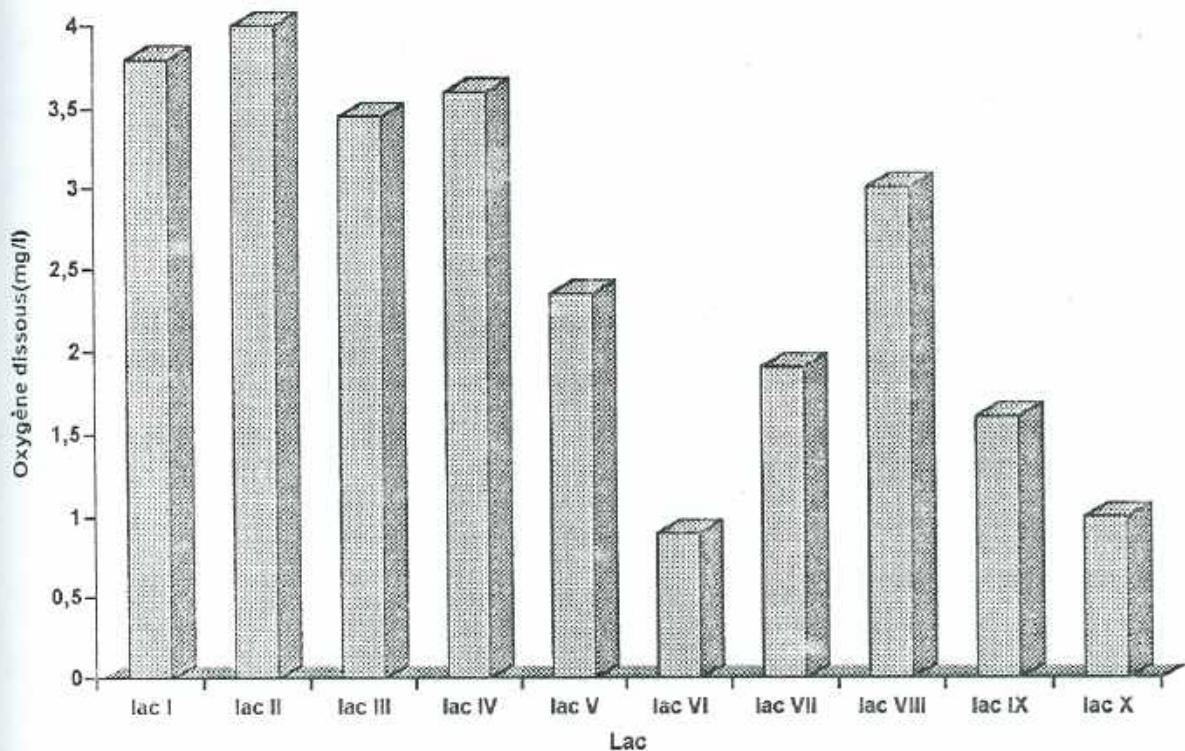


Fig. 15 : Moyennes d'oxygène dissous par lac.

Ce paramètre joue un rôle important pour la vie aquatique car il intervient dans la respiration et la photosynthèse. La figure. 6. ci-dessus montre une désoxygénation liée à l'existence dans les lacs V; VI; VII; IX et X, le phénomène est lié à l'existence des macrophytes dans les lacs précités. Pour les lacs à algues le taux d'oxygène est relativement plus élevé et la valeur excède les 3 mg /l. L'étude des essais en aquarium a permis de mettre en relief ce mécanisme.

d) Les M.E.S.

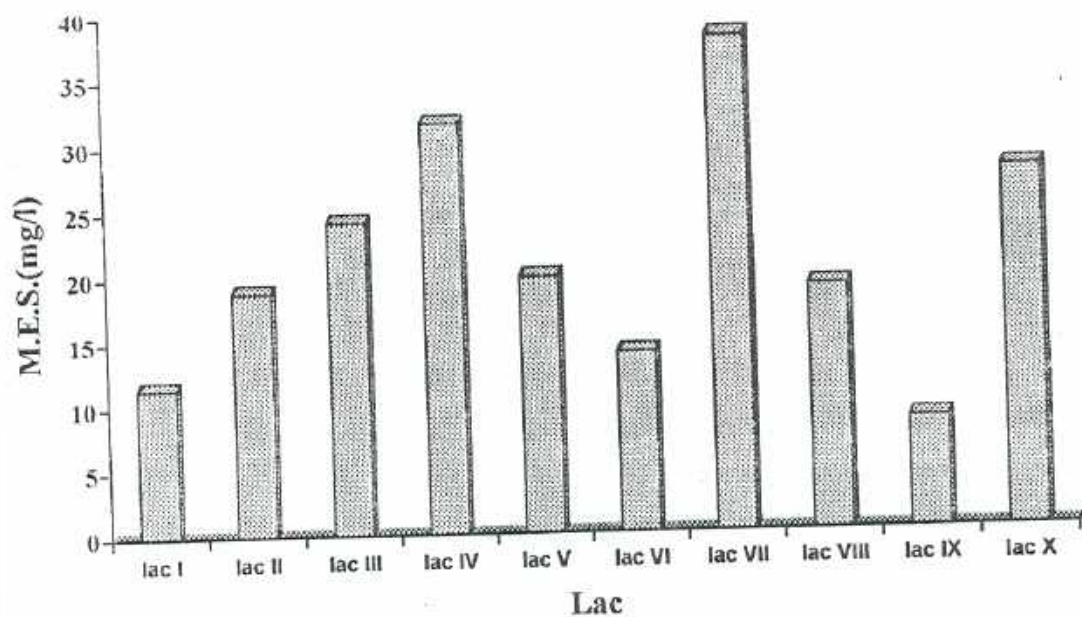


Fig. 16 : Moyennes des matières en suspension (M.E.S.) par lac.



L'étude des matières en suspension (M.E.S ) a permis d'évaluer la charge minérale ou organique non dissoute dont la valeur moyenne pour presque tous les lacs est de 19,85 mg/l pour la période d'étude. La plus grande valeur (tableau.9.) provient du lac VII qui reçoit la majeure partie des eaux usées. Il faut noter que la décantation naturelle et le temps de séjour relativement important de l'eau dans chaque lac contribuent de façon significative à réduire les matières en suspension au vue de la charge apportée par les eaux usées et pluviales; c'est un phénomène d'autoépuration primaire.

### c) Conductivité.

Ce paramètre lié à la salinité de l'eau, est un indicateur du taux de minéralisation de l'eau. Le lac I présente la plus faible moyenne annuelle, la valeur maximale étant donnée par le lac VII comme l'indique la fig.8 ci-dessous.

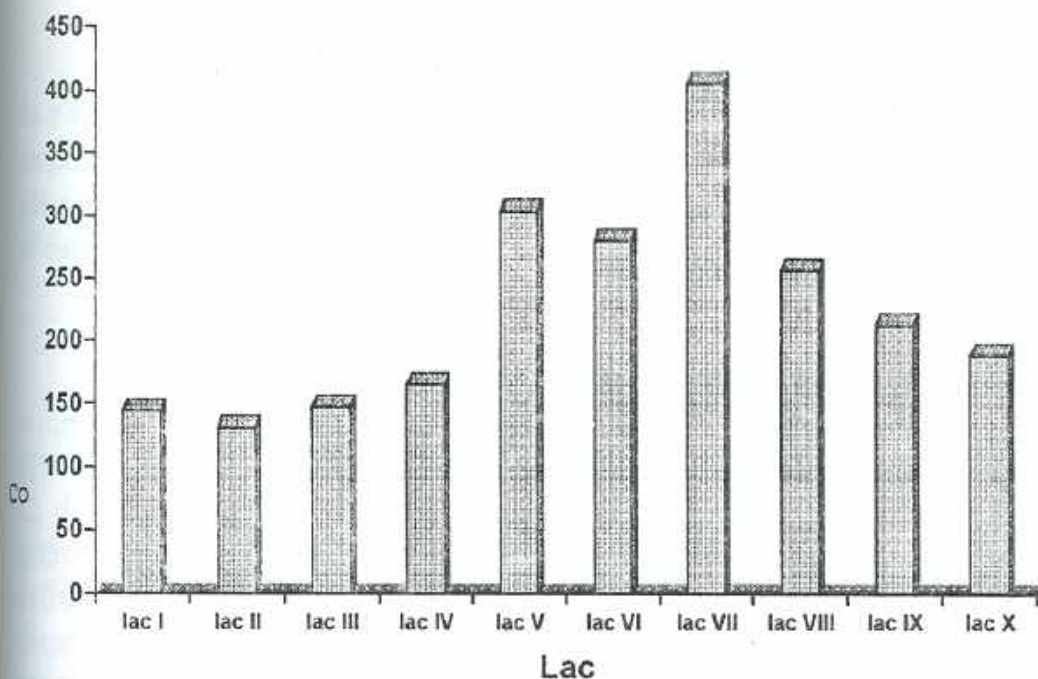


Fig. 17 : Moyennes de la conductivité électrique par lac.

On constate que la valeur moyenne de conductivité augmente lorsqu'on évolue vers les lacs du centre urbain, et dépend des rejets comme l'attestent les résultats sur les eaux usées. Pour tous les lacs la valeur est de 237 µS/cm ce qui correspond à une minéralisation moyenne.

### Conclusion

Il ressort des analyses des résultats que sur le plan statique, le lac I peut être considéré comme celui dont les eaux sont de qualité acceptable

pH=7,3; oxygène dissous =3,8mg/L; conductivité = 144  $\mu$ S/cm. Les lacs en bordure de la présidence connaissent une eutrophisation alguale qui se caractérise par un pH relativement plus élevé autour de 8 et un taux d'oxygène dissous plus élevé que pour les lacs à macrophytes environ 3,5 mg/l . La conductivité électrique varie entre 130 et 165 $\mu$ S/cm. Les autres lacs du tableau 9 comportent pendant une bonne partie de l'étude des macrophytes et présentent un pH légèrement acide liés aux interactions entre l'eau et les macrophytes. Il apparaît également une forte déoxygénation qui tourne autour de 1 mg/l d'O<sub>2</sub>. Les conductivités sont relativement plus élevées et varient entre 203 et 405 $\mu$ S/cm.

Ces résultats montrent déjà une manifestation plus accrue du phénomène d'eutrophisation au fur et à mesure que l'on évolue vers le centre urbain à forte densité de population (cf.tableau.3.) et ayant un fort pourcentage d'habitats évolutifs (plus de 70% ).

## B) ETUDE DES PARAMETRES NUTRITIFS.

Les paramètres abordés ici concernent les éléments comme l'azote et le phosphore dont le rôle dans le domaine de l'eutrophisation est d'une grande importance. L'analyse des résultats conduit d'abord à une étude théorique des éléments azote et phosphore et ensuite leur implication dans le phénomène d'eutrophisation.

### 1) - Azote.

L'azote est la seule substance nutritive qui n'existe pas dans la « matrice rocheuse initiale » et dont l'origine est exclusivement atmosphérique (79% dans l'air ). Dans la biosphère tant végétale qu'animale, à côté du carbone C, de l'hydrogène H et de l'oxygène O, l'azote N est un élément fondamental pour la synthèse des protéines, véritables briques des structures vivantes, des cellules <sup>(18)</sup>. L'accroissement des productions végétales nécessite la mise à disposition des plantes de quantités importantes d'azote. Peu de plantes sont capables d'assimiler l'azote gazeux pourtant omniprésent. La plupart l'assimilent seulement sous forme d'ions nitrate ou ammonium.

Les engrais chimiques azotés sont obtenus à partir de la synthèse de l'ammoniac, matière première pour l'obtention de l'acide nitrique, du nitrate d'ammoniaque et de l'urée. L'ion nitrate est très soluble dans l'eau; c'est la forme minéralisée stable de l'azote.

La plupart des travaux liés à la pollution azotée des eaux rapportent unanimement une augmentation constante de la teneur en azote en général et en nitrate en particulier dans les aquifères exploités pour la distribution d'eau; ainsi certains lacs de Yamoussoukro qui reçoivent régulièrement ces éléments nutritifs sont régulièrement envahis par une végétation aquatique.



L'azote organique se présente sous forme d'ammoniac. L'activité microbienne, à la base de cette transformation, se produit tout au long de l'année, mais son rythme varie surtout en fonction des conditions climatiques parmi lesquelles, la température joue un rôle déterminant. Le taux de minéralisation dépend en outre de la nature des matières organiques, de la quantité de carbone disponible  $\frac{C}{N} < 20$  et du degré d'humidité. Une pollution organique des eaux favorisera une humification au niveau des sédiments suivie de la minéralisation. L'étude de ces sédiments indiquent clairement qu'ils constituent pour les lacs de Yamoussoukro une source potentielle de nutriments azotés <sup>(19)</sup>.

## 2) - Phosphore.

L'élément phosphore peut être apporté aux plantes sous forme de phosphates. Les produits de base nécessaires à la préparation des engrais phosphatés, sont des composés minéraux très peu solubles: phosphate naturel  $Ca_3(PO_4)_2$  ou composés naturels fluorurés-apatite:  $3Ca_3(PO_4)_2, CaF_2$  ou chlorurés  $3Ca_3(PO_4)_2, CaCl_2$ . Ces minéraux sont transformés par action de l'acide sulfurique en espèces actives, solubles et assimilables <sup>(3)</sup> :

- acide phosphorique  $H_3PO_4$

- acide superphosphorique:  $H_3PO_4$  enrichi en  $P_2O_5$ , anhydride phosphorique.

- ions dihydrogénophosphoriques  $H_2PO_4^-$ , engagés dans les phosphates et superphosphates.

Naturellement le phosphore est présent dans l'eau à des concentrations de quelque mg/l à la différence de l'azote du potassium et du carbone. Il est très peu abondant dans la nature et fortement retenu par les sols.

Les lessives sont destinées à faciliter la pénétration de l'eau au sein des tissus et le fractionnement des salissures insolubles. Leur composition fait intervenir plusieurs groupes de substances:

Les tensioactifs dont la structure moléculaire comporte un groupe soluble dans l'eau (hydrophile). Leurs propriétés mouillantes rendent plus intime le contact entre l'eau et la surface à nettoyer ; leurs propriétés émulsionnantes facilitent la dispersion des matières grasses en très fines gouttelettes. Le tensioactif le plus ancien est le savon, sels d'acides gras d'origine animale (suif) ou végétale (huiles) totalement biodégradable.

Les adjuvants sont généralement utilisés pour les eaux dures; ils sont de ce fait des adoucisseurs de lavage. Le tripolyphosphate de sodium (TPP), substance dérivée du phosphore est un très bon agent séquestrant; il disperse les salissures et maintient le pH de la solution de lavage. En France (en 1987) une lessive avec phosphate contenait 30% de TPP, facilement hydrolysable en orthophosphate. C'est sous cette forme qu'il constituera un nutriment en milieu aquatique.



Les adjuvants TPP restent des produits plus efficaces malgré leur apport considérable de phosphore dans les eaux usées domestiques.

*Les détergents* apparaissent comme des polluants potentiels des eaux en phosphore si l'on compare les quantités globales en azote et phosphore contenus dans les eaux usées et celles correspondant aux apports physiologiques, il y a une bonne correspondance pour l'azote, alors que pour le phosphore le rapport dépasse 2 et même 3<sup>(3)</sup> ces excédents s'expliquent surtout par des apports dus aux détergents et dans un degré moindre à la phosphorisation effectuée pour l'adoucissement de l'eau potable pratique que l'on ne rencontre pas à Yamoussoukro car l'eau de SODECI est de dureté acceptable. De nombreuses études signalent la corrélation entre l'accroissement des concentrations en phosphore dans les eaux usées ou dans les eaux superficielles et la quantité globale de détergents phosphorés utilisés: cependant, les premières augmentent plus vite que les deuxièmes<sup>(3)</sup>; Wollenweider<sup>(3)</sup> mentionne que 50% seulement du phosphore des eaux usées proviendraient des détergents. Les détergents contiennent essentiellement des pyrophosphates tétrasodiques  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  ( 27% de P ) et des tripolyphosphates TPP  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  ( 25% de P ).

Le phosphore et l'azote sont les nutriments majeurs dont le rôle dans le phénomène d'eutrophisation est essentiel. Selon le tableau.6., outre ces deux éléments, le carbone apparaît comme important dans la vie des plantes aquatiques.

#### Notion de facteur limitant.

La composition des eaux naturelles est déterminée par quelques processus importants. La régulation de  $\text{O}_2$  et  $\text{CO}_2$  se fait lors de la photosynthèse et de la respiration des organismes vivants et au cours de l'altération des roches.

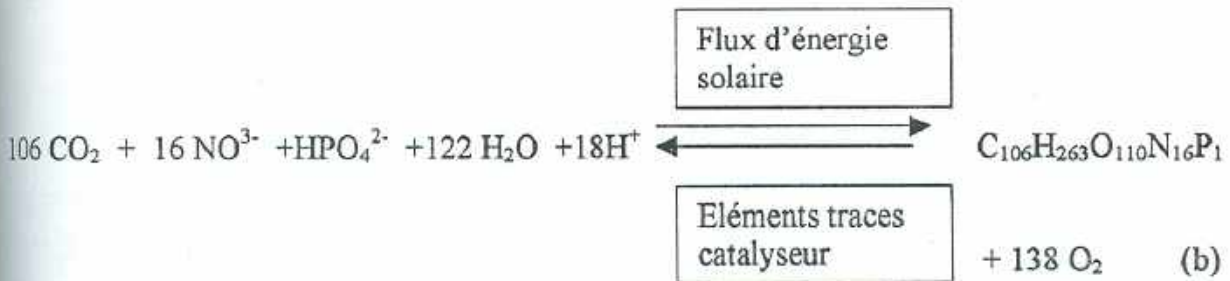
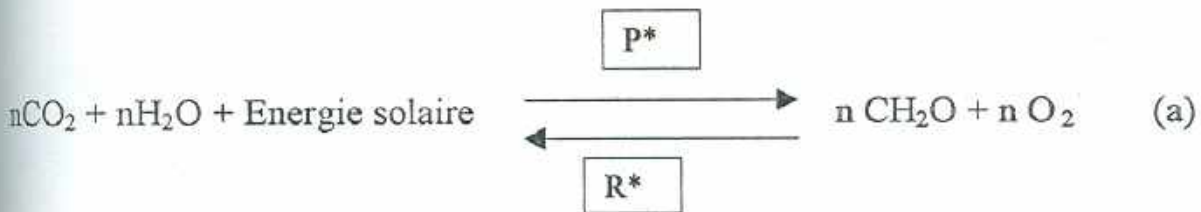
#### - Processus d'altération.

Les processus d'altération consistent en des réactions de dissolution des roches les plus abondantes comme les silicates, les oxydes, et les carbonates. La composition de phases dissoutes résulte de ces réactions. Un écosystème en équilibre est caractérisé par des conditions stables entre  $P^*$  (vitesse de production par photosynthèse de la biomasse) et  $R^*$  (vitesse de minéralisation par respiration de la matière organique).

#### - Interaction entre les organismes et l'eau.

L'équation ci-dessous représente de façon simplifiée la photosynthèse ( $P^*$ ), et le processus de respiration ( $R^*$ ); de nombreuses substances nutritives nécessaires pour la photosynthèse la conduisent de façon naturelle et sous l'effet des rayons solaires à la synthèse du photoplasme d'algue où la stoechiométrie des composants est respectée<sup>(6)</sup>.





Le flux d'énergie nécessaire au système est accompagné sur le cycle des nutriments et celui des éléments traces. Même si la stoechiométrie de la réaction (b) est différente pour chaque système aquatique et pour chaque algue, il est remarquable de constater que la dynamique compliquée: photosynthèse respiration ( $P^* - R^*$ ) pour ces différents organismes peut être transcrite par des relations simples;  $\Delta\text{C} : \Delta\text{N} : \Delta\text{P} \approx 106:16:1$ . où  $\Delta\text{C}$ ,  $\Delta\text{N}$ ,  $\Delta\text{P}$  représentent respectivement les variations de carbone, d'azote et du phosphore au cours des différents processus précités.

L'eutrophisation étant le résultat d'un déséquilibre de l'écosystème en faveur de la prolifération des plantes aquatiques, la réaction évolue dans le sens  $P^*$ . Un apport supplémentaire des éléments P, N et C augmente ce phénomène. De nombreux travaux se sont penchés sur la recherche du nutriment le plus important entre l'azote et le phosphore dont le contrôle peut freiner la production végétale. Cet élément est désigné sous le nom de **facteur limitant**<sup>(2)</sup>. En effet ce sont les éléments essentiels intervenant dans la photosynthèse; donc si l'un venait à manquer il pourrait freiner le développement de la plante.

Lorsqu'on applique le concept de facteur limitant à une situation donnée, on suppose qu'un seul élément nécessaire à la photosynthèse peut être contrôlé pour parvenir à enrayer le phénomène.

La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître ce rôle au phosphore surtout en zone tempérée. Cependant certains auteurs<sup>(20) et (21)</sup> indiquent que l'azote est le facteur limitant en zone tropicale. Dans cette étude le phosphore apparaît comme un facteur limitant comme le témoignent les résultats. \*

Des trois éléments C, P et N qui interviennent dans la photosynthèse, le carbone et l'azote se retrouvent en abondance dans la nature donc difficilement contrôlables, contrairement au phosphore. Pour Golterman,<sup>(9)</sup> il

n'est pas indispensable de savoir si le phosphore est le facteur limitant ou non; le fait est que c'est l'élément essentiel qui puisse être facilement contrôlé au point de le rendre limitant.

### 3) - Résultats

#### a) Résultats liés au phosphore.

Cette analyse doit situer la qualité des eaux des différents lacs en comparaison avec les valeurs observées en zones tempérées. Elle doit en outre donner des renseignements sur l'origine des ions phosphates et polyphosphates retrouvés dans le milieu étudié.

L'étude a porté sur un système lacustre soumis à des influences diverses, mais alimentés par les eaux de même origine. Cette dernière considération permet de relier l'état trophique des lacs à leur environnement activités sur les berges, type d'eau reçue par les lacs etc.

La teneur en phosphates des eaux, du phosphore total et du taux de phosphores contenus dans les matières en suspension (M.E.S ) interviennent dans cette étude.

#### Les phosphates.

L'analyse des phosphates dans les eaux a été effectuée pendant une année. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

**Tableau 11**  
Moyennes des concentrations de phosphate  $\text{PO}_4^{3-}$  par lac.

| Lacs.                    | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | Moy  |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Concentration.<br>(mg/l) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 |



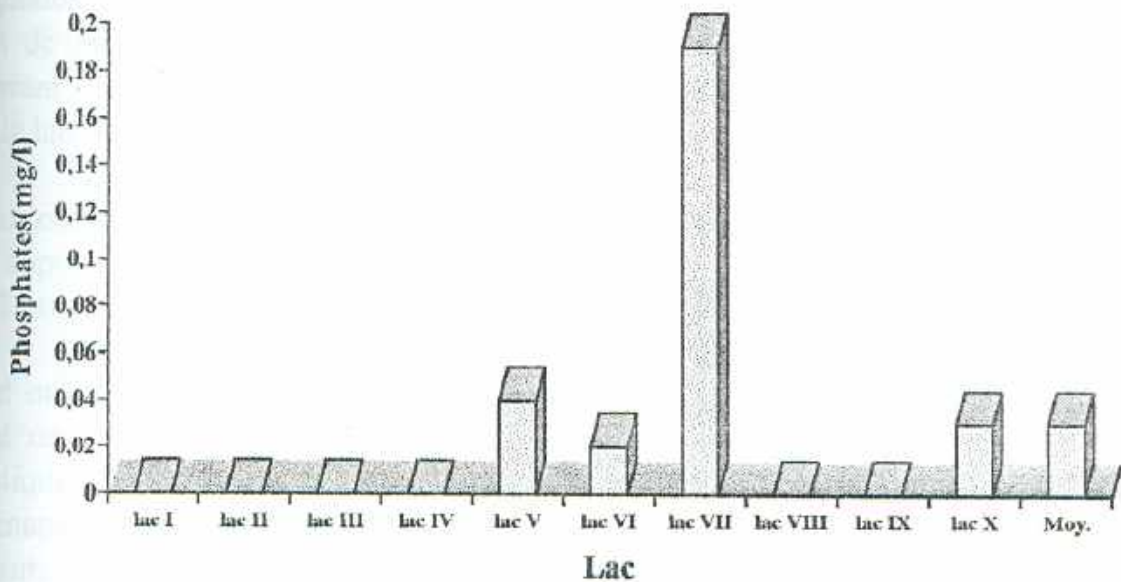


Fig. 18 : Moyennes des phosphates par lac.

Les résultats de la Fig 18 nous donnent pour toute l'année, des moyennes quasiment nulles en tenant compte du seuil de détection de nos appareils de mesures, pour les lacs I, II, III et IV en bordure de la Présidence sans macrophyte et des lacs VIII et IX comportant tout de même des lotus et des jacinthes naines à leurs abords. Les autres lacs V, VI, VII et X ont des teneurs non nulles en phosphates et comportent en abondance des macrophytes. Cependant l'on a procédé à l'arrachage des macrophytes dans le lac V en cours d'étude. Il semble donc que l'existence de phosphates dans la colonne d'eau implique celle des macrophytes ou rend le terrain favorable à leur prolifération.

La teneur moyenne annuelle de phosphates est de 0,030 mg/l pour l'ensemble des lacs étudiés ( Fig.18. ).

Cette figure montre que pour les lacs I et II le taux de phosphate est pratiquement nul impliquant, compte tenu de l'absence de plantes, de faible présence d'algues, et sans apports exogènes.

Le lac IV a une faible présence de phosphate voisine de 0,01mg/l, mais la présence importante des algues dans ce lac comme en témoigne les valeurs de Chlorophylle a, suggère la recherche d'une source exogène et endogène permanente de nutriments qui peuvent être relativement importants mais assimilés par les algues.

Le lac V montre des concentrations relativement plus importantes en phosphates de 0,04mg/l. Malgré la présence abondante dans ce lac jusqu'en juillet de jacinthes d'eau, ces taux élevés sont la marque d'apport extérieur important. Le lac VII possède le taux le plus élevé en phosphates et constitue pour le lac V une source en phosphates.

Pour le lac VI dont le point en aval est le point de prélèvement n°15, le taux obtenu constitue un bilan de l'ensemble des autres lacs en amont, de leurs apports et de l'action épuratoire des jacinthes. Sa valeur moyenne se cadre à 0,02 proche de la moyenne générale autour de 0,03mg/l.

Quant aux lacs VIII, IX et X leurs valeurs évoluent vers la baisse quand on se déplace dans le sens d'écoulement des eaux et par conséquent, quand on se rapproche du centre urbain. Ceci constitue un paradoxe, mais s'explique par les rejets urbains importants qui se déversent dans le lac X en provenance d'un bassin important et peuplé avec une densité égale à 88 habitants / ha. Ces apports exogènes sont ensuite assimilés par les macrophytes enracinés qui sont présents dans ces lacs

#### Phosphore total dans l'eau brute.

L'analyse du phosphore total dans l'eau brute et dans l'eau filtrée a été effectuée pendant une année. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

**Tableau 12**

Moyennes en mg/l de phosphore total pour l'eau brute et l'eau filtrée.

| Lacs.                            | I      | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | Moy.  |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eau brute                        | 0,08   | 0,075 | 0,110 | 0,180 | 0,210 | 0,120 | 0,480 | 0,120 | 0,080 | 0,150 | 0,160 |
| Eau filtrée                      | 0,01   | 0,015 | 0,015 | 0,03  | 0,042 | 0,03  | 0,15  | 0,02  | 0,01  | 0,02  | 0,04  |
| Mésotrophe<br>valeur de seuil    | 0,0267 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Eutrophe<br>valeur de seuil      | 0,084  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Hypereutrophe<br>valeur de seuil | > 0,84 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |



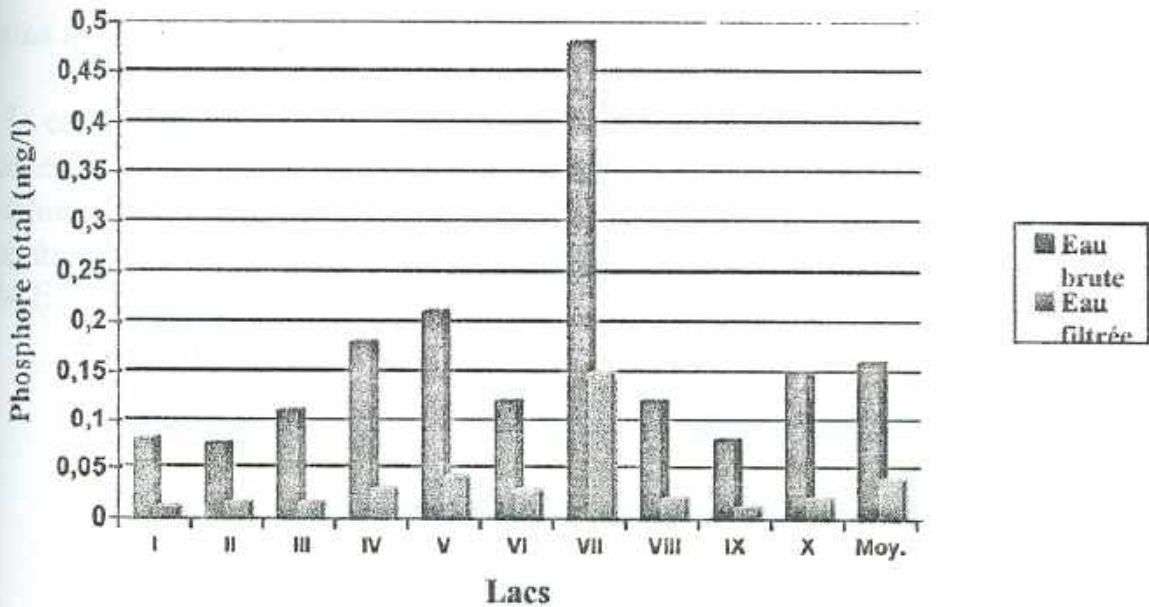


Fig. 19 : Moyennes de phosphore total de l'eau brute et de l'eau filtrée par lac.

Le taux de phosphore total augmente quand on se dirige vers le lac V qui recueille toutes les eaux des différents lacs avec une moyenne globale de 0,2mg/l de  $P_{tot}$  pour l'eau brute et 0,03 /l pour l'eau filtrée.

Le cas du lac VII est inquiétant car il affiche un apport de  $P_{tot} = 0,48$  mg/l; ceci est dû à son débit et surtout à son emplacement.

Les concentrations moyennes des eaux du lac VI sont égales à 0,12mg/l de phosphore pour l'eau brute et 0,03mg/l de phosphore pour l'eau filtrée. Ces valeurs, un peu plus faibles que les valeurs moyennes générales (0,16mg/l pour l'eau brute et de 0,04 mg/l pour l'eau filtrée), sont expliquées par l'effet épurant exercé par des macrophytes (jacinthes) situées en amont.

Le taux de phosphore des eaux du lac I et du lac IX sont équivalents. Il faut noter l'absence de plantes dans le lac I et la présence de ces plantes dans le lac IX. Ces plantes utilisent une bonne partie du phosphore : on comprend alors que ces deux lacs n'ont en réalité pas le même degré de fertilisation due au phosphore.

Le taux de phosphore total dans l'eau filtrée de tous les lacs comparée à celui de l'eau brute dans les mêmes conditions, indiquent 0,04mg/l et 0,16mg/l. Cela représente approximativement 25% de P dans l'eau filtrée et 75% de P dans les M.E.S.

Cependant, si on considère les points ou les lacs pour lesquels les teneurs en phosphore total ne sont pas négligeables, la forme soluble dans l'eau est souvent majoritaire.

Les résultats mettent en évidence le rôle de pollueur exercé par certains quartiers de la ville de Yamoussoukro.

La grande similitude de profil des deux courbes de la figure 19 ainsi que la courbe de régression linéaire de la figure 20 confirment l'interprétation précédente. En effet, la courbe de régression linéaire pour les deux formes de phosphore donne pour équation  $Y = 0,2999X - 0,0103$  mettant ainsi en relief une corrélation entre les deux formes du phosphore total soit 70% de phosphore dans les M.E.S. et 30% dans l'eau brute.

**Tableau 13**

Moyenne du phosphore total eau filtrée par lac.

|                                |       |      |       |       |      |      |       |      |
|--------------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| P <sub>tot</sub> (eau brute)   | 0,075 | 0,08 | 0,110 | 0,012 | 0,15 | 0,18 | 0,21  | 0,48 |
| P <sub>tot</sub> (eau filtrée) | 0,01  | 0,01 | 0,015 | 0,03  | 0,02 | 0,03 | 0,042 | 0,15 |

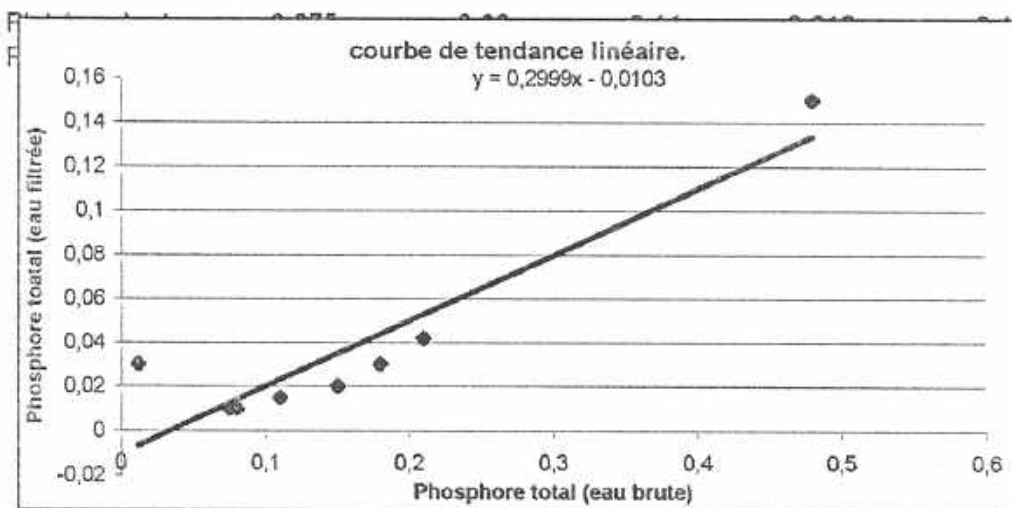


Fig. 20 : Courbe de corrélation phosphore total eau filtrée et eau brute.

### c) Teneur en P<sub>tot</sub> des M.E.S

L'analyse du phosphore total dans les M.E.S. a été effectuée pendant une année. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

**Tableau 14**

Teneur moyenne des M.E.S. en phosphore.

| Lacs.         | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | Moyenne |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| $\bar{P}$ (%) | 0,61 | 0,32 | 0,40 | 0,48 | 0,85 | 0,65 | 0,87 | 0,53 | 0,83 | 0,65 | 0,62    |



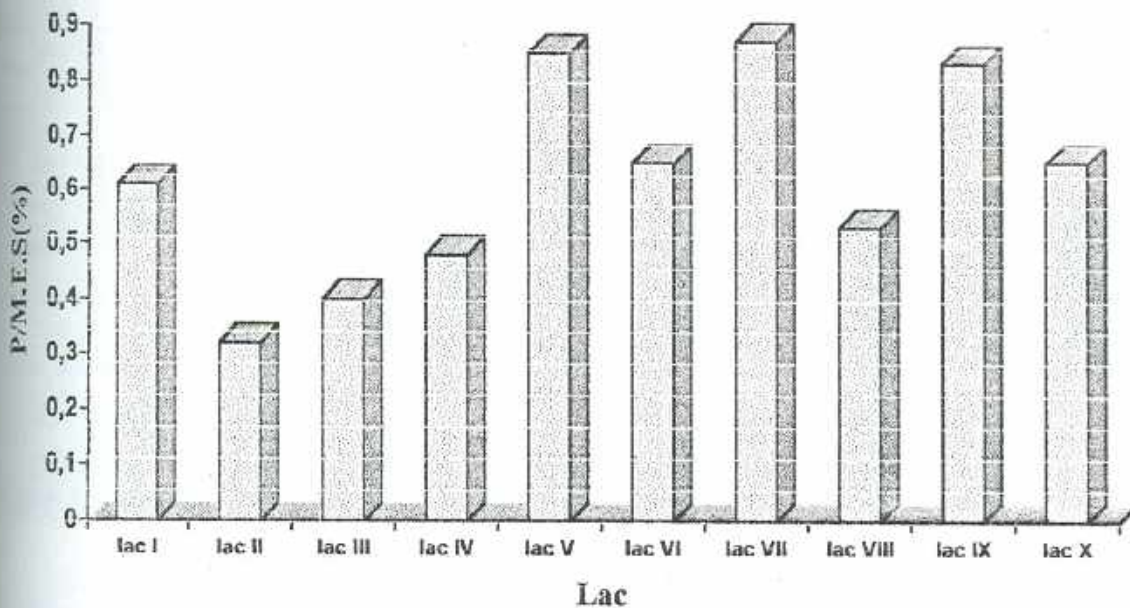


Fig. 21 : Teneur en phosphore total des matières en suspension par lac.

Le taux de  $P_{\text{tot}}$  augmente selon le sens d'écoulement des eaux (c'est à dire en direction du centre urbain). Ces observations s'interprètent de la même manière que pour l'analyse du phosphore total contenu dans les eaux brutes ou filtrées.

#### b) Azote:

##### Azote total Kjeldhal (N.T.K).

L'analyse de ce nutriment a été effectuée de juillet à décembre et a donné les résultats suivants :

**Tableau 15**  
Résultats liés à l'azote Kjeldhal par lac.

| Lacs          | NTK (EF)<br>(mg/l)                                    | NTK (EB)<br>(mg/l) | $\Delta$ NTK<br>(mg/l) | $\frac{NTK}{MES}$ (%) | $\frac{\Delta NTK}{NTK}$ (%) |
|---------------|---|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| lac I         | 2,11  | 3,58               | 1,47                   | 12,88                 | 41,06                        |
| lac II        | 2,11  | 3,82               | 1,71                   | 9,09                  | 44,76                        |
| lac III       | 2,1   | 4,7                | 2,6                    | 10,8                  | 55,3                         |
| lac IV        | 2,4   | 4,33               | 1,93                   | 6,11                  | 44,57                        |
| lac V         | 2,4   | 3,99               | 1,59                   | 8,04                  | 39,85                        |
| lac VI        | 2,2   | 3,9                | 1,7                    | 12,27                 | 43,59                        |
| lac VII       | 4,1   | 4,95               | 0,85                   | 2,24                  | 17,17                        |
| lac VIII      | 1,9   | 3,43               | 1,53                   | 8,12                  | 44,6                         |
| lac IX        | 1,93  | 3,25               | 1,32                   | 16,07                 | 40,6                         |
| lac X         | 1,94  | 3,65               | 1,71                   | 12,95                 | 46,85                        |
| moyennes      | 2,38  | 3,99               | 1,61                   | 8,11                  | 40,35                        |
| mésotrophe    | Valeur du seuil du système de classification O.C.D.E  |                    |                        | 0,753mg/l             |                              |
| eutrophe      | Valeur du seuil du système de classification O.C.D.E  |                    |                        | 0,84mg/l              |                              |
| hypereutrophe | Valeur du seuil du système de classification O.C.D.E. |                    |                        | >0,84mg/l             |                              |

L'azote total Kjeldhal, se répartit entre l'eau et les M.E.S. De juillet à décembre, les valeurs obtenues montrent une répartition d'environ 40% dans les M.E.S et 60% dans l'eau. Malgré la présence des plantes dans la plupart des lacs, ce rapport ne semble pas subir de grandes variations tel que le montre la figure 23.

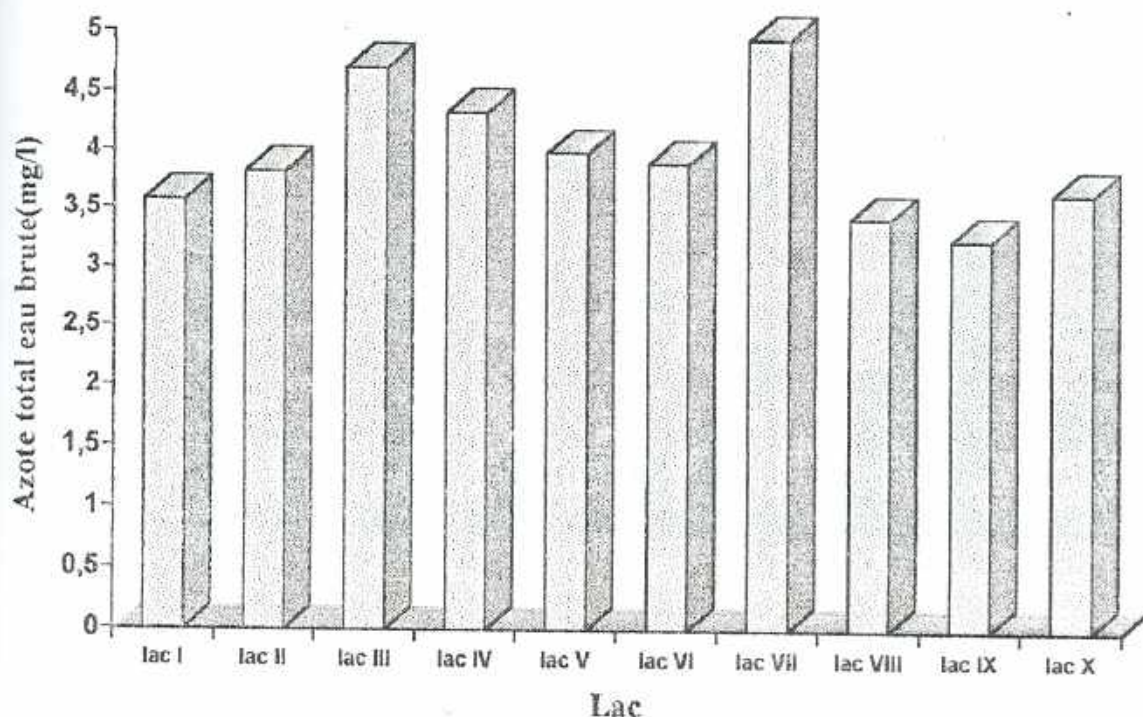


Fig. 22 : Moyenne de l'azote total NTK dans l'eau brute par lac.



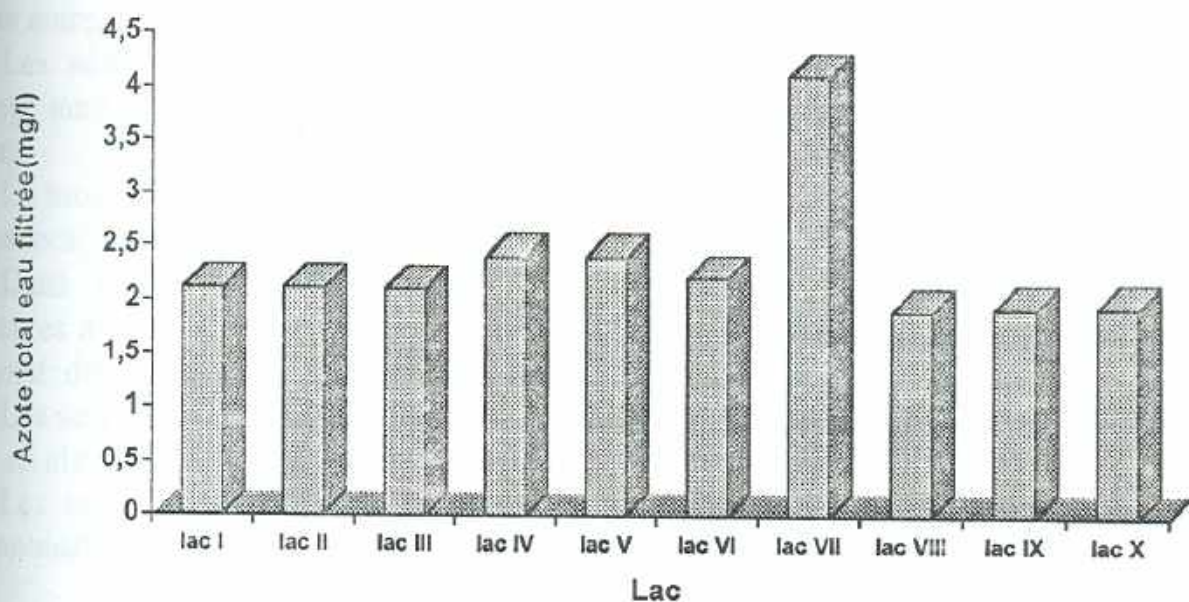


Fig. 23 : Moyenne de NTK dans l'eau filtrée par lac.

Quels que soient les lacs, les différentes valeurs sont relativement très proches les unes les autres et voisines de la valeur moyenne 2,38 mg/l; hormis pour le lac VII dont la moyenne est environ 5 mg/l.

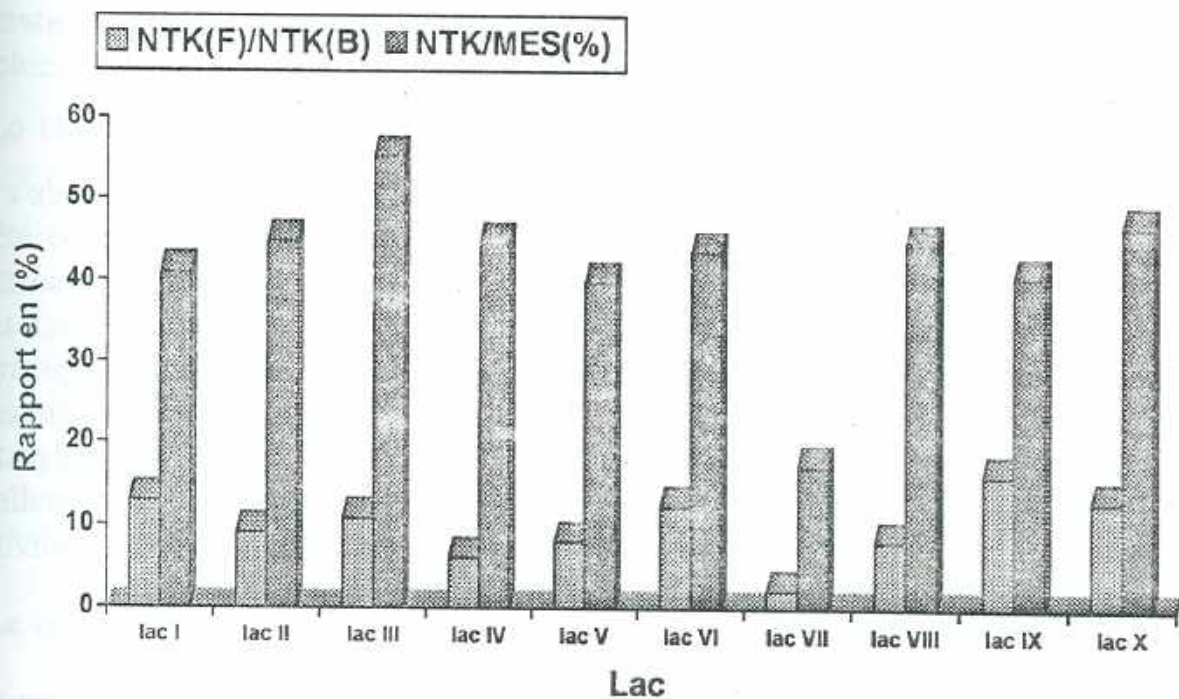


Fig. 24 : Proportion de l'azote total NTK dans les M.E.S. et dans l'eau filtrée par lac.

L'apport en azote semble être constant même si les sources varient d'un lac à un autre, ce qui n'était pas le cas pour le phosphore.

Les sédiments sont des sources endogènes de nutriments azotés par relargage mais aussi des sources directes pour les macrophytes enracinés comme les lotus.

La moyenne annuelle est environ 2 mg/l dans le cas de l'eau filtrée pour tous les lacs. Seule la proportion du lac VII est supérieure : 4,1 mg/l.

Dans le cas des eaux brutes, les valeurs observées sont élevées, supérieures à 4 mg/l, pour les lacs III, IV et VII, proches du centre, les autres lacs ayant des valeurs inférieures allant de 3 à 4 mg/l.

Les valeurs trouvées pour les deux premiers lacs III et IV sont dues à leur teneur en algue et à la présence des excréments des caïmans.

Les taux d'azote observés, placent la plupart des lacs étudiés dans un état d'eutrophisation avancée.

### c) Corrélation entre les indicateurs trophiques et caractéristiques nutritives des lacs: recherche du facteur limitant.

Bien qu'aucune raison majeure ne permette de supposer l'existence dans les conditions originelle, d'une corrélation entre l'azote et le phosphore, les études consacrées aux lacs du programme de l'O.C.D.E.,<sup>(5)</sup> font apparaître une tendance générale de l'azote et du phosphore à se manifester par une concentration accrue, depuis le stade de l'oligotrophie jusqu'à celui de l'eutrophie.

Le rapport  $\frac{N}{P}$ , qui est en moyenne de plus de 100 en situation oligotrophe s'abaisse à moins de 10 pour une situation eutrophe<sup>(5)</sup>. Ce fait est interprété comme une tendance des lacs de trophie croissante à passer de la dépendance vis à vis du phosphore à celle de dépendance vis à vis de l'azote. Certains lacs<sup>(20)</sup> peuvent échapper à cette règle, indépendamment de leurs caractéristiques trophiques. Ainsi, le comportement des lacs hypertrophiques peut très bien ne dépendre aucunement de la charge nutritive, mais de l'effet de la photosynthèse. Un brassage en profondeur ou une fréquence élevée de renouvellement des eaux constituent d'autres facteurs susceptibles de rendre la productivité moins dépendante des caractéristiques nutritives<sup>(5)</sup>.

Le tableau 16 suivant donne le rapport  $\frac{NTK}{P_{tot}}$  des lacs de Yamoussoukro pour les eaux brutes et filtrées.



Tableau 16

Rapport de l'azote total NTK et du phosphore total pour l'eau brute et l'eau filtrée.

| Paramètres<br>Lacs | $\frac{\text{NTK}}{\text{P}_{\text{tot}}}$ (EF) | $\frac{\text{NTK}}{\text{P}_{\text{tot}}}$ (EB) | rang dans le classement de l'état trophique décroissant. |
|--------------------|---|---|--|
| Lac I              | 211   | 44,75   | 10   |
| Lac II             | 140   | 50,9  | 8  |
| lac III            | 140   | 42,73   | 7  |
| Lac IV             | 80  | 24,05   | 4  |
| Lac V              | 57  | 19  | 2  |
| Lac VI             | 73  | 32,5  | 3  |
| Lac VII            | 27,33   | 10,31   | 1  |
| Lac VIII           | 95  | 28,58   | 6  |
| Lac IX             | 193   | 40,62   | 9  |
| Lac X              | 97  | 24,33   | 5  |

Selon le rapport O.C.D.E que nous venons de citer, ces règles étaient les principaux critères utilisés en zone tempérée pour décrire l'état trophique d'un réservoir d'eau et particulièrement pour déterminer le facteur limitant, à

condition que ce rapport  $\frac{\text{NTK}}{\text{P}_{\text{tot}}}$  prenne en compte l'azote et le phosphore biodisponible c'est à dire généralement les formes solubles. De nombreux auteurs<sup>(2,7et8)</sup> s'accordent pour dire que ce rapport est généralement faible en zone tropicale et que l'azote est le plus souvent l'élément limitant le développement de la biomasse alguale. De plus, ils estiment que la production de la biomasse y est relativement constante tout au long de l'année.

Dans cette étude l'azote total Kjeldhal (NTK) a été retenu. En effet, les résultats des analyses ne donnaient pour la période d'étude aucune valeur significative en nitrate et il doit exister une corrélation entre l'azote biodisponible et le NTK.

Il apparaît utile d'analyser ce rapport en fonction des lacs afin d'établir des comparaisons avec l'évolution des autres paramètres.

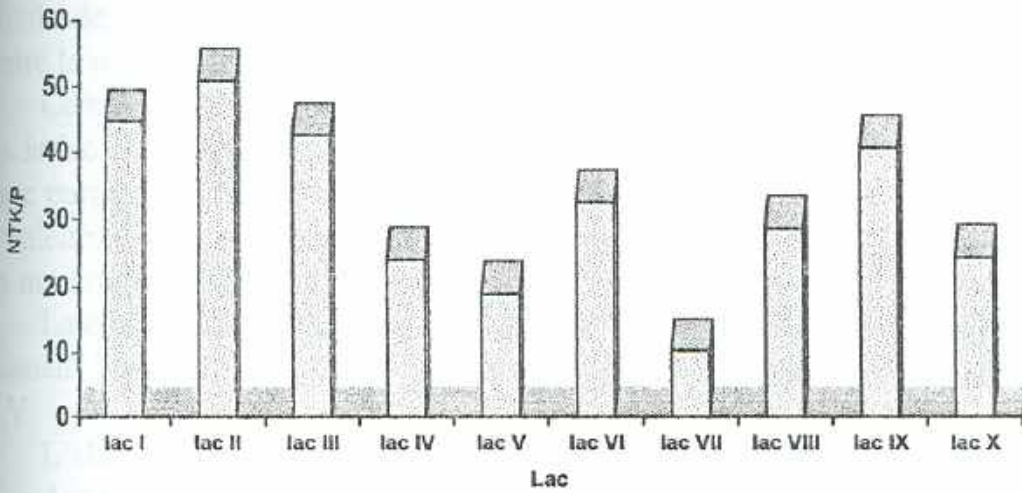


Fig. 25 : Rapport  $\frac{NTK}{P_{tot}}$  pour l'eau brute par lac.

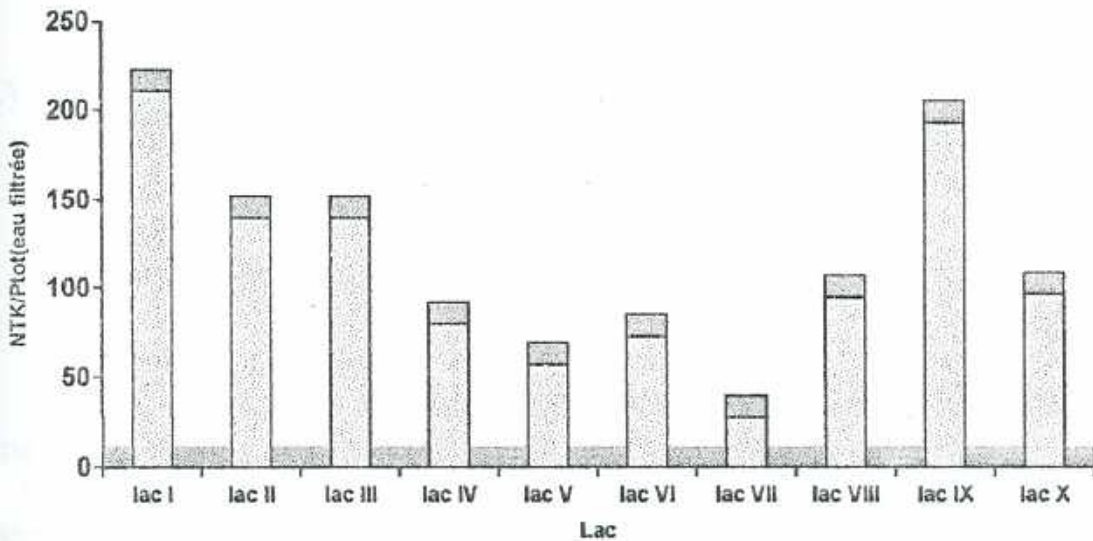


Fig. 26 : Rapport  $\frac{NTK}{P_{tot}}$  pour l'eau filtrée par lac.

Si la valeur de ce rapport est inférieure à 7,2, cela signifie que l'azote est le facteur limitant de la croissance pour les algues, si elle est supérieure, c'est alors le phosphore qui le devient<sup>(5)</sup>.

Quelles que soient les formes de l'azote ou du phosphore, soluble totalement ou non, ce rapport est toujours supérieur à 7,2 comme le montrent le tableau 15 et les figures 26 et 27.



Le lac VII est celui qui se rapproche le plus de cette valeur limite. Toutefois, comme il s'agit d'un lac où les deux éléments sont en excès, il est difficile de conclure que pour ce lac l'azote soit l'élément limitant. Tout ceci montre le rôle limitant du phosphore dans l'eutrophisation des lacs étudiés.

Ce rapport diminue pour les autres lacs au fur et à mesure qu'on se dirige vers le lac V et cela quel que soit le type d'eau considérée, filtrée ou non. La forme particulière de la courbe d'évolution de ce rapport paraît cohérente avec les valeurs d'autres paramètres comme l'oxygène dissous, la conductivité, etc.. Elle montre la singularité des lacs V; VI et VII.

La conséquence de cela indique avec toutes réserves que le phosphore soit l'élément limitant. Il l'est davantage encore pour les lacs I, II et III que pour le lac V.

L'absence de jacinthe dans ces premiers lacs confirmerait cette hypothèse.

A partir de résultats de ces rapports nous avons établi un classement par ordre d'importance d'avancement de l'état trophique des lacs.

En conclusion, le phosphore apparaît ici comme l'élément important et maîtrisable dont l'élimination pourrait freiner le phénomène d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro.

## C) PARAMETRES INDICATEURS DE LA POLLUTION ORGANIQUE.

Les études ont été effectuées sur une période de cinq mois.

### 1-Indice permanganate.

#### a) Considération d'ordre théorique.

Le taux de matière organique est estimé par la détermination de l'oxygène utilisé au cours de la réduction du permanganate de potassium.

L'inconvénient des matières organiques est de faciliter le développement des germes, algues et champignons.

Il n'est pas possible de doser véritablement les matières organiques d'origine animale ou végétale que renferment les eaux. Leur teneur est appréciée, le plus souvent, par des tests tels que la réduction du permanganate de potassium en milieu acide ou alcalin. En réalité, au cours des essais les substances oxydées ne sont pas seulement d'origine organique mais elles sont également d'origine minérale : sulfure, nitrites, ammoniacales. Il est difficile de tirer une conclusion sur l'origine végétale ou animale des substances présentes.

Le tableau suivant donne une classification des eaux à partir des résultats d'oxydation au  $\text{KMnO}_4$  <sup>(10)</sup>.





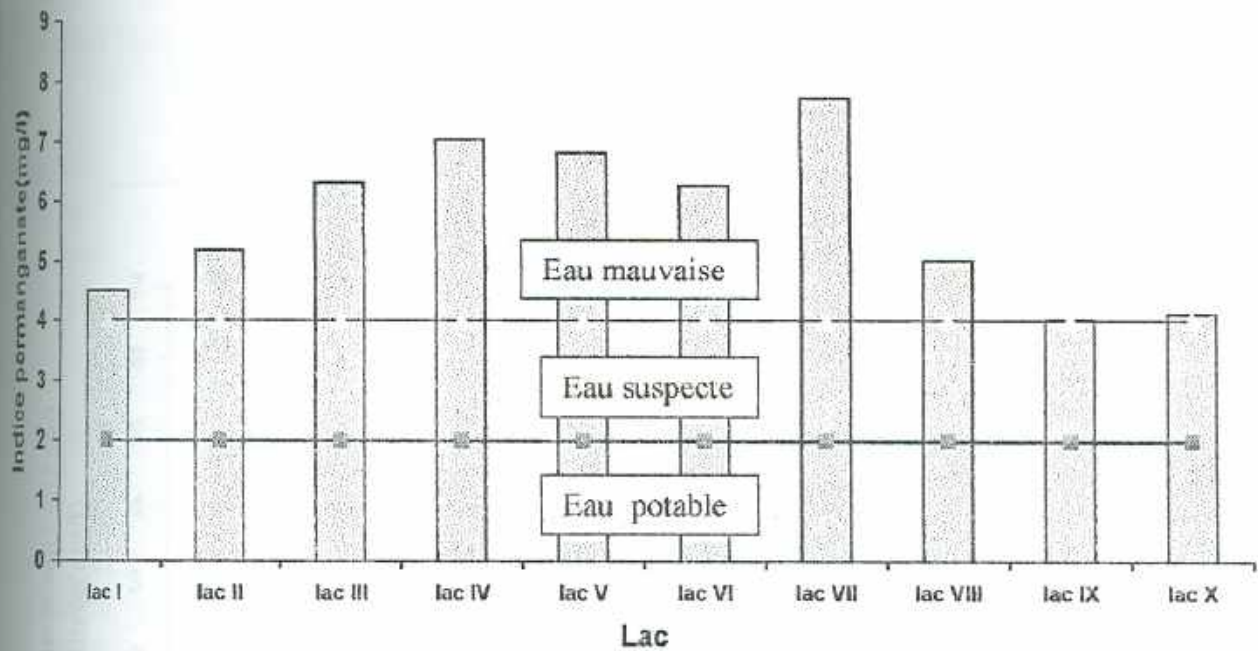


Fig. 27 : Moyennes de l'indice permanganate pour l'eau brute par lac.

Les valeurs obtenues sont importantes pour la plupart de ces lacs mais plus faibles pour les lacs IX et X.

Les valeurs obtenues supérieures à 4mg/l d' $O_2$  indiquent que l'eau brute de chaque lac est de mauvaise qualité.

Tableau 19

Moyenne des valeurs d'oxydation au  $KMnO_4$  eau filtrée.

| Lac.                | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PI(F)<br>mg/l $O_2$ | 3,39 | 3,19 | 3,48 | 3,51 | 4,27 | 4,33 | 5,81 | 3,25 | 2,7  | 2,8  |
| $\Delta PI$         | 1,1  | 1,99 | 2,84 | 3,54 | 2,56 | 1,95 | 1,94 | 1,78 | 1,32 | 1,31 |

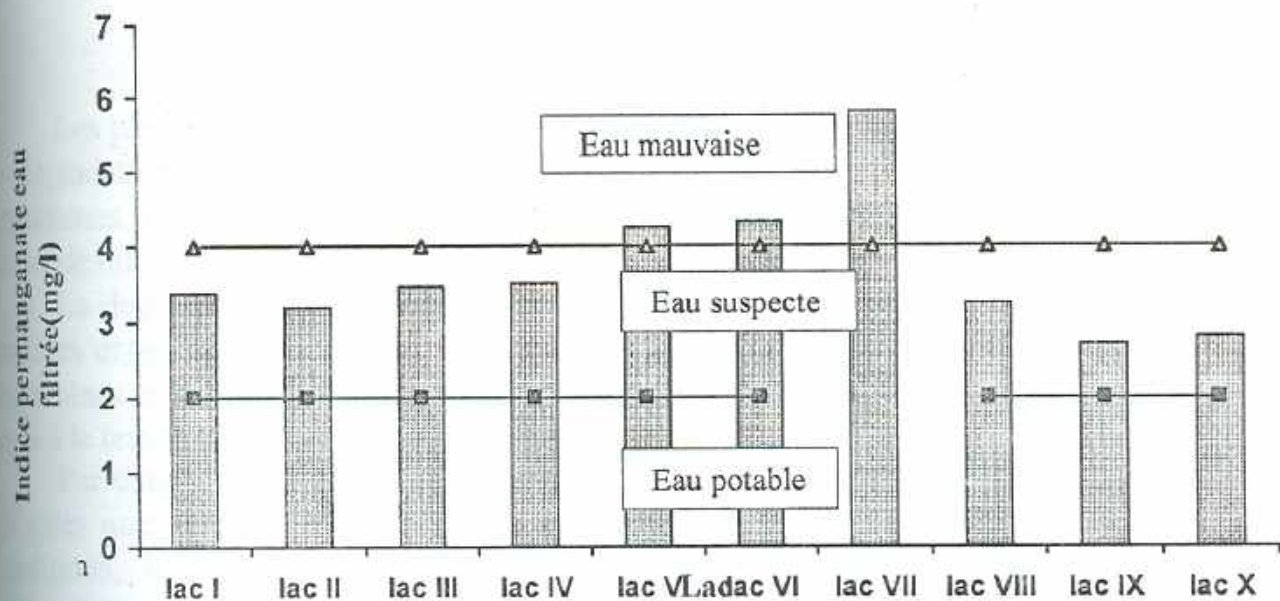


Fig. 28 : Moyennes de l'indice permanganate pour l'eau filtrée.

L'indice permanganate des eaux filtrées des lacs I à IV (sans macrophytes) et des lacs VIII, IX et X (avec macrophytes) ont des valeurs relativement plus faibles. Les lacs V, VI et VII donnent les moyennes les plus élevées, révélant une pollution organique plus importante.

La différence des valeurs de l'indice permanganate dans les eaux brutes et filtrées est d'environ 2 mg/l. Cette différence due aux M.E.S montre qu'une partie non négligeable (35%) des matières organiques se retrouve probablement dans les sédiments qui créent à terme une source potentielle d'envasement des lacs.

Les études effectuées entre les deux catégories d'eau : eau brute et eau filtrée des lacs à algues et à macrophytes ont montré que l'indice permanganate est plus important pour les lacs à algues.

En effet, pour le lac IV à algues, l'indice permanganate pour l'eau brute et l'eau filtrée, a pour valeurs respectives 7,3 et 3,8 mg/l  $O_2$  soit un  $\Delta PI = 3,5$  mg/l de  $O_2$ .

Pour le lac VI à jacinthes d'eau, ces valeurs sont respectivement de 6,0 et 4,7 mg/l  $O_2$  soit un  $\Delta PI = 2,3$  mg/l  $O_2$ .

Pour les lacs à lotus: lac V :  $\Delta PI = 2,6$  mg/l  $O_2$  et lac X :  $\Delta PI = 1,3$  mg/l  $O_2$ .



Ces observations sont en accord avec les résultats antérieurs. Il apparaît que la teneur en matières organiques des M.E.S est plus importante pour les lacs à algues que pour les lacs à macrophytes.

Par ailleurs, la comparaison avec tableau 16 de la partie théorique montre que le taux d'indice permanganate pour la plupart des lacs est assez élevé, ce qui suppose une contamination microbienne. Ceci a été confirmé par les résultats des travaux de A. O. ALLE<sup>(19)</sup> sur le même site.

## 2- DBO<sub>5</sub> et DCO.

### **a) Demande biochimique en oxygène (DBO).**

Les phénomènes d'autoépuration dans les eaux superficielles résultent de la dégradation des charges organiques polluantes, sous l'action de micro-organismes. Il en résulte une consommation en oxygène qui s'exprime par la demande biochimique en oxygène ou D.B.O.

La dégradation des composés glucidiques, lipidiques et protéidiques des matières organiques se traduit, dans un premier temps, par une décomposition des chaînes carbonées<sup>(10)</sup>. Celle-ci commence immédiatement et dure environ 20 jours à la température de 20°C.

Par contre le début de la transformation des matières azotées n'apparaît qu'après une dizaine de jours et demande beaucoup plus de temps. Dans ces conditions, il a été conventionnellement retenu d'exprimer la D.B.O. en milligrammes d'oxygène consommé pendant 5 jours à 20°C. Les eaux de surface destinées à la consommation ne devraient pas avoir une D.B.O. supérieure à 4 mg/l, sauf si l'on applique des traitements particuliers.

Par contre en zone polluée, elles peuvent avoir une D.B.O. de plusieurs milligrammes par litre, ce qui, dans les limites raisonnables, peut être plutôt favorable à la vie aquatique<sup>(10)</sup>.

### **b) Demande chimique en oxygène (D.C.O.)**

Dans les conditions expérimentales définies par la méthodologie, confer deuxième partie, la D.C.O. correspond à la teneur de l'ensemble des matières organiques, que celles-ci aient un caractère biodégradable ou non. Elle s'exprime par la quantité d'oxygène fournie par le bichromate de potassium et nécessaire à l'oxydation des substances organiques (protéines, glucides, lipides...) présentes dans les eaux résiduaires.

Etant donné les conditions (température), le pouvoir oxydant du réactif (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) et l'emploi d'un catalyseur (AgSO<sub>4</sub>), les résultats sont plus élevés que ceux obtenus avec le permanganate de potassium.

Cependant, d'une façon générale, les composés azotés ainsi que certains noyaux aromatiques et certaines chaînes aliphatiques peuvent échapper à l'oxydation.

Les différences des résultats obtenus par la D.C.O. et la D.B.O. constituent une indication de l'importance des matières peu ou pas biodégradables.

Ces paramètres sont des indicateurs pour l'appréciation de la pollution organique.

Afin de déceler leur degré de pollution, ces analyses ont été effectuées pour cinq lacs :

lac I (sans plantes aquatiques),

lac V (avec des algues pendant la période d'analyse: 7/1996 à 2/1997),

lac VI (comportant des jacinthes d'eau ),

lac VII (marécageux qui a été pris comme point d'égout pour le lac V ) et

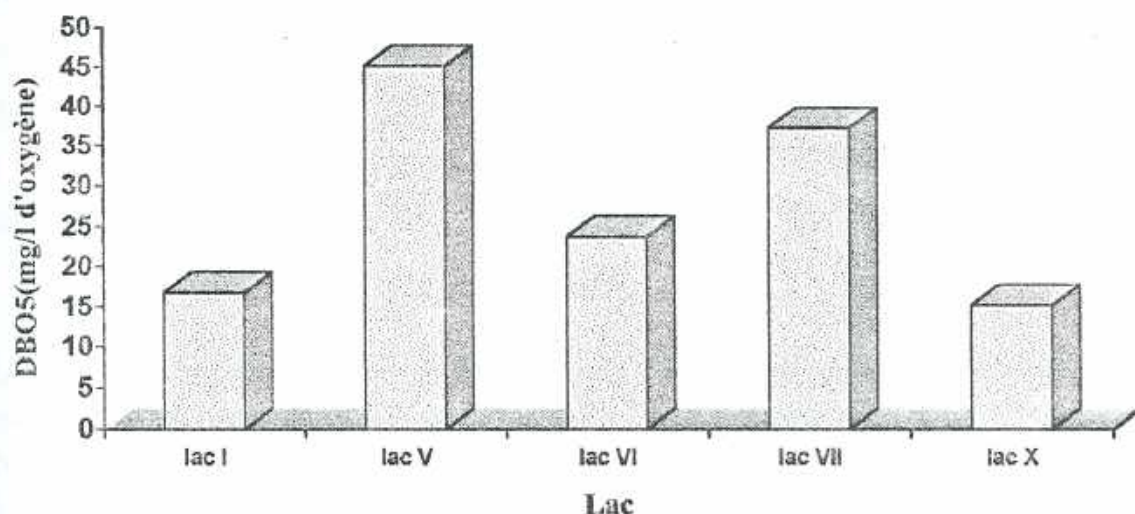
lac X ( ayant des lotus ).

Les résultats sont donnés par le tableau suivant:

**Tableau 20**

Moyenne de DBO<sub>5</sub> et DCO par lac.

| Lacs.                                | lac I | lac V | Lac VI | lac VII | lac X |
|--------------------------------------|-------|-------|--------|---------|-------|
| DBO <sub>5</sub> mg/l O <sub>2</sub> | 16,8  | 45,2  | 23,8   | 37,25   | 15,25 |
| DCO mg/l O <sub>2</sub>              | 23,7  | 50,7  | 28,7   | 46,3    | 21,33 |
| $\frac{DBO_5}{DCO}$                  | 0,71  | 0,89  | 0,83   | 0,81    | 0,72  |



**Fig. 29** : Moyenne de DBO<sub>5</sub> par lac.



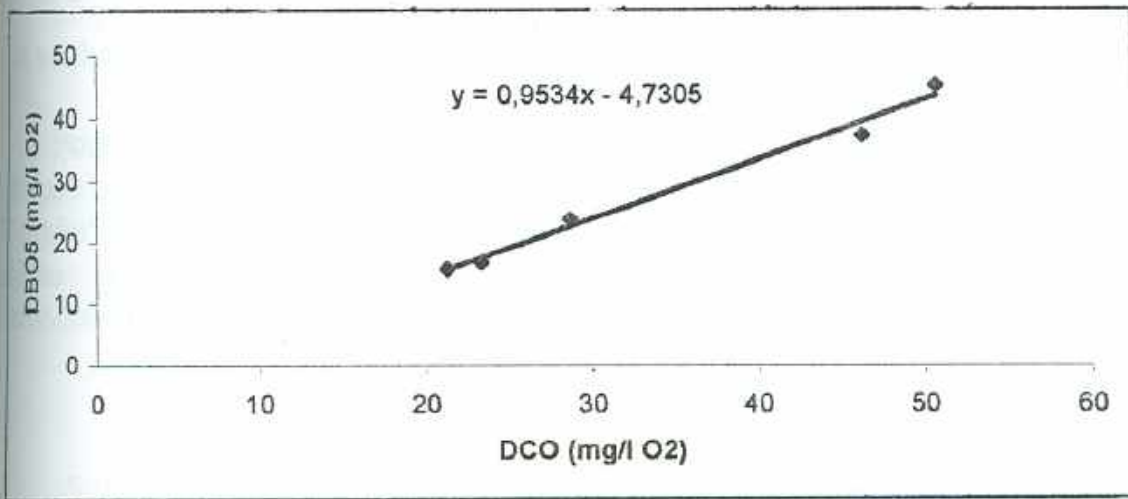


Fig. 30 : Courbe de corrélation de la DBO<sub>5</sub> en fonction de la DCO.

L'observation des courbes montrent une similitude d'évolution de la DCO et de la DBO. En effet, la courbe de corrélation DBO en fonction de DCO est une droite d'équation  $Y = 0,9534 X - 4,7305$ . La pente de la droite est sensiblement égale à 0,9534; le rapport des deux grandeurs est pratiquement constant comme en témoigne les résultats du tableau 20.

Pour la DBO<sub>5</sub> et la DCO les résultats nous donne pour l'ensemble des lacs la relation  $\frac{DBO_5}{DCO} = 0,80$  en moyenne alors que la pente de la courbe de la figure 30 est de 0,9534, la moyenne de ces deux valeurs est de 0,876. Il est donc possible de considérer qu'ils sont proches de ceux rapportés par la bibliographie<sup>(11)</sup> pour l'Europe et les U.S.A soit:  $\frac{DBO_5}{DCO} = 0,9$ .

Il est à remarquer que la charge en DBO<sub>5</sub> ou DCO varie d'un lac à un autre.

Dans chaque lac, les valeurs de DBO<sub>5</sub> et de DCO peuvent être modifiées de façon considérable à cause de différents facteurs : le temps de rétention des eaux relativement important ( surtout en saison sèche ) et les plantes qui exercent des activités de toutes sortes avec l'eau

Ces résultats doivent donc être considérés à titre indicatif pour le phénomène d'eutrophisation qui est beaucoup plus en rapport avec les nutriments azotés et phosphorés. Ces paramètres feront l'objet d'une étude plus approfondie lors de l'identification des sources polluantes, compte tenu de leur rôle dans le traitement des eaux résiduaires

## D) PARAMETRES INDICATEURS DE LA PRODUCTION PRIMAIRE.

La production d'algue peut être appréciée par la teneur en chlorophylle a et la méthode de la profondeur du disque de Secchi.

### 1- Chlorophylle a et profondeur au disque de Secchi.

Pour les zones tempérées, selon le rapport de l'O.C.D.E.<sup>(5)</sup>, une eau eutrophe correspond à une eau dont la teneur en chlorophylle a varie entre 6,7 et 31 mg/m<sup>3</sup> (µg/l) ou une valeur maximale comprise entre 16,9 et 107 mg/m<sup>3</sup>. Le tableau ci-dessous donne les résultats des mesures de chlorophylle a et la profondeur du disques de Secchi.

**Tableau 21**

Valeurs de chlorophylle a et de la profondeur du disque de Secchi.

| Lacs   | points | Chlorophylle a en µg/l |       |      |                      |      | Disque de Secchi (m) |
|--|--------|------------------------|-------|------|----------------------|------|----------------------|
| lac I  | 1      |                        | 21    | 22   | 31                   | 18   | 0,74                 |
| lac IV                                       | 6      |                        | 98    | 123  | 153                  | 123  | 0,35                 |
| lac IV                                       | 7      |                        | 101   | 106  | 169                  | 109  | 0,35                 |
| lac V  | 11     | 144                    |       | 172  | 175                  | 161  |                      |
| lac V  | 12     | 133                    | 193,3 | 169  | 172                  | 175  | 0,5                  |
| lac V  | 13     | 100                    |       | 172  | 188                  | 172  |                      |
| lac VI                                       | 14     | 124                    |       | 85   | 120                  | 114  |                      |
| lac VI                                       | 15     | 24                     | 7     | 11   | 9                    | 7    | 0,7                  |
| lac VII                                      | 16     | 0                      | 0     | 0    | 7                    | 0    |                      |
| lac X  | 20     | 2                      | 12    | 11   | 13                   | 11   |                      |
| Mois   |        | Oct.                   | Nov.  | Déc. | Jan.                 | Fév. |                      |
| Valeur du seuil du système O.C.D.E. Chl.max. |        |                        |       |      |                      |      |                      |
| Mésotrophe (8-25µg/l)                        |        | Eutrophe (25-75µg/l)   |       |      | Hypereutrophe (> 75) |      |                      |

Disque de Secchi: lac II: 0,45 m lac IX : 0,9 m.

La profondeur du disque de Secchi n'a pas fait l'objet de mesures pour des problèmes d'accès à certains lacs, tandis que la chlorophylle a n'a pas été dosée pour les lacs II, III, VIII et IX.

Ces résultats confirment les analyses précédentes et permettent de constater la compétition algues - macrophytes.

### 2- Etude comparée de l'eutrophisation alguale et de l'eutrophisation avec prolifération des macrophytes: compétition algues-macrophytes.

L'étude détaillée des différents paramètres en rapport avec l'eutrophisation: pH, oxygène dissous, nutriments, chlorophylle a, M.E.S.,



disque de Secchi, permettent de relever des points communs et des différences pour la prolifération des algues et des macrophytes (jacinthes d'eau et lotus).

Quelle que soit la forme d'eutrophisation, elle est due à un apport accru des éléments fertilisants : azote et phosphore principalement.

Les algues, immergées, ont plus besoin de l'éclairement. Les algues apparaissent généralement en premier lieu sitôt qu'un déséquilibre de l'écosystème se manifeste en faveur des phytoplanctons. Cependant si l'environnement du plan d'eau le favorise, il peut apparaître également des macrophytes en particulier sur le littoral.

L'évolution des paramètres suivants: pH, O<sub>2</sub> dissous, chlorophylle a, M.E.S, permet de distinguer les deux formes d'eutrophisation.

#### a) Influence du pH

L'eutrophisation alguale se fait plus facilement à un pH basique (pH = 8) alors que pour l'eutrophisation avec développement des macrophytes le pH favorable est celui d'un milieu légèrement acide ou voisine de la neutralité.

**Tableau 23.**

Evolution du pH des eaux des lacs IV, V et VI sur une année.

| Mois / Lacs. | lac IV | lac V | lac VI |
|--------------|--------|-------|--------|
| Février      | 9,7    | 6,2   | 6,5    |
| Mars         | 9,2    | 7,2   | 6,7    |
| Avril        | 9,1    | 6,5   | 6,7    |
| Mai          | 8,1    | 6,6   | 6,7    |
| Juin         | 8,1    | 6,5   | 6,8    |
| Juillet      | 8,3    | 7,1   | 6,9    |
| Août         | 8,5    | 7,2   | 6,6    |
| Septembre    | 8,0    | 7,7   | 7,3    |
| Octobre      | 7,7    | 7,6   | 7,1    |
| Novembre     | 7,9    | 8,1   | 7,1    |
| Décembre     | 8,0    | 7,9   | 7,1    |

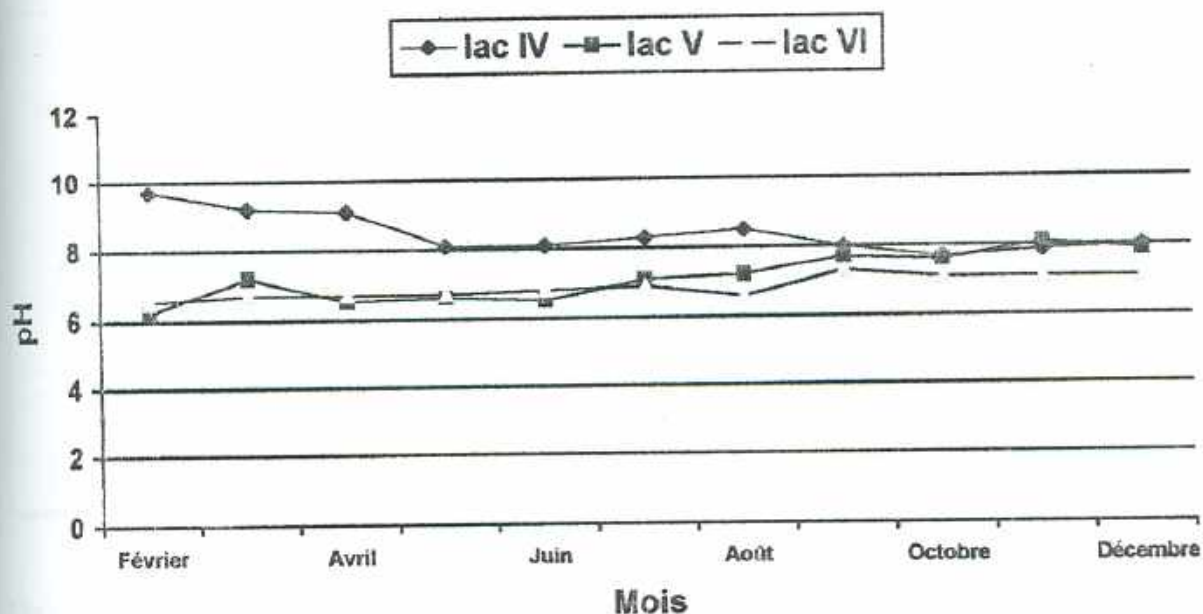


Fig. 31 : Evolution comparée du pH des eaux des lacs IV, V et VI.

### b) O<sub>2</sub> dissous

La désoxygénation est plus grande avec les macrophytes qu'avec les algues.

Tableau 24

Evolution de l'oxygène dissous dans l'eau des lacs IV, V et VI.

| Mois / Lacs. | lac IV | lac V | lac VI |
|--------------|--------|-------|--------|
| Février      | 4,5    | 1,3   | 1,8    |
| Mars         | 4,1    | 1,6   | 1,0    |
| Avril        | 4,5    | 0,7   | 1,2    |
| Mai          | 3,2    | 0,7   | 1,2    |
| Juin         | 3,6    | 0,7   | 0,7    |
| Juillet      | 4,0    | 2,1   | 1,0    |
| Août         | 3,9    | 3,1   | 0,9    |
| Sept.        | 3,3    | 3,1   | 0,5    |
| Oct.         | 2,9    | 2,3   | 0,4    |
| Nov.         | 3,3    | 3,6   | 0,4    |
| Déc.         | 2,4    | 3,0   | 0,6    |



Evolution comparée de l'oxygène dissous pour les lacs IV; V et VI.

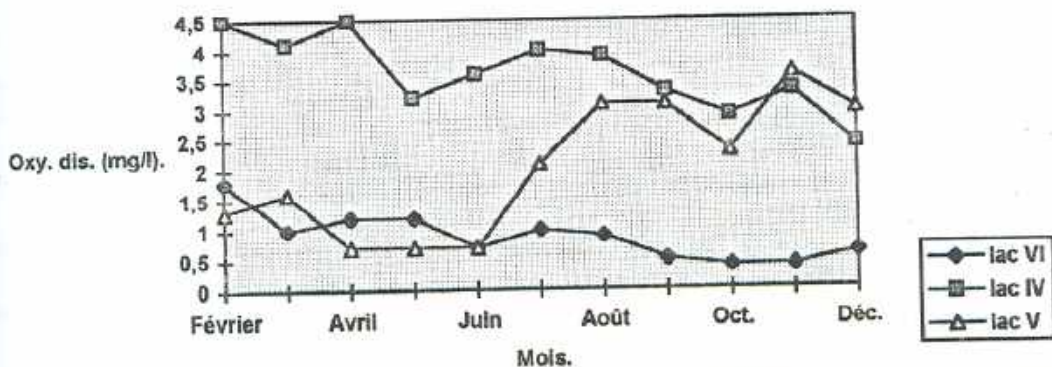


Fig.32 : Evolution comparée de l'oxygène dissous pour les lacs IV, V et VI.

### c) Chlorophylle a

La chlorophylle a étant en rapport direct avec la présence des algues, elle permet de comparer la présence de ce type de plante dans les lacs. A travers les résultats, il apparaît que la présence des macrophytes entraîne un couvert végétal qui limite l'éclairement pour les algues immergées ce qui provoque leur disparition. A l'image des gros arbres qui, de par leurs ombres, empêchent le développement des herbes en dessous, les algues ne supportent pas la présence des macrophytes. Le tableau suivant récapitule ces observations.

#### Tableau 25

Récapitulatif des caractéristiques comparées de l'eutrophisation alguale et à macrophytes.

| Paramètres             | macrophytes  | algues   | constats  |
|------------------------|--|--|---|
| nutriments: N et P     | consommation plus les phosphates                   | Consommation moindre                           | nécessaires pour les 2 types d'eutrophisation.          |
| PH                     | milieu légèrement acide ou proche de la neutralité | milieu basique<br>pH≈8                         | pH≈constant<br>le milieu exerce un effet tampon.        |
| O <sub>2</sub> dissous | diminution considérable moy voisine de 1mg/l       | valeur relativement élevée voisine de 3,5 mg/l |   |
| chlorophylle a         | presque nulle                                      | grande valeur donnée par les analyses          | met en relief une compétition en faveur des macrophytes |
| M.E.S                  | Faible effet de décantation                        | plus élevé algues participant à ces MES.       |   |

Tableau.26.

Récapitulatif de l'état trophique des lacs étudiés  
selon le classement ouvert de l'O.C.D.E.<sup>(5)</sup>,  
paramètres indicateurs de la fertilité.

| Lacs     | Ptot(mg/l)            | NTK(mg/l)             | Etat réel.  |
|----------|-----------------------|-----------------------|---|
| lac I    | 0,08<br>eutrophe      | 3,58<br>eutrophe      | qualité acceptable  |
| lac II   | 0,075<br>eutrophe     | 3,82<br>eutrophe      | eutrophe  |
| lac III  | 0,11<br>eutrophe      | 4,7<br>eutrophe       | comporte des algues   |
| lac IV   | 0,18<br>hypereutrophe | 4,33<br>hypereutrophe | comporte beaucoup<br>d'algues   |
| lac V    | 0,21<br>hypereutrophe | 3,99<br>eutrophe      | Entièrement couvert<br>de jacinthes en 95                               |
| lac VI   | 0,12<br>hypereutrophe | 3,9<br>eutrophe       | Entièrement couvert<br>de jacinthes                                     |
| lac VII  | 0,48<br>hypereutrophe | 4,95<br>hypereutrophe | Marécageux mais<br>subit actuellement<br>un curage                      |
| lac VIII | 0,12<br>hypereutrophe | 3,43<br>eutrophe      | colonies de<br>macrophytes sur les<br>berges.                           |
| lac IX   | 0,08<br>eutrophe      | 3,25<br>eutrophe      | présence de lotus<br>(qualité d'eau à la<br>limite de<br>l'acceptable ) |
| lac X    | 0,15<br>hypereutrophe | 3,65<br>eutrophe      | entièrement couvert<br>de lotus (envasement<br>très avancé )            |

A travers ce tableau il ressort que le phosphore apparaît comme nutriment principal de la classification et qu'au vue du système O.C.D.E, tous les lacs sont dans un état d'eutrophisation avancée. Mais le constat sur le terrain et les analyses montrent que le lac I qui ne comporte aucun type de plante, qui possède des valeurs plus ou moins normales pour la plupart des paramètres, n'est pas eutrophe. Ainsi, les lacs de Yamoussoukro ne répondent pas exactement aux critères de classification de l'O.C.D.E ( classification établie à partir des études menées en zones tempérées ).

Les lacs de Yamoussoukro sont situés en zone tropicale et il est important de tenir compte des conditions climatiques spécifiques. Ces lacs semblent mieux tolérer la charge nutritive que ceux des zones tempérées. La mesure de la profondeur du disque de Secchi ne semble pas être un bon indicateur de l'état trophique des lacs à cause de l'influence des couleurs liées aux matières minérales et autres .

Les lacs IV, V, VI, VII, VIII et X peuvent être considérés comme étant dans un état d'eutrophisation avancé (hyperfertiles).

Les lacs IX, III et II peuvent se classer une phase intermédiaire.



Le lac I étant considéré comme mésotrophe.

**Tableau 27**

Récapitulatif de l'état trophique des lacs étudiés  
en tenant compte du classement ouvert de l'O.C.D.E. <sup>(5)</sup>  
paramètres indicateurs de la production primaire.

| lac/para. +état | Chl.a(mg/m <sup>3</sup> )     | Dis. Sch.             | Etat réel.  |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|---|
| lac I           | 22,6.<br>eutrophe             | 0,74<br>eutrophe      | qualité acceptable  |
| lac II          |                               | 0,45<br>eutrophe      | eutrophe  |
| lac III         |                               |                       | comporte des algues   |
| lac IV          | 163,66<br>hypereutrophe       | 0,35<br>hypereutrophe | comporte beaucoup<br>d'algues   |
| lac V           | 151,94<br>hypereutrophe       | 0,45<br>hypereutrophe | entièrement couvert<br>de jacinthes en 95                               |
| lac VI          | 110 (amont )<br>10,83 (aval ) | 0,7<br>hypereutrophe  | entièrement couvert<br>de jacinthes                                     |
| lac VII         | 1,16<br>Oligotrophe           |                       | marécageux mais<br>subit actuellement<br>un curage                      |
| lac VIII        |                               |                       | colonies de<br>macrophytes<br>sur les berges.                           |
| lac IX          |                               | 0,9<br>eutrophe       | présence de lotus<br>(qualité d'eau à la<br>limite de l'acceptable<br>) |
| lac X           | 11,5<br>mésotrophe            |                       | entièrement couvert<br>de lotus (envasement<br>très avancé )            |

Les résultats obtenus montrent que la présence de macrophytes (surtout les lotus) n'implique pas nécessairement une hypereutrophisation du plan d'eau. C'est le cas du lac IV et du lac IX pour lesquels le lac IX a une teneur en phosphore et azote moindre (0,08 et 3,25 mg/l) par rapport au lac IV ( 0,18 mg/l de Ptot; 4,33 mg/l de NTK ) alors que le lac IX comporte des lotus et le lac IV des algues.

Le lac IV possède des berges entretenues et enceintes bétonnées, alors que les berges du lac IX sont sablonneuses et on y pratique des activités maraichères, ce qui au fil du temps, a favorisé le comblement des bordures par des matières minérales et son envasement.

Cette évolution physique favorise la prolifération surtout des macrophytes enracinés dans un lac en proie à une eutrophisation même si les qualités physico-chimiques de ses eaux ne correspondent pas à un état d'eutrophisation avancée.

En 1995 au moment où le lac V était encore couvert de jacinthes, des analyses de quelques paramètres complémentaires ont été effectués; la demande  $D = \frac{DCO}{O_2}$  dissous nous a permis de réaliser le classement suivant:

**Tableau 28**

Récapitulatif des paramètres complémentaires à titre indicatif: classement des lacs par ordre décroissant d'insatisfaction de la demande  $D = \frac{DCO}{O_2}$ .

| Para. LAC | O <sub>2</sub> dissous mg/l | Turbidité JTU | Couleur Hazen | DCO mg/l | Demande $D = \frac{DCO}{O_2}$ | Etat des lacs           |
|-----------|-----------------------------|---------------|---------------|----------|-------------------------------|-------------------------|
| Lac V     | 0,67                        | 1,95          | 15            | 48       | 71,6                          | Jacinthes               |
| Lac VI    | 0,52                        | 2,3           | 15            | 36       | 69,2                          | Jacinthes               |
| lac X     | 0,79                        | 2,5           | 30            | 22       | 28,02                         | Lotus, jacinthes naines |
| lac VIII  | 2,34                        | 1,9           | 15            | 32       | 13,64                         | Lotus, jacinthes naines |
| Lac IX    | 1,17                        | 2,2           | 30            | 14       | 11,96                         | Lotus, jacinthes naines |
| lac III   | 4,27                        | 2,17          | 15            | 38       | 8,9                           | Pas de plantes          |
| Lac I     | 3,93                        | 2,5           | 15            | 26       | 6,6                           | Pas de plantes          |

Ce classement est en concordance avec les résultats précédents. Les lacs qui ont une grande insatisfaction (lac V et VI) possède actuellement un fort pourcentage de matières organiques dont la dégradation aérobie se fera difficilement. On pourrait cependant avoir une dégradation anaérobie au niveau des sédiments.

Les autres paramètres comme la couleur la turbidité ne sont d'un grand apport dans l'étude du phénomène d'eutrophisation.

En conclusion de ce qui précède, l'état trophique d'un lac ne peut mieux s'apprécier que par rapport à sa teneur en nutriments, azote et phosphore, principalement à Yamoussoukro mais aussi par des paramètres tels que la chlorophylle a et le disque de Secchi. pour l'eutrophisation alguale.

Les analyses tels que la DBO, l'indice permanganate, l'oxygène dissous etc.. venant comme compléments des analyses et de détermination de la pollution organique dans sa globalité.



**A) INTRODUCTION**

Cette étude doit tenir compte du fait que les systèmes aquatiques sont dynamiques et connaissent une variabilité liée à des facteurs multiples dépendant du temps.

En effet la vie aquatique dépend entre autres de l'éclairement et des apports en éléments nutritifs fertilisants qui sont liés aux activités saisonnières des hommes.

De plus les perturbations climatiques à Yamoussoukro sont fréquentes à cause de l'influences de deux zones climatiques: forêt et savane.

S'il est vrai que l'étude statique précédente a permis de déterminer les états trophiques des plans d'eau en les reliant à leur environnement, il n'en demeure pas moins que la compréhension du phénomène passe par la détermination des apports de matières fertilisantes et des variations saisonnières.

L'étude statique a montré l'importance joué par certains paramètres dans le phénomène d'eutrophisation.

Les apports de nutriments, en particulier le phosphore ont été déterminés chronologiquement et analysés mensuellement sur une période d'un an en fonction de la pluviométrie et des activités humaines afin de déceler les sources potentielles polluantes.

Les moyennes mensuelles des mesures effectuées pour les échantillons des différents lacs sont regroupées en annexes. L'exploitation de ces résultats ont donné les les valeurs rassemblées dans le tableau ci-dessous.

L'analyse des résultats sous leurs aspects évolutifs permettra de mettre en évidence les périodes et le rôle des caractéristiques climatiques sur le milieu ainsi que les modes de pollution en nutriments phosphorés.

**B) RESULTATS ET INTERPRETATION.****1-Résultats liés au phosphore.**

Les moyennes mensuelles des nutriments liés au phosphore sont regroupées dans le tableau suivant:

Tableau 29

Résultats des analyses en dynamique pour le phosphore.

| Paramètres<br>Mois | $\frac{P_{tot}}{M.E.S}$ | $PO_4^{3-}/P$ (%) | Pluviométrie | Ptot(EB) | Ptot(EF) | $PO_4^{3-}$ | M.E.S |
|--------------------|-------------------------|-------------------|--------------|----------|----------|-------------|-------|
| Fév.               | 1,529                   | 7,7               | 37,5         | 0,26     | 0,11     | 0,02        | 17    |
| Mars               | 0,88                    | 9,1               | 135,3        | 0,22     | 0,06     | 0,02        | 25,1  |
| Avril              | 0,885                   | 17,4              | 115,5        | 0,23     | 0,09     | 0,04        | 25,6  |
| Mai                | 0,947                   | 16,7              | 277          | 0,18     | 0,05     | 0,03        | 18,8  |
| Juin               | 0,678                   | 18,8              | 182          | 0,16     | 0,02     | 0,03        | 23,6  |
| Juillet            | 0,798                   | 11,8              | 83           | 0,17     | 0,02     | 0,02        | 21,3  |
| Août               | 0,955                   | 17,6              | 94           | 0,17     | 0,01     | 0,03        | 17,8  |
| Sept.              | 1,017                   | 11,1              | 258          | 0,18     | 0,02     | 0,02        | 17,7  |
| Oct.               | 0,889                   | 0                 | 100          | 0,14     | 0,01     | 0           | 15,9  |
| Nov.               | 0,24                    | 25                | 64           | 0,04     | 0,01     | 0,01        | 16,7  |
| Déc.               | 0,24                    | 20                | 44           | 0,05     | 0,01     | 0,01        | 22    |
| Jan.               | 0,227                   | 14,3              | 3,6          | 0,07     | 0,02     | 0,01        | 50    |

La mesure du phosphore total dans l'eau brute et dans l'eau filtrée permet de prendre en compte, par différence sa présence dans les M.E.S. Ceci n'est peut être pas à négliger car les sédiments constituent sans doute une source endogène de phosphore par relargage.

Ces teneurs dans les M.E.S ainsi que leur évolution sont également caractéristiques pour chaque lac.

Un lac avec une présence importante d'algues, aura une valeur du rapport Ptot/M.E.S élevée car une part plus importante du phosphore se retrouvera dans l'eau.

Un lac soumis aux apports extérieurs pourra avoir des M.E.S très « phosphorées ».

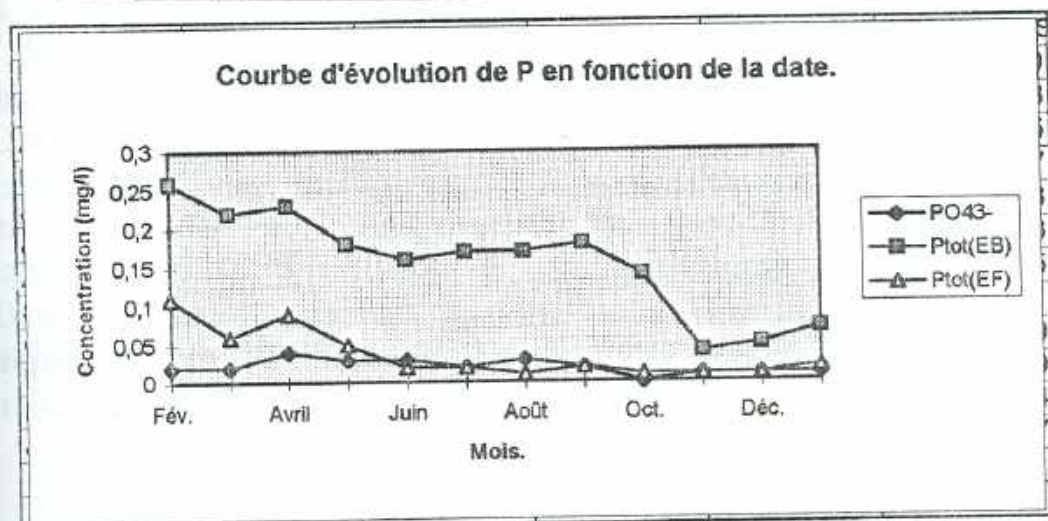


Fig.53 : Courbe d'évolution du phosphore total dans l'eau brute et filtrée et des phosphates dans l'eau filtrée



La moyenne du phosphore total est de 0,18 mg/l. La valeur la plus élevée se situe en février au début des pluies, une décroissance est observée au fil du temps pour atteindre une valeur minimale de 0,04 mg/l en novembre puis une croissance à partir de décembre.

L'observation simultanée de la pluviométrie permet de constater qu'à la sortie de la saison sèche, caractérisée par des activités comme les feux de brousse et des dépôts de déchets ménagers, le drainage des substances nutritives telles que les cendres se fait en direction des lacs et augmente de ce fait la teneur en phosphore des plans d'eau.

Ceci est plus remarquable pour le lac I dont le versant non urbanisé fait l'objet d'activités rurales. Par la suite l'augmentation de la pluviométrie contribue au lessivage du sol. Cet apport diminue au cours de la période avec l'apparition des jeunes touffes d'herbes qui freinent ce lessivage et consomment une partie de ce phosphore.

La période de grandes pluies, Mai à Juillet, est celle du renouvellement des eaux des lacs. Les débits des eaux qui étaient quasiment nuls en période de saison sèche, atteignent leurs valeurs maximales à tous les niveaux (lacs, égouts...). Ceci provoque une dilution des différents éléments dissous du fait de l'augmentation du niveau d'eau. L'écoulement entraîne un fort pourcentage d'algues (lac IV).

La période de juillet à septembre correspond à une petite saison sèche avec une baisse de pluviométrie suivie, de septembre à novembre, d'une petite saison pluvieuse, ce qui entraîne une répétition à une faible échelle de ce qui précède.

A partir de cette date la concentration des éléments augmente à cause de la grande saison sèche où l'évaporation des eaux est importante, le débit et la pluviométrie sont nuls.

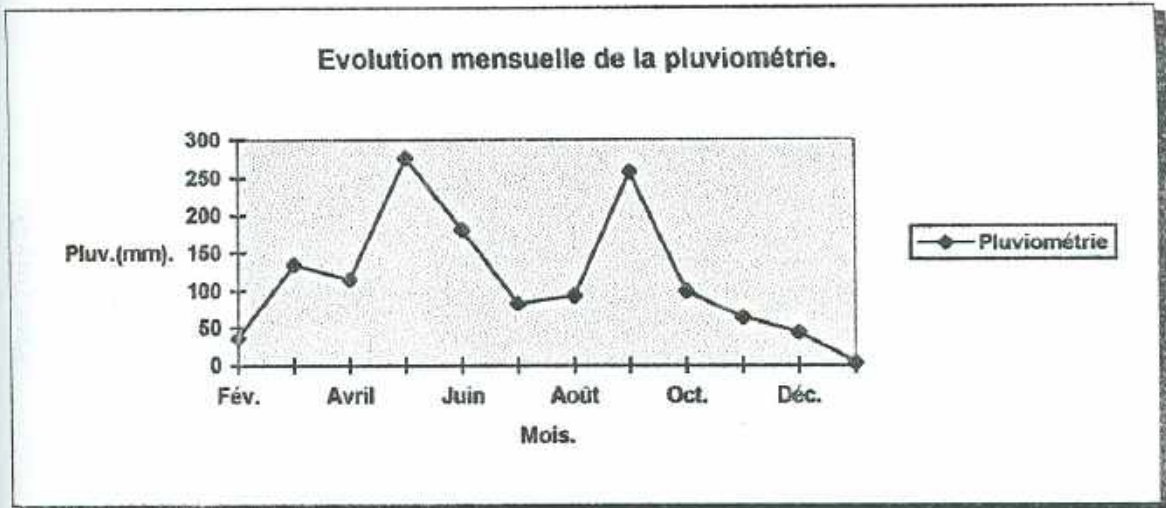
Le cycle annuel reprendra donc à la fin de la saison sèche entre janvier et février.

Il est évident que ces résultats ne se reproduiront pas exactement aux mêmes dates, mais seront parallèles étant donné le dynamisme du système aquatique et les effets d'accumulation dans le temps des nutriments.

Cette analyse nous permet de situer les sources polluantes en phosphore. Les apports extérieurs sont assez facilement identifiables, les pollutions d'origine industrielle ou agricole sont quasiment nulles, les variations climatiques beaucoup plus restreintes qu'en zone tempérée.

Dans ces conditions, les apports sont essentiellement d'origines domestiques, ou résultants des apports liés aux feux de brousse (dans une moindre mesure et de façon saisonnière).

Cette tendance peut être confirmée par les caractéristiques des eaux usées.



**Fig.34** : Evolution mensuelle de la pluviométrie à Yamoussoukro en 1995.

La courbe de la figure 35 ci-dessous montre une décroissance continue du phosphore total de Février à Octobre. Cette même figure montre une corrélation entre l'évolution du phosphore total dans l'eau brute et la pluviométrie.

La période de Février à Octobre correspond la saison des pluies. Pendant cette période, on assiste à un renouvellement des eaux impliquant une dilution continue de celles-ci.

A partir de Novembre, avec la saison sèche, il y a une remontée du taux de phosphore dans l'eau. Cette évolution s'explique par le fait, qu'en saison sèche, le débit des eaux est pratiquement nul; de plus l'évaporation des eaux réduit de façon considérable le volume d'eau des lacs ce qui entraîne une augmentation des concentrations en phosphore total des eaux des lacs. Cette augmentation atteindra des valeurs critiques à partir du début de la saison pluvieuse où les eaux pluviales drainent l'ensemble des déchets accumulés en saison sèche vers les lacs.



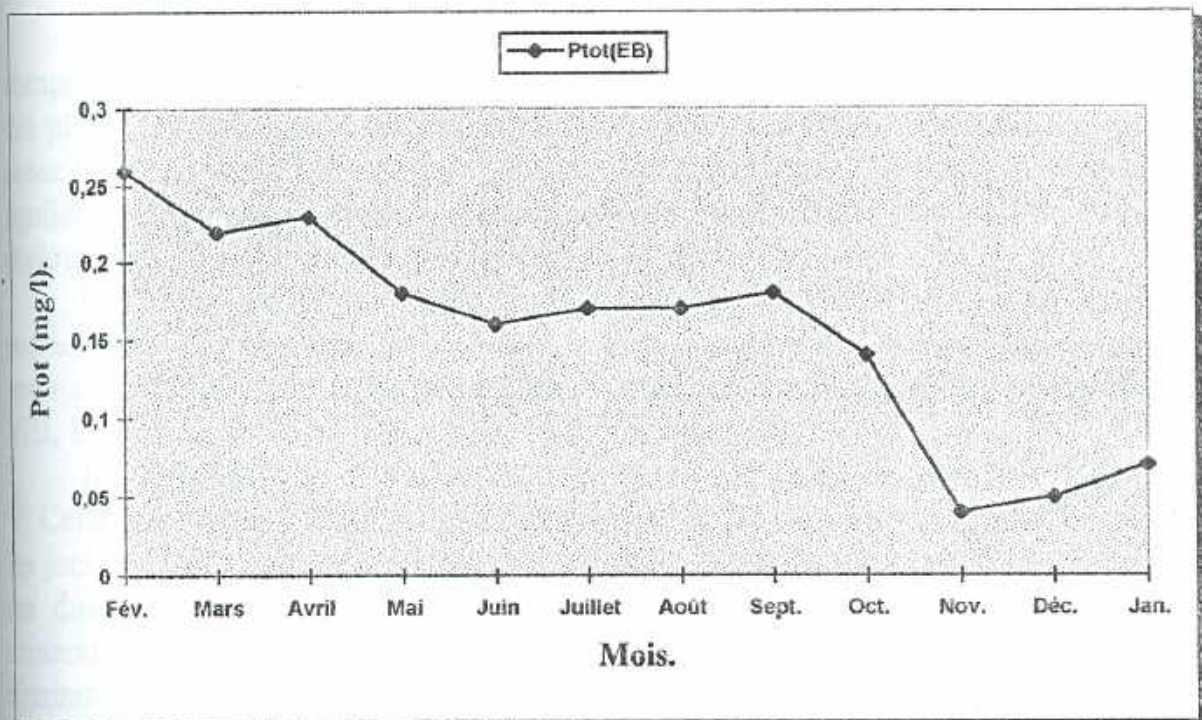


Fig. 35 : Evolution mensuelle du Ptot dans l'eau brute.

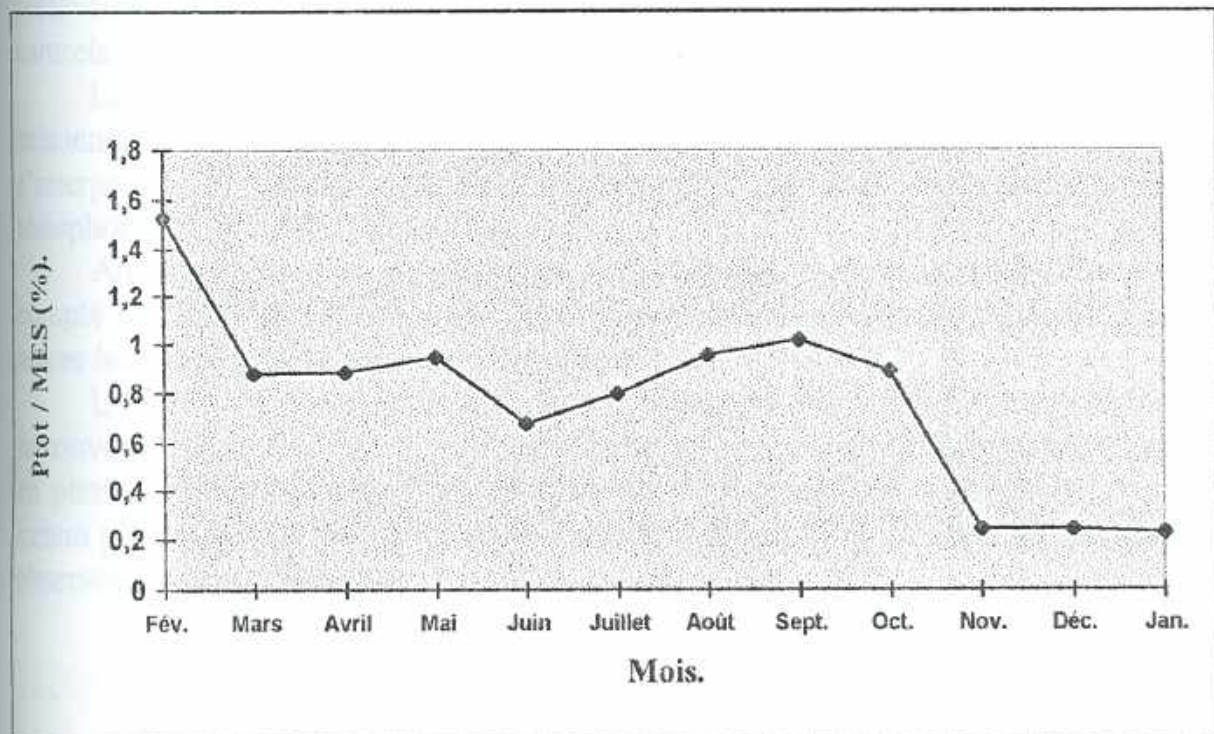


Fig.36 : Evolution du rapport  $\frac{P_{tot}}{MES}$  en fonction des mois.

Le rapport  $\frac{P_{tot}}{MES}$  montre une évolution constante au cours du temps : il est compris entre 0,2 et 1,5. Si on néglige le mois de février qui correspond au début des pluies, il est même compris entre 0,2 et 1%. Ces faibles fluctuations suivent assez bien les variations du phosphore total durant cette période. Il s'établit un équilibre entre le phosphore des M.E.S. et l'eau d'une part et le phosphore dissous et la consommation par les plantes d'autre part.

Les lacs V et VI ont un rapport beaucoup plus important, il ne faut donc pas exclure que ces taux soient liés à la présence des plantes aquatiques (les jacinthes). Cependant, la présence des plantes enracinées (les lotus) dans les lacs VIII, IX et X semble ne pas agir de la même manière.

L'étude statique a montré un taux de M.E.S relativement bas pour le lac V. Cette observation tendrait à affirmer que l'effet de sédimentation produit par les jacinthes et observé dans les expériences de laboratoire, ne s'exercerait que sur des matières moins riches en phosphore qui sont des matières d'origine minérale car il y a baisse simultanée de la conductivité. Toutefois, cette diminution de la conductivité est à relier à la consommation des nutriments par les plantes.

En ce qui concerne l'évolution de la concentration en phosphate, il convient de ne pas perdre de vue que les phosphates présents au moment du prélèvement dans les différentes eaux étudiées, proviennent à la fois des apports naturels et exogènes mais aussi endogènes.

Les mesures ont été réalisées ici sur les eaux filtrées. L'évolution saisonnière du taux moyen de phosphates tous les lacs confondus, doit s'interpréter en tenant compte du fait que c'est sous cette forme que le phosphore est assimilé par les plantes.

Au vu des résultats en statiques, seuls les lacs V et VII doivent être pris en compte car les lacs VI et X ont des concentrations relativement faibles et les autres lacs sont quasiment sans phosphates.

L'apport de phosphates dû aux premières pluies a permis aux plantes de retrouver un gain de vitalité et de se multiplier, et de ce fait leur consommation en phosphate augmente ce qui favorise leur effet auto-épurant durant toute la saison pluvieuse. La conséquence est donc la diminution du taux de phosphates observée de Mai à Octobre.



## 2- Résultats liés à l'azote.

### Tableau 30

Résultat de l'étude en dynamique des apports en azote.

| Paramètres<br>Mois | Pluviométrie<br>(mm). | $\frac{NTK}{P}$ (EB) | $\frac{NTK}{P}$ (EF) | NTK(EF) | NTK (EB) |
|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------|----------|
| juillet            | 83                    | 23                   | 137                  | 2,7     | 3,9      |
| août               | 94                    | 25,3                 | 260                  | 2,55    | 4,3      |
| septembre          | 258                   | 27,2                 | 140                  | 2,83    | 4,9      |
| octobre            | 100                   | 26,4                 | 304                  | 1,4     | 3,7      |
| décembre           | 64                    | 69,4                 | 201                  | 2,01    | 3,47     |

Les résultats en statique ont montré qu'il y existe un apport important d'azote dans les différents lacs sans grande différence d'un lac à un autre comme c'est le cas pour le phosphore. De plus l'état trophique est beaucoup plus en rapport avec le phosphore qui apparaît comme facteur limitant. Le temps de suivi s'est fait sur une période de quatre mois.

Bien que l'apport de l'azote proviennent potentiellement des mêmes sources que le phosphore, vu que ce nutriment est le plus important après le phosphore, l'étude de son évolution dans le temps s'avère nécessaire.

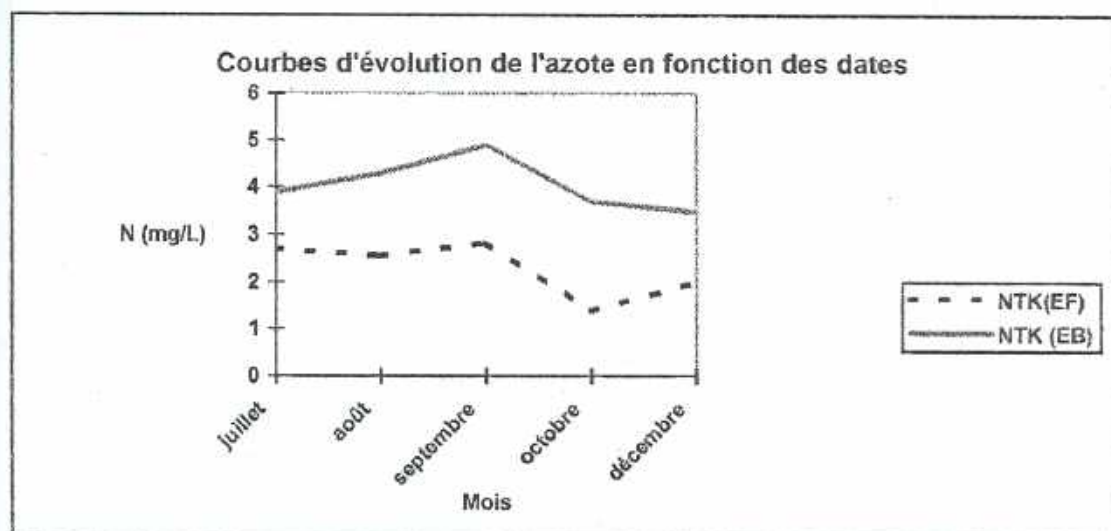


Fig.37. Courbes d'évolution de l'azote en fonction des dates.

Pour cette évolution, la durée d'expérimentation n'a pas permis de suivre les fluctuations sur toute l'année. Cependant, les concentrations augmentent avec le débit des lacs qui reste important, pendant la période de baisse de pluviométrie en juillet et août. A partir de la reprise des pluies, en septembre les apports exogènes par drainage font encore augmenter le taux d'azote.

Cette évolution est à rapprocher de celle du phosphore, ce qui permet de conclure que les sources nutritives déjà décelées pour le phosphore, restent les mêmes pour l'azote, surtout les eaux usées; même si les apports peuvent changer.

Par ailleurs, l'azote n'apparaissant pas comme élément de maîtrise, une identification globale de sources polluantes et leur maîtrise suppose une possibilité de freinage des apports des autres polluants, de l'azote et en particulier du phosphore.

En comparant les courbes de la figure 37., on constate que l'évolution en fonction de la date de prélèvement montre une légère augmentation  $\Delta N=0,6$  pour NTK dans l'eau brute; ce qui confirme la conclusion de l'étude en statique. Il semble donc que l'apport d'azote soit constant

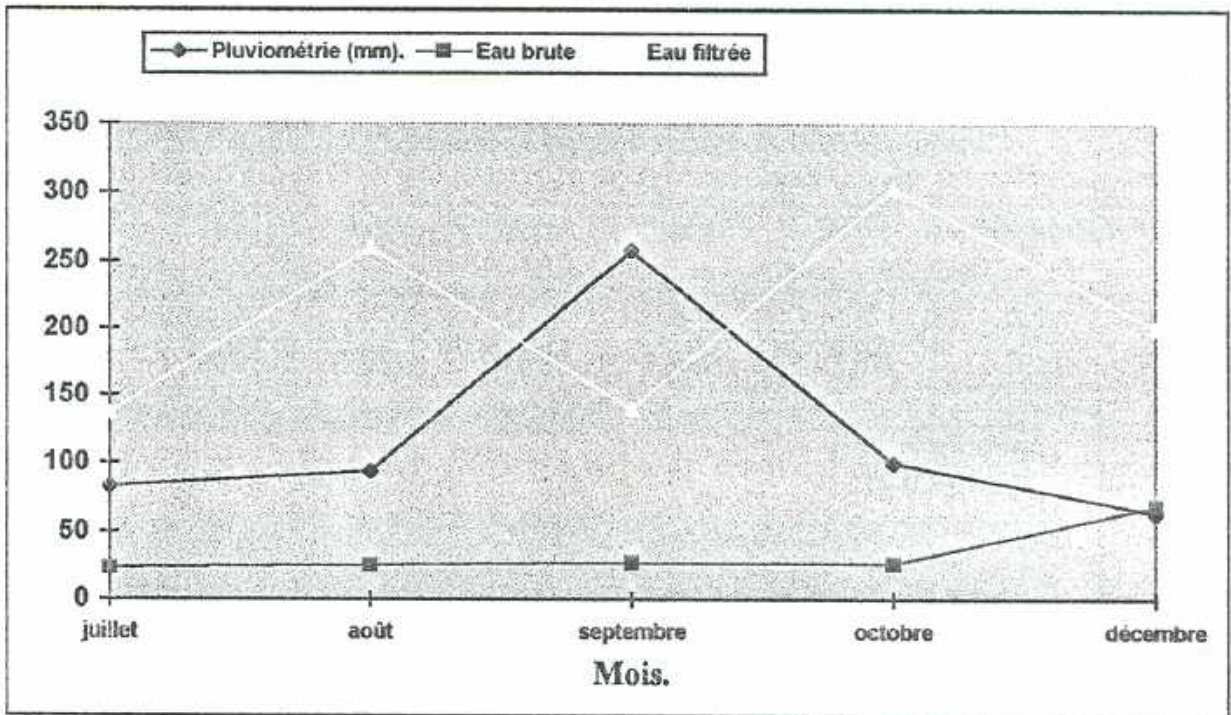


Fig. 38 : Evolution de la pluviométrie et du rapport  $\frac{NTK}{P}$  dans l'eau brute et l'eau filtrée.

La comparaison des courbes de la figure 38 montre une variation plus importante du rapport  $\frac{NTK}{P}$  pour l'eau brute en fonction de la date de prélèvement, alors que ce même rapport reste presque constant pour l'eau filtrée. L'azote et le phosphore dissous restent pratiquement dans le même rapport.



L'observation simultanée de l'évolution du rapport  $\frac{NTK}{P}$  dans l'eau brute et de la pluviométrie montre que la variation observée pour l'eau est liée aux précipitations; en effet, leurs valeurs varient en sens contraire. Les concentrations en azote semblent plus importantes pendant la période de baisse de pluviométrie où la dilution des eaux des lacs est faible et l'évaporation importante.

Il ressort de ces observations que l'azote total Kjeldahl dans les M.E.S. est en partie dû au drainage pluvial beaucoup plus que ne l'est le phosphore total.

### 3-Evolution liée à la pollution organique.

#### a) L'indice permanganate

Tableau.31.

Résultats de l'étude en dynamique pour l'indice permanganate PI

| Mois<br>PI  | Juil. | Août  | Sep.  | Oct. | Nov. | Moyenne |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|---------|
| eau brute   | 6,23  | 5,6   | 6,4   | 6,2  | 5,7  | 6,04    |
| eau filtrée | 4,4   | 3,722 | 3,667 | 3,78 | 3,78 | 3,87    |

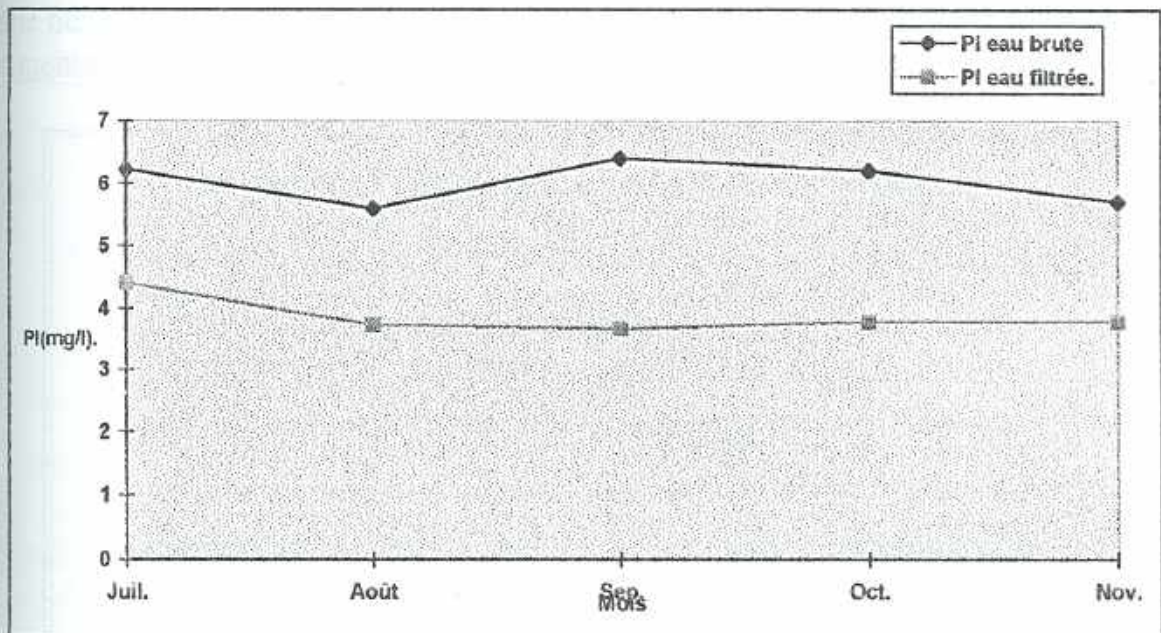


Fig. 39 : Evolution comparée de l'indice permanganate pour l'eau brute et l'eau filtrée.

L'évolution comparée de l'indice permanganate montre une légère diminution pour les eaux filtrées durant la période d'analyse, alors que pour les eaux brutes il apparaît une remontée en septembre. Globalement il suit le même schéma de variation que les nutriments azote et phosphore.

Cela signifie que les sources de pollution même si elles sont d'importances variées restent les mêmes pour les nutriments et autres polluants comme les matières organiques par exemple.

### b) La DCO et DBO<sub>5</sub>.

Tableau 32

Résultats de l'étude en dynamique pour la DBO<sub>5</sub> des lacs I, V, VI, VII et X.

| Lac/date | 7/11/96 | 28/11/96 | 13/12/96 | 20/12/96 | 23/01/97 | 03/02/97 | Moy.  |
|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| lac I    |         | 6        | 17       | 16       | 25       | 20       | 16,8  |
| lac V    | 80      | 15       | 68       | 50       | 28       | 30       | 45,2  |
| lac VI   | 50      | 10       | 20       | 10       | 18       | 35       | 23,8  |
| lac VII  | 30      | 10,5     | 45       | 33       | 45       | 60       | 37,25 |
| lac X    |         | 7        | 13       |          | 15       | 26       | 15,25 |
| Moy.     | 53      | 10       | 33       | 36       | 26       | 34       | 28    |

Le suivi de ces paramètres, DCO et DBO<sub>5</sub>, dans le temps permet de mettre en relief la grande variabilité de la pollution organique. Les prélèvements à l'issue des pluies, donnent des résultats variables en comparaison avec ceux des nutriments.

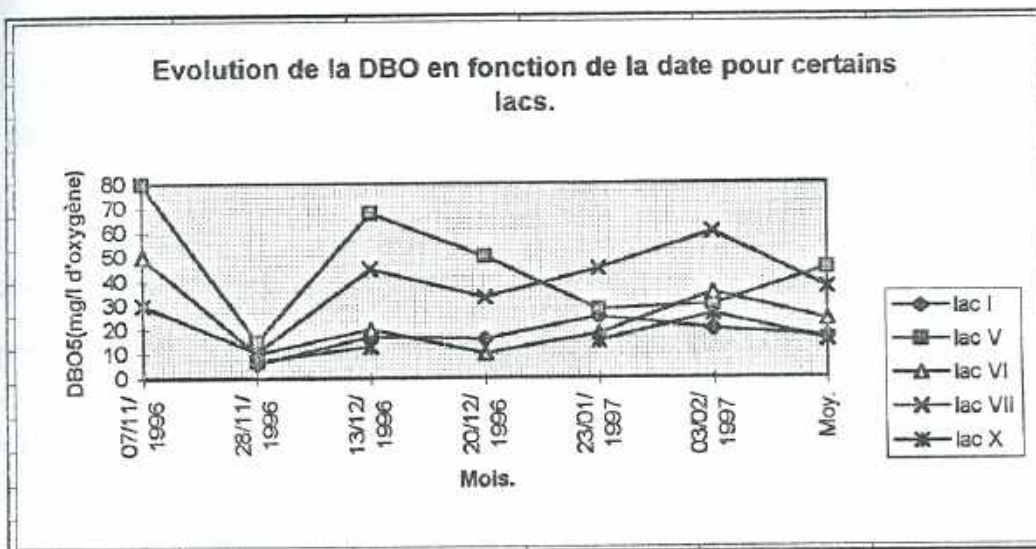


Fig.40 : Evolution de la DBO<sub>5</sub> en fonction de la période de prélèvement pour certains lacs.



Tableau 33

Résultats de l'étude en dynamique pour la DCO des lacs I, V, VI, VII et X.

| Lac/date | 7/11/96 | 28/11/96<br>(pluie) | 13/12/96 | 20/12/96 | 23/01/97 | 03/02/97 | Moy.  |
|----------|---------|---------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| lac I    | 28      | 8                   | 28       | 20       | 28       | 30       | 23,7  |
| lac V    | 84      | 28                  | 72       | 52       | 32       | 36       | 50,7  |
| lac VI   | 60      | 8                   | 28       | 16       | 24       | 36       | 28,7  |
| lac VII  | 32      | 12                  | 60       | 36       | 68       | 70       | 46,3  |
| lac X    | 40      | 8                   | 16       | 16       | 20       | 28       | 21,33 |
| Moy.     | 48,8    | 12,8                | 40,8     | 28       | 34,4     | 40       | 34,14 |

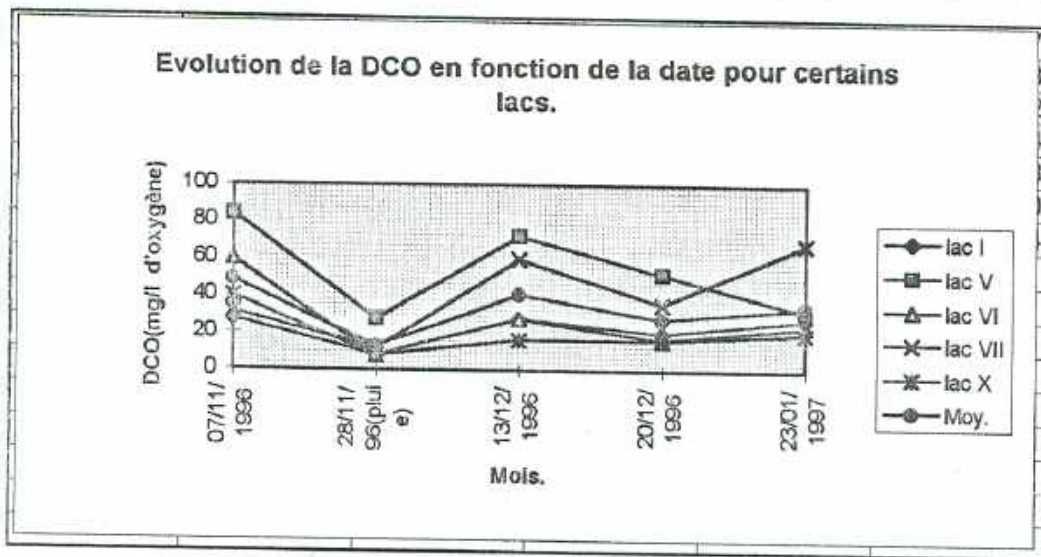


Fig.41 : Evolution de la DCO en fonction de la période de prélèvement pour les lacs.

Le rapport  $\frac{DBO5}{DCO}$  donne une moyenne de 0,74 pour le lac I alors que ce rapport est supérieur à 0,8 pour les autres lacs étudiés ( V; VI; VII et X ). La valeur de la DBO est plus faible pour le lac I. Il en est de même pour la DCO ce qui indique une pollution organique faible. Ce résultat confirme les conclusions tirées à propos de ce lac lors de l'étude en statique.

#### 4- Evolution des couleurs des feuilles des jacinthes dans le temps.

##### a) Principe de la colorimétrie

La vue humaine perçoit la lumière visible sous des longueurs d'onde comprises approximativement entre 380 nm et 780 nm. Les yeux ne distinguent pas les radiations en dessous de 380 nm (ultraviolet) et ceux qui sont au delà de 780 nm (infrarouge). Pour une perception dans le visible et l'obscurité, les yeux peuvent distinguer 3 différentes couleurs par stimulation: le bleu, le vert et le rouge (couleur de base).

Les couleurs observées résultent de l'addition de ces trois signaux. Il apparaît que chaque couleur peut être reconstituée par addition du rouge, du vert et du bleu. Ce principe est utilisé pour évaluer par mesure les différentes couleurs. L'échantillon dont on veut déterminer la couleur par mesure, est illuminé par une lumière qui est souvent la lumière standard illuminante C ou D65.

La lumière standard CIE de type C correspond à la lumière blanche du jour (lumière solaire) avec une température de couleur de 6774 K. La lumière standard de type D<sub>65</sub> correspond à la lumière du jour avec une couleur correspondant à une température de 6504K. Comparée à la lumière standard C, D<sub>65</sub> contient une proportion d'ultraviolet correspondant à la lumière du jour.

Au cours des mesures, l'échantillon est illuminé à un angle de 0°. La radiation qui diffuse est reflétée dans le milieu et enregistré par un élément photosensible sous un angle de 45°. Le spectre de cette source de lumière est ainsi constitué d'un mélange de couleur rouge, bleue et verte. Si l'échantillon absorbe l'une des 3 radiations stimulées, seules les 2 autres seront reflétées.

Selon le Système international en rayonnement (CIE) (DIN 5033), les valeurs associées aux excitations des 3 radiations sont désignées par X, Y et Z pour 2° et 10° pour une observation standard. L'utilisation de ces 3 paramètres semble difficile.

Dans ce système, la valeur de L\* situe la position sur l'axe Blanc / Noir; la valeur de a\*, la position sur l'axe Rouge / Vert; et la valeur de b\*, la position sur l'axe Bleu / Jaune; (voir figure ci-dessous).



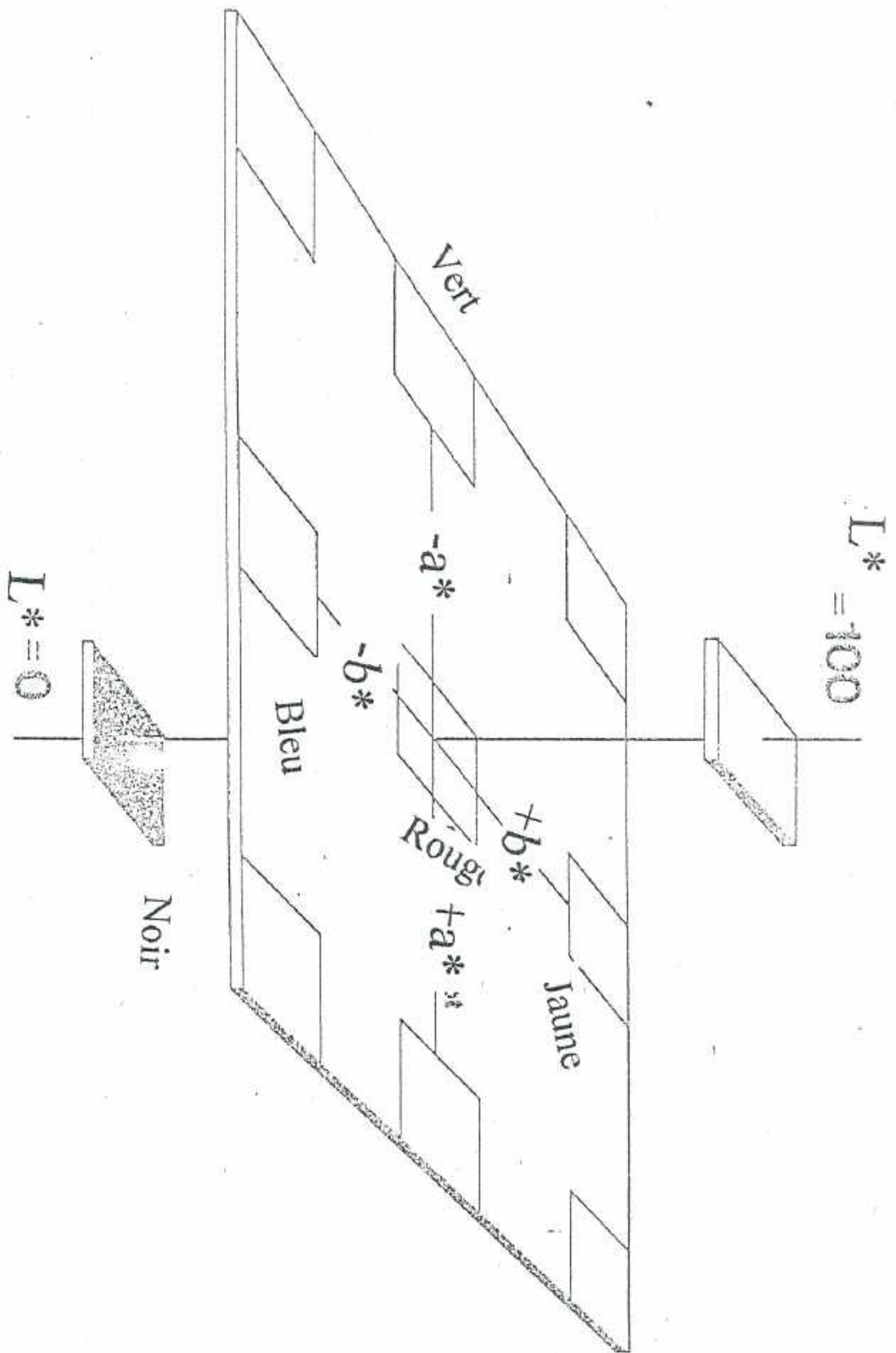


Fig.42 : .Diagramme d'évolution des paramètres de couleur  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$ .

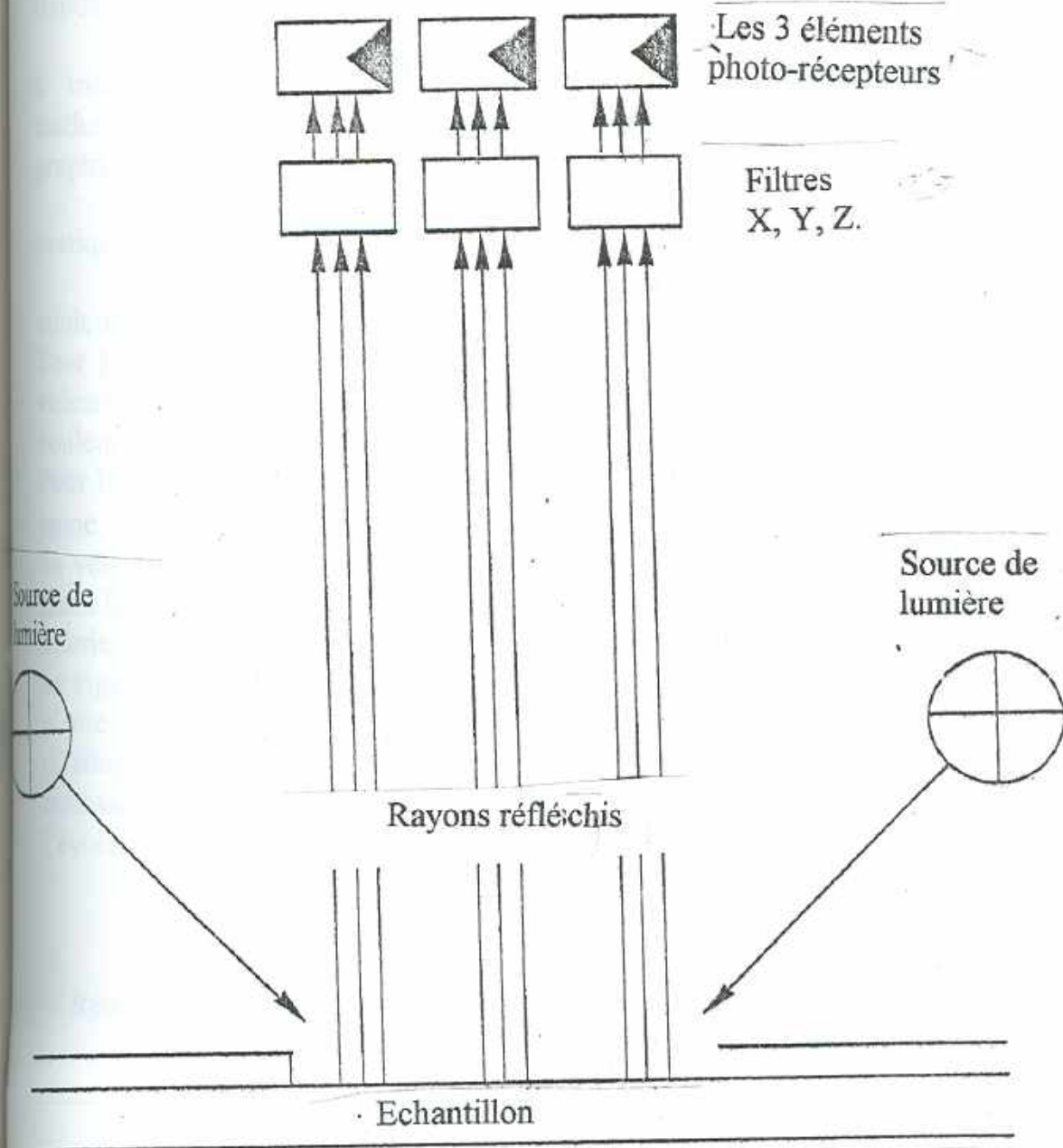


Fig.42 Principe de mesure du colorimètre LFM3



On a les relations suivantes entre  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  et  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

$$L^* = 116 \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

$$a^* = 500(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n})$$

$$b^* = 200(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n})$$

où  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  sont les valeurs données pour la couleur blanche standard avec DIN 6174.

Les avantages du système  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  en comparaison avec le système CIE à triangle de couleurs sont dus au fait qu'une différence observée mathématiquement pour les couleurs est reproduite exactement sur le système de graphique  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ci-dessus.

Le système d'unité  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  standardisé en 1976 est utilisé dans la pratique.

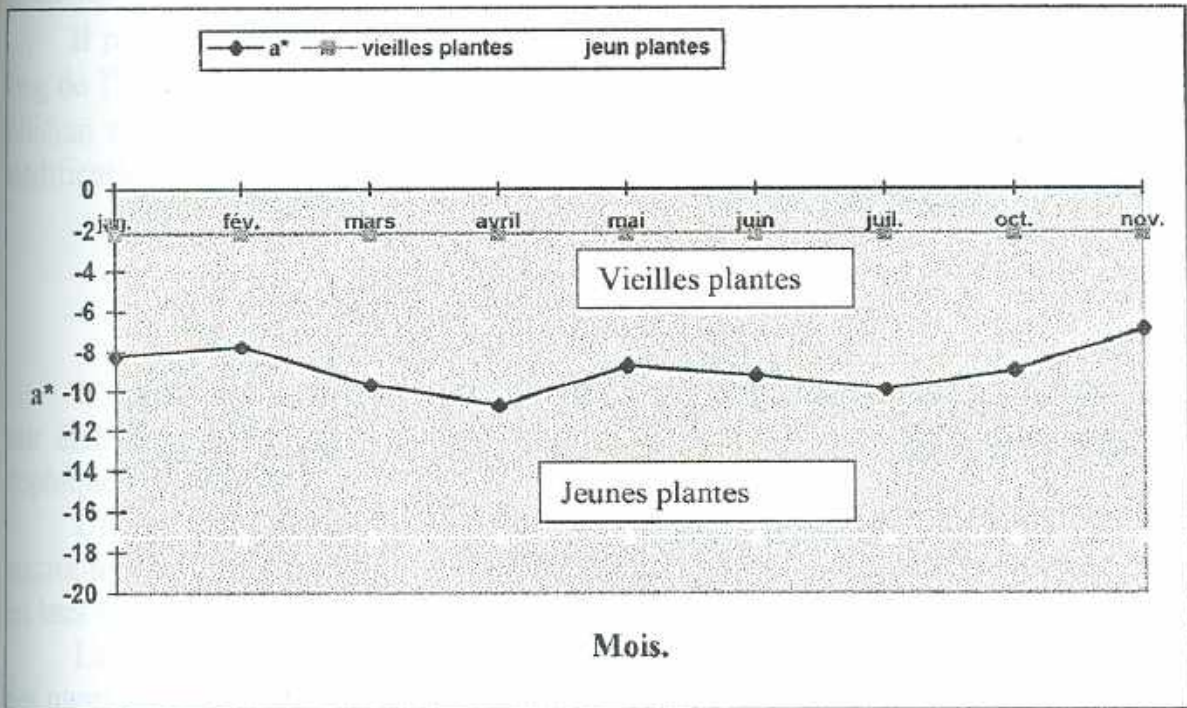
Les paramètres  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  permettent la détermination globale des couleurs avec une prédominance d'une couleur spécifique à chaque paramètre. Pour  $L^*$ , sa valeur varie de zéro (noir) à 100 (blanc); tandis que pour  $a^*$  les valeurs négatives correspondent au vert et les valeurs positives au rouge (la couleur considérée est d'autant plus prononcée que la valeur absolue est élevée). Pour  $b^*$  les valeurs négatives correspondent au bleu et les valeurs positives au jaune. Ainsi  $L^*$  décrit le passage du noir au blanc;  $a^* \in [-a; +a]$  décrit le passage du vert (-a) au rouge (+a) tandis que  $b^*$  décrit le passage du bleu au jaune. Dans le cas des jacinthes, une plante en pleine croissance, aura une valeur de  $a^*$  inférieure à zéro (couleur verte), ainsi plus on a une grande valeur absolue avec un signe négatif plus la plante est verte (grande vitalité). Par contre, lorsque la plante vieillit elle perd sa couleur pour tendre vers une superposition du jaune et du rouge ( $a^*$  et  $b^*$  supérieurs à zéro). Le paramètre  $a^*$  sera retenu pour suivre la croissance des jacinthes par la couleur verte. Le tableau suivant donne l'évolution des paramètres de janvier à novembre 1996.

### c) Résultats et interprétations.

Tableau 34

Résultats d'analyse des couleurs des feuilles des jacinthes en aval du lac VI moyennes mensuelles de janvier à novembre 1996.

| Mois    | $a^*$ | nombre de feuilles<br>(moyenne par analyse) | $L^*$ | $b^*$ |
|---------|-------|---|-------|-------|
| Jan.    | -8,23 | 70  | 34,06 | 18,81 |
| Fév.    | -7,77 | 60  | 34    | 19,79 |
| Mars    | -9,67 | 69  | 34,84 | 20,88 |
| Avril   | -10,7 | 50  | 35,39 | 21,43 |
| Mai     | -8,72 | 41  | 35,16 | 19,86 |
| Juin    | -9,16 | 47  | 33,77 | 19,4  |
| Juil.   | -9,92 | 44  | 33,77 | 17,87 |
|         |       |   |       |       |
| Oct.    | -8,94 | 25  | 32,88 | 18,87 |
| Nov.    | -6,93 | 22  | 34,7  | 19,3  |
| Moyenne | -8,89 |   | 34,39 | 19,57 |



**Fig. 43** : Evolution du paramètre de couleur  $a^*$  des feuilles de jacinthes d'eau en aval du lac VI.

La variation des moyennes mensuelles de  $a^*$  de Janvier à Novembre (hormis les mois d'Août et de Septembre) montre un maximum en Avril et en Juillet avec des moyennes plus faibles en Janvier et Novembre, en saison sèche.

Les études portant sur les jeunes plantes et les vieilles feuilles nous donnent les valeurs moyennes rassemblées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 35**

Valeurs des caractéristiques de couleur des feuilles des jeunes et vieilles jacinthes d'eau.

| Paramètres          | $L^*$ | $A^*$  | $b^*$ |
|---------------------|-------|--------|-------|
| Nature de la plante |       |        |       |
| Jeunes plantes      | 41,65 | -17,24 | 28,45 |
| Vieilles plantes    | 34,6  | -2,21  | 28,45 |

L'observation de la courbe montre que la plus faible valeur obtenue en novembre est  $a^* = -6,93 \approx -7$  ce qui donne une variation de  $a^* = -5$  par rapport aux vieilles plantes. Ceci exclut toute période de vieillissement total de toutes les plantes.



En saison sèche le taux de vieillissement est plus important qu'en saison pluvieuse. Le renouvellement des plantes est continu quelle que soit la saison.

Il ressort de cette étude que les jacinthes prolifèrent pratiquement tout au long de l'année à Yamoussoukro. Le caractère saisonnier des jacinthes d'eau à Abidjan est lié à la présence de la mer qui en période de marée provoque une modification saline des eaux de la lagune.

#### d) Conclusion.

**L'étude statique** de l'eau des lacs de Yamoussoukro a mis en évidence leur état d'eutrophisation avancé, mais toutefois ces lacs sont dans des états trophiques différents.

Un lac peut bien être à l'abri de la prolifération de certains types de macrophytes (lotus) malgré les caractéristiques de ses eaux qui le classent parmi les lacs eutrophes.

La densité de population, les activités humaines, l'état d'assainissement des quartiers d'habitation et la morphologie du lac jouent un rôle très important sur la réponse trophique des plans d'eau à Yamoussoukro.

**L'étude en dynamique** a permis de situer les origines des matières polluantes, leur variabilité par rapport au climat.

L'origine des apports exogènes de nutriments, ainsi que leur mode de pénétration dans le système lacustre apparaît plus clairement comme le confirmeront les résultats et les analyses suivants:

Les apports en éléments fertilisants sont de plusieurs origines:

- une origine liée à l'activité humaine en zone rurale : ce sont les éléments de minéralisation issus des feux de brousse, dont la part est saisonnière et de moindre importance,

- une origine liée à l'activité humaine en zone urbaine : ce sont les apports des rejets domestiques comme les eaux usées et les déchets qui restent la principale source d'eutrophisation.

Les lacs III et IV semblent avoir un apport en nutriments endogène lié à la présence des excréments des caïmans.

La plupart des lacs connaissent la prolifération de plusieurs types de plantes aquatiques; les plantes immergées (algues), enracinées (lotus) et flottantes (jacinthes).

Cette comparaison a permis de faire ressortir les spécificités des différentes formes d'eutrophisation et la compétition entre les algues et les macrophytes. Les jacinthes prolifèrent pratiquement toute l'année avec un regain de vitalité en saisons pluvieuses.

Quatrième partie :

**IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES  
SOURCES D'EUTROPHISATION.**



# IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SOURCES D'EUTROPHISATION

## A) INTRODUCTION.

Cette partie de l'étude a pour but de préciser et d'estimer l'importance des sources polluantes afin d'aboutir à une méthode efficace de lutte contre le phénomène d'eutrophisation. Il s'agit avant tout de mieux caractériser les sources maîtrisables comme dans le cas des eaux usées domestiques et urbaines et de montrer l'existence d'autres sources endogènes comme les excréments des caïmans pour expliquer l'eutrophisation des lacs « aux caïmans » de la présidence.

A travers les caractéristiques des eaux usées prélevées essentiellement autour du lac V qui est un réceptacle recevant toutes les eaux des autres lacs, se confirmera le rôle prépondérant des eaux usées urbaines dans le phénomène d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro. Un clin d'œil sera fait sur quelques lessives habituellement utilisées à Yamoussoukro afin de situer leur importance dans les teneurs en phosphore des eaux usées.

## B) LES METHODES EXPERIMENTALES.

Les méthodes expérimentales sont les mêmes que celles utilisées dans l'analyse des eaux des lacs.

Les analyses ont été faites sur une période allant de 1995 à 1997.

La période des pluies correspond à la période de grand débit, la valeur minimale correspondant à la saison sèche. Il est à noter que, du fait du manque de points de collecte d'eaux usées, ces eaux arrivent généralement par des pistes de ruissellement; de ce fait le débit n'est pas connu. Certains points d'égout ont été parfois abandonnés, lorsque leurs débits, devenus très faibles, ne permettaient plus un bon prélèvement.

Les paramètres étudiés sont: la température, le pH, les M.E.S (matières en suspension), la conductivité, les nutriments phosphore et azote, les éléments de pollution biologique: PI (indice permanganate) D.B.O. (demande biochimique en oxygène) D.C.O. (demande chimique en oxygène).

Dans chaque cas l'accent est mis sur l'importance des apports des eaux usées, comparés à la teneur des eaux du lac V.

## C) GENERALITES.

### 1- Origine, définition et qualité des eaux usées.

La résolution des problèmes de pollution des eaux usées comporte aujourd'hui une approche multidisciplinaire dans laquelle les qualités des eaux dépendent des exigences de l'agriculture, de l'urbanisme, des loisirs et des industries. Dans tous les cas, il existe un rapport entre le bénéfice résultant d'une qualité déterminée d'eau et le coût d'obtention d'une telle qualité.

Les eaux usées proviennent de quatre sources principales:

- eaux usées domestiques.
- eaux usées résiduelles industrielles
- effluents agricoles
- eaux pluviales.

Dans le cas de Yamoussoukro, la deuxième source est quasiment inexistante. Il ne reste que les eaux usées domestiques, les eaux pluviales et rejets urbains et dans certains cas, les effluents agricoles.

### 2- Estimation de la composition organique.

Bien que ces interprétations doivent se faire avec beaucoup de précautions, la teneur en matière organique d'une eau usée, s'évalue par chacun des trois essais suivants:

- La DBO fournira la mesure des teneurs en matières organiques carbonées biodégradables et sous certaines conditions, celles en matières azotées oxydables présentes dans l'eau résiduaire.
- La DCO mesure la totalité des matières organiques carbonées à l'exception de certains constituants aromatiques, comme le benzène, qui ne subissent pas d'oxydation complète au cours de la réaction. La DCO est une réaction d'oxydoréduction de sorte que d'autres substances réductrices telles que les sulfites, les sulfures et les ions ferreux sont également oxydés entraînant une augmentation de la DCO.
- Le COT (carbone organique total) permet de mesurer la totalité du carbone, sous forme de  $\text{CO}_2$  de sorte que le carbone des composés minéraux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  etc) présent dans l'eau usée est éliminé avant l'analyse ou retranché dans le calcul.

Il faut souligner que de grandes précautions sont prises dans l'interprétation de l'essai de COT et dans la corrélation des résultats d'un de ces essais avec les résultats d'un autre.

Dans le cas de cette étude, seules la DBO et la DCO ont été considérées pour caractériser les eaux d'égout du lac V.



### 3- Caractéristiques des eaux usées urbaines.

Les eaux d'égout urbaines renferment des matières organiques sous forme de matières solubles colloïdales et en suspension. La part de la pollution dans les eaux d'égout est habituellement exprimée par rapport à l'habitat. Ainsi Hunter et Henkelekian<sup>(39)</sup> ont étudié pour 73 cités dans 27 états aux U.S.A pendant la période 1958-1964 un débit d'eau d'égout de 511 litres/habitants/jour, et obtenu une DBO de 90,78 g/habitants/jour et une teneur en matière en suspension de 140 g/habitants/jour.

Ce dernier a donné comme valeurs caractéristiques moyennes de rejets urbains recommandées celles rassemblées dans le tableau suivant:

**Tableau 36**

Caractéristiques moyennes de rejets urbains d'après Hunter et Heukelekian.

| Caractéristique                         | Maximum | Moyenne | Minimum |
|---|---------|---------|---------|
| pH                                      | 7,5     | 7,2     | 6,8     |
| matière décantable (mg/l)               | 6,1     | 3,3     | 1,8     |
| matières solides totales (mg/l)         | 646     | 453     | 322     |
| matières volatiles totales (mg/l)       | 388     | 217     | 118     |
| M.E.S (mg/l)                            | 258     | 145     | 83      |
| matières volatiles en suspension (mg/l) | 208     | 120     | 62      |
| DCO (mg/l)                              | 436     | 288     | 159     |
| DBO (mg/l)                              | 276     | 147     | 75      |
| chlorure (mg/l)                         | 45      | 35      | 25      |

Cette même étude s'est intéressée aux volumes d'eau d'égout et à la DBO pour diverses collectivités comme les écoles, les hôpitaux etc.

Cet exemple tiré de la littérature montre toute la complexité et l'importance du travail à mettre en œuvre pour cerner le problème des eaux usées urbaines.

Dans le cas de Yamoussoukro il n'existe pas de données statistiques fiables pour les eaux d'égout des lacs étudiés, entourés par des quartiers à fort taux d'habitats évolutifs.

Toutes ces considérations nous ont amené à tenir compte des réalités du milieu d'étude pour que ce travail aboutisse à des solutions réalisables et économiquement rentables.

Dans le même ordre d'idée, nous nous sommes intéressé aux paramètres en rapport avec l'eutrophisation ( $O_2$  dissous, azote, phosphore) en plus des paramètres classiques déterminés dans le cadre du traitement des eaux.

D) RESULTATS DES ANALYSES DES EAUX USEES DES  
EGOUTS DU LAC V.

1- Présentation des points de prélèvement.

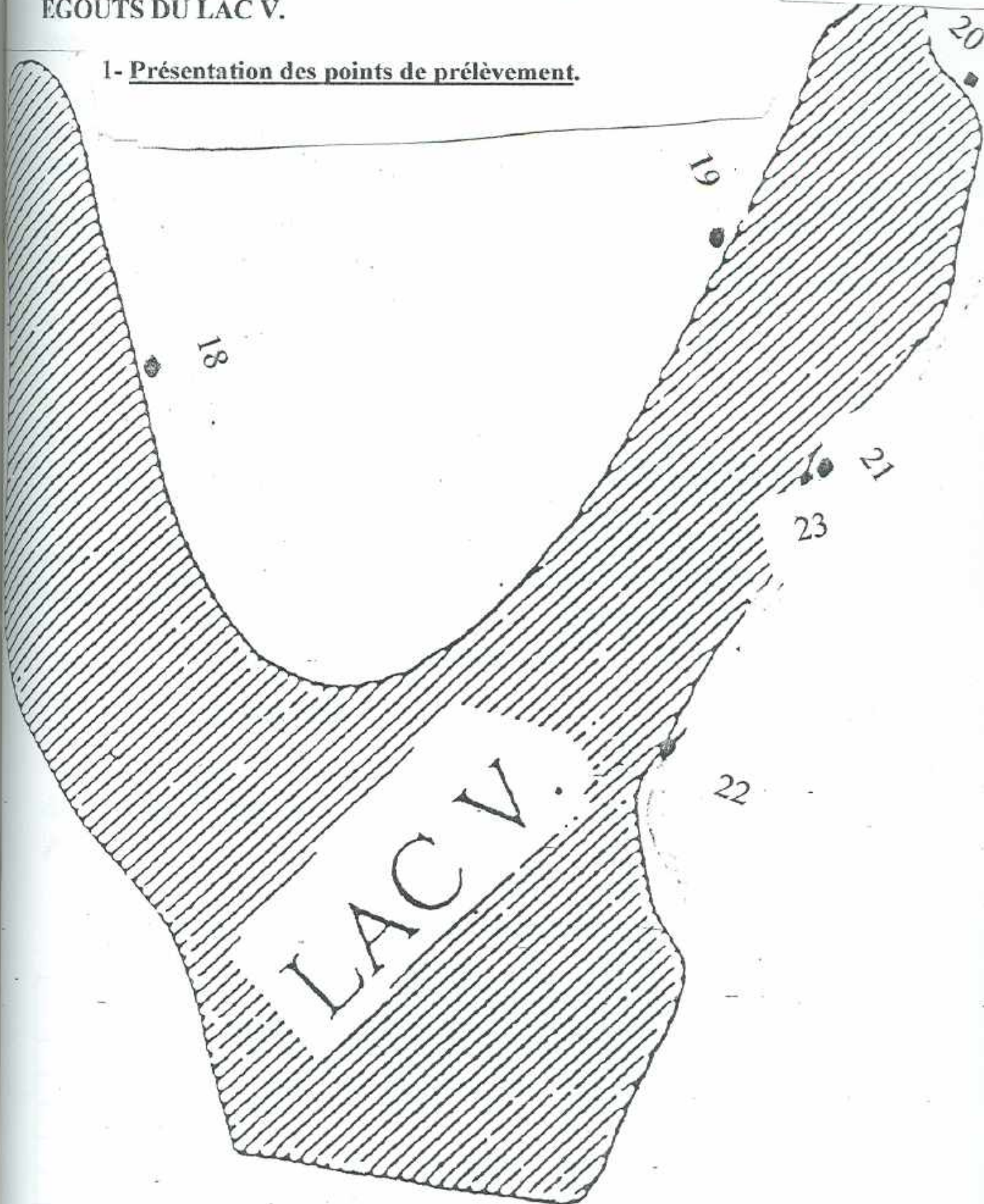


Fig.44 : Présentation des points de prélèvement des eaux d'égouts du lac V



Le point 18 est un égout provenant du quartier « Energie ». C'est un égout collecteur des eaux usées domestiques de certaines habitations de ce quartier.

Le point 19 : égout de l'hôpital de Yamoussoukro, collecte les eaux hospitalières issues des activités quotidiennes des patients et du corps médical mais aussi celle de la morgue. L'hôpital est juste à côté du lac V qui reçoit ces eaux sans traitement et de façon continue.

Le point 20 correspond au déversoir du lac VII à fort débit dont les apports en nutriments constituent une source importante de pollution du lac V. En effet ce lac situé entre la gare routière dénommée « gare d'Abidjan » et le quartier Dioulakro reçoit toutes collecte les eaux usées en provenance du centre commercial « Mô-Fétai » et des zones avoisinantes. Ce point a été de ce fait classé comme point d'égout pour ce lac V.

Les points 21 et 23 reçoivent les eaux de l'égout à ciel ouvert situé entre la grande mosquée et le foyer des handicapés physiques de Yamoussoukro. Les eaux usées proviennent du quartier Dioulakro. Le point 21 est prélevé avant que l'eau du lac V ne soit en contact avec les eaux usées alors que le point 23 est commun à ces deux types d'eau.

Le point 22 situé en aval du marché de moutons, reçoit les eaux de l'autre partie du quartier Dioulakro. Cet égout, compte tenu de sa position reçoit les éléments de déjection des animaux.

## 2-Paramètres physico-chimiques.

### a) Température.

Pour la période d'analyse la température moyenne est de 28,16°C. Les différences sont relativement faibles comme le montre le tableau de résultats suivant:

**Tableau 37**

Température moyenne mensuelle des eaux usées en °C.

| Dates<br>Point de prélèvement | Mars  | Avril | Mai   | Juil  | Août  | Moyenne |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Point 18                      | 28,7  | 28,5  | 28,2  | 27,2  | 27,8  | 28,08   |
| Point 19                      | 29,1  | 31,1  | 29,7  | 29,2  | 28,5  | 29,52   |
| Point 20                      | 27,6  | 27,5  | 27,7  | 28    | 27,4  | 27,64   |
| Point 21                      | 32    | 31,5  | 28,9  | 28,8  | 27,7  | 29,78   |
| Point 22                      | 28,4  | 27,3  | 28,7  | 28,1  | 27    | 27,9    |
| Point 23                      |       |       |       | 26,5  | 25,6  | 26,05   |
| moyenne                       | 29,16 | 29,18 | 28,64 | 27,97 | 27,33 | 28,16   |

Ces températures dépendent d'une façon générale de la température du milieu environnant et de la position de l'égout, à ciel ouvert ou souterrain comme le montrent la figure ci-dessous.

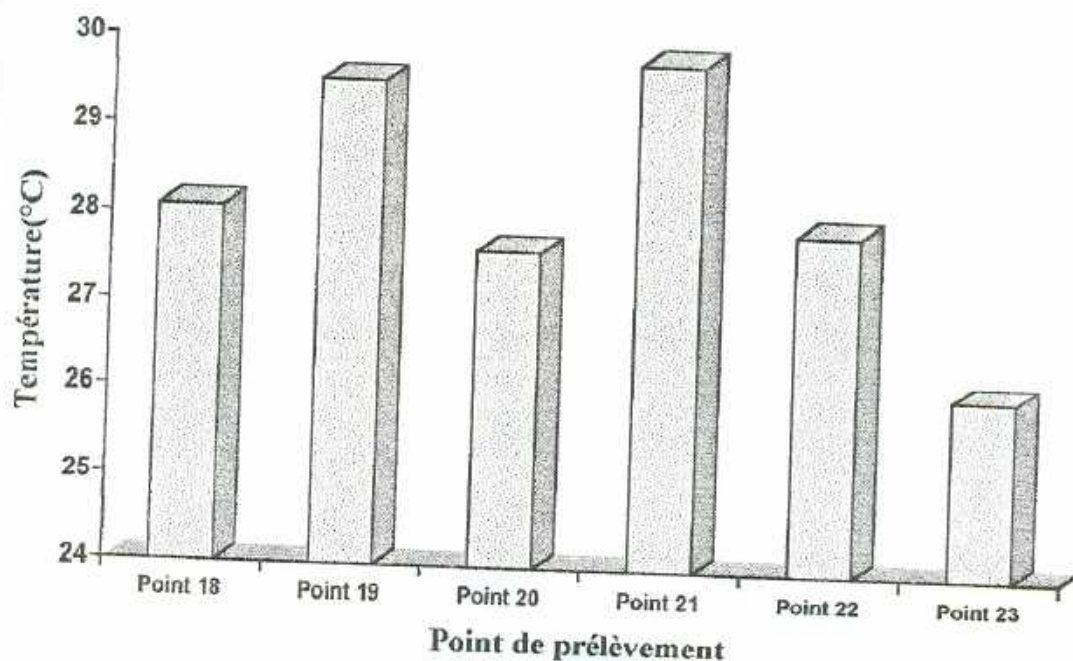


Fig.45 : Moyenne de la température en °C des eaux d'égout par point de prélèvement.

### b) Conductivité.

Tableau 38

Conductivité moyenne des eaux usées par point de prélèvement ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

| Dates                | mars  | avril | mai  | juillet | août   | moyenne |
|----------------------|-------|-------|------|---------|--------|---------|
| Point de prélèvement |       |       |      |         |        |         |
| Point 18             | 456   | 843   | 887  | 850     | 508    | 708,8   |
| Point 19             | 145   | 157   | 194  | 331     | 257    | 216,8   |
| Point 20             | 420   | 374   | 246  | 273     | 264    | 315,4   |
| Point 21             | 2098  | 2260  | 1553 | 344     | 302    | 1311,4  |
| Point 22             | 555   | 522   | 715  | 1014    | 1029   | 767     |
| Point 23             |       |       |      | 508     | 572    | 540     |
| moyenne              | 734,8 | 831,2 | 719  | 553,3   | 448,67 | 643,23  |

La plus grande valeur est obtenue pour le point 21:  $1311,4 \mu\text{S}/\text{cm}$ , qui apparaît comme l'égout le plus chargé en polluants. La plus faible valeur est de  $216,8 \mu\text{S}/\text{cm}$  au point 19, la moyenne étant de  $643,23 \mu\text{S}/\text{cm}$  comme le



montre la figure ci-dessous. Ces valeurs sont relativement très importantes comparées à celle des eaux des lacs (où la moyenne est de  $237\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Il apparaît que ces eaux sont chargées en sels minéraux.

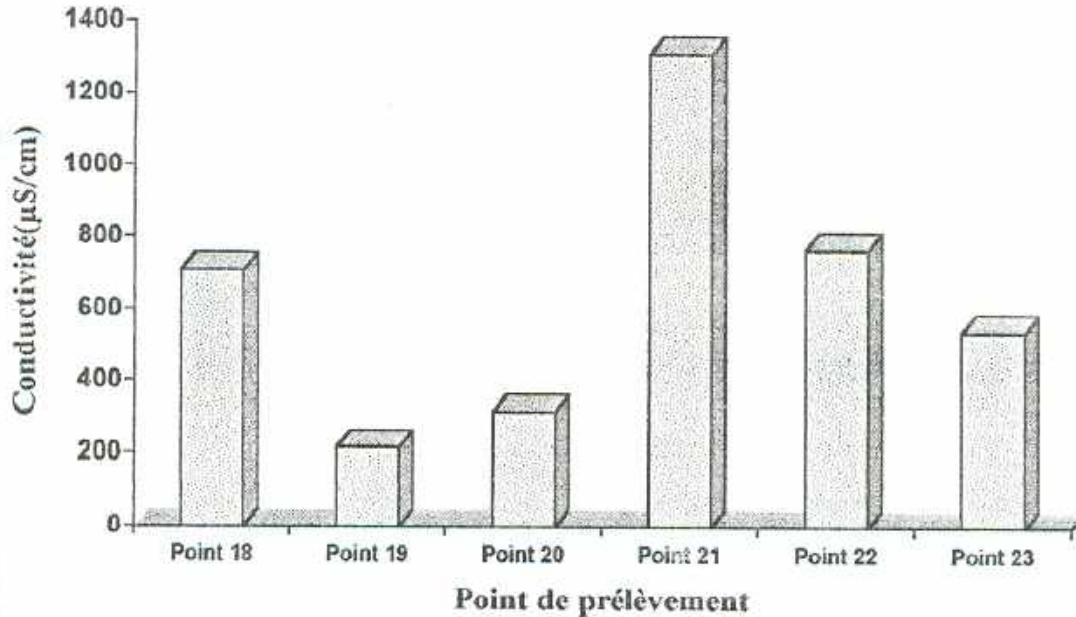


Fig.46 : Moyenne de la conductivité pour les eaux usées du lac V ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### c) pH

Tableau 39

Valeur moyenne du pH des eaux d'égout à chaque point de prélèvement.

| Dates<br>Point de prélèvement | Avril | Mai | Mars | Moyenne. |
|-------------------------------|-------|-----|------|----------|
| 18                            | 7,2   | 7,3 | 6,9  | 7,1      |
| 19                            | 6,9   | 7,2 | 7,1  | 7,1      |
| 20                            | 6,6   | 6,7 | 6,9  | 6,7      |
| 21                            | 7,7   | 7,7 | 7,9  | 7,8      |
| 22                            | 6,7   | 7,6 | 7,0  | 7,1      |
| Moyenne                       | 7,0   | 7,3 | 7,2  | 7,2      |

L'observation des valeurs du tableau.39.précédent et de la figure ci-dessous, montre que les pH sont voisins de 7, qui est le pH favorable à prolifération des microorganismes. La plus grande valeur est obtenue pour le point 21 :pH=7,8 et la plus faible valeur pour le point N°20 :pH=6,7 qui est au déversoir du lac VII comportants diverses macrophytes.

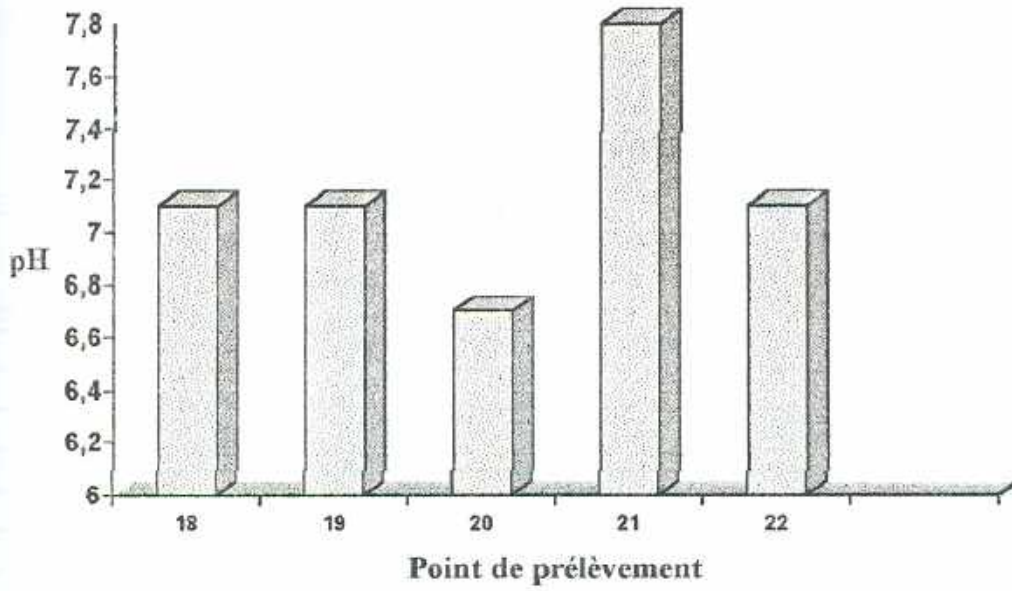


Fig .47 : Moyenne du pH pour les eaux usées à chaque point de prélèvement du lac V



## d)Oxygène dissous.

Tableau 40

Moyennes mensuelles de l'oxygène dissous en mg/l  
pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

| Dates                | Mars | Avril | Mai  | Juillet | Août | Moyenne |
|----------------------|------|-------|------|---------|------|---------|
| Point de prélèvement |      |       |      |         |      |         |
| Point 18             | 0,4  | 1,4   | 2,2  | 0,3     | 0,1  | 0,88    |
| Point 19             | 1,6  | 1,0   | 1,2  | 0,7     | 1,0  | 1,10    |
| Point 20             | 1,1  | 0,8   | 0,6  | 0,4     | 1,0  | 0,78    |
| Point 21             | 0,1  | 0,1   | 0,1  | 0,4     | 2,4  | 0,62    |
| Point 22             | 1,5  | 0,6   | 3,0  | 4,8     | 7,2  | 3,42    |
| Point 23             |      |       |      | 3,2     | 2,5  | 2,85    |
| Moyenne              | 0,94 | 0,78  | 1,42 | 1,63    | 2,37 | 1,61    |

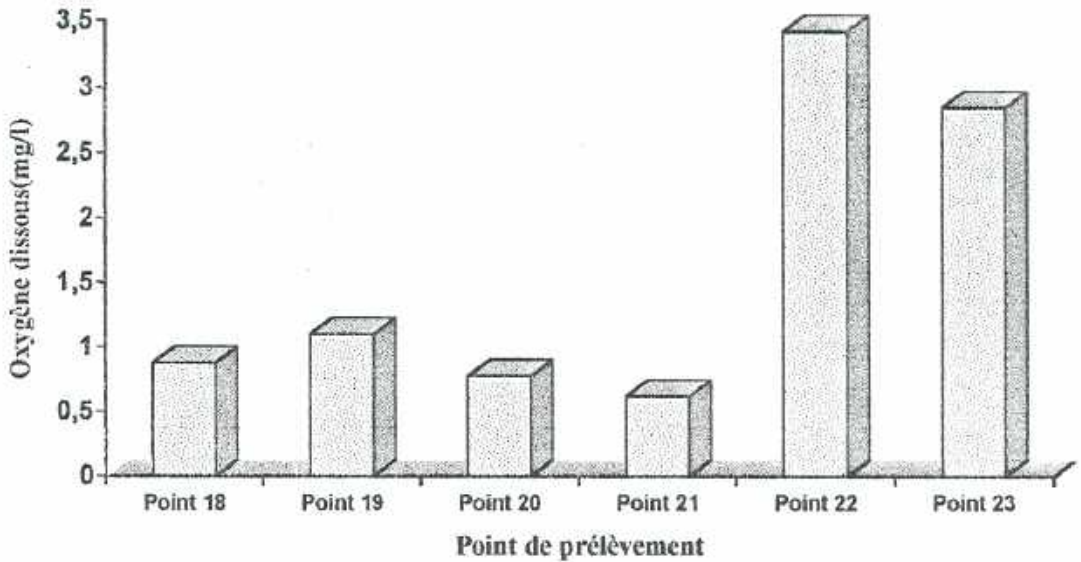


Fig.48 : Moyenne de l'oxygène dissous en mg/l  
pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

Les valeurs mensuelles obtenues sont très faibles et varient de 0,1 à 7,2. Cette faiblesse est beaucoup plus accentuée au mois d'Avril. La moyenne globale est de 1,61 mg/l d'O<sub>2</sub> dissous. Ces valeurs faibles sont dues à la présence des microorganismes qui participent à la biodégradation des polluants surtout organiques. Ce constat est en accord avec l'interprétation des valeurs de pH. La différence entre la teneur en oxygène dissous des eaux usées et celle des lacs est en moyenne de 1,1 mg/l. Le point 22 a la plus forte

valeur avec un maximum de 7,2 mg :l d'oxygène dissous comme le montre la figure ci-dessus.

e) M.E.S (Matières en suspension).

Tableau 41

Moyennes mensuelles des M.E.S. en mg/l pour les eau usées à chaque point de prélèvement du lac V.

| Dates                | Avril | Mai   | Juillet | Août  | Mars  | Moyenne |
|----------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|
| Point de Prélèvement |       |       |         |       |       |         |
| 18                   | 340   | 36    | 104     | 325,5 | 50    | 164,62  |
| 19                   | 18,8  | 32,2  | 47,5    | 26,75 | 40    | 33,05   |
| 20                   | 17,8  | 52,4  | 16      | 12    | 23    | 24,24   |
| 21                   | 81,9  | 74    | 67,5    | 19,85 | 115   | 71,65   |
| 22                   | 30,5  | 23,9  | 21      | 34,25 | 23    | 26,53   |
| 23                   | 43    | 72,3  | 49,25   | 12,25 | 30    | 33,62   |
| Moyenne              | 82,22 | 43,07 | 50,86   | 71,77 | 46,83 | 58,95   |

Les valeurs obtenues sont relativement plus importantes pour les eaux d'égout que pour celles des lacs. Cependant on trouve parfois une très grande variation d'un égout à un autre (exemple: le point 18: 164,62 mg/l et le point 19: 33,05 mg/l). Les points 18 et 21 paraissent comme les points d'égout les plus chargés en M.E.S comme le montre la figure ci-dessous. Ces points d'égout à ciel ouvert reçoivent les eaux ménagères et les déchets alors que le point 19 qui est l'égout de l'hôpital est constituée surtout des divers nettoyages moins chargée en matière en suspension.

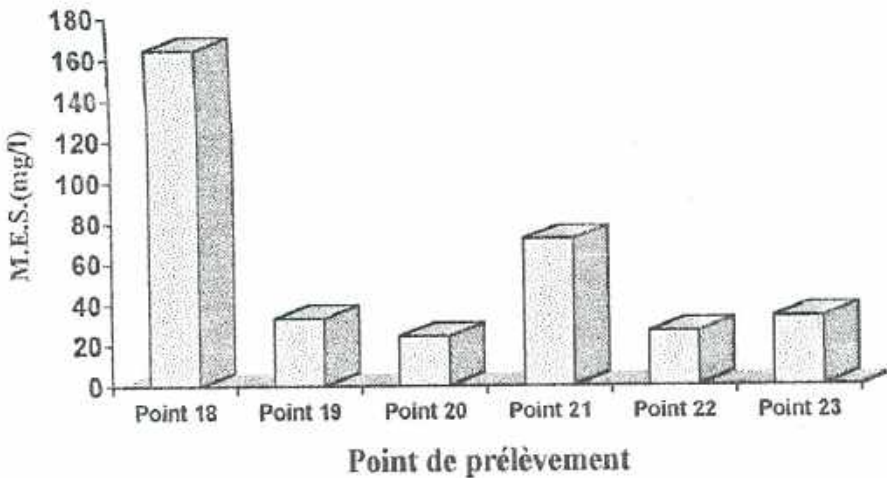


Fig. 49 : Moyennes des matières en suspension pour les eaux usées d'égout à chaque point de prélèvement du lac V en mg/l.



### 3- Paramètres nutritifs.

#### a) Le phosphore total eau filtrée.

Tableau 42

Moyennes mensuelles du phosphore total en mg/l  
pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

| Dates<br>Point de<br>prélèvement | Mars | Avril | Mai  | Juillet | Août | Oct.  | Déc. | Jan.  | Moyenne |
|----------------------------------|------|-------|------|---------|------|-------|------|-------|---------|
| 18                               | 0,7  | 0,24  | 0,5  | 0,73    | 0,13 |       |      |       | 0,46    |
| 19                               | 0,28 | 0,21  | 0,41 | 1,1     | 0,85 |       |      |       | 0,57    |
| 20                               | 0,42 | 0,07  | 0,07 | 0,06    | 0,04 |       |      |       | 0,13    |
| 21                               | 3,1  | 2,68  | 1,37 | 0,07    | 0,02 | 0,176 | 1,02 | 0,204 | 0,71    |
| 22                               | 1,5  | 1,57  | 0,42 | 0,085   | 0,02 | 0,211 | 8,02 | 1,764 | 2,68    |
| 23                               | 0,32 | 0,36  | 0,24 | 0,16    | 0,06 | 0     | 0,17 | 0,022 | 0,105   |
| Moyenne                          | 1,05 | 0,86  | 0,5  | 0,37    | 0,19 |       |      |       | 0,59    |

Les valeurs obtenues indiquent des teneurs en phosphore très importantes pour l'eau filtrée. Les points les plus chargés sont : 22 ; 21 et 19 comme le montre la figure ci-dessus. Les points 21 et 22 collectent les eaux usées du quartier Dioulakro à fort taux d'habitats évolutifs. Pour ces deux points les eaux domestiques sont directement entraînées vers ces égouts sans aucune précaution puis drainées vers le lac V. Le point 19 est l'égout de l'hôpital ; sa forte teneur en phosphore est liée aux lessives, aux détergents, aux produits pharmaceutiques chimiques quotidiennement utilisés. De part son débit et sa forte teneur en phosphore, cet égout constitue une source de nutriments mais aussi des divers polluants car il collecte des eaux usées hospitalières.

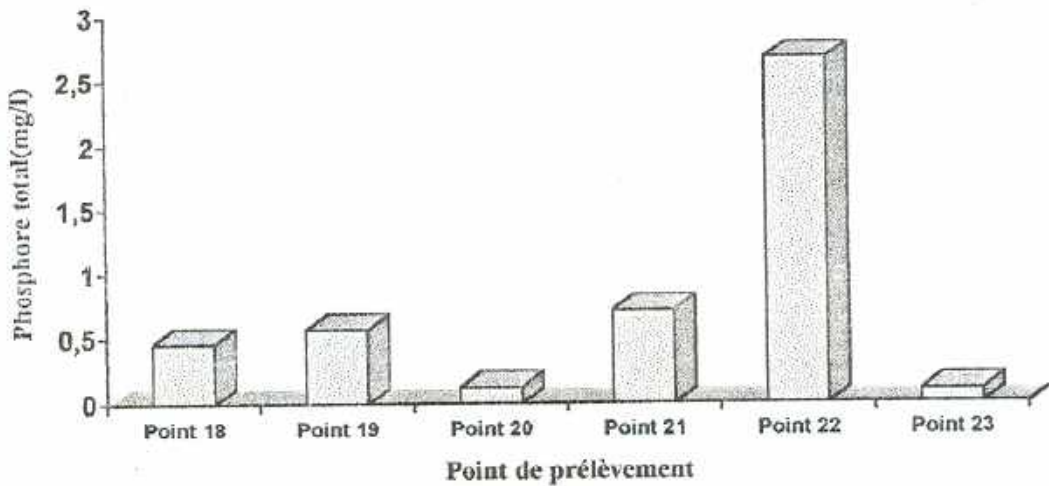


Fig. 50 : Moyennes de  $P_{tot}$  de l'eau filtrée en mg/l pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

#### b) Phosphore total dans les M.E.S.

Tableau 43

Moyennes du phosphore total en mg/l dans les matières en suspension des eaux usées d'égout du lac V.

| Dates                | Mars | Avril | Mai  | Juillet | Août | Moyenne |
|----------------------|------|-------|------|---------|------|---------|
| Point de prélèvement |      |       |      |         |      |         |
| 18                   | 2,6  | 0,09  | 0,79 | 8,01    | 0,43 | 2,38    |
| 19                   | 0,5  | 1,21  | 0,95 | 0,93    | 4,44 | 1,61    |
| 20                   |      | 1,57  | 0,39 | 1,21    | 1,1  | 1,07    |
| 21                   | 0,68 | 2     | 1,9  | 0,65    | 1,15 | 1,28    |
| 22                   | 1,4  |       | 1,59 | 1,18    | 0,77 | 1,34    |
| 23                   | 0,17 | 1,38  | 0,49 | 1,25    | 2,48 | 1,15    |
| Moyenne              | 1,07 | 1,25  | 1,02 | 2,21    | 1,73 | 1,45    |

La teneur en phosphore des matières en suspension est pratiquement la même pour les points 21 ;22 et 23, les points 18 et 19 possédant les plus grands taux. La différence des teneurs pour ces deux groupes de points est due au fait que les deux derniers points ne collectent que des eaux usées domestiques alors que les autres drainent aussi des déchets domestiques surtout lorsqu'il pleut.



La valeur moyenne qui est de 1,45mg/l est très élevée. Ces eaux qui se déversent dans les lacs constituent, à travers la charge en phosphore des M.E.S., une source en nutriments des sédiments et sont à la base de l'eutrophisation à macrophytes enracinés.

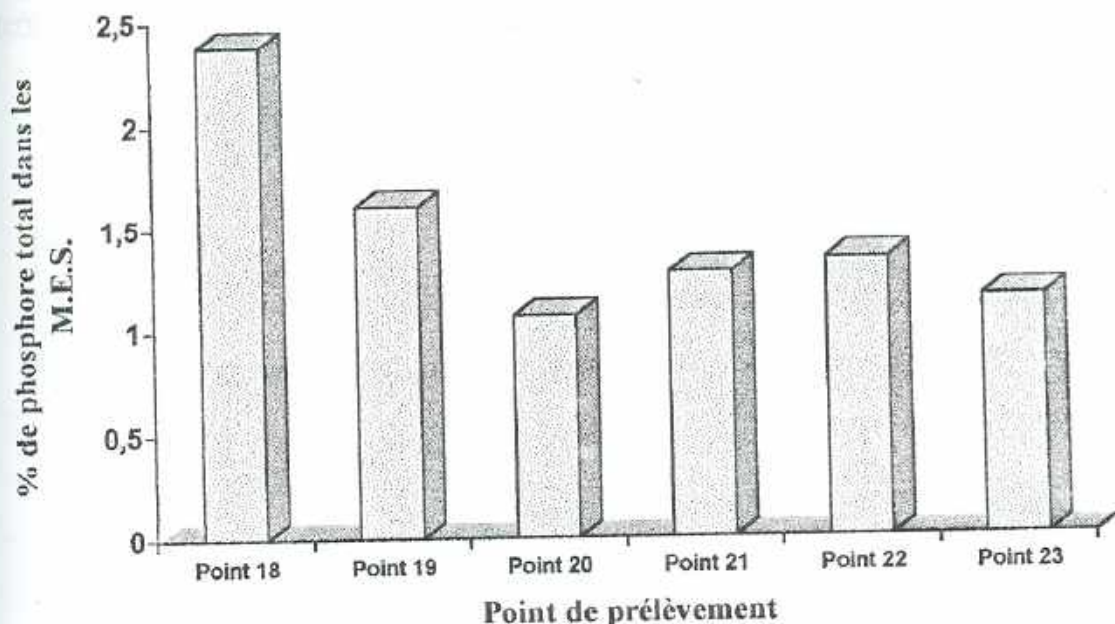


Fig. 51 :Teneur en % des M.E.S en phosphore pour les eaux usées se déversant dans le lac V..

### c) Phosphates.

Tableau 44

Moyennes mensuelles du phosphate en mg/l pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

| Dates                | Mars | Avril | Mai  | Juillet | Août  | Moyenne |
|----------------------|------|-------|------|---------|-------|---------|
| Point de prélèvement |      |       |      |         |       |         |
| 18                   | 0,7  | 0,18  | 0,48 | 0,38    | 0,1   | 0,37    |
| 19                   | 0,25 | 0,17  | 0,38 | 1       | 0,8   | 0,52    |
| 20                   | 0,42 | 0,04  | 0,05 | 0,04    | 0,014 | 0,11    |
| 21                   | 2,68 | 1,86  | 0,87 | 0,05    | 0,008 | 1,09    |
| 22                   | 1,4  | 1,07  | 0,36 | 0,05    | 0,014 | 0,58    |
| 23                   | 0,13 | 0,28  | 0,22 | 0,14    | 0,005 | 0,16    |
| Moyenne              | 0,93 | 0,6   | 0,39 | 0,28    | 0,157 | 0,47    |

Pour les phosphates, la figure ci-dessous montre que le point 21 qui est un égout en provenance du quartier Dioulakro présente la plus forte moyenne. Cependant, les autres points restent des points à forte teneur en phosphates avec parfois des débits importants comme c'est le cas pour le point 19 : égout de l'hôpital et constituent des sources permanentes en nutriments phosphorés directement assimilables par les plantes.

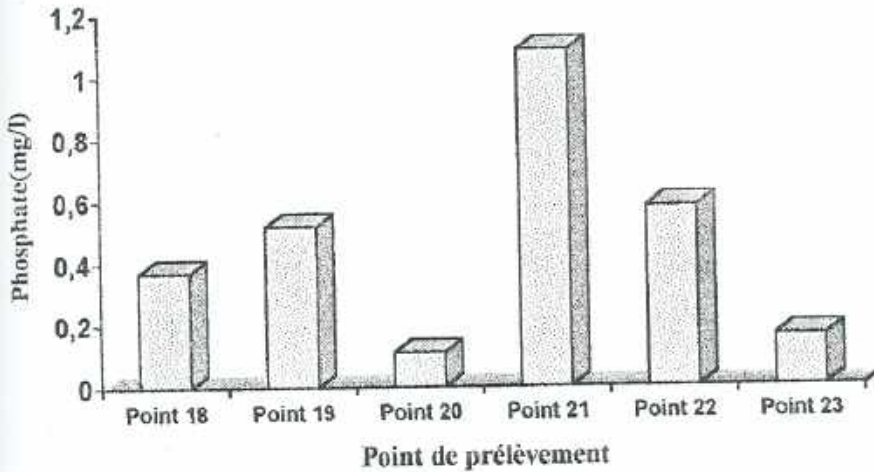


Fig. 52 Moyenne des phosphates pour les eaux usées du lac V.

#### d) Nitrates.

Tableau 45

Valeurs du nitrate en mg/l pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

| N° d'ordre des analyses | N°1   | N°2  | N°3   | N°4  | N°5  | Moyenne. |
|-------------------------|-------|------|-------|------|------|----------|
| Point de prélèvement    |       |      |       |      |      |          |
| 18                      | 0,1   | 4,04 | 3,732 |      |      | 2,624    |
| 19                      | 0,32  | 0,17 | 0,049 | 0,11 | 0,3  | 0,19     |
| 20                      | 0,056 | 0,02 | 0,03  |      |      | 0,035    |
| 21                      | 0,084 | 0,01 | 0,028 | 0,07 | 0    | 0,038    |
| 22                      | 0,53  | 8,7  | 4,79  | 8,37 | 1,05 | 4,688    |
| 23                      | 0,04  | 0,01 | 0,067 | 0,12 | 0,04 | 0,055    |
| Moyenne.                | 0,19  | 2,16 | 1,45  | 2,17 | 0,35 | 1,27     |

Les points 18 et 22 sont les plus polluants en nitrates comme le montre la figure ci-dessous.



Dans le cas particulier du point 22, les déjections des moutons sont sans doute, à la base de cette forte teneur car il s'est installé, juste à côté de ce point un marché de moutons. Ce marché joue en même temps le rôle d'étable pour les commerçants – éleveurs impliqués dans cette activité.

La proximité des habitations et le drainage des eaux des sanitaires du quartier « Energie » expliquent la forte valeur de nitrate obtenue au point 18.

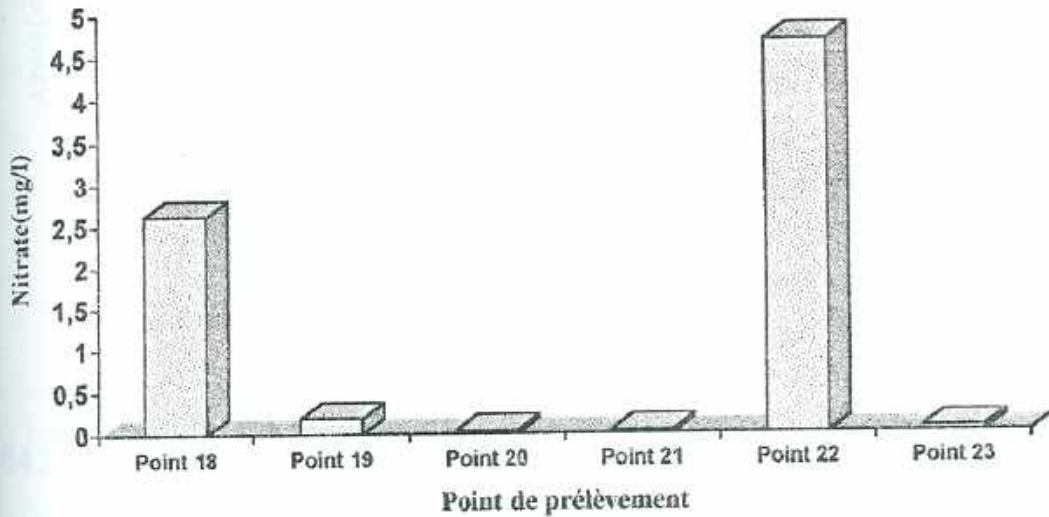


Fig.53 : Moyenne de nitrate en mg/l dans les eaux usées se déversant dans le lac V..

e) Azote total kjeldhal (NTK) pour l'eau brute.

Tableau 46

Moyennes mensuelles d'azote total kjeldhal (eau brute)  
pour les eaux usées du lac V en mg/l.

| Dates                | Juillet | Août  | Sept. | Oct.  | Déc.  | Moyenne |
|----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Point de prélèvement |         |       |       |       |       |         |
| 18                   | 5,6     | 8,4   |       | 3,1   |       | 5,7     |
| 19                   | 10,08   | 14    | 14    | 8,5   |       | 11,65   |
| 20                   | 2,89    | 4,48  |       |       | 5,08  | 4,15    |
| 21                   | 3,92    | 14,93 | 8,4   | 28    | 11,38 | 13,37   |
| 22                   | 3,96    | 14,12 | 2,8   | 79,84 |       | 25,18   |
| 23                   |         | 4,85  | 3,36  | 9,98  | 4,94  | 5,78    |
| Moyenne.             | 5,29    | 10,13 | 7,14  | 25,88 | 7,13  | 10,97   |

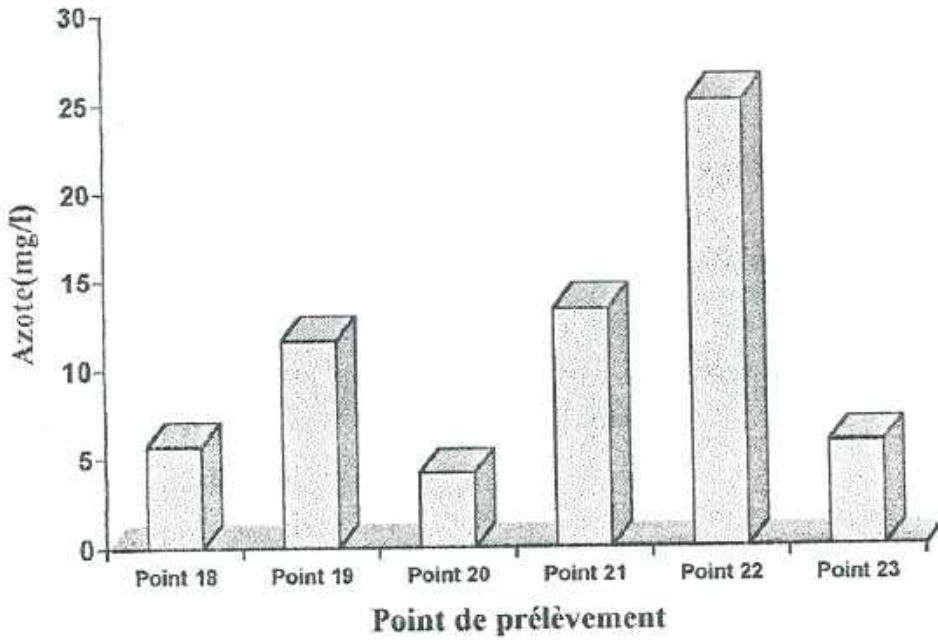


Fig. 54 : Azote total Kjeldal de l'eau brute en mg/l pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

**Tableau 47**

Moyennes mensuelles de l'azote total kjeldhal de l'eau filtrée pour les eaux usées se déversant dans le lac V.

| Dates                | Juillet | Août  | Sept. | Oct.  | Déc.  | Moyenne |
|----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Point de prélèvement |         |       |       |       |       |         |
| Point 18             | 2,59    | 2,24  |       | 2,4   |       | 3,13    |
| Point 19             | 8,375   | 11,2  | 9,52  | 5,5   |       | 7,28    |
| Point 20             | 3,13    | 3,9   |       |       | 4,24  | 1,26    |
| Point 21             | 11,4    | 10,53 | 6,72  | 27,23 | 10,58 | 1,94    |
| Point 22             | 7,785   | 3,36  | 2,8   | 23,44 |       | 1,54    |
| Point 23             | 3,55    | 3,55  | 3,36  | 5,10  | 3,24  | 2,52    |
| Moyenne              | 6,14    | 5,8   | 5,6   | 12,73 | 6,02  | 2,94    |



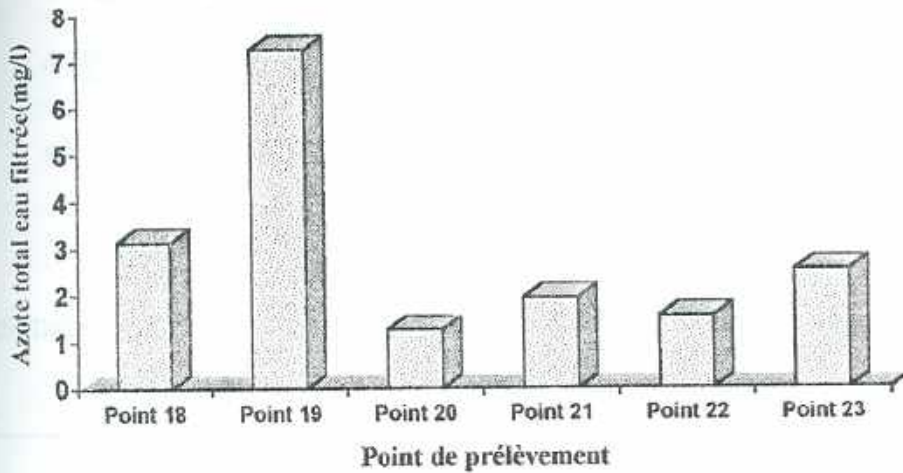


Fig. 55 : Azote total kjeldhal (eau filtrée) en mg/l des égouts du lac V.

Les points 19, 22, 21 fournissent les plus grands taux d'azote total comme l'indiquent les tableaux.46; et 47 des résultats.

Le cas du point 19 correspondant à l'égout de l'hôpital de Yamoussoukro est très préoccupant car son débit est très important et ne varie pratiquement pas au cours de l'année; alors qu'il fait partie des points à fortes teneurs de nutriments.

Pour les eaux brutes la moyenne générale est de 10,97 tandis qu'elle est de 6,14 pour les eaux filtrées soit une différence de 4,83. L'azote total Kjeldahl contenu dans les matières en suspension représente ainsi 44% en moyenne et constitue une source potentielle de l'enrichissement en nutriment des sédiments.

Ces sédiments enrichies favorisent la prolifération des macrophytes enracinés comme les lotus.

#### 4- Paramètres indicateurs de la pollution organique.

##### a) Indice permanganate (PI).

Tableau 48

Moyennes mensuelles de l'indice permanganate (eau brute) en mg/l d'O<sub>2</sub> pour les égouts du lac V.

| Date      | Juillet<br>1ère<br>analyse | Juillet<br>2ème<br>analyse | Août<br>1ère<br>analyse | Août<br>2ème<br>analyse | Août<br>3ème<br>analyse | Sept. | Moyenne. |
|-----------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|----------|
| Point 18  | 8,73                       | 12,07                      | 9,32                    |                         |                         |       | 10,04    |
| Point 19  | 9,81                       | 19,09                      | 14,29                   | 11,15                   | 8,17                    | 9,69  | 12,03    |
| Point 20  | 15,27                      | 7,86                       | 5,75                    |                         |                         |       | 9,63     |
| Point 21  | 14,18                      | 14,60                      | 10,87                   | 4,69                    | 17,19                   | 9,54  | 11,85    |
| Point 22  | 4,00                       | 8,08                       | 8,54                    | 5,82                    | 8,00                    | 7,49  | 6,99     |
| point 23. |                            | 10,39                      | 6,52                    | 5,98                    | 6,98                    | 7,49  | 7,47     |
| Moyenne   | 10,40                      | 12,02                      | 9,22                    | 6,91                    | 10,09                   | 8,55  | 9,53     |

Les valeurs obtenues sont similaires mais les points 18 ;19et21 restent les plus chargés comme l'indique la figure ci-dessous.

Ces valeurs élevées s'expliquent par la position et les types d'activités menées en leur amont comme il vient d'être décrit plus haut.

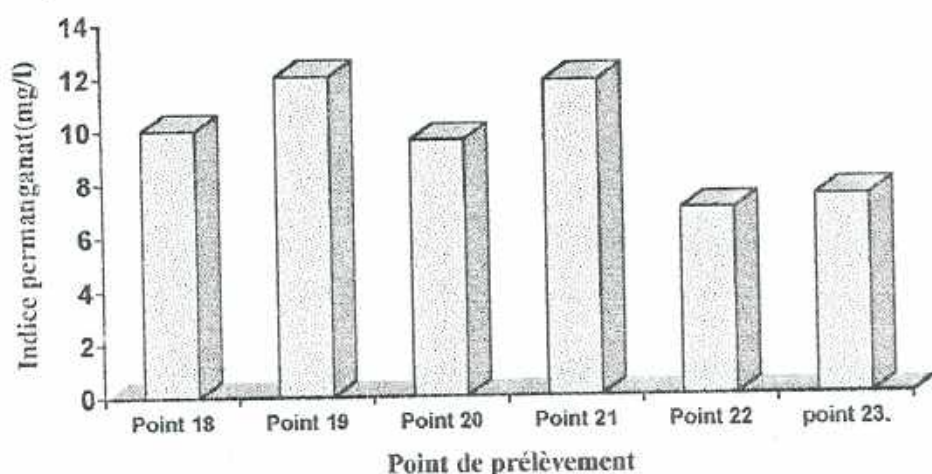


Fig.56 : Moyennes mensuelles de l'indice permanganate de l'eau brute pour les égouts du lac V.



Tableau 49

Moyennes mensuelles de l'indice permanganate de l'eau filtrée en mg/l pour les égouts du lac V.

| Date     | Juillet 1ère analyse | Juillet 2ème analyse | Août 1ère analyse | Août 2ème analyse | Août 3ème analyse | Sept. | Moyenne |
|----------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|---------|
| Point 18 | 6,55                 | 8,42                 | 4,82              |                   |                   |       | 6,60    |
| Point 19 | 6,91                 | 15,44                | 10,56             | 4,46              | 7,32              | 8,07  | 8,79    |
| Point 20 | 6,18                 | 6,18                 | 4,92              |                   |                   |       | 5,76    |
| Point 21 | 10,18                | 7,58                 | 5,28              | 3,72              | 17,02             | 5,14  | 8,15    |
| Point 22 | 4,36                 | 6,74                 | 4,82              | 3,07              | 6,98              | 5,72  | 5,28    |
| Point 23 |                      | 8,14                 | 5,90              | 4,69              | 6,4               | 5,91  | 5,15    |
| Moyenne. | 6,83                 | 8,75                 | 5,98              | 3,19              | 9,45              | 5,72  | 6,69    |

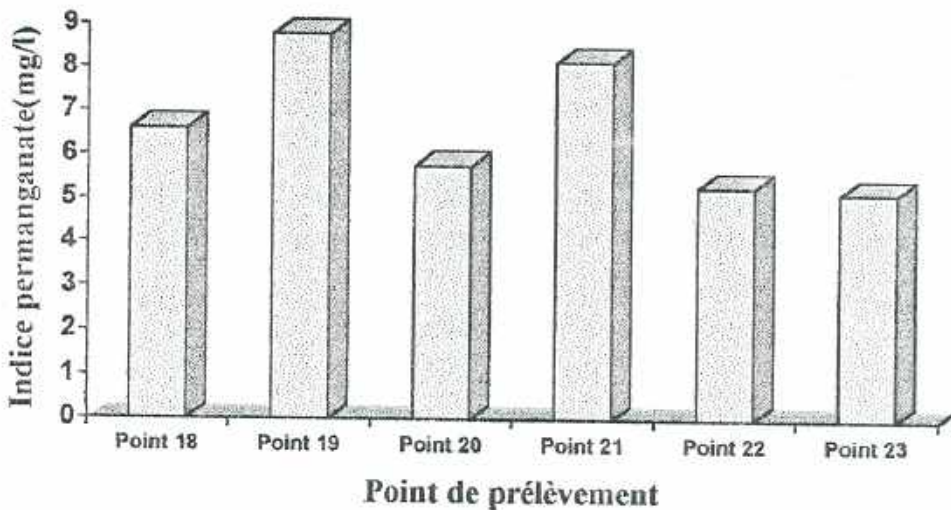


Fig. 57 : Moyennes mensuelles de l'indice permanganate de l'eau filtrée en mg/l pour les égouts du lac V.

Les égouts 18, 19 et 21 sont les plus chargés en matières organiques et en sels minéraux. Les figures ci-dessus montrent que ces points sont les plus polluants en matières organiques.

L'évolution dans le temps des apports montre que ces égouts présentent des teneurs liées à la pluviométrie.

Ces eaux usées comportent traditionnellement les eaux usées ménagères et les déjections humaines. Les eaux usées ménagères renferment des concentrations relatives importantes en divers éléments polluants,

dépendant des modes de vie et des quantités d'eau consommées. On peut considérer que 80 % de l'eau consommée est rejetée et arrive aux lacs sous forme d'eaux usées.

**Tableau 50**

Consommation trimestrielle de l'eau de SODECI  
par quartier de la ville de Yamoussoukro.

| quartier    | nbre<br>d'abonnés | Volume consommé par trimestre. |                |                |                | Total<br>annuel |
|-------------|-------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|             |                   | T <sub>1</sub>                 | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |                 |
| Assabou     | 544               | 39027                          | 44448          | 47679          | 31501          | 162659          |
| Dioulakro   | 1549              | 67201                          | 97684          | 96589          | 89129          | 350603          |
| Habitat     | 900               | 48362                          | 52521          | 51537          | 44672          | 197092          |
| Kokrénou    | 237               | 9088                           | 10879          | 10767          | 9242           | 39976           |
| Morofé      | 471               | 90155                          | 103197         | 81716          | 71050          | 346118          |
| N'Zuessy    | 1484              | 73516                          | 99559          | 93024          | 81223          | 347322          |
| Résidentiel | 251               | 16227                          | 18153          | 16531          | 13733          | 64644           |
| Total       | 5436              | 343576                         | 426441         | 397843         | 340554         | 1508414         |

En se référant au tableau ci-dessus, les calculs donnent pour les grands quartiers : Assabou, Dioulakro, N'Zuessy, Habitat, en bordure des lacs qui ont été étudiés hormis ceux situés en bordure de la Présidence; la consommation journalière par habitant. Les valeurs sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 51**

Quelques éléments Caractéristiques des quartiers en bordure des lacs étudiés.

| Quartiers. | Pop.  | Sup | Dens. | Cons./an<br>(m <sup>3</sup> ) | Abon | Type d'habitat (%) |     |     |    | Cons.<br>journalière<br>(l/hu/j) |
|------------|-------|-----|-------|-------------------------------|------|--------------------|-----|-----|----|----------------------------------|
|            |       |     |       |                               |      | S                  | EC  | EV  | SP |                                  |
| Dioulakro  | 63106 | 529 | 119   | 350603                        | 1549 | 1%                 | 20% | 79% |    | 15,22                            |
| N'Zu-essy  | 44483 | 507 | 88    | 347322                        | 1484 |                    | 11% | 88% | 1% | 21,39                            |
| Habitat    | 16379 | 119 | 138   | 197092                        | 900  | 2%                 | 23% | 74% | 1% | 32,97                            |

légende:

Quart.: quartier

Pop.: population

Sup.: superficie

con. an.: consommation annuelle

Abon.: nombre d'abonnement à la SODECI

S: habitat de type standing.

EC: habitat économique.

EV: habitat évolutif.

SP: habitat spontané.



Le quartier Dioulakro a un fort pourcentage de population utilisant l'eau de puits ce qui amène à suggérer une évaluation de consommation en eau largement supérieure à 15,22l/habitants/j.

Les établissements publics sont généralement de grands consommateurs d'eau; ainsi, on a pour le Lycée Mamie Adjoua: 119867 m<sup>3</sup>/an et 13 abonnés; pour le Lycée Scientifique: 398208 m<sup>3</sup>/an et 2 abonnés ; Garde présidentielle + Présidence: 253107 m<sup>3</sup>/an et pour l'hôpital: 140852 m<sup>3</sup>/an et 5 abonnés.

Dans le cas de Dioulakro, quartier à forte population utilisant l'eau de puits , la consommation en eau doit prendre en compte cette source d'approvisionnement; ce qui entraîne des consommations journalières du même ordre que pour le quartier N'Zuessy.

Pour ces quartiers à forts taux d'habitats évolutifs, où généralement il manque de système individuel d'assainissement, les eaux usées sont drainées par des pistes de ruissellement vers les lacs. Les apports en eaux usées sont regroupés dans le tableau suivants :

**Tableau 52**

Population, consommation et apport d'eau estimés des quartiers versants en bordure des lacs étudiés de Yamoussoukro.(1)

| Quartier  | population | consommation annuelle en m <sup>3</sup> | Apport d'eau usée   |
|-----------|------------|---|---------------------|
| Dioulakro | 63106      | 350603                                  | 8,52 l/habitants/j  |
| N'Zuessy  | 44483      | 327322                                  | 11,98 l/habitants/j |
| Habitat   | 16379      | 197092                                  | 18,46 l/habitants/j |

A travers ces estimations, on se rend compte que les lacs reçoivent une forte charge d'eau usée.

En se référant aux caractéristiques nutritives de ces eaux, l'on peut affirmer que ces eaux usées constituent la principale source polluante en nutriments (azote et phosphore essentiellement). Il en est de même pour la pollution organique qui favorise à travers l'envasement des lacs leur eutrophisation.

#### 5- Analyse des excréments des caïmans.

Cette source de nutriment a été abordée en 1996-1997 pour mieux expliquer les résultats que les travaux de 1995 nous ont donnés pour les lacs III et IV en bordure de la Présidence qui présentent des teneurs en nutriments assez élevées comparé au lac I. La présence en grand nombre des caïmans

dans les lacs III et IV comme le montre la figure ci – dessous, nous alors orienté vers cette piste.



**Fig.58** : Sortie des caïmans du lac IV pour recevoir des morceaux de viandes.

Par ailleurs, les riziculteurs en Asie utilisent l'élevage des caïmans pour enrichir leurs cultures à partir des excréments de ceux – ci. Les résultats en éléments fertilisants sont concluants.

#### **a) Conditions expérimentales.**

Les excréments ont été obtenus avec le concours du gardien qui s'occupe de ces caïmans. Ces excréments, ramassés hors de l'eau étaient assez déshydratés. Cependant, avant l'analyse proprement dite, ils ont été séchés de nouveau à l'étuve ( 105 °C) pendant quatre jours, refroidis au dessiccateur. Une certaine quantité a été broyée. Une masse  $m_0$  ( 5g ou 10 g ) a été dissoute dans un volume  $V$  ( généralement  $V = 1$  litre) d'eau distillée. La solution ainsi préparée est laissée pendant trois jours avant les analyses de phosphates,  $P_{tot}$  et NTK ne soient effectuées.

Par ailleurs l'extraction des nutriments par utilisation de l'acide chloridrique HCl a permis une comparaison avec la dissolution à l'eau distillée. Les analyses effectuées dans les mêmes conditions à différentes



périodes, sur une masse dissoute dans l'eau distillée et conservée à l'abri de l'air, montrent une variation des concentrations.

L'extraction du phosphate à l'aide de l'acide chlorhydrique a été effectuée de la manière suivante:

- peser 0,15g d'excrément préalablement séché à l'étuve et broyé;
- ajouter 2 ml de HCl 6M;
- faire évaporer à sec sur plaque chauffante;
- ajouter 2 ml de HCl 6M et laisser en contact au moins 15 mn;
- filtrer sur filtre plissé dans une fiole de 50 ml et ajuster la solution à 50 ml avec de l'eau distillée;
- faire les analyses suivant les méthodes décrites dans la deuxième partie de l'étude.

#### b) Calcul des teneurs en nutriments.

Soient V (litre) le volume de solution préparée, C (g/l) la concentration du paramètre nutritif, obtenue après analyse et  $m_0$  la masse d'excrément pesée. Le taux T en nutriment exprimé en % massique est donné par:

$$T = \frac{C \cdot V}{m_0} \cdot 100.$$

#### d) Résultats des analyses.

**Tableau 53**

Résultats des analyses des excréments des caïmans (lac IV).

| date                 | N° Excréments | dissolvant       | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l) | Ptot (mg/l) | NTK (mg/l) | %P    | %N   | % PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
|----------------------|---------------|------------------|--------------------------------------|-------------|------------|-------|------|---------------------------------|
| 25/11/96             | I             | H <sub>2</sub> O | 14,83                                | 152,93      | 51,86      | 1,53  | 0,52 | 0,15                            |
| 21/12/96             | I             | H <sub>2</sub> O | 18,7                                 |             |            |       |      | 0,37                            |
| 21/12/96             | II            | H <sub>2</sub> O | 5,81                                 | 53,24       | 122,67     | 1,06  | 2,45 | 0,12                            |
| 21/12/96             | II            | HCl              | 76,11                                |             |            |       |      | 2,54                            |
| 6/01/97<br>$m_0=10g$ | I             | H <sub>2</sub> O | 8,57                                 | 260,5       | 72,39      | 2,605 | 0,25 | 0,086                           |
| 6/01/97<br>$m_0=10g$ | I             | HCl              | 70,8                                 |             |            |       |      | 2,36                            |
| 6/01/97<br>$m_0=5g$  | II            | H <sub>2</sub> O | 2,62                                 | 180,4       | 102,78     | 3,6   | 2,05 | 0,026                           |
| Moy.                 |               |                  |                                      |             |            | 2,85  | 1,62 | 0,12                            |

La dissolution simple dans l'eau distillé donne une faible concentration en phosphates, comparée à l'extraction avec HCl: plus de 2% en masse d'excrément contre moins de 0,37% pour l'eau distillée, soit 10 fois plus pour l'extraction avec HCl.

Par ailleurs la dégradation dans le temps des excréments aboutit à des nutriments moins incorporés, d'où une augmentation des teneurs en nutriments phosphore et azote.

Le lac IV compte actuellement 30 caïmans et au moins 10 dans le lac III de la Présidence. La masse en résidus d'excréments est de l'ordre de 100g chaque fois qu'un caïman défèque. En tenant compte des valeurs moyennes en P et N obtenues sous forme de pourcentage pondéral, c'est au moins 85,5g de P que reçoit par jour le lac IV et 28,5g de P pour le lac III ; de même pour l'azote: le lac IV reçoit au moins 48,6g N/j et le lac III, 16,2g N/j pour ; c'est pour cette raison que ces deux lacs: III et IV de la Présidence sont plus riches en nutriments que les lacs I et II.

#### 6- Analyses de quelques lessives.

Trois lessives ont été analysées: une lessive en poudre «OMO», une lessive pâteuse «SUNLIGHT» et une lessive liquide «PAX».

##### **a) Conditions expérimentales.**

La solution analysée pour (OMO), est obtenue en dissolvant dans une fiole de 100 ml avec de l'eau distillée, 0,5014g de poudre, alors que pour (Sunlight) la masse dissoute était de 5,068g pour le même volume. En ce qui concerne «PAX» les analyses sont faites directement sans dilution car, les analyses préliminaires avec dilution donnaient des valeurs nulles. Il a été effectué au moins 3 essais en prenant la même masse pour chaque lessive; les résultats ont donné des valeurs identiques.

Les autres phases d'analyse de phosphates  $P_{tot}$ , et des autres paramètres ont été réalisées conformément aux méthodes déjà décrites dans la deuxième partie du travail.



## b) Résultats des analyses.

Tableau 54

Résultats des analyses de quelques lessives utilisées à Yamoussoukro.

| Lessive      | pH    | $\text{PO}_4^{3-}$<br>(mg/l) | Conductivité<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Ptot(mg/l) | %P   | $\text{PO}_4^{3-}/\text{Ptot}$<br>(%) |
|--------------|-------|------------------------------|---|------------|------|---------------------------------------|
| « OMO »      | 10,37 | 0,57                         | 611   | 22,29      | 4,45 | 2,56                                  |
| « Sunlight » | 9,63  | 1,07                         | 241   | 2,95       | 0,58 | 36,27                                 |
| « PAX »      | 9,44  | 0,05                         | 16,14                                       |            |      |                                       |

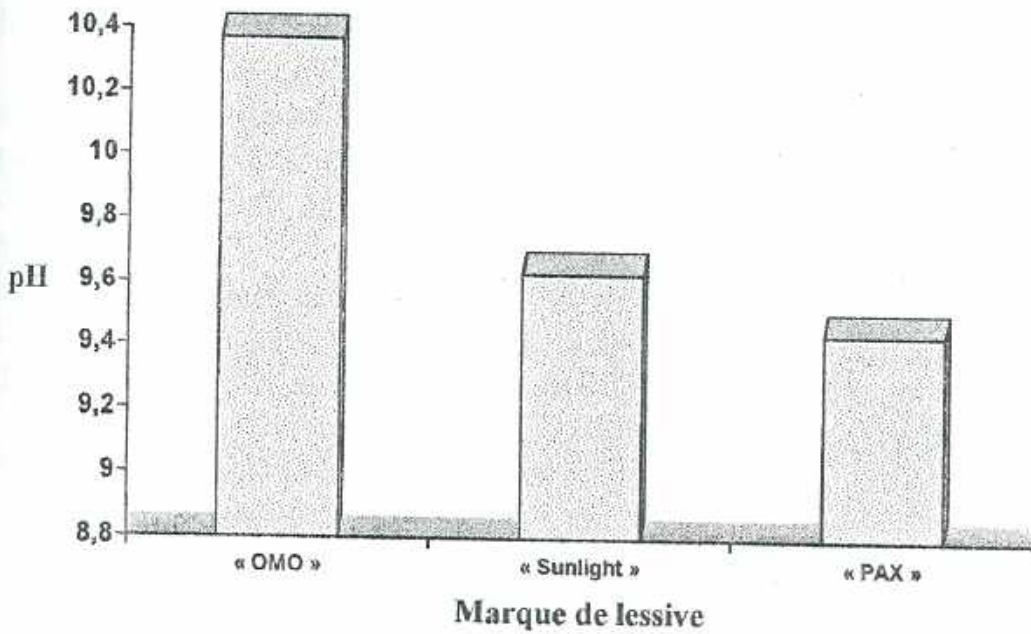


Fig.59 : pH de quelques lessives.

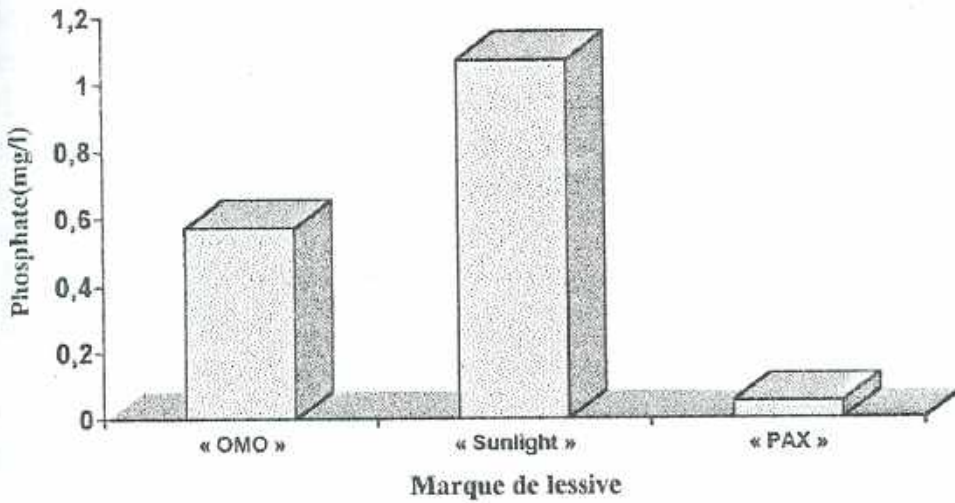


Fig.60 : Concentration en phosphate de quelques lessives.

La plus forte teneur vient de « OMO » qui est le plus utilisé car relativement le moins cher des 3 lessives analysées. Cependant « Sunlight » libère beaucoup plus de phosphates que « OMO ».

A côté de ces lessives, existent des savons en morceaux durs et des savons de fabrication traditionnelle qui n'ont pas fait l'objet d'étude car le but poursuivi est de montrer que les lessives qui se retrouvent dans les eaux usées de Yamoussoukro tous les jours, ont des apports en phosphore non négligeables. En effet l'utilisation quotidienne des lessives pour diverses activités, apportent des quantités de P assez importantes dans les eaux usées. Ces eaux usées arrivent directement aux lacs par des pistes de ruissellement dans le cas des grands quartiers comme Dioulakro, Habitat et N'Zuessy.

Cette étude sommaire des lessives nous montre qu'outre le phosphore issu du métabolisme humain, l'apport des détergents est important dans le cadre des eaux usées domestiques à Yamoussoukro.

### Conclusion.

Il ressort de l'étude des caractéristiques des eaux usées pour le lac V que la principale source de nutriments responsable de l'eutrophisation reste les eaux usées domestiques et urbaines qui arrivent directement dans les lacs. Outre le phénomène d'eutrophisation qu'elles entraînent, les eaux usées domestiques de par leur rôle de polluants organiques avec des fortes valeurs de DBO et de DCO, participent au déséquilibre de l'écosystème des lacs favorisant du coup des maladies liées à la pollution comme l'a déjà révélé les



statistiques de l'état épidémiologique de la ville de Yamoussoukro (cf. première partie).

Les excréments des caïmans, tout en permettant de mieux expliquer les sources de pollution nutritives des lacs III et IV, ne constituent particulièrement pas une principale source d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro.

Le rôle des détergents dans la grande teneur en phosphore des eaux usées domestiques a été relevé.

Toute solution durable doit prendre en compte cette principale source que constituent les eaux usées, donc permettre de contrôler ces apports par des systèmes de traitement pouvant les rendre moins nuisibles sur tous les plans.

**Cinquième partie :**

**METHODOLOGIE DE LUTTE CONTRE  
L'EUTROPHISATION DES LACS DE  
YAMOISSOUKRO.**



## : ETUDE DES SYSTEMES ACTUELS D'EPURATION DES EAUX RESIDUAIRES.

Chapitre I :

Cette partie de l'étude conduit à mettre en relief sur les plans théoriques les éléments de base pour le contrôle des retenues d'eau similaires en zone tropicale. L'étude des différents types de traitement des eaux usées rencontrées à Yamoussoukro, les insuffisances relevées et enfin des propositions de solution à court et à long terme permettront de lutter d'une façon générale contre l'eutrophisation et la pollution des lacs de Yamoussoukro.

### A) ETUDE THEORIQUE DES METHODES DE TRAITEMENT DES EAUX USEES.

#### 1- Nécessité du traitement des eaux.

Les eaux de surface sont généralement contaminées par les eaux résiduaires et pluviales ce qui provoque des nuisances de toutes sortes.

L'organisation mondiale de la santé estime en effet que 80% des maladies qui affectent la population mondiale sont directement associées à l'eau.

Cette même organisation estime également que 50% des cas de la mortalités infantiles sont du fait des eaux polluées. Dans la première partie de cette étude, les statistiques obtenus à l'hôpital de Yamoussoukro confirment ce constat de l'O.M.S.

Dans le cas de l'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro, les résultats ont montré (cf troisième partie) que ce sont les substances nutritives phosphore et azote présentes dans les eaux de ruissellement et les eaux usées domestiques qui sont responsables de l'accroissement de toutes sortes de plantes aquatiques.

L'eutrophisation comme nous l'avons déjà signalé pose de multiples problèmes qu'on ne peut pas extraire de ceux posés par la pollution des eaux dans sa globalité et par rapport auxquels l'O.M.S recommande des mesures de lutte pour se mettre à l'abri des maladies liées à l'environnement.

De ce fait le traitement des eaux résiduaires de Yamoussoukro s'impose.

#### 2- Procédés de traitement des eaux.

Il existe un grand nombre de procédés de traitement des eaux usées dont l'application dépend à la fois des caractéristiques des eaux à traiter et du degré d'épuration désiré.

Les prétraitements et les traitements primaires sont utilisés pour l'élimination des huiles des matières flottantes ou en suspension, pour la neutralisation ou pour l'égalisation. Ils conditionnent l'eau en vue d'un traitement biologique ultérieur ou en vue d'un rejet dans le milieu naturel récepteur. Au tableau.55. sont rassemblées les règles générales relatives aux prétraitements des eaux avant une épuration par voie biologique.

**Tableau.55.**

Prétraitement ou traitement primaire exigé pour les procédés biologiques.

| Polluants  | Traitements   |
|--|---|
| Matières en suspension<br>Huile ou graisse<br>Métaux lourds<br>Alcalinité et acidité<br>Sulfures<br>Action de charge (DBO) | lagunage, décantation et flottation.<br>Ecumage ou séparation<br>Précipitation ou échange d'ion<br>Neutralisation<br>Précipitation ou stripage<br>Bassin d'égalisation. |

Les procédés utilisés pour l'élimination de polluants spécifiques sont présentés au tableau.56

**Tableau 56**

Procédés généralement utilisés pour l'élimination de polluants spécifiques

| Polluants                                   | Procédés  |
|---|---|
| Matières organiques biodégradables (DBO)    | Procédé biologique, aérobie(boues activées, lagunes aérées lits ou filtres bactériens, bassin de stabilisation) |
| Matières en suspension (M.E.S)              | Décantation, flottation, tamissage  |
| Matières organiques réfractaires (DCO, COT) | Adsorption sur charbon, injection en nappe profonde   |
| Azote                                       | Lagunage, stripage, nitrification, dénitrification, échange d'ions.   |
| Phosphore                                   | Précipitation à la chaux aux sels de fer ou d'alumine co-précipitation biologique d'échange d'ions.             |
| Matières organiques dissoutes               | Echange d'ion osmose inverse électrodialyse.  |

Le choix d'un procédé de traitement ou d'une chaîne de plusieurs procédés dépendra des caractéristiques de l'eau résiduaire :  
de la partie de l'effluent requise;



.de l'évolution des normes de rejets.

Il faut reconnaître que pour un problème d'épuration donné il y aura plusieurs possibilités de traitements qui fournissent l'effluent souhaité <sup>(11)</sup>; parmi ceux-ci, un seulement se révélera économique.

### 3- Précision théoriques sur quelques procédés de traitements biologiques.

#### **a) Réacteurs aérobies à biomasse fixée lit bactériens**

Le lit bactérien est un réacteur biologique aérobie où les microorganismes sont fixés sur un support inerte et forment un biofilm. Ils reproduisent « industriellement » l'effet épurateur du sol.

En ruisselant, l'eau à épurer forme un film liquide qui sera traversé par l'oxygène venant et par le CO<sub>2</sub> formé par la biomasse. L'élément essentiel du lit bactérien est le support inerte disposé en colonne sur lequel s'accroche le biofilm. Pour alimenter ce support en eau résiduaire, il faut disposer d'un distributeur aussi régulier que possible. Après le lit, vient un distributeur destiné à l'enlèvement des boues secondaires qui sont envoyées généralement vers un digesteur. Le besoin en énergie des lits bactériens se ramène aux frais de pompage évalués à 0,15 - 0,2 kwh/kg DBO<sub>5</sub> (OEHME 1984) comme le rapporte EDELINE<sup>(12)</sup>, les investissements par contre sont plus coûteux. Le lit bactérien reste possible et économique pour des tailles assez réduites.

#### **c) Réacteur aérobie à biomasse en suspension (Boues activées).**

C'est le plus utilisé dans les stations d'épuration existantes à Yamoussoukro.

Le procédé à boues activées consiste en un réacteur biologique aérobie où les microorganismes flottent librement dans un liquide aéré sous forme de petits amas appelés BIOFLOCS. Le mélange eaux usées BIOFLOCS est appelé « liqueur mixte ». Le procédé inventé à Manchester en 1914, reproduit « industriellement », l'effet épurateur des rivières. Il est devenu le principal procédé actuel d'épuration : boue activée (en anglais Activated sludge).

Les flocons de boues activées sont composés des mêmes microorganismes que le biofilm des lits bactériens; c'est une biocénose bactérienne avec prédateurs. Il lui faut au moins deux semaines pour atteindre sa concentration usuelle de 3 - 4g/l (valeurs extrêmes); 1 à 8g/l en matières en suspension volatiles (MSV). Pour épurer à 95% un substrat quelconque, une boue activée doit contenir au moins 1mg ATP/l.

La biomasse se formant lentement, il est nécessaire de la recycler de sorte qu'on peut distinguer deux temps de séjour différents:



- le temps de séjour du liquide dans l'aérateur,
- le temps de séjour des cellules dans l'installation ou « âge des boues ». L'âge des boues conditionne fortement leurs propriétés.

#### d) Réacteur algo-bactériens lagunage.

Il s'agit d'un bassin ou d'un système de bassins exposés à l'air libre et destinés au traitement biologique des eaux usées. Ils simulent en amplifiant l'action auto-épuration à des étangs ou à des lacs ayant l'allure d'une lagune. On peut les classer en fonction de leur place dans la filière épuratoire. On aura donc des bassins de stabilisation:

- anaérobies: sorte de prédigesteurs exposés à l'air.
- aérobie: fonctionnant grâce à une association typique d'algues et de bactéries complétée éventuellement par une aération mécanique.
- combinaison des deux formes ci-dessus: où la zone supérieure est aérobie et la zone inférieure anaérobie.

Selon l'autre classement on peut distinguer des bassins:

- primaires, recevant les eaux brutes
- secondaires: recevant les eaux prédécantées
- de maturation: destinées à diminuer les pathogènes
- à poisson: placés en épuration tertiaires.

En posant An= bassin anaérobie; F = bassin facultatif; Fm = bassin de maturation; P bassin à poissons.

On a toujours dans l'usage un ordre immuable :  $\rightarrow An \rightarrow Fm \rightarrow F \rightarrow P \rightarrow$  mais, la série pourra être complète ou incomplète.

#### Aspect biologique et fonctionnement.

Le principe de base est d'obtenir une épuration bactérienne aérobie sans avoir à dépenser d'argent pour la fourniture d'oxygène. On utilise l'oxygène fourni par les algues ce qui oblige à exposer l'eau au soleil sous faible profondeur et grande surface.

Ce procédé réputé être très bon marché ne comporte que de grands bassins de terre et convient surtout pour les régions où l'insolation est élevée et le terrain abondant et bon marché.

Il peut se poser un certain nombre de problèmes: le développement des thiobactéries rouges. En première phase, les protéines sont hydrolysées et les acides aminés sont libérés, ils peuvent atteindre 12 mg/l (13). Ensuite, l'azote passe à la forme composée par les algues; mais les algues semblent selon KOTF et INCERMAN<sup>(13)</sup>, également capables d'assimiler directement les acides aminés libres stimulant ainsi l'activité bactérienne.



## B) ETAT DES OUVRAGES DES STATIONS D'EPURATION DES EAUX RESIDUAIRES A YAMOOUSSOUKRO EN MARS 1996 (1)

### 1- Stations d'épuration à l'abandon ou en panne.

Parmi les 10 stations abandonnées sept sont de type boues activées. La plupart de ces stations sont actuellement envahies par des herbes. D'autres sont hors service et présentent des défauts de conception<sup>(1)</sup>. Certaines stations sont en panne. C'est le cas des deux stations de l'ex ENSA et de l'hôtel Président (Tour). Il semblerait que certains moteurs des turbines d'aération soient grillés pour le cas de l'ex INSET.

La station de l'hôpital de Yamoussoukro, à trois canalisations de collecte d'eau, assez éloignées entre elles, déversent les effluents dans un caniveau pour rejoindre ensuite le lac dont les eaux sont utilisées pour l'irrigation de cultures maraîchères.

### 2- Station d'épuration en fonctionnement en 1996 station d'épuration de l'ex ENSTP.

Filière eau : boues activées à clarificateur séparé.

Filière boues : épaisseur (non utilisée) et lits de séchage, en fonctionnement en 1996.

*Si l'on veut conserver ces ouvrages d'art; il apparaît urgent de s'occuper de façon plus rigoureuse de leur entretien.*

Afin d'assurer l'épuration des effluents il est nécessaire :

- d'effectuer des bilans entrée - sortie afin de quantifier les flux polluants et de vérifier le rendement des ouvrages,

- de réaliser les réglages indispensables au bon traitement de l'eau et à la stabilisation des boues résiduaires,

- de suivre les consommations d'énergie, temps passé à l'entretien, etc...,

- d'effectuer l'entretien quotidien afin d'éviter la détérioration du génie civil et des équipements électromécaniques,

- de trouver un débouché convenable pour les boues résiduaires et les refus du pré - traitement.

### 3- Conséquences sur l'eutrophisation des lacs

Les systèmes d'épuration des eaux usées installés au début de l'assainissement de la ville de Yamoussoukro sont tous dans un état

défectueux ou abandonnés. Ces ouvrages qui ont coûté très cher, sont pratiquement irrécupérables pour la plupart. Les études théoriques indiquent que les systèmes d'épuration doivent faire l'objet de recherche d'amélioration de façon permanente, afin de les rendre moins coûteux et plus performants.

La station de l'hôpital de Yamoussoukro qui reçoit les eaux usées hospitalières ne fonctionne pas. De ce fait, les eaux se déversent directement dans le lac V. Les résultats de l'analyse des eaux de l'égout 19 (cf quatrième partie) indiquent que ce point est une source importante de nutriments et de polluants très variés comme les microorganismes viraux.

Cette pollution spécifique fait de ce type d'eau usée un danger pour la population.

Du fait de cette pollution spécifique, un prétraitement devra être effectué sur place avant que l'effluent soit mêlé aux eaux usées domestiques de l'établissement et épuré avant le rejet dans le lac.

Un système de prétraitement physique et au chlore avant que l'effluent ne soit dans le lac V.

Les quartiers, N'Zuessy, Dioulakro, Habitat, Assabou à fort pourcentage d'habitats évolutifs manquent manifestement d'équipements d'assainissement.

Les eaux usées domestiques se dirigent directement dans les lacs par ruissellement et par des fossés à ciel ouvert comme le montre la figure qui suit.



*a**b*

**Fig.61 (a et b) :** Ecoulement d'eau usée en provenance du quartier Dioulakro vers le lac VII. Chaussée bitumée détruite par les eaux.

Les résultats de la 4ème partie permettent de conclure que, les eaux usées domestiques constituent une pollution organique importante avec la présence de vecteurs de maladies.

L'état des ouvrages d'épuration d'eau usée de Yamoussoukro, montre que les propositions de solution pour l'assainissement d'une façon générale, et pour la restauration des lacs en particulier, doit tenir compte du problème de suivi sans lequel tout ce qui serait fait risque d'être inutile.



**TYPOLOGIE D'EPURATION  
ENVISAGEE**

Il s'agit à travers ce chapitre, de mieux expliquer les résultats en laboratoire tout en précisant les caractéristiques nutritives des eaux usées.

### A) ETUDE DE LA POLLUTION ORGANIQUE.

#### 1- Etude de la réaction dans un flacon de DBO des eaux de Yamoussoukro.

##### a) Réaction dans le flacon de DBO.

La réaction dans le flacon de DBO est semblable à toutes les réactions aérobies et se produit en deux phases séparées.

À l'origine, la matière organique de l'eau usée est utilisée par les micro-organismes pour leur énergie et leur croissance. Cela conduit à une consommation d'oxygène et à la croissance de nouveaux organismes. Quand les matières organiques initialement présentes dans l'eau usée ont disparu, les organismes présents continuent à consommer et à utiliser l'oxygène pour l'auto-oxydation ou le métabolisme endogène de leurs masses cellulaires. Lorsque les masses cellulaires sont complètement oxydées, un résidu cellulaire non biodégradable subsiste et la réaction est achevée. Ce stade définit la DBO finale ou ultime. La réaction d'oxydation dans le flacon de DBO est par conséquent une réaction en deux phases.

En considérant une substance biodégradable (cas des eaux usées domestiques sans apport d'éléments résiduels industriels comme à Yamoussoukro), la DBO<sub>5</sub> s'établira à environ 90% de la demande Théorique en oxygène. Environ 10% des matières organiques initiales finissent leur évolution sous forme d'un résidu cellulaire non biodégradable et ne sont pas mesurées dans la DBO. La DCO mesurera la demande Théorique en oxygène DTO; par conséquent pour ces substances on a:  $DCO = \frac{DBOu}{0,9} = DTO$

(DBOu : DBO ultime).

Molhman et Edwards <sup>(41)</sup> ont indiqué une fourchette de 2,35 à 2,62 pour le rapport  $\frac{DCO}{COT}$  des eaux usées domestiques brutes. Le rapport entre DBO<sub>5</sub> et COT

est alors:  $\frac{DBO}{COT} = \frac{O_2}{C} \cdot \left(\frac{DBOu}{DCO}\right) \cdot \left(\frac{DBO}{DBOu}\right)$  ce qui donne pour les eaux usées étudiées:

$\frac{DBO_5}{COT} \approx 2,38$ . Cette valeur étant en conformité avec la fourchette indiquée par

Molhman et Edwards <sup>(41)</sup>, donc la relation ci-dessus est applicable à la détermination de la pollution des eaux usées de Yamoussoukro.

## b) Généralité sur la thermodynamique et la cinétique.

### - Considérations thermodynamiques.

Dans le cas de la thermodynamique, les réactions chimiques sont caractérisées par des états d'équilibre qui donnent les conditions limites vers lesquelles le système tend.

A pression et à température constante, les réactions chimiques d'un système ne se déroulent que dans le sens d'une diminution de l'enthalpie de réaction c'est à dire  $\Delta G < 0$ .

Les eaux naturelles sont des systèmes ouverts et dynamiques comportant différents apports et pertes d'énergie : solaire et photosynthèse pour lesquels l'état d'équilibre constitue une « construction ». Cependant le concept d'enthalpie libre de réaction est d'une grande importance dans un système dynamique.

Il faut tenir compte du fait que dans un système dynamique certains éléments sont en équilibre. Cela peut être le cas localement des réactions acide - base.

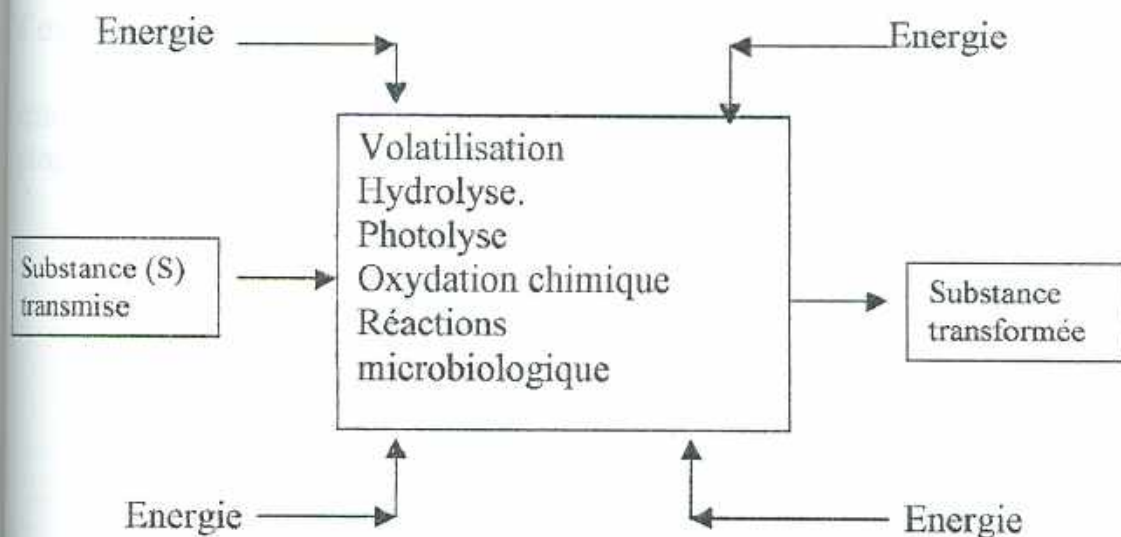
De nombreux processus d'oxydoréduction sont catalysés par les micro-organismes, surtout des bactéries qui utilisent une partie de l'enthalpie libre de la réaction des processus d'oxydoréduction pour croître et se reproduire.

Les bactéries ne peuvent effectuer des réactions si ces dernières ne sont pas thermodynamiquement possible. Cas de la respiration aérobie à pH=7 on a  $\Delta G^\circ = -125 \text{ kJ/équivalent}^{(6)}$ . Aussi est - il incorrect de parler d'oxydation d'un substrat par les bactéries. Du point de vue de la réaction brute, les bactéries se comportent comme des catalyseurs ou des « médiateurs » cinétiques d'une réaction d'oxydoréduction.



### - Considération d'ordre cinétique.

En cinétique, la transformation dans l'eau d'une substance S est la suivante :



$$\sum R_i = \frac{-d[S]}{dt} = \sum (K_i \cdot [S] \cdot E)$$

Où :

S est la substance transformée ;

$K_i$  est la constante de vitesse spécifique de la substance i pour la réaction ;

$R_i$  est la vitesse de réaction du processus chimique i ;

E est le facteur d'environnement.

Différents processus peuvent transformer la substance présente S et du facteur d'environnement E.. La vitesse de transformation de S correspond à la somme des vitesses de tous les processus  $R_i$ , mais en général, seules une ou deux des réactions les plus rapides prédominent pour les conditions données. Il ne reste que le facteur d'environnement E constante pendant le temps d'observation qui peut donc être inclus dans la constante de vitesse. En conséquence, la cinétique paraît donc être d'un pseudo-premier ordre. La vitesse totale de transformation est déterminée comme dans les réactions parallèles par les réactions qui dominant, et qui doivent être quantifiées.

### - Cinétique de la réaction de DBO.

Dans la réaction de DBO, la concentration  $C$  se rapporte à la matière organique dégradable. Conventionnellement cela est représenté par  $L$ , le maximum d'oxygène nécessaire pour ces matières;  $L_t$  représente la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation des matières organique à l'instant  $t$ .

La réaction dans le flacon de DBO peut être considérée comme une réaction du premier ordre en tenant compte des considérations ci-dessus; d'où  $dL_t$  proportionnel à  $-L_t$

. On a :

$$v = \frac{dL_t}{dt} = -kt$$

où  $k$  est une constante ; par intégration de l'équation ci-dessous, on a :

On intègre entre  $L_t = L_0$  à  $t = 0$  et  $L = L_t$  au temps  $t$ ; ce qui donne:

$$L_t = L_0 e^{-kt}$$

$L_0$  correspond à la consommation finale au bout d'un temps infini.

C'est aussi le taux d'oxygène disponible à  $t=0$

$$\ln \frac{L_t}{L_0} = -kt$$

La mesure de DBO  $t$  à l'instant  $t$  est donnée par:

$$DBO_t = L_0 - L_t = L_0 (1 - e^{-kt}). \quad (a)$$

ainsi pour  $t = 5$  jours on a:

$$DBO_5 = L_0 (1 - e^{-5k}). \quad (b)$$



Cette expression exprime la consommation d'oxygène pour 5 jour d'incubation.  
 Pour caractériser la cinétique de la réaction, il est important de connaître  $L_0$  et  $k$   
 pour caractériser la réaction.

### Détermination de $k$ et $L_0$

Posons  $y = L_0 - L_t = L_0(1 - e^{-kt})$ .

L'équation différentielle est:

$$v = L_0 \cdot k e^{-kt}$$

on tire alors:  $\ln(v) = -kt + \ln(L_0 \cdot k)$

$v$  représente les différences journalières.

Le tracé de de la vitesse en fonction du temps :

$$\ln v = f(t)$$

permet de calculer  $k =$  pente de la droite et  $\ln(L_0 k)$  est égale à l'ordonnée à l'origine de la droite.  $L_0$  correspond à la consommation ultime pour un temps d'incubation égale à l'infini.

### c) Validité expérimentale

Les essais menés au laboratoire avec les eaux des lacs et d'égout de Yamoussoukro conduisent aux résultats suivants:

Tableau 57

Résultats : (essai sur eaux usées : point 21 : égout de Dioulakro situé entre la mosquée et le foyer des handicapés physiques)

| t(jour) | $L_0 - L_t =$ consommation d' $O_2$ (mg/l) | Consommation journalière d' $O_2$ (mg/l) | $\ln(v)$ |
|---------|--|--|----------|
| 0       | 0  |  |          |
| 1       | 160  | 160                                      | 5,075    |
| 2       | 195  | 35                                       | 3,55     |
| 3       | 215  | 20                                       | 2,99     |
| 4       | 230  | 15                                       | 2,7      |
| 5       | 240  | 10                                       | 2,3      |

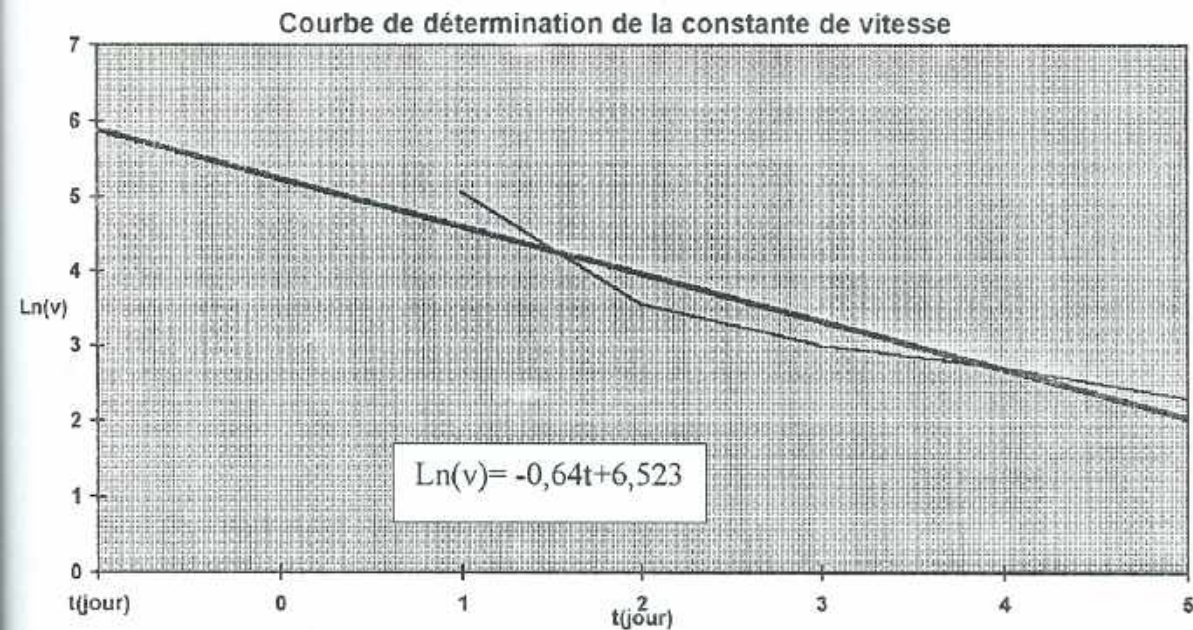


Fig. 62 : Courbe de détermination de la constante de vitesse.

$$\ln(v) = -0,64t + 6,523$$

La résolution de l'équation ci-dessus, issue des données expérimentales permet de déterminer la constante de vitesse  $k = 0,64$  pour cet essai correspond à une consommation ultime  $L_0 = 1063,5 \text{ mg/l}$  d'oxygène. Cette valeur relativement importante de la constante de vitesse indique que la dégradation biologique s'effectue assez rapidement pour les matières organiques contenues dans cette eau. La valeur de  $L_0$  est très élevée montrant ainsi la grande charge de ces eaux en matière organique biodégradable.



Tableau 58

Résultats : essai sur eaux usées :point 23 : égout de Dioulakro situé entre la mosquée et le foyer des handicapés physiques)

| t(jour) | $L_0-L_1$ = consommation d'O <sub>2</sub> (mg/l) | consommation journalière. | ln(v) |
|---------|--|---------------------------|-------|
| 0       | 0  | -                         |       |
| 1       | 250  | 250                       | 5,52  |
| 2       | 300  | 50                        | 3,91  |
| 3       | 400  | 100                       | 4,6   |
| 4       | 450  | 50                        | 3,91  |
| 5       | 250  | 0                         |       |

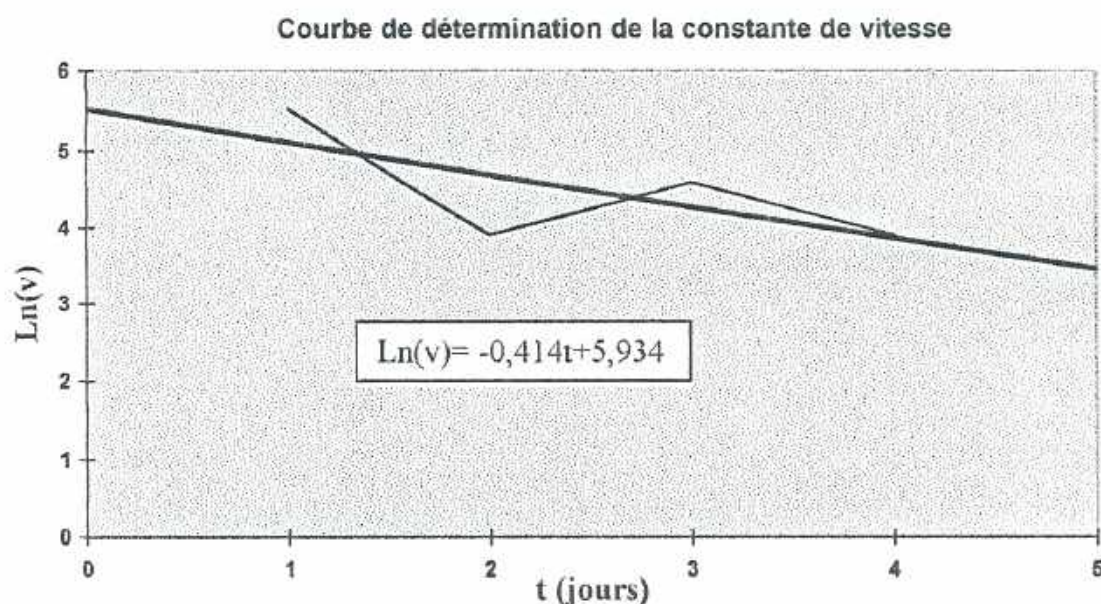


Fig.63 : Courbe de détermination de la constante de vitesse.

$$\text{Ln}(v) = -0,414t + 5,934$$

La résolution de l'équation ci-dessus, issue des données expérimentales permet de déterminer la constante de vitesse K. La valeur de k est ici de 0,414 et  $L_0 = 912,23\text{mg/l d'O}_2$ . En tenant compte de celles habituellement trouvées pour les eaux usées urbaines qui est de  $k=0,15$  à  $0,17^{(11)}$ , la valeur trouvée correspond à une biodégradation assez rapide des matières organiques. La consommation ultime d'O<sub>2</sub>,  $L_0$ , trouvée est importante et montre le rôle de polluant organique de cet égout.

Tableau 59

Résultats de l'essai in - situ pour le lac VII

| t(jour) | $L_0 - L_t =$ consommation<br>d' $O_2$ (mg/l) | consommation<br>journalière. | $\ln(v)$ |
|---------|---|------------------------------|----------|
| 0       | 0   |                              |          |
| 1       | 200   | 200                          | 5,29     |
| 2       | 240   | 40                           | 3,69     |
| 3       | 260   | 20                           | 2,99     |
| 4       | 270   | 10                           | 2,3      |
| 5       | 280   | 10                           | 2,3      |

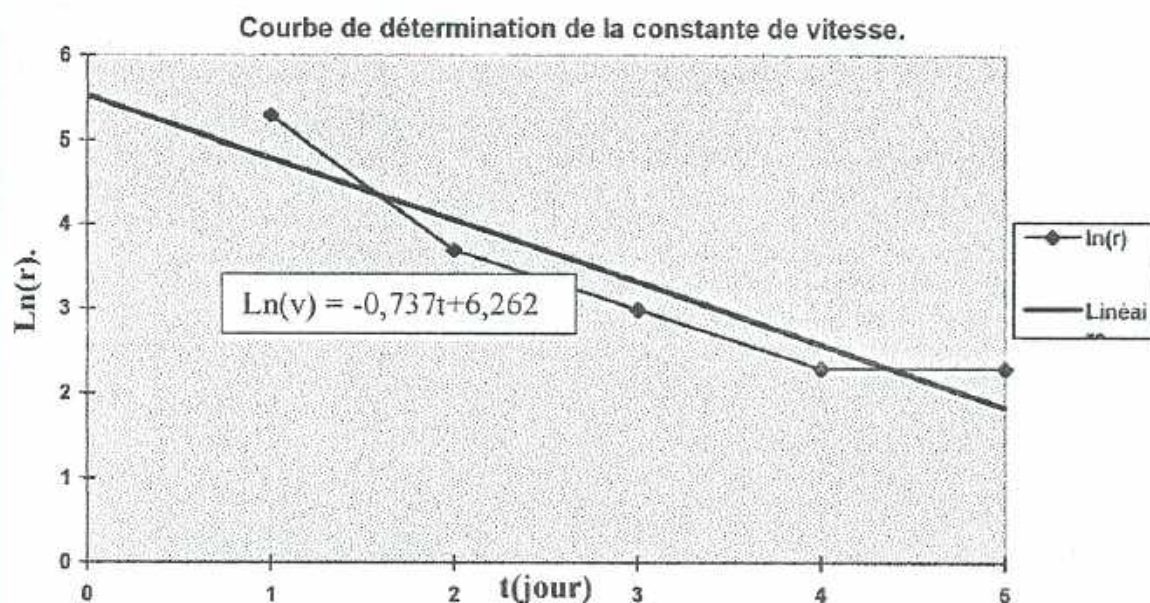


Fig. 64 : Courbe de détermination de la constante de vitesse.

$$\ln(v) = -0,737t + 6,262$$

La résolution de l'équation ci-dessus, issue des données expérimentales permet de déterminer la constante de vitesse  $k = 0,737$ . La biodégradation se fait assez rapidement. La valeur de  $L_0$  trouvée est de **712 mg/l d' $O_2$** . Les résultats obtenus confirme le rôle polluant de cet lac pour le lac V qui est situé à son déversoir. Il faut remarquer que cet essais a été réalisé sur un échantillon prélevé juste après une grande pluie l'auto - épuration n'a donc pas pu avoir lieu d'où la forte valeur de  $L_0$  obtenue ci-dessus.



Tableau 60

Résultats de l'essai pour le lac VI.

| t(jour) | $L_0 - L_t =$ consommation<br>d' $O_2$ (mg/l) | consommation<br>journalière. | $\ln(v)$ |
|---------|---|------------------------------|----------|
| 0       | 0   |                              |          |
| 1       | 16  | 16                           | 2,77     |
| 2       | 17  | 1                            | 0        |
| 3       | 19  | 0,69                         | 0,69     |
| 4       | 20  | 0                            | 0        |
| 5       | 21,5  | 1,5                          | 0,4      |

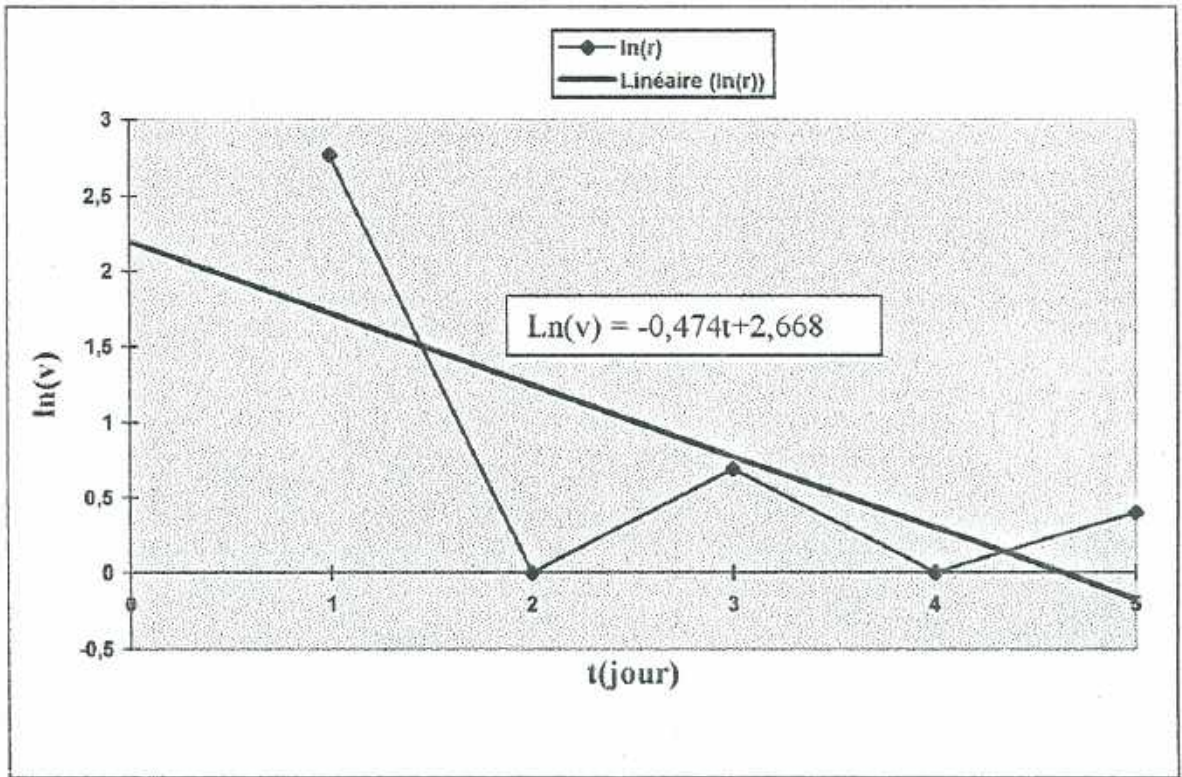


Fig.65. Courbe de détermination de la constante de vitesse.

$$\text{Ln}(v) = 0,474t + 2,668$$

La résolution de l'équation ci-dessus, issue des données expérimentales permet de déterminer la constante de vitesse  $k = 0,474$ . La valeur est plus faible

que pour les eaux usées du point 23. Cependant une telle valeur correspond encore à une biodégradation assez rapide des matières organiques.

La valeur de DBO ultime  $L_0 = 30,4 \text{ mg/l O}_2$ . Cette faible valeur s'explique par le rôle décantant joué par les macrophytes des lacs en amont.

En tenant compte des valeurs obtenues pour les eaux d'égout, il apparaît clairement que les matières qui sédimentent par auto-épuration contribueront à l'envasement des lacs.

Cet envasement est propice à la prolifération des macrophytes enracinés (lotus)

Tableau 61

Résultats de l'essai pour le lac V.

| t(jour) | $L_0 - L_t =$ consommation d' $\text{O}_2(\text{mg/l})$ | consommation journalière. | $\ln(v)$ |
|---------|---|---------------------------|----------|
| 0       | 0   |                           |          |
| 1       | 12  | 12                        | 2,48     |
| 2       | 14  | 2                         | 0,69     |
| 3       | 15  | 1                         | 0        |
| 4       | 15,5  | 0,50                      | -0,69    |
| 5       | 16,5  | 1                         | 0        |

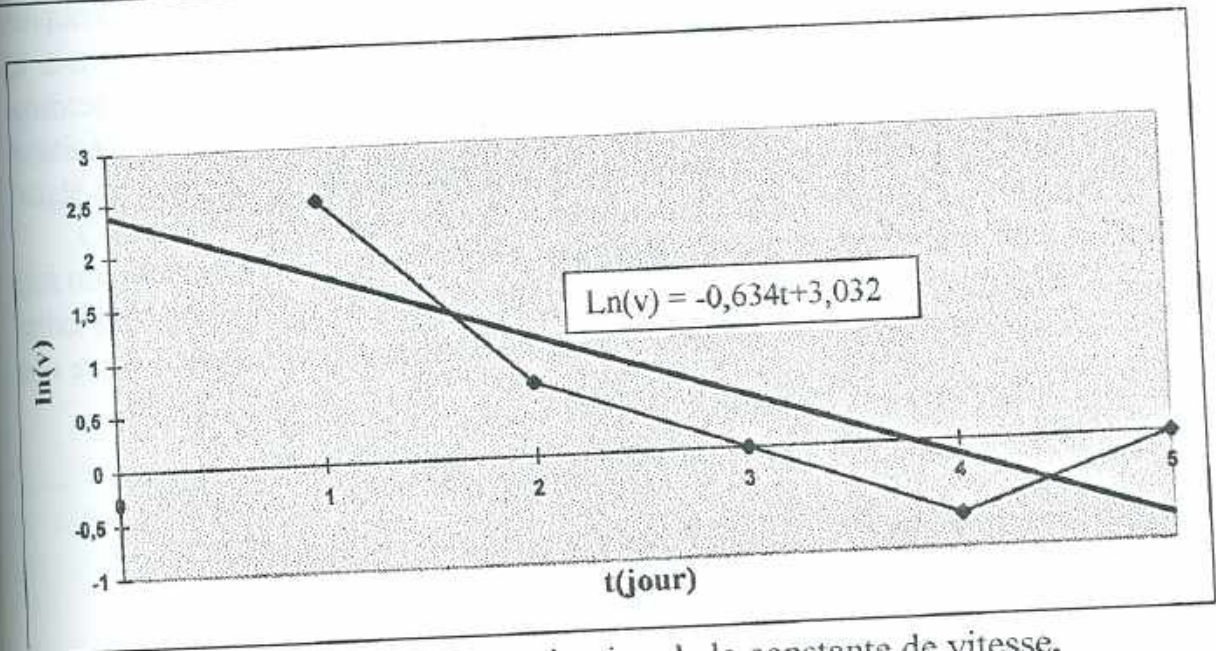


Fig.66. Courbe de détermination de la constante de vitesse.

$$\text{Ln}(v) = -0,634t + 3,032$$

La résolution de l'équation ci-dessus, issue des données expérimentales permet de déterminer la constante de vitesse K. Pour cet essai du lac V la valeur



trouvée est  $k = 0,634$  proche de celles trouvées pour les égouts du même lac. La valeur de  $L_0$  trouvée est de  $32,7 \text{ mg/l O}_2$ . Cette faible valeur s'explique par le rôle décantant joué par l'auto-épuration des macrophytes des lacs en amont.

En tenant compte des valeurs obtenues pour les eaux d'égout, il apparaît clairement que les matières qui sédimentent par auto-épuration contribueront à l'envasement du lacs. C'est par le biais de cet envasement que la pollution organique due aux eaux usées des égouts contribuera à l'eutrophisation des lacs.

En effet cet envasement facilite l'enracinement des plantes aquatiques et rend propice la prolifération des macrophytes enracinés (lotus) surtout aux niveau du littoral. La prolifération des plantes aquatiques et la poursuite de l'envasement provoquent le vieillissement accéléré du lac qui aboutit à sa disparition.

### Conclusion

Cette étude de la réaction de DBO des eaux de certains lacs et des égouts du lac V, montre une similitude de l'évolution cinétique. La cinétique de ces réactions apparaît être celle d'une réaction du premier ordre.

Les constantes de vitesse trouvée lors des vérifications expérimentales indiquent que la biodégradation se fait rapidement pour les deux types d'eau : eau des lacs et eau d'égout. Le rôle auto - épuratoire des lacs contribue à réduire de façon considérable la DBO ultime dans les lacs.

Dans le cas des eaux d'égout les différentes valeurs de  $L_0$  trouvées indiquent une forte teneur de ces eaux en matières organiques biodégradables. La matière organique, de part son importance dans l'envasement des lacs constitue un facteur favorisant pour la prolifération des plantes aquatiques enracinées comme les lotus et partant du phénomène d'eutrophisation vu sous l'angle du vieillissement accéléré des plans d'eau.

Ces différentes observations montrent la nécessité d'un traitement des eaux résiduaires avant qu'elles ne se retrouvent dans les lacs pour non seulement freiner les apports en nutriments, comme il a été relevé dans la troisième partie, mais aussi l'envasement des lacs, comme il vient d'être relevé précédemment.

## B) ANALYSES DES RESULTATS DE LA DBO ET DE LA DCO.

Les égouts qui ont fait l'objet d'analyse sont: 20; 21 et 22. Parallèlement l'on a déterminé les taux d'azote total NTK de  $PO_4^{3-}$  et  $P_{tot}$  et ceci d'octobre 1996 à février 1997. Le tableau suivant donne les résultats obtenus.

**Tableau 62**

Résultats des analyses des eaux usées.

| Date  | éch. | DBO<br>mg/l | DCO<br>mg/l | NTK<br>mg/l | P <sub>tot</sub><br>mg/l | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>mg/l | DBO/N  | DBO/P  | DBO/DCO | N/p  | PO <sub>4</sub> /P<br>(%) |
|-------|------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------|--------|--------|---------|------|---------------------------|
| Oct.  |      |             |             | -           | 0,32                     |                                       |        |        |         |      |                           |
| Nov.1 |      | 30          | 32          | 8,62        | 0,42                     | 0,08                                  | 21 :1  | 42 :1  | 0,94    | 7,9  | 16,6                      |
| Nov.2 |      | 10,5        | 12          |             |                          |                                       |        |        | 0,87    |      |                           |
| Déc.1 | 20   | 45          | 60          | 9,7         | 1,4                      | 0,12                                  | 41 :1  | 34 :1  | 0,75    | 7,9  | 8,57                      |
| Déc.2 |      | 33          | 36          |             |                          |                                       |        |        |         |      |                           |
| Jan.  |      | 45          | 68          | 8,45        | 0,8                      | 0,1                                   | 5 :1   | 56 :1  | 0,66    | 10,5 | 12,5                      |
| Fév.  |      | 45          | 60          |             |                          |                                       |        |        | 0,75    |      |                           |
| Oct.  |      |             |             | 130,9       | 10,57                    |                                       |        |        |         | 12,4 |                           |
| Nov.1 |      | 110         | 372         | 78,18       | 3,87                     | 3,02                                  | 1,8:1  | 37:1   | 0,3     | 20,1 | 78,0                      |
| Nov.2 |      | 180         | 216         |             |                          |                                       |        |        | 0,87    |      |                           |
| Déc.1 | 21   | 375         | 496         | 108,9       | 11,55                    | 8,48                                  | 3 :1   | 33 :1  | 0,76    | 9,4  | 73,4                      |
| Déc.2 |      | 400         | 600         |             |                          |                                       |        |        | 0,66    |      |                           |
| Jan.  |      | 200         | 208         | 144,1       | 16,14                    | 9,25                                  | 1,4 :1 | 12 :1  | 0,96    | 8,9  | 57,3                      |
| Fév.  |      | 200         | 325         |             |                          |                                       |        |        | 0,6     |      |                           |
| Oct.  |      |             |             | 2,91        | 0,2                      |                                       |        |        |         | 14,5 |                           |
| Nov.1 |      | 40          | 32          | 4,26        | 3,78                     | 2,59                                  | 20 :1  | 22 :1  | -       | 1,12 |                           |
| Nov.2 |      | 130         | 168         |             |                          |                                       |        |        | 0,77    |      |                           |
| Déc.1 | 22   | 110         | 128         | 18,86       | 2,66                     | 0,04                                  | 9 :1   | 66 :1  | 0,86    | 7,09 | 1,5                       |
| Déc.2 |      | 240         | 260         |             |                          |                                       |        |        | 0,92    |      |                           |
| Jan.  |      | 78          | 84          | 5,72        | 0,4                      | 0,02                                  | 14 :1  | 195 :1 | 0,92    | 14,3 | 5                         |
| Fév.  |      | 78          | 86          |             |                          |                                       |        |        | 0,9     |      |                           |

A travers les résultats, il apparaît que les points 21 et 22 du quartier Dioulakro sont les plus polluants. En fait le point 20 correspond au déversoir du lac VII qui, selon son état marécageux est pollué, mais l'effet épurant des plantes sans doute diminue considérablement la valeur de DBO ou de DCO. Ces valeurs considérables de DBO impliquent pour ces eaux usées une teneur en microorganismes assez importante dont l'activité soutend la réaction dans le flacon de DBO comme l'a montré l'étude cinétique.

## D) EFFET EPURANT DES JACINTHES D'EAU.

Les essais au laboratoire permettent de mettre en relief les effets épurants des jacinthes.



### 1- Conditions expérimentales.

Les essais ont été réalisés sur les eaux des lacs I et V où la teneur initiale des nutriments est différente. Deux essais ont été réalisés par jour pour les eaux de chaque lac. L'eau du lac VII a été suivie récemment. Les paramètres ont été déterminés conformément aux méthodes expérimentales déjà exposées dans la deuxième partie.

### 2- Résultat des essais.

Le tableau ci-dessous donne les résultats des essais effectués en aquarium avec les eaux du lac I.

**Tableau 63**  
Résultats en aquarium pour les eaux du lac I.

| jour | pH   | conductivité<br>μs/cm | O <sub>2</sub> dissous<br>mg/l | Ptot  |
|------|------|-----------------------|--------------------------------|-------|
| 0    | 7,25 | 161                   | 2,3                            | 0,248 |
| 1    | 6,78 | 141                   | 3,3                            | 0,256 |
| 2    | 6,75 | 112                   | 2,8                            | 0,188 |
| 3    |      |                       |                                |       |
| 4    |      |                       |                                |       |
| 5    | 5,7  | 30                    | 2,6                            | 0,088 |
| 6    | 4,71 | 17                    | 2,1                            | 0,011 |
| 7    | 4,82 | 21                    | 1,9                            | 0     |
| 8    | 4,34 | 19                    | 2,3                            | 0     |
| 9    | 4,36 | 30                    | 1,4                            | 0     |
| 10   |      |                       |                                |       |
| 11   |      |                       |                                |       |
| 12   |      |                       |                                |       |
| 13   | 4,17 | 32                    | 1,8                            | 0     |
| 14   | 3,95 | 40                    | 1,4                            | 0     |
| 15   | 4    | 31                    | 3,1                            | 0     |
| 16   |      |                       |                                |       |
| 17   |      |                       |                                |       |
| 18   |      |                       |                                |       |
| 19   | 4,12 | 30                    | 2,8                            | 0     |
| 20   |      |                       |                                |       |
| 21   | 4    | 37                    | 3,1                            | 0     |

Tableau 64

Résultats des essais en aquarium pour les eaux du lac V.

| jour | pH5(2) | conductivité<br>μs/cm | O <sub>2</sub> dissous<br>mg/l | Phosphate<br>PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l) | Ptot(brute)<br>mg/l |
|------|--------|-----------------------|--------------------------------|---|---------------------|
| 0    | 6,95   | 404                   | 3,1                            | 0,28  | 0,72                |
| 1    | 7,25   | 445                   | 3,3                            | 0,1   | 0,2                 |
| 2    | 7,26   | 412                   | 2,5                            | 0,067   | 0,172               |
| 3    |        |                       |                                |   |                     |
| 4    |        |                       |                                |   |                     |
| 5    | 7      | 306                   | 2,1                            | 0,02  | 0,16                |
| 6    | 6,65   | 250                   | 2,5                            | 0   | 0                   |
| 7    | 7,15   | 259                   | 2,6                            | 0   | 0                   |
| 8    | 7,09   | 206                   | 2,5                            | 0   | 0                   |
| 9    | 6,98   | 208                   | 2,8                            | 0   | 0                   |
| 10   |        |                       |                                |   |                     |
| 11   |        |                       |                                |   |                     |
| 12   |        |                       |                                |   |                     |
| 13   | 6,33   | 67                    | 2,1                            | 0   | 0                   |
| 14   | 6,05   | 42                    | 2                              | 0   | 0                   |
| 15   | 5,09   | 19                    | 3,2                            | 0   | 0                   |
| 16   |        |                       |                                |   |                     |
| 17   |        |                       |                                |   |                     |
| 18   |        |                       |                                |   |                     |
| 19   | 4,44   | 18                    | 3,1                            | 0   | 0                   |
| 20   |        |                       |                                |   |                     |
| 21   | 4,33   | 26                    | 2,7                            | 0   | 0                   |

### 3-Interprétation des essais de laboratoire en aquarium.

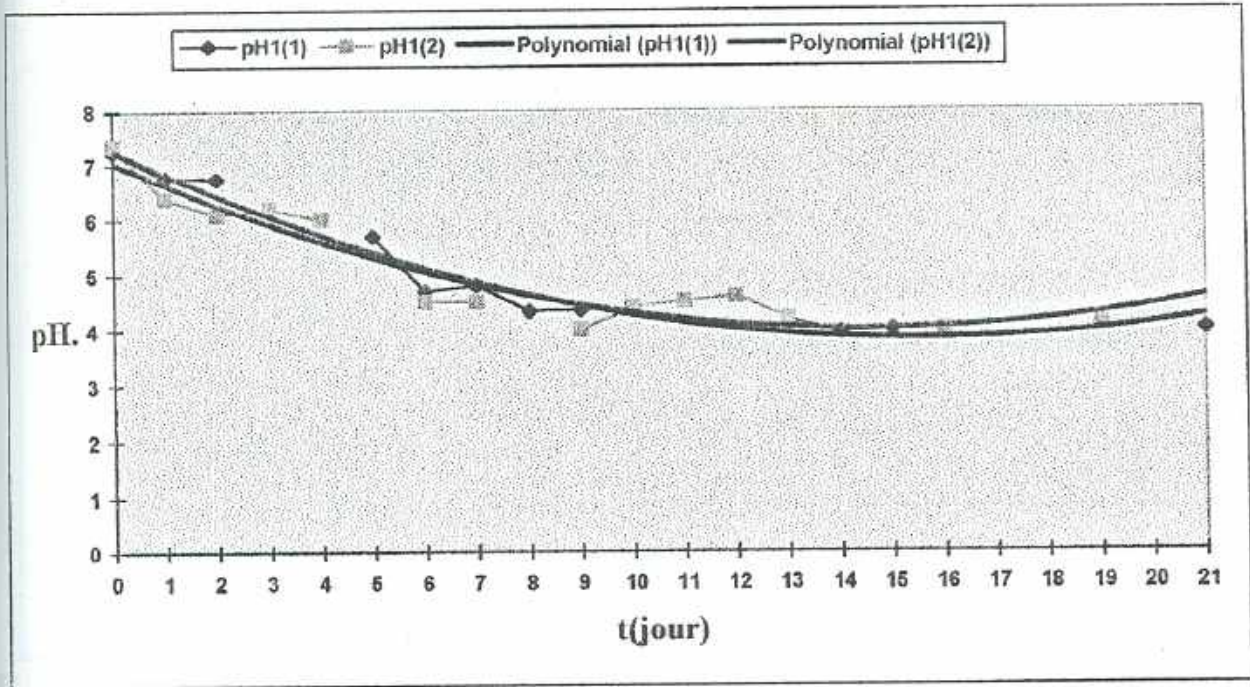
#### a)- Etude des variations du pH et de la conductivité.

Dans les deux séries de mesures, le pH a été suivi en fonction du temps de séjour des plantes dans deux aquariums dans lesquels se trouvait, pour l'un, de l'eau du lac I et pour l'autre, de l'eau du lac V. L'interprétation de ces courbes doit se faire en parallèle avec celle de la conductivité.

La reproductibilité des résultats pour ce type d'expérience est nécessaire. Les deux séries de mesures faites sur des plantes diverses à des moments différents montrent que cette condition de reproductibilité a été atteinte et que les phénomènes observés sont indépendants de contraintes expérimentales mal maîtrisées. Les courbes des figures 67 et 68 montrent que, dans les deux



expériences, le pH suit, pour les deux type d'eaux une évolution décroissante dans le temps.



$\text{pHi}(j)$ : i indique le n° du lac et j le n° de l'essai.

**Fig.67** : Comparaison des valeurs du pH sur les deux essais des eaux usées du lac I en fonction du temps.

Pour l'eau du lac 1, entre 10 et 13 jours, le pH décroît de 7,2 à 4,2 en une dizaine de jours. Au delà du 13<sup>ème</sup> jour, il se stabilise sur une durée très longue. On se rappellera figure Fig .69, que pour ces eaux, la conductivité initiale était voisine de 150uS/cm. Ce qui correspond à une minéralisation faible du milieu<sup>(10)</sup>. La décroissance du pH est instantanée et implique des échanges rapides entre: eau plante ou plante - eau.

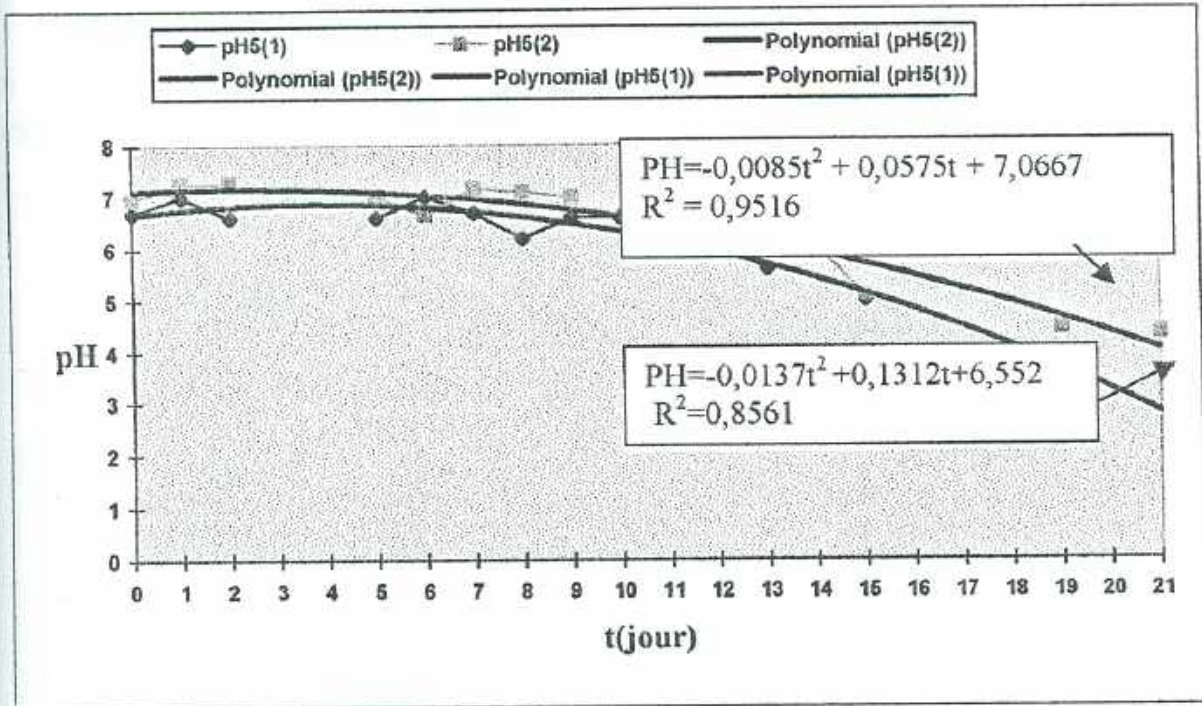


Fig.68 : Comparaison des valeurs du pH sur les deux essais pour le lac V.

Les courbes de tendance sont décrites par le même type de fonction (du second degré). Il en résulte, compte tenu des valeurs proches des coefficients de corrélation que cette évolution est caractéristique des eaux du lac V.

Pour ce lac, le pH reste à peu près constant aux environs de 6,9 ou 7 pendant une dizaine de jours, avant d'atteindre une valeur plancher située aux environs de 4 au bout d'une quinzaine de jours. On observera que pour ce type d'eaux fig.69, la conductivité initiale est d'environ 450 à 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , soit bien plus élevée que pour les eaux du lac 1.

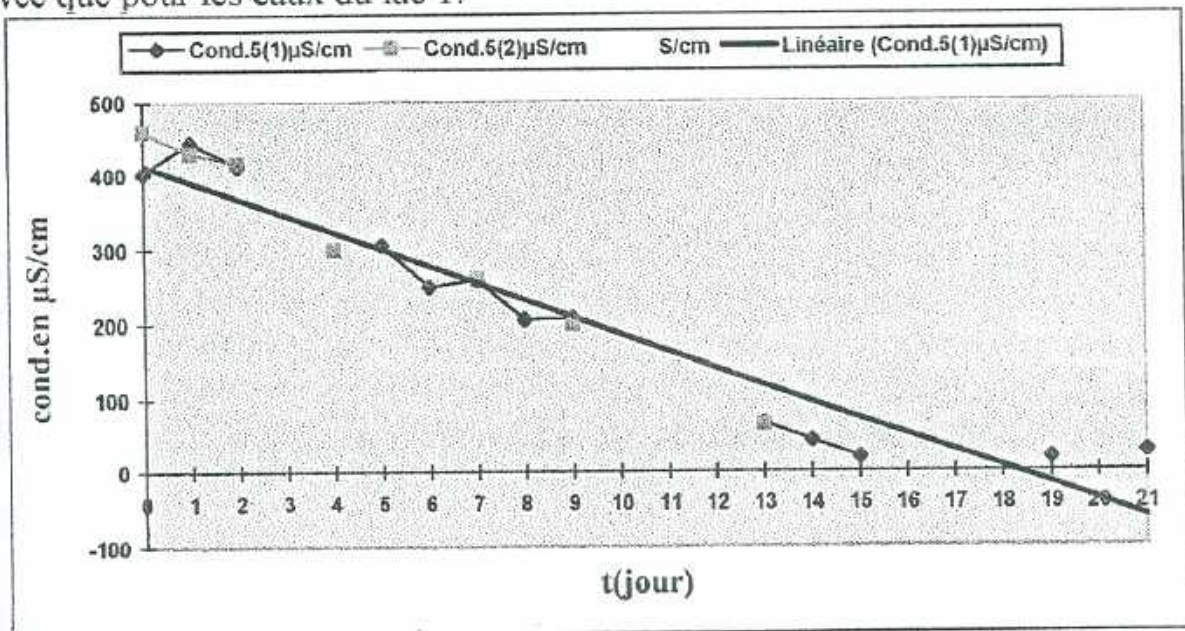


Fig. 69 : Comparaison des valeurs de la conductivité pour les deux essais du lac V.



La figure ci-dessus montre que la décroissance de la conductivité suit une loi tout à fait linéaire durant une dizaine de jours, après quoi, elle semble rester constante aux environs d'une valeur plancher de 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

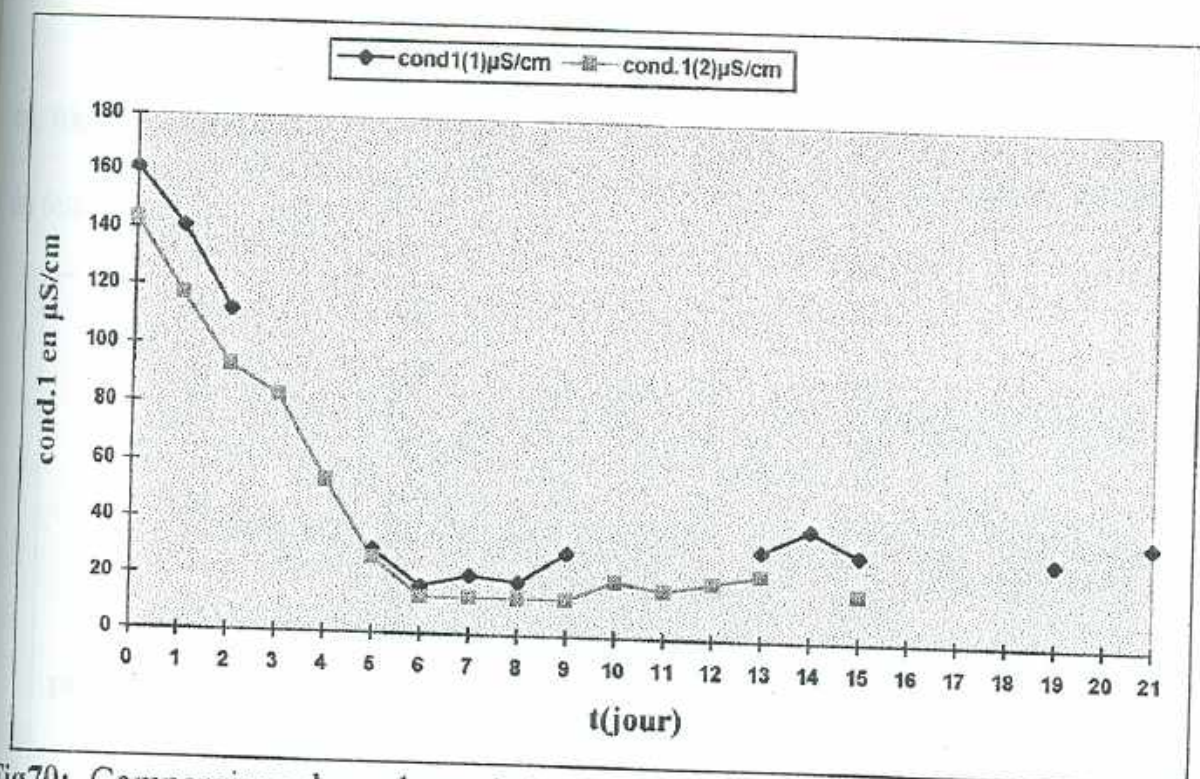


Fig70: Comparaison des valeurs de la conductivité pour les deux essais du lac I.

Les droites de décroissance de la conductivité des eaux du lac V montre qu'on arrive à la valeur de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au bout de dix jours. Or, pour cette eau, à cette même date, le pH commence également à diminuer.

Pour l'eau du lac I figure 70, la décroissance de la conductivité se manifeste dès le premier jour, alors que cette eau a une conductivité de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Il semble donc bien établi que l'évolution du pH est liée à celle de la conductivité. Pour les eaux du lac V, le pH reste constant tant que la conductivité n'a pas atteint la valeur de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ceci est sans doute la manifestation d'un effet tampon des sels dissous et des plantes.

Lors des mesures in - situ, nous avons constaté, que le pH moyen des eaux du lac V se situe à environ 6,6 et la conductivité à environ 360  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Si on se réfère à l'expérimentation de laboratoire, on obtient les mêmes valeurs.

Pour les eaux du lac I, le pH moyen est de 8 et la conductivité de 171  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En présence de plantes aquatiques, cette eau atteindrait certainement un pH plus faible, voisin également de 6,6 car on se trouverait dans la zone tampon. Ce pH devrait rapidement descendre jusqu'à la valeur plancher de 4 si l'eau n'était pas renouvelée.



En résumé, cette expérience montre que les plantes flottantes font diminuer le pH de l'eau dans laquelle elles se trouvent, ce qui n'est pas le cas des algues rencontrées dans le lac IV.

Si les apports de sels minéraux sont suffisants pour maintenir la conductivité en dessus de  $150 \mu\text{S/cm}$ , alors, le pH devrait avoir une valeur constante voisine de 6,6.- 6,9. Cela est vérifié pour toutes les valeurs in-situ.

b) Etude des variations de la concentration en phosphates et en oxygène dissous.

La figure ci-dessous donne l'évolution du taux de phosphates en fonction du temps pour les eaux du V.

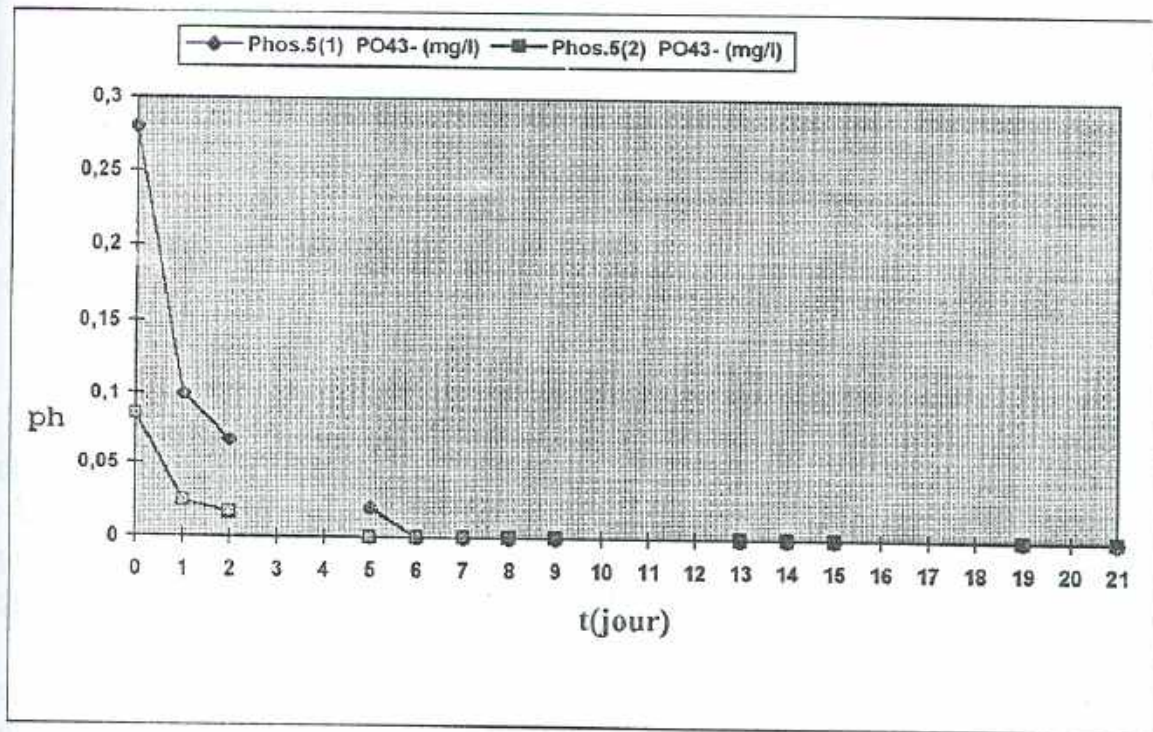


Fig.73 : Comparaison des valeurs de phosphates pour les deux essais du lac V.

Les deux essais donnent des courbes de même tendance comme l'indique la figure 73. Le taux de décroissance semble être lié à la concentration initiale; il est plus important lorsque la concentration initiale est plus élevée.

Les taux initiaux de phosphates étaient différents dans les deux eaux d'essais, ce qui ne permet pas d'affirmer que ces deux essais étaient complètement identiques. Cependant, les interprétations faites sur le pH et la conductivité ne sont pas pour autant sans objet. En effet, le rôle des phosphates dans un tel milieu est de courte durée. Sur la figure 73, au bout de quatre à cinq jours, les phosphates ont quasiment disparu du milieu, quelle que soit la teneur initiale. De plus, leur concentration est faible comparée à celle des autres espèces en solution. Dans cette expérience, un essai à blanc montre, ce qui est



déjà connu, que les phosphates ne sont pas consommés que par les plantes aquatiques.

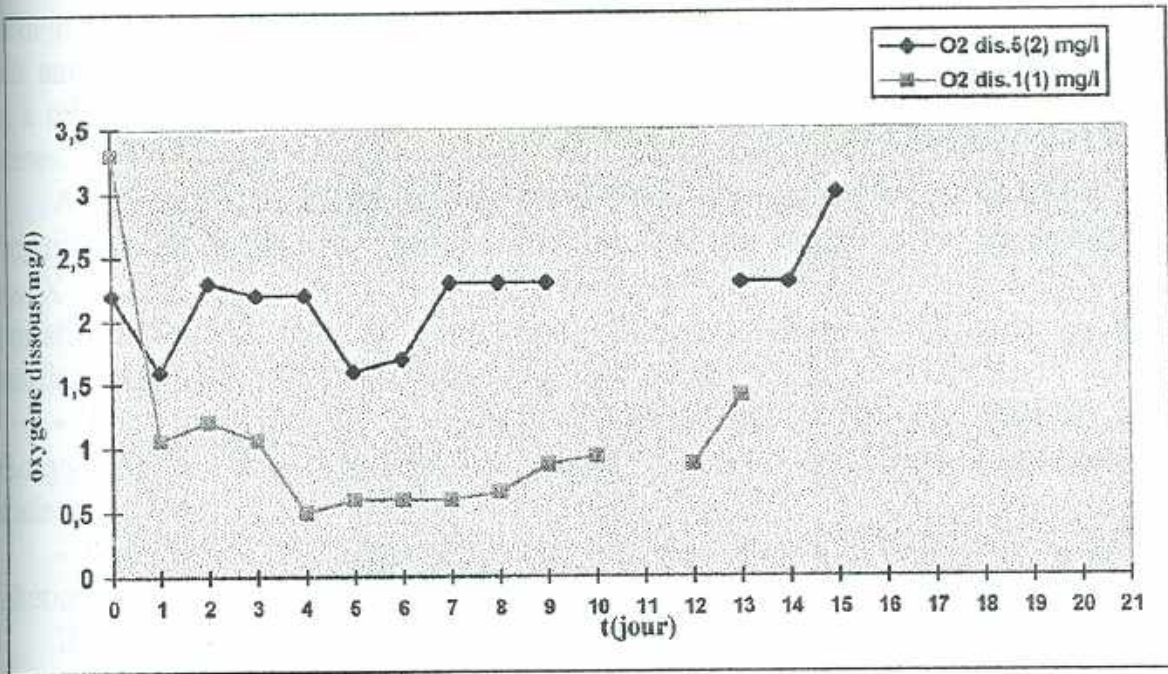


Fig.74 : Evolution de l'oxygène dissous pour les eaux des lacs I et V.

Les jacinthes d'eau, sont hors du laboratoire et bénéficient de temps en temps de la lumière solaire mais aussi de l'ombrage du toit du bâtiment abritant les laboratoires. L'oxygène dissous, comme en témoigne la figure ci-dessus, diminue très vite, et atteint une valeur minimale d'environ 2mg/l au cours de la première journée. Cette constatation est vérifiée pour les eaux des deux lacs.

Pour le lac I le taux d'oxygène dissous initial est supérieur à 4mg/l alors que pour les eaux du lac V il n'est que légèrement supérieur à 2mg/l  $O_2$ . Après le douzième jour, il semble que l'on assiste à une légère remontée sans qu'on puisse l'attribuer à un phénomène connu mais il est possible de rapprocher cet état de fait à la diversité des apports en oxygène dans le milieu (photosynthèse dissolution de l'oxygène de l'air). En résumé, l'action des plantes sur la teneur en oxygène dissous de l'eau dans laquelle elles plongent est d'opérer une rapide baisse de cette teneur.

Dans le même laps de temps que s'opère cette diminution du taux d'oxygène dissous, on constate une précipitation spectaculaire des matières en suspension. Cette précipitation ne peut qu'être imputée aux jacinthes qui joueraient un rôle identique à celui d'une autre plante connue pour son caractère flocculant : la moringa. Pour les eaux du lac V le pH demeure constant durant cette période. Par contre, la diminution de la conductivité pourrait être interprétée autant par la consommation des plantes que par une précipitation des sels dissous.

Il semble possible de relier l'origine de cette précipitation à un produit émis dans l'eau par les jacinthes ou à un effet induit par la vie de la plante. Si la première hypothèse est vraie, l'adjonction d'eau dans laquelle des jacinthes auraient séjourné à de l'eau de forte turbidité, devrait induire une clarification de cette eau. Si cette première hypothèse n'est pas vérifiée, c'est que ce phénomène est à relier à l'activité biologique de la plante et plus précisément à celle des racines.

A travers ces résultats, nous voyons que l'effet épurant des jacinthes peut être utilisé pour réduire les charges nutritives par lagunage surtout au niveau des lacs X et VII qui serviraient alors de points de collecte des eaux usées domestiques et urbaines du centre ville. Cependant nous relevons quelques insuffisances:

- La réduction de la charge en DBO est faible par rapport à la désoxygénation que provoquent les plantes ce qui ne favorise pas les réactions en aérobie.

- L'existence des macrophytes à ces endroits enlève une partie de son esthétique à la ville.

Il faut donc une solution qui réduit la charge en DCO et pourquoi pas les odeurs, tout en atténuant les charges nutritives.

#### 4- Résultats de la deuxième série des essais en aquarium.

##### a) Méthode expérimentale.

Nous avons utilisé deux aquariums contenant les eaux du lac VII. L'aquarium noté A ne contient pas de jacinthes d'eau alors que l'aquarium B en contient. Le volume d'eau initial étant de 7 litres par aquarium. Les analyses des paramètres ont été faites en parallèle. Les paramètres suivis sont: pH; M.E.S.; O<sub>2</sub> dissous; N.T.K.; P<sub>tot</sub>; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>; DCO(eau brute); DCO(eau filtrée) et le paramètre caractéristique de la couleur verte a\*(cf troisième partie : mesure de la couleur des feuilles de jacinthe) qui permet d'estimer l'évolution des algues dans l'eau.



b) Résultats et interprétation .  
pH.

L'analyse a donné les résultats du tableau suivants:

**Tableau 67**

Résultats du pH pour les deux essais A et B.

| t(jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0       | 7,15               | 7,15               |
| 1       | 7,48               | 7,29               |
| 2       | 8,06               | 7,29               |
| 3       | 8,32               | 7,23               |
| 4       | 8,43               | 7,53               |
| 5       | 8,45               | 7,57               |
| 6       | 8,5                | 7,74               |

◆ A(sans jacinthes) —■ B(avec jacinthes)

M.E.S.

Tableau 68

Résultats des M.E.S. pour les deux essais A et B.

| t | A   | B   |
|---|-----|-----|
| 0 | 119 | 119 |
| 1 | 12  | 42  |
| 2 | 6   | 20  |
| 3 | 18  | 18  |
| 4 | 8   | 8   |

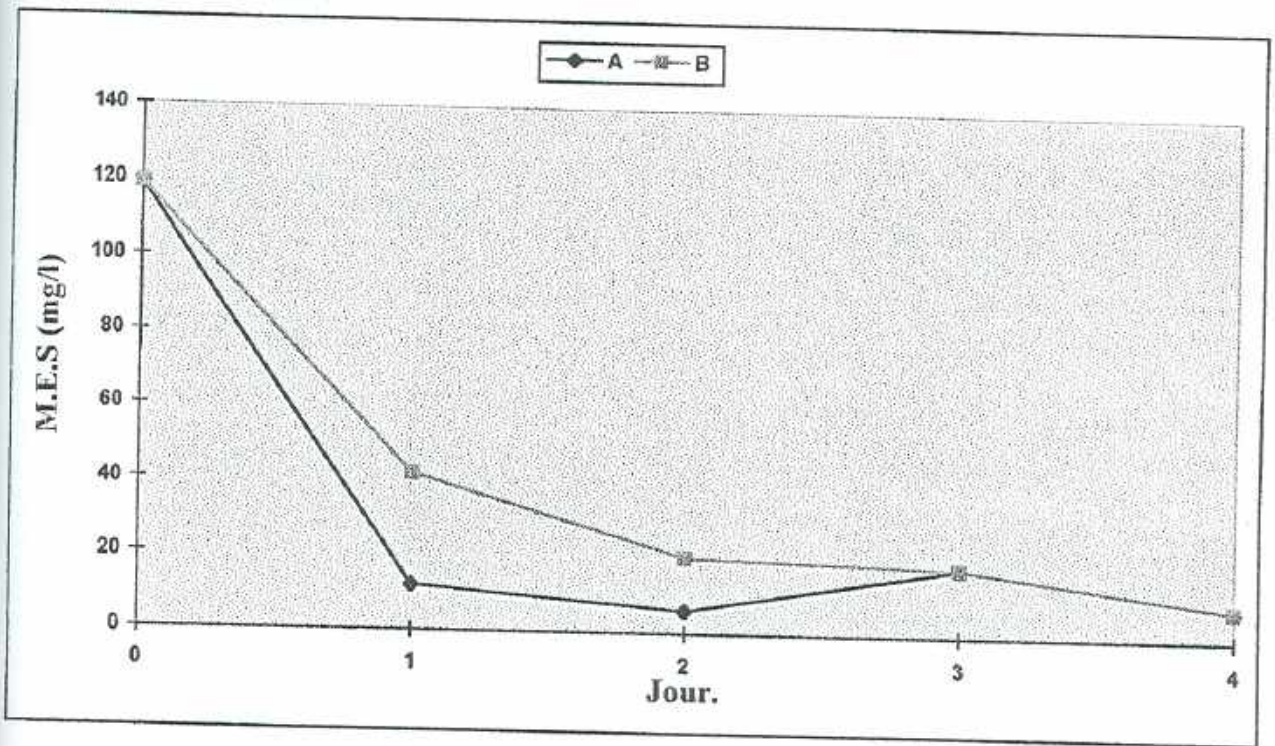


Fig.76 : Courbe d'évolution des M.E.S. pour les deux essais A et B.

La décroissance des M.E.S. est pratiquement identique pour les deux essais mais elle est plus prononcée pour l'aquarium à jacinthes, les deux premiers jours.



## c) Oxygène dissous.

Tableau 69

Résultats de l'oxygène dissous pour les deux essais A et B.

| t(jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0       | 3,14               | 3,14               |
| 1       | 7,11               | 3,73               |
| 2       | 7,02               | 4,87               |
| 3       | 8,15               | 6,14               |
| 4       | 7,46               | 6,3                |
| 5       | 7,01               | 6,44               |

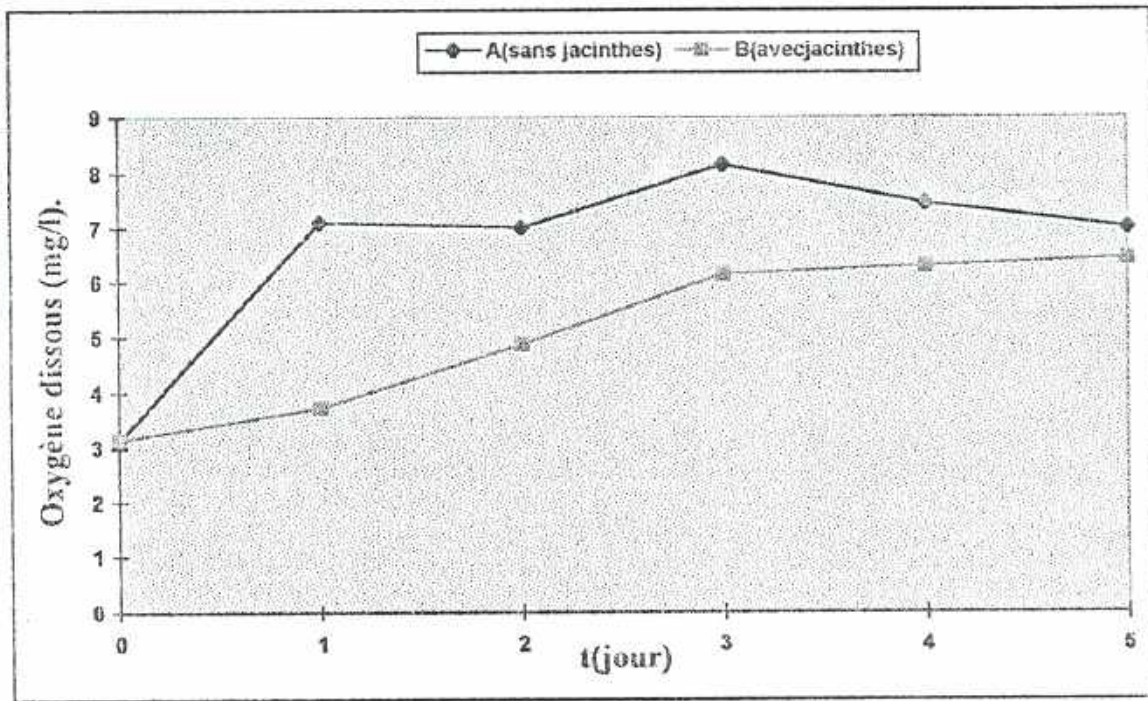


Fig.74 : Courbe d'évolution de l'oxygène dissous pour les deux essais A et B.

La figure ci-dessus montre que l'aquarium A (sans macrophytes) où se développent les algues a un taux d'oxygène dissous relativement plus important que pour l'aquarium B qui comporte les jacinthes d'eau (macrophytes). Ce résultat confirme ceux obtenus précédemment en aquarium avec les eaux des lacs I et V.



Tableau 70

Résultats des phosphates pour les deux essais A et B.

| t(jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0       | 0,54               | 0,54               |
| 1       | 0,53               | 0,45               |
| 2       | 0,51               | 0,17               |
| 3       | 0,48               | 0,15               |
| 4       | 0,43               | 0,19               |

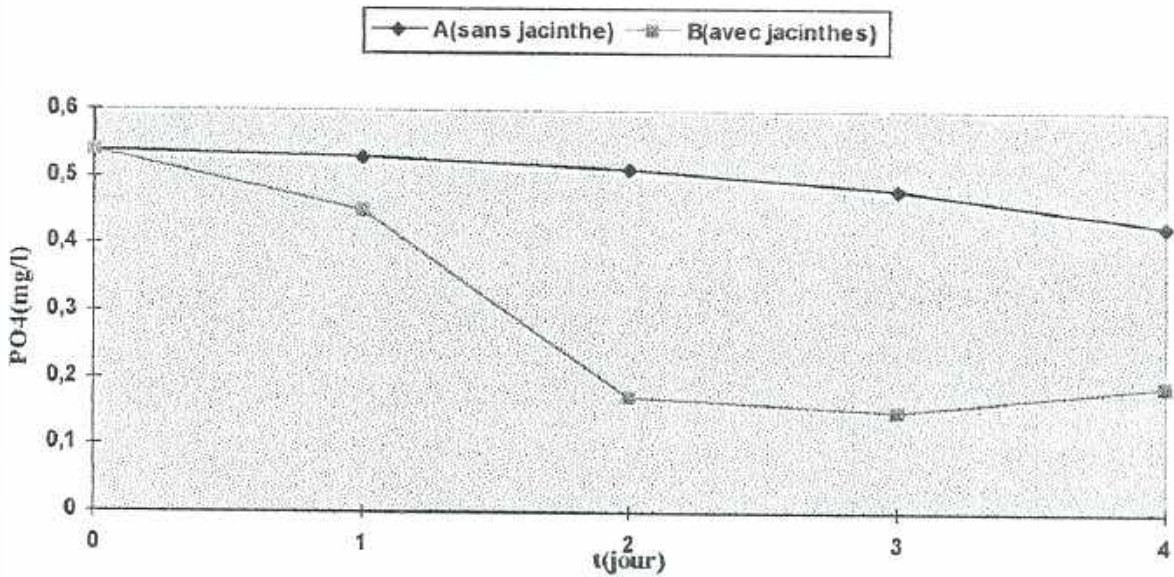


Fig.75 : Evolution des phosphates pour les deux essais.

La figure ci-dessus indique clairement que la diminution de la teneur en phosphates est plus importante pour l'aquarium à jacinthes d'eau que dans le cas de l'aquarium A à algues. Cette décroissance des phosphates dans l'essai B confirme les résultats du premier essai en aquarium.



P<sub>tot</sub>.

Tableau 71

Résultats du phosphore total pour les deux essais A et B.

| t(jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0       | 1,62               | 1,62               |
| 1       | 0,72               | 0,74               |
| 2       | 0,63               | 0,35               |
| 3       | 0,5                | 0,54               |

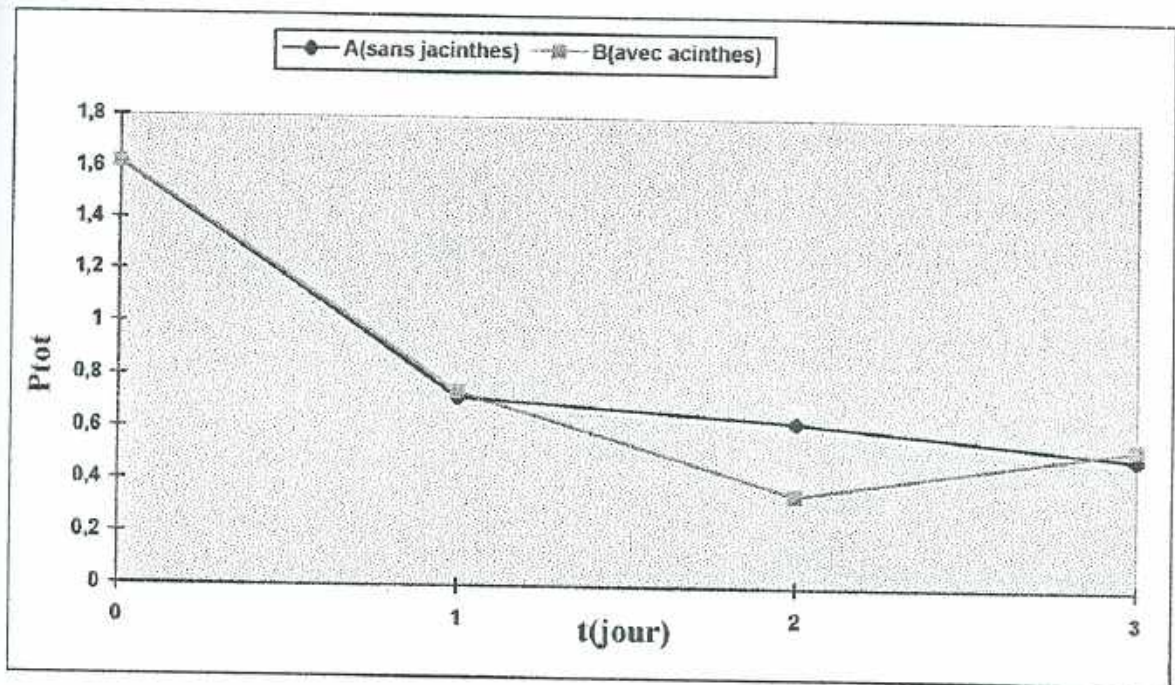


Fig.76 : Evolution de phosphore total pour les deux essais A et B.

La diminution du phosphore total est pratiquement identique pour les deux essais.

N.T.K.

Tableau 72

Résultats de l'azote total kjeldahl pour les deux essais A et B.

| t(jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|---------|--------------------|--------------------|
| 0       | 7,73               | 7,73               |
| 1       | 5,26               | 5,71               |
| 2       | 4,93               | 3,7                |
| 3       | 3,92               | 3,8                |
| 4       | 3,14               | 3,14               |
| 5       | 1,57               | 3,02               |

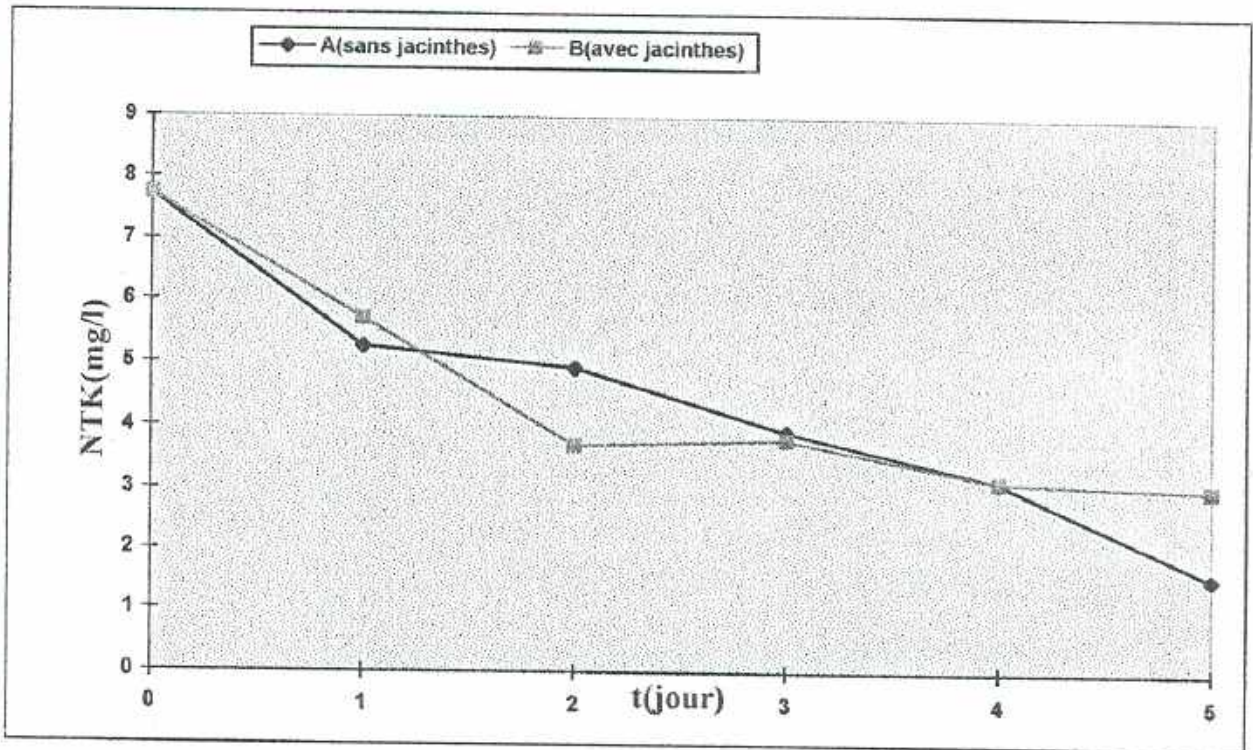


Fig.77 : Evolution de l'azote total pour les deux essais A et B.

La variation du taux d'azote total kjeldahl est caractérisée pour les deux essais par des courbes similaires. La diminution de l'azote total kjeldahl est pratiquement identique pour les deux essais.



a\*.

Tableau 73

Résultats du paramètre de couleur a\* pour les deux essais A et B.

| T (jour) | A (sans jacinthes) | B (avec jacinthes) |
|----------|--------------------|--------------------|
| 0        | 1,74               | 1,74               |
| 1        | -7,71              | -4,53              |
| 2        | -5,87              | -2,99              |
| 3        | -7,06              | -3,28              |
| 4        | -5,78              |                    |
| 5        | -6,07              | -0,66              |
| 6        | -7,43              | -2,49              |

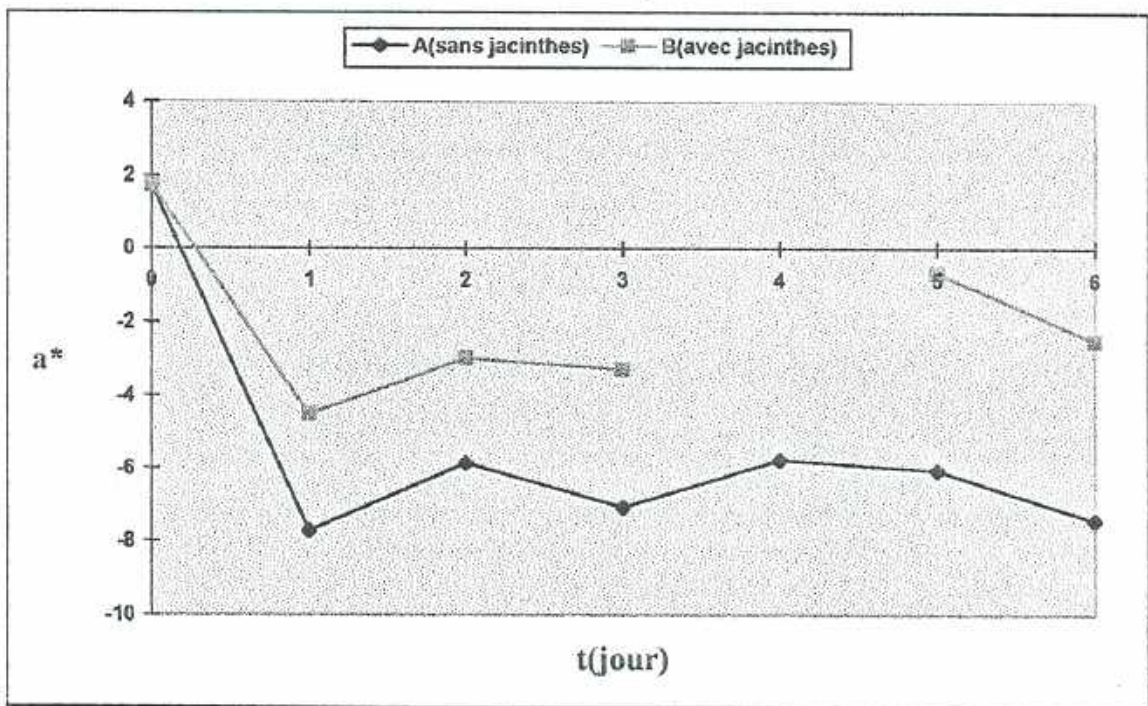


Fig.78 : Evolution du paramètre de couleur verte a\* pour les deux essais A et B.

La valeur de a\* caractéristique de la couleur verte augmente en valeur absolue beaucoup plus pour l'aquarium A (présence d'algues) que pour l'aquarium B où se trouvent des jacinthes d'eau. La présence des macrophytes freine le développement des algues comme l'a déjà montré l'étude in situ des eaux des lacs.

Par ailleurs, la détermination au colorimètre du paramètre de couleur verte a\* peut constituer un test rapide d'estimation de la présence des algues dans une eau ; mais les interférences liées à la présence éventuelle des substances colorées rend cette méthode imprécise.

c) Taux d'élimination des substances : aquarium A (sans macrophytes).

Tableau 74

Taux d'élimination de substances pour l'aquarium A.

| Substances        | variation ou taux d'élimination.  |
|-------------------|---|
| $PO_4^{3-}$       | 20,37%  |
| Ptot              | 69,1%   |
| N.T.K.            | 79,68%  |
| M.E.S.            | 93,27%  |
| DCO (eau brute)   | Passe de 46 à 17,9 mg/l d'O <sub>2</sub> (61%)                                  |
| DCO (eau filtrée) | Passe de 31 à 8,9 mg/l d'O <sub>2</sub> (71,3%)                                 |
| a*                | Passe de 1,74 (rougeâtre) à -7,43 (verdâtre).<br>On a un développement d'algue. |

d) Taux d'élimination des substances: aquarium B comportant des jacinthes d'eau.

Tableau 75

Taux d'élimination de substances pour l'aquarium B.

| Substances        | variation ou taux d'élimination au bout de 8 jours                      |
|-------------------|---|
| $PO_4^{3-}$       | 64,8%   |
| Ptot              | 66,67%  |
| N.T.K.            | 60,9%   |
| M.E.S.            | 93,27%  |
| DCO (eau brute)   | Passe de 46 à 24,6 mg/l d'O <sub>2</sub> (46,5%)                        |
| DCO (eau filtrée) | Passe de 31 à 6,6 mg/l d'O <sub>2</sub> (78,7%)                         |
| a*                | Passe de 1,74 (rougeâtre) à -2,49 (verdâtre).<br>développement d'algue. |

e) Etude comparée des deux essais.

Il apparaît des similitudes d'évolution pour certains paramètres: c'est le cas des M.E.S.; de l'azote total Kjeldahl N.T.K.; du phosphore total; par contre, il y a une grande différence pour les phosphates: diminution plus importante avec la présence des jacinthes d'eau douce qui confirme les résultats des premiers essais en aquarium. Le pH est celui d'un milieu basique pour l'essai A à algues, alors qu'il reste autour de 7 pour l'essai B à macrophytes. Il y a



également une oxygénation plus importante pour A. Il est à remarquer que la quantité d'eau faible a permis de se mettre dans les conditions proches de celle d'un lagunage (faible profondeur). Dans ce cadre l'on constate que le lagunage avec développement d'algues est meilleur. En tenant compte des inconvénients d'un lagunage avec développement des macrophytes et des taux d'élimination obtenus ci-dessus, un lagunage avec développement d'algue est plus adapté pour le traitement des eaux résiduaires à Yamoussoukro.

## D) DESCRIPTION DU PLAN DE TRAITEMENT DES EAUX PROPOSE POUR LUTTER CONTRE LEUR EUTROPHISATION

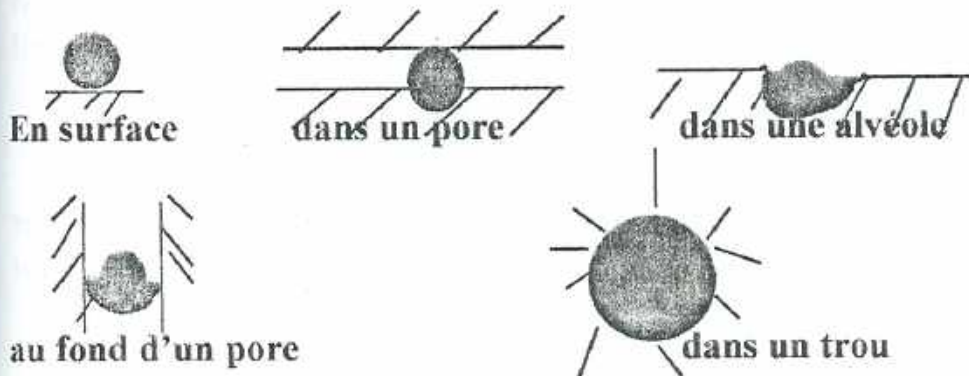
### 1-Considération d'ordre théorique.

#### a) Définition et description générale.

L'adsorption est un phénomène d'interface pouvant se manifester entre un solide et un liquide. Le phénomène est général pour toutes les surfaces. Selon WEBER<sup>(33)</sup>, tout solide est un adsorbant potentiel, mais l'on cherche à exploiter cette caractéristique en le magnifiant, par l'emploi de solide à porosité élevée.

Aux interfaces, les attractions intermoléculaires ne sont pas compensées dans toutes les directions, et il subsiste des forces résiduelles dirigées vers l'extérieur. Ces forces représentent une énergie superficielle par unité de surface, comparable à la tension superficielle des liquides. Ces forces sont neutralisées lorsque des particules mobiles (un gaz ou un liquide) se fixent en surface; on dit qu'elle s'adsorbent<sup>(33)</sup>.

Les schémas suivants donnent les configurations possibles de l'interface.



L'équilibre d'adsorption, entre un adsorbant et un adsorbé, dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont:

- la surface spécifique;
- la nature de l'adsorbé;
- le pH (l'adsorption est maximum au point isoélectrique, car les liaisons avec l'eau y sont minimales. De même, une molécule neutre est mieux adsorbée qu'une autre);
- la polarité;

- la température.

### b) Cinétique de l'adsorption.

La cinétique proprement dite n'est pas encore décrite de façon satisfaisante par des équations. Elle semble être gouvernée par deux étapes:

- transport de la molécule vers la particule, par agitation, s'il s'agit de charbon actif en poudre, par turbulence, s'il s'agit de charbon actif granulaire;
- migration jusqu'au site d'absorption par diffusion intragranulaire.

La deuxième étape est la plus lente et ne peut être artificiellement accélérée. La mise à l'équilibre peut atteindre quatre heures et souvent plus<sup>(12)</sup>. La cinétique obéit à des équations semblables à celles des transferts gazeux: vitesse décroissante en fonction du déficit d'adsorption, et fixation tendant asymptotiquement vers la saturation de l'adsorbant. Il convient de toujours appliquer la granulation minimum possible.

Deux modèles ont été formulés de façon approfondie:

- le Pore Diffusion Model (P.D.M.) de WEBER<sup>(33)</sup>;
- le Homogenous Surface Diffusion Model (H.S.D.M.) de SONTHEIMER rapporté par F. EDELIN<sup>(12)</sup>

Dans le P.D.M., la molécule est supposée migrer par diffusion dans le liquide et pénétrer dans les pores selon l'axe de ceux-ci. En cours de route, elle s'équilibre localement le long de la paroi du pore, par adsorption.

Dans le H.S.D.M., la molécule s'adsorbe dès l'entrée du pore, à l'extérieur du grain, seul endroit où soit supposé régner un équilibre d'adsorption. Ensuite, la molécule adsorbée « rampe » le long de la surface du pore, selon une loi de diffusion. On rencontre donc successivement deux résistances: la première est un coefficient de transfert de masse dans le film liquide, et la seconde, un coefficient de diffusion superficielle.

### c) Traitement au charbon.

L'adsorption sur charbon effectué par certains auteurs<sup>(12,33)</sup> a donné un rendement intéressant maximum pour l'effluent dans le traitement des eaux usées suivant:

D.B.O. < 2mg/l;

D.C.O. < 10mg/l.

M.E.S. < 1mg/l

de plus selon ces mêmes auteurs, ce procédé de traitement possède une efficacité reconnue pour l'élimination des odeurs et de couleur. Le problème qui reste à résoudre est celui des substances nutritives azote et phosphore responsables de l'eutrophisation des eaux. Pour répondre à une telle préoccupation, des analyses en laboratoire ont été réalisées et ont donné des résultats concluants.



## d) Résultats expérimentaux.

Les eaux usées ont été caractérisées à travers la D.B.O., D.C.O. et leur teneur en azote et en phosphore puis, nous avons évalué les rapports  $\frac{DBO}{N}$ ,  $\frac{DBO}{P}$ ,  $\frac{DBO}{DCO}$ ,  $\frac{N}{P}$  et  $\frac{PO_4^{3-}}{P}$  comme l'indique le tableau des valeurs ci-dessous.

Tableau 76

Résultats des analyses pour les eaux usées.

| Date | échantillon. | DBO<br>mg/l | DCO<br>mg/l | NTK<br>mg/l | Ptot<br>mg/l | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>mg/l | DBO/N   | DBO/P   | DBO/DCO | N/p  | PO <sub>4</sub> /P<br>(%) |
|------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|------|---------------------------|
| Nov. | 20           | 30          | 32          | -           | 0,42         | 0,08                                  | 21 : 1  | 42 : 1  | 0,94    | 7,9  | 16,6                      |
| Déc. |              | 45          | 60          | 9,7         | 1,4          | 0,12                                  | 41 : 1  | 34 : 1  | 0,75    | 7,9  | 8,57                      |
| Jan. |              | 45          | 68          | 8,45        | 0,8          | 0,1                                   | 5 : 1   | 56 : 1  | 0,66    | 10,5 | 12,5                      |
| Nov. | 21           | 110         | 372         | 78,1        | 3,87         | 3,02                                  | 1,8 : 1 | 37 : 1  | 0,3     | 4    | 78,0                      |
| Déc. |              | 375         | 496         | 8           | 11,55        | 8,48                                  | 3 : 1   | 33 : 1  | 0,76    | 20,1 | 73,4                      |
| Jan. |              | 200         | 208         | 108,9       | 16,14        | 9,25                                  | 1,4 : 1 | 12 : 1  | 0,96    | 9,4  | 57,3                      |
|      |              |             |             | 144,1       |              |                                       |         |         |         |      |                           |
| Nov. | 22           | 40          | 32          | 4,26        | 3,78         | 2,59                                  | 20 : 1  | 22 : 1  | -       | 1,12 | 68,5                      |
| Déc. |              | 110         | 128         | 18,8        | 2,66         | 0,04                                  | 9 : 1   | 66 : 1  | 0,86    | 7,09 | 1,5                       |
| Jan. |              | 78          | 84          | 6           | 0,4          | 0,02                                  | 14 : 1  | 195 : 1 | 0,92    | 14,3 | 5                         |
|      |              |             |             | 5,72        |              |                                       |         |         |         |      |                           |

Pour une réduction de 1mg/l en DBO, on a une élimination de P variant de 0,005 à 0,083 mg/l pour les eaux usées; ce qui est important pour cet élément en tenant compte des concentrations généralement rencontrées. En ce qui concerne l'azote, la réduction varie de 0,05 à 0,7mg/l. La réduction de charge en DBO entraîne celle des éléments phosphore et azote incorporés dans les composés organiques comme les protéines. Le charbon de bois rencontré sur le marché de Yamoussoukro que nous avons utilisé pour l'essai a aidé à résoudre le problème de pollution dans son ensemble tout en atténuant le phénomène d'eutrophisation des eaux des lacs. Une étude portant sur divers charbons est à envisagée pour

ressortir la variété de bois donnant un meilleur rendement lors de l'utilisation du filtre à charbon. Cependant, tenant compte des réflexes des opérateurs qu'il faut impliquer dans la gestion des eaux usées, qui consiste à rechercher le charbon directement sur le marché local, les résultats obtenus peuvent être pris en compte dans la résolution du problème d'eutrophisation.

## **2-Description du plan de traitement des eaux usées au charbon.**

Le but poursuivi à travers cette solution, est la résolution simultanée de plusieurs problèmes: l'ensablement, l'apport en nutriment, la pollution organique et même microbienne. Pour se faire, le charbon de bois a été utilisé comme élément de base.

En effet, nous sommes dans une zone où cet élément se trouve facilement et à un prix abordable. Cependant, l'on doit rechercher une utilisation aussi efficace que possible. Les essais en laboratoire nous ont donné les résultats du tableau.71. ci-dessous.

### **a) Résultats des essais au charbon.**

#### **- conditions expérimentales.**

Le charbon de bois vendu sur le marché de Yamoussoukro a été utilisé. Le charbon écrasé est tamisé à l'aide du premier tamis  $F_1$  de diamètre inférieur à 1mm et du deuxième tamis  $F_2$  de diamètre supérieur à 2mm. La couche de charbon est de 5cm environ pour un volume d'eau filtrée de 500ml par essai. Un papier filtre est placé avant la couche de charbon pour éviter son entraînement par l'eau à filtrer. La figure ci-dessous, donne le schéma du système de filtrage au charbon utilisé.



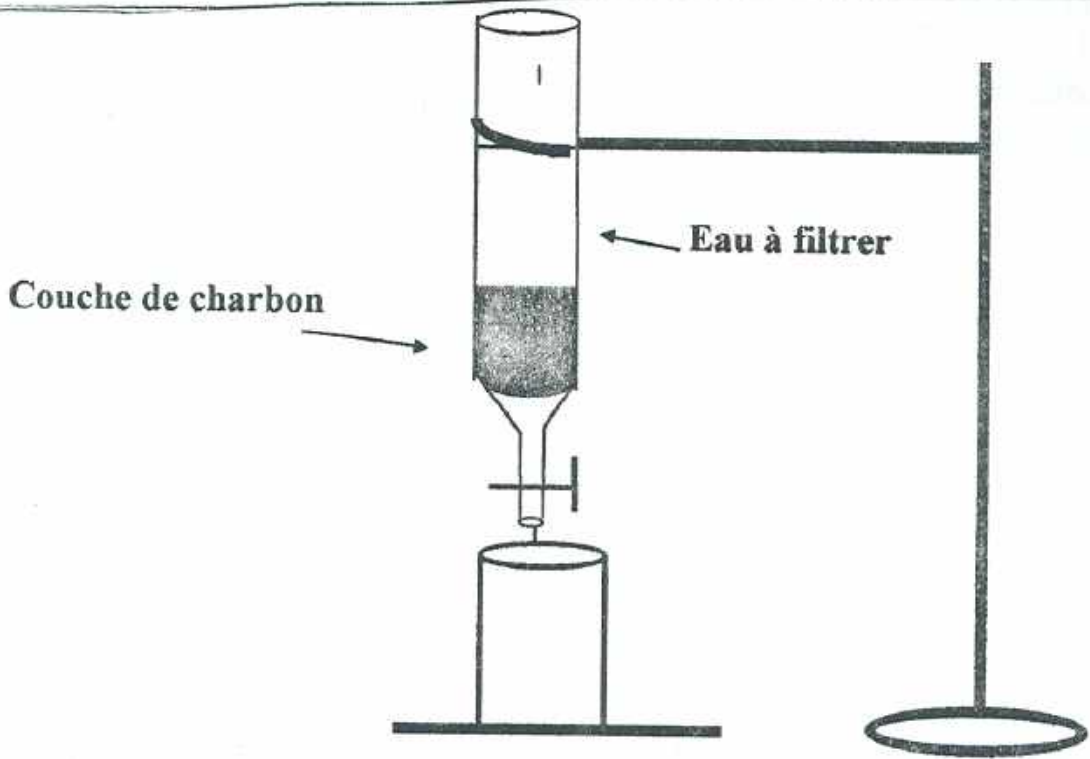


Fig.79 : Schéma expérimental de traitement au charbon de bois

- Résultats des analyses

Tableau 77

Résultats des essais au charbon.

| Echantillon / paramètre.                                    | $PO_4^{3-}$ | Ptot   | N.T.K. |
|---|-------------|--------|--------|
| Eau brute   | 8,18        | 12,11  | 139,1  |
| Eau filtré avec du charbon fin ( $F_1$ )<br>$d < 1mm$       | 4,54        | 9,5    | 80,47  |
| Eau filtré avec du charbon moins fin ( $F_2$ )<br>$d > 2mm$ | 6,3         | 11,38  | 125,4  |
| Taux d'élimination<br>$F_1$ ( $d < 1mm$ )                   | 44,5%       | 21,55% | 42,15% |
| Taux d'élimination<br>$F_2$ ( $d > 2mm$ )                   | 23%         | 6,06%  | 9,85%  |

Les pourcentages d'élimination des substances se calculent de la manière

suivante:  $\% \text{ d'élimination} = \frac{(C_{Br} - C_F) \times 100}{C_{Br}}$

$C_{Br}$ : concentration pour l'eau brute.

$C_F$ : concentration pour l'eau filtrée

Les calculs donnent les résultats des taux d'élimination du tableau ci-dessus. Ce résultat obtenu sur trois essais en laboratoire doit être adapté à la réalité sur le terrain en tenant compte des facteurs multiples que sont : le débit des eaux usées, la quantité de charbon à utiliser selon le débit, le temps de saturation et la méthode de réactivation du charbon pour une utilisation de durée relativement longue, le coût d'exploitation, etc.

Dans le cadre de ce travail, le but recherché est avant tout, de montrer qu'un traitement primaire voir tertiaire pouvait être envisagé en utilisant le charbon de bois, et valoriser par la même occasion les matériaux locaux dans la résolution des problèmes d'environnement.

Par ailleurs il est apparu urgent dans le cas de certains sites tels que l'égout de l'hôpital, les terrasses des « maquis » de trouver des solutions immédiatement applicables dans le court - terme pour réduire les impacts négatifs déjà relevés sur le plan sanitaire de ces sites très fréquentés par la population.

Le plan détaillé ci-joint, correspond à la méthode du traitement que nous proposons pour résoudre le problème de l'eutrophisation des eaux des lacs de Yamoussoukro. Il faut distinguer ici deux aspects:

- les opérations prioritaires utilisant le système de filtre à charbon pour l'hôpital et les égouts situés à côté des terrasses des « maquis » en bordure du lac VIII, pour tenir compte du fait que les hommes y sont plus exposés; et les opérations qui demandent une construction de dalots sous forme de projet.

Pour une meilleure utilisation du charbon, il est prévu un grillage avant le filtre à charbon. Le sable doit être enlevé périodiquement. Pour les zones de loisirs (terrasses des maquis) et l'hôpital, un pré - traitement au chlore des eaux usées avant leur arrivée au filtre est souhaitable. Il faudrait, c'est le souhait ardent, responsabiliser les opérateurs économiques propriétaires des maquis pour la réalisation et la tenue des filtres de leur zone d'exercice.

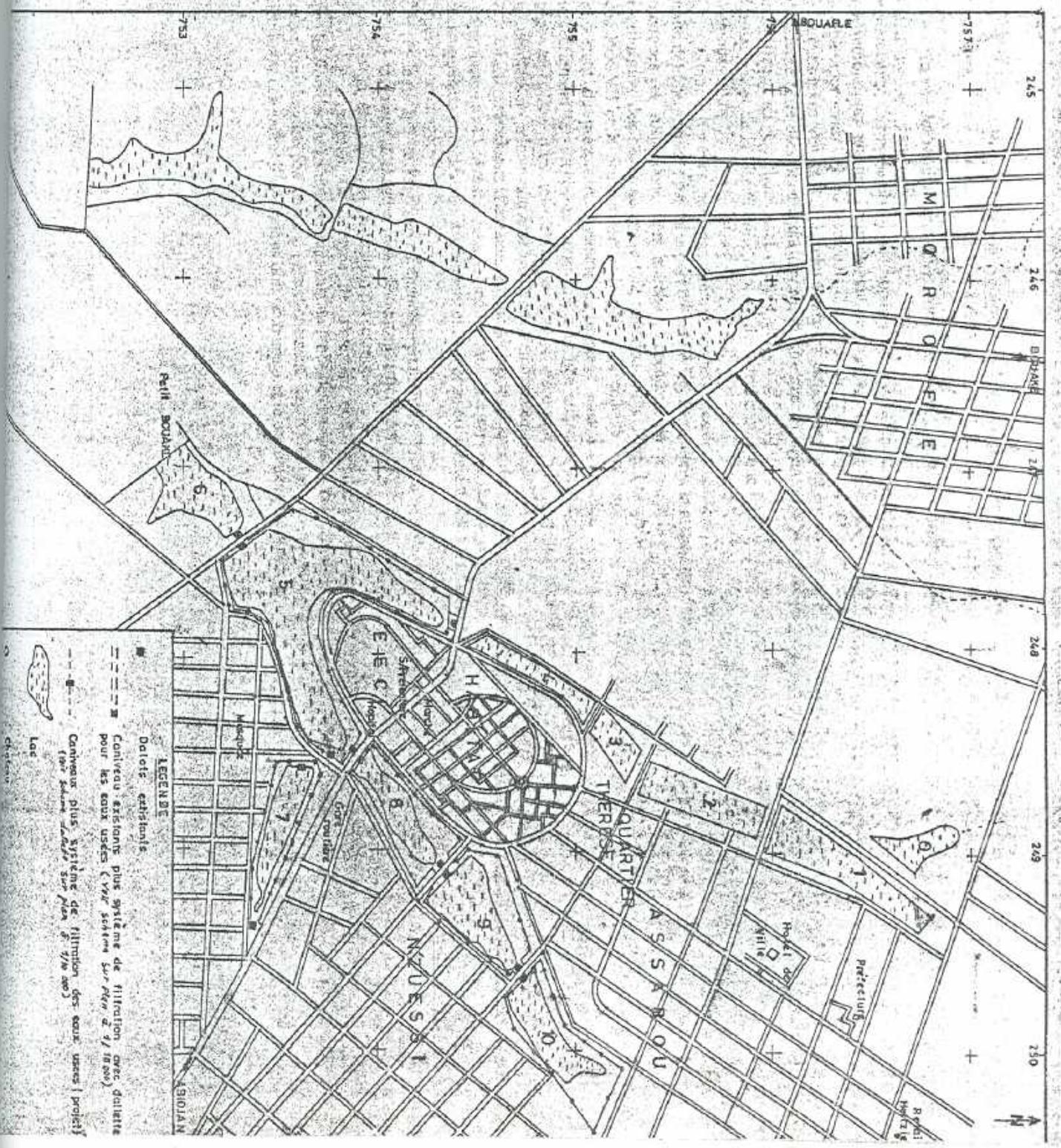
Un suivi régulier: dessablage, changement périodique du charbon est nécessaire. Par ailleurs il est important de rappeler que plus le charbon est fin plus le filtrage est meilleur; mais pour un bon rendement le charbon fin doit être encasté dans du charbon plus gros présentant une surface de contact. Ceci a l'avantage d'éviter l'entraînement par l'eau du charbon au bout d'un temps relativement court, vidant ainsi le filtre de son contenu.

Cette solution doit être complétée par une sensibilisation des habitants. Compte tenu de l'état d'eutrophisation avancée des lacs un plan de restauration par dragage s'impose. En effet la sédimentation des matières organiques qui s'est effectuée sur plusieurs années a réduit de façon considérable la profondeur des lacs. De plus ces lacs ont joué le rôle de mares d'épuration pour la ville et se trouvent aujourd'hui dans un état de saturation. Ils sont devenus, de part leur situation géographique, des « fosses septiques » à ciel ouvert qui constituent un danger pour la population sur le plan sanitaire.



Il faut entre autres, les amener à avoir des systèmes individuels d'assainissement de qualité et des réflexes de personnes conscientes du danger des problèmes d'environnement. La sensibilisation des population reste l'élément le plus important pour une meilleure efficacité des méthodologies de lutte envisagées. En outre la lutte intégrée, que met en œuvre le projet du CIAPOL (Centre Ivoirien d'Antipollution), qui inclut la lutte biologique permet de mieux lutter contre les végétaux aquatiques envahissants que sont les macrophytes.





LEGENDE

- Datois existants
- ▣ Contours existants plus système de filtration avec dattiers pour les eaux usées (voir système sur plan n° 9/1800)
- ▤ Contours plus système de filtration des eaux usées (projet) (voir système sur plan n° 9/1800)
- Lac



Lac



245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

753

754

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

771

772

773

774

775

776

777

778

779

780

781

782

783

784

785

786

787

788

789

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803

804

805

806

807

808

809

810

811

812

813

814

815

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

838

839

840

841

842

843

844

845

846

847

848

849

850

851

852

853

854

855

856

857

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

887

888

889

890

891

892

893

894

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

905

906

907

908

909

910

911

912

913

914

915

916

917

918

919

920

921

922

923

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

938

939

940

941

942

943

944

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

967

968

969

970

971

972

973

974

975



### 3- Proposition de solution à long terme: traitement par lagunage.

Au vue des résultats que nous avons obtenus, et partant du constat d'échec des plans de traitement antérieurs (échec lié au manque de suivi et de maintenance des appareils), il est apparu important de préconiser une solution qui semble plus adaptée. Le traitement par lagunage (traitement algo-bactérien) semble approprié. Les inconvénients d'un lagunage par usage de macrophytes à Yamoussoukro ont été déjà relevés (aspect esthétique). Les résultats de la deuxième série d'essai en aquarium ont montré que le lagunage algo-bactérien est efficace ici. Ce choix tient compte des caractéristiques climatiques (forte insolation) et de la disponibilité relative des terrains pour une telle opération à Yamoussoukro.

Comme il a été signalé dans l'étude des procédés de traitement, ce type de traitement ne nécessite pas un apport d'énergie facturante après la réalisation des ouvrages et reste donc bon marché. Cependant, la récupération et une réutilisation des boues nécessite une attention particulière. Les points amonts des lacs VII et X peuvent servir de points de collecte des eaux usées. Il est important de prévoir un système de dragage pour l'extraction des boues généralement très riches en nutriment pour une utilisation en agriculture. La mise en place d'un tel débouché s'avère nécessaire afin que les boues accumulées ne crée un nouveau problème d'environnement.

Les propositions d'assainissement global que rapporte l'étude menée à Yamoussoukro(1) abonde dans le même sens. Ce rapport donne les détails techniques du coût des investissements et de leur amortissement selon les divers types de lagunage:

- lagunage stockage suivi d'épandage en forêt;
- lagunage stockage et ruissellement superficiel contrôlé;
- lagunage aéré et infiltration percolation.

La conception de ce type de traitement doit prendre en compte la production des boues et des sédiments au fonds des bassins. A cet effet il faudra curer ou draguer ces bassins périodiquement. La réalisation d'un dispositif facilitant ces genres d'opérations doit accompagner le traitement par lagunage.

**CONCLUSION GENERALE**



Les systèmes écologiques sont rarement un système simple à étudier. Cette étude, comme toute étude de système environnemental, se doit d'avoir une finalité pratique, en ce sens qu'elle doit aider à proposer des solutions concrètes au problème posé à Yamoussoukro.

Cependant, pour satisfaire à cet objectif pratique, ce travail doit s'appuyer sur une argumentation théorique expérimentale empirique.

La diversité des lacs de Yamoussoukro sur le plan de la morphologie et leur alimentation par les eaux d'une même origine, de même que le retrait des jacinthes dans certains lacs en cours d'étude, ont permis la réalisation d'études comparatives.

L'étude statique de l'eau des lacs de Yamoussoukro a mis en évidence leur état d'eutrophisation avancé, mais toutefois ces lacs sont dans des états trophiques différents. Ainsi pour le lac I qui reste le lac dont les eaux sont de qualité relativement acceptable, les résultats donnent :  $pH=7,3$  ;  $O_2$  dissous =  $3,8mg/l$  ; conductivité =  $144\mu S/cm$   $P_{tot} = 0,08mg/l$ . Pour les lacs II, III et IV, en bordure de la Présidence, qui connaissent une eutrophisation alguale, le pH est relativement élevé :  $pH=8$ , avec un taux d'oxygène dissous moyen de  $3,5mg/l$ , une conductivité variant entre 130 et  $165\mu S/cm$ . La teneur en phosphore varie de  $0,08mg/l$  pour le lac II à  $0,18mg/l$  pour le lac IV. Les lacs situés en plein centre urbain connaissent une eutrophisation à macrophytes ; Il s'agit des lacs V, VI, VII, VIII, IX et X qui présentent un pH légèrement acide entre  $pH = 6,6$  et  $pH = 6,9$ . Le taux d'oxygène dissous est faible pour ces lacs ( $1 mg/l$  d' $O_2$  en moyenne). La conductivité électrique est plus élevée et varie entre 203 et  $405 \mu S/cm$ . Le taux de phosphore y est important (supérieur à  $0,12 mg/l$  sauf le lac IX qui affiche  $0,08 mg/l$ ).

Les valeurs de l'azote total NTK sont très peu différents d'un lac à un autre (compris entre  $3,25$  et  $4,95 mg/l$ ).

Le phosphore apparaît comme nutriment principal de classification mais aussi comme facteur engendrant le phénomène d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro surtout pour les lacs à algues. En effet l'azote ne devient facteur limitant que si  $NTK/P < 7,2$  ; or pour ces lacs ce rapport varie de 57 à 211.

Le lac IV est resté sans macrophytes avec un taux de phosphore de  $0,18mg/l$ , alors que le lac IX qui a un taux de  $0,08mg/l$  possède des lotus. Ceci s'explique par l'envasement poussé observé pour le lac IX. Cet envasement favorise l'apparition des lotus. Deux lacs de même degré trophique n'ont pas obligatoirement les mêmes réponses trophiques ; La tenue des berges, l'environnement du bassin versant et d'autres facteurs morphologiques peuvent favoriser ou non, la prolifération de certaines plantes aquatiques.

Les lacs de Yamoussoukro semblent plus tolérer les charges nutritives que ceux des zones tempérées. En effet, pour ces lacs, la valeur minimale en phosphore est de  $0,08mg/l$ , alors que Vollenweider<sup>(32)</sup> indique comme charge excessive en phosphore :  $0,02mg/l$ .



La densité de population, les activités humaines, l'état d'assainissement des quartiers d'habitation et la morphologie du lac jouent un rôle très important sur la réponse trophique des plans d'eau à Yamoussoukro.

L'étude dynamique a permis de situer les origines des matières polluantes, leur variabilité par rapport au climat notamment le régime des pluies.

L'origine des apports exogènes de nutriments, ainsi que leur mode de pénétration dans le système lacustre apparaît plus clairement comme le confirment l'étude de l'identification des sources d'eutrophisation. Le début de la saison des pluies constitue la période critique des apports en nutriments.

Les apports en éléments fertilisants sont de plusieurs origines :

- une origine liée à l'activité humaine en zone urbaine : ce sont les apports des rejets domestiques comme les eaux usées et déchets qui restent la principale source d'eutrophisation.

- une origine liée à l'activité humaine en zone rurale : ce sont les éléments de minéralisation issus des feux de brousse, dont la part est saisonnière et de moindre importance.

Les lacs III et IV ont un apport en nutriment endogène lié à la présence des excréments des caïmans. En effet, il est apparu après analyse, que le lac III reçoit en moyenne 28,5g de phosphore et 16,2g d'azote par jour et le lac IV 85,5g de phosphore et 48,6g d'azote par jour du fait des excréments des caïmans.

La comparaison des différents types d'eutrophisation a permis de ressortir les spécifications et la compétition algues - macrophytes.

L'analyse des couleurs des feuilles des jacinthes montre que ces plantes prolifèrent sur toute l'année avec un regain de vitalité en saison pluvieuse.

Le rôle des détergents dans la grande teneur en phosphore des eaux usées domestiques a été relevé.

Toute solution durable doit prendre en compte cette principale source que constituent les eaux usées, donc permettre de contrôler ces apports par des systèmes de traitement pouvant les rendre moins nuisibles sur tous les plans.

Les valeurs de  $DBO_5$  sont en moyenne de 16,8mg/l pour le lac I, 45,2mg/l pour le lac V, 23,8mg/l pour le lac VI, 37,25mg/l pour le lac VII, 15,25mg/l pour le lac X ; tandis que celle de DCO est respectivement de : 23,7, 50,7, 28,7, 46,3 et 21,3mg/l d' $O_2$  pour ces mêmes lacs

L'analyse des eaux des égouts 22 et 21 du lac V donnent respectivement 76mg/l : 228,3mg/l d' $O_2$  pour la  $DBO_5$ , 81,3 et 358,7mg/l d' $O_2$  pour la DCO. Les valeurs limites maximales données par les normes qui sont de 80mg/l d' $O_2$  pour la  $DBO_5$  et de 120mg/l d' $O_2$  pour la DCO, étant très souvent largement dépassées, il apparaît que ces égouts à ciel ouvert sont très polluants pour le lac V. Cette forte charge organique des eaux usées des égouts est à l'origine de l'envasement des lacs et favorise par la même occasion, l'eutrophisation à macrophytes.



explique la faiblesse des valeurs de DBO<sub>5</sub> et de DCO observées pour les eaux des lacs en comparaison avec les résultats obtenus pour les eaux usées.

L'étude cinétique des réactions de DBO a donné des constantes de vitesse de 0,64 pour l'égout 21 et 0,414 pour l'égout 23 du lac V, 0,737 pour les eaux du lac VII, 0,474 pour les eaux du lac VI et 0,634 pour les eaux du lac V. Lorsque la constante de vitesse K est comprise entre 0,15 et 0,17, l'eau correspondante est considérée comme contenant des matières organiques facilement biodégradables<sup>(11)</sup>. Les valeurs des constantes de vitesse trouvées sont largement plus grandes ; il apparaît donc que ces eaux (eaux des lacs et eaux usées) contiennent des matières organiques dont la biodégradabilité est rapide.

Le problème d'assainissement de Yamoussoukro lié au manque de systèmes fiables de traitement des eaux résiduaires (collectifs ou individuels) est en amont du phénomène d'eutrophisation.

Pour répondre à cette préoccupation, des essais au charbon de bois et sur l'effet épuratoire des jacinthes d'eau, ont permis de montrer la possibilité d'un traitement au charbon à court - terme et le lagunage avec développement des algues pour une solution complémentaire à long- terme.

Le Phénomène d'eutrophisation qui est un problème d'environnement, a été abordé dans le but de comprendre le phénomène, d'identifier les causes et de proposer des solutions comme il vient d'être décrit ci-dessus. Nous espérons dans ce cadre, avoir apporté notre modeste contribution à la compréhension de l'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro qui concerne un milieu dynamique (l'eau) avec toutes les variances possibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]- **BCEOM ; MM. BASSIGNY ET GOUGOU(1996).**  
Rapport sur le plan directeur de l'assainissement de Yamoussoukro
- [2]- **RYDING S.O et RAST W. (1993)**  
Science de l'environnement n°9. Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Masson éditeur 294 p.
- [3]- **BARROIN. G. (1976)**  
La lutte contre l'eutrophisation. Aménagement et nature n°44 p.21-23.
- [4]- **BIERNAUX(1978)**  
Eutrophisation et hypereutrophisation des eaux de surface.  
Anale de Gembloux Belgique 1979-85 p.55-64.
- [5]- **O.E.C.D. (1982)**  
Eutrophisation des eaux: méthode de surveillance, d'évaluation et de lutte.  
O.C.D.E bureau des publications.
- [6]- **SIGG L.; STUMM W.; BEHRA P (1994)**  
Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement.  
2ème Ed. Masson.p.180-377.
- [7]- **DROOP M. R. (1973)**  
Some thoughts on nutrient limitation in algae. Jour.Phycol.9 264-77
- [8]- **RHEE,C.- Y. (1978).**  
Effects of N:P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake. Limnol. Oceanogr.23;10-25.
- [9]- **GOLTERMAN H.L.(1975)**  
Physiological limnology. An approach to the physiology of lake ecosystems. Elsevier scientific publishing Co. New York.P.366 - 402.
- [10]- **RODIER J. (1976 )**  
L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer Tome 2  
5ème édition. Edition Dunod; -



[11]- ECKENFELDER W.W. (traduit de l'américain par VANDEVENNE L. (1981))

Gestion des eaux usées urbaines et industrielles 503p.

[12]- EDELINE F.(1996).

L'épuration physico-chimique des eaux; Edition Cebedoc.

[13]- EDELINE F. (1993).

L'épuration biologique de l'eau. Edition Cebedoc

[14]- HENRY et Coll.,(1985)

Response of phytoplankton in lake Jacaretinga to enrichment with nitrogen and phosphorus in concentration similar to those of the rivers solimoes (Amazon, Brazil). ARCH.hydrobiol.103:453-77.

[15]- MOSS B.(1969).

Limitation of algal growth in some central African lakes. Limnol.Oceangr.14 :591-601.

[16]- LINDMARK.G.(1979).

Phosphorus as a growth-controlling factor for phytoplankton in lago Prona, Brasilia. Ph.D. Thesis, Part IV, Institute of limnology, Lund University, Sweden 49 p.

[17]- J.I.O.L.(Journal Ivoirien d'Océanologie et de limnologie) 1991

Spécial - plantes aquatiques envahissantes. Volume I n°2 C.R.O. (Centre de Recherches océanographiques).

[18] - BENETON J.P. (1984)

Rapport de recherche LPC (Laboratoire central Ponts et Chaussées) N°130 69p.

[[19]- ALLE A.O (1996).

Etude de l'écosystème de Yamoussoukro et ses environs. Mémoire de D.E.A

[20]- THORNTON J.A.&NDUKU, W.K.1982.

Water chemistry and nutrient budgets. In: Thornton, J.A., lake Mellwaine, the eutrophication and recovery of tropical African Man-Made Lake. Monographiae biologica, volume 49, Junk Publishes, the Netherlands p.43-49.

[21]- ZARET & Coll.(1981)

Nutrient addition experiment in lago Jacaretinga, central amazon basin, Brazil. Verh.internat.Verin. limnol.21:721-24.

[22]- MAMA D. (1996)

Etude dynamique des processus conduisant à l'eutrophisation du système lacustre de Yamoussoukro.

Mémoire de D.E.A.

[23]- MICHELL & MARSHALL, B.E.(1974).

Hydrobiological observations on three Rhodesian reservoirs. freshwater biol.4:661-72.

[24]- WALMSLEY & TOERIEN D.F. (1977).

The summer conditions of three eastern transval reservoirs and some considerations regarding the assessment of trophic status. Jouk limnol. Soc. S. Afr. 3 :37-41.

[25] - NORME AFNOR (normes françaises (1994.))

Méthodes d'analyse des eaux. Environnement.

[26]- ROBARTS R.D.(1982).

Primary production of lake Mellwaine. In : Thrnton, J.A. ,Lake Mellwaine, the eutrophication and recovery of a Tropical African Man-Made Lake. Monographiae Biologicae, Volume 49, Junk Publishers, The Hague, the Netherlands p.110-17.

[27]- WALMSLEY & DRITTI (1980)

Guidelines for the control of eutrophication in South Africa. Technical Report, Water Research Commission and National institute for water Research, Pretoria, Republic of South Africa. 27p.

[28]- WOOD G.1975.

An assessment of eutrophication in Australian inland waters. Technical Paper N°.15, Australian Water Research Council, Canberra, Australia.

[29]- TOERIEN & Col. (1975)

*A Preliminary trophic status classification of some South African impoundments.* Water SA 1 :15-23.



- [30]- THORNTON J.A. (1985)  
Nutrients in Africa lake ecosystems : Do we know all ? Jour. Limnol. Soc. S. Afr. 12 :6-21.
- [31]- WETZEL, R.G.(1975)  
Limnology. W.B. Saunders Co, Philadelphia, Pennsylvania, USA. 743p.
- [32]- VOLLENWEIDER.R.A. (1988).  
Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et eaux courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote comme facteurs d'eutrophisation. O.C.D.E. Paris. Rapport technique DAS/CSI 68-27.250p.
- [33]- WEBER W. J. (1972).  
Physicochemical processes of waterquality control. J. Wiley - Interscience.
- [34]- WEBER W. J. (1984).  
Evolution of technology, JEED (A.S.C.E.), 110,899-917.
- [35]- CONDOLIOS E. (1975)  
« Les décanteurs statiques pour le déssablage des eaux chargées », In La houille blanche, n°516, p.331-341.
- [36]- PLAKSINE I. N. , KLASSEN V. I. , AKOPOV M. G. (1958)  
« L'action des réactifs sur le traitement des fines de charbon dans les hydrocyclones »,in 3<sup>ème</sup>.  
Conférence internationale sur la préparation du charbon, Inichar, Liège, Conf. N° D6.
- [37]- CRAMEL. L . W. (1977)  
Activated sludge en hancement : a viable alternative to tertiary carbon adsorption, 2d EPA Forum on Management of petroleum refinery waste water, Tulsa (USA) 27.
- [38]- HUNTER J. V. and HENKELEKIAN H. (1965).  
« The composition of Domestic Sewage Fraction », J. Water Polution Control Federation, 37 n°8,1142
- [39]- SUIDAN M. T. , STEKERKA G. L. , KKAO S. W., PFEEFER J. T. (1983),  
Anaerobic filters for the treatment of coal gasification waste water. Biotechn.Bioeng. 25, 1581-1596.

[40]- **KOTT Y, INCERMANN R. (1966)**

The biochemical dynamics of waste stabilisation ponds. Air & w. Poll. Int.J., 10, 603.

[41 - **PESSON]- P. (1980)**

La pollution des eaux continentales : incidence sur les biocénoses aquatiques. Ed. 8112-3. Nouvelle Orléans.

[42] - **LHOTE A. (1996)**

Rôle du phosphore dans la croissance des jacinthes d'eau du système lacustre de Yamoussoukro.

Mémoire de DEA

[43]- **R. DESJARDIN (1990)**

Traitement des eaux. Ed. de l'école polytechnique de Montréal. 2-553-00211-5.

1\* SOURCE PREFECTURE DE YAMO USSOUKRO

2\* PHOTO PRISE EN JUIN 1997 PAR MAMA DAOUDA (DOCUMENT PERSONNEL)



Annexe 1: Evolution de la température

|        |     | Fév  | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août | Sept | Oct  | Nov  | Déc  | Jan  |
|--------|-----|------|------|-------|------|------|---------|------|------|------|------|------|------|
|        | ech |      |      |       |      |      |         |      |      |      |      |      |      |
|        | 0   |      |      |       |      |      |         |      |      |      |      | 27   |      |
| Lac 1  | 1   | 27,0 | 29   | 30,3  | 29,1 | 28,4 | 27,1    | 27,2 | 27   | 27,4 | 28,2 | 27,1 | 26,4 |
| Lac 2  | 2   | 26,5 | 29   | 30,7  | 29,4 | 28,9 | 27,3    | 27,4 | 27,8 | 27,4 | 28,5 | 27,5 | 26,5 |
|        | 3   | 26,5 | 29   | 30,2  | 29,4 | 28,7 | 27,5    | 28,1 | 27,6 | 27,3 | 28,5 | 27,4 | 26,8 |
| Lac 3  | 4   | 26,5 | 29   | 30,4  | 29   | 28,6 | 27,2    | 27,3 | 27,5 | 27,3 | 28,6 | 27,1 | 26,6 |
|        | 5   | 26,5 | 29,5 | 30,5  | 29,3 | 28,9 | 28,2    | 27,6 | 27,8 | 27,9 | 28,7 | 27,3 | 27,0 |
| Lac 4  | 6   | 28,5 | 29,5 | 30,7  | 29,2 | 28,8 | 27,4    | 27,4 | 27,4 | 27,6 | 28,9 | 27,4 | 27,1 |
|        | 7   | 28,0 | 30   | 30,3  | 29,4 | 28,9 | 28,2    | 27,4 | 28   | 27,9 | 28,9 | 27,5 | 27,0 |
| Lac 5  | 8   | 27,0 | 26,2 | 27,5  | 27,9 | 27,7 | 27,6    | 27,4 | 28,3 | 28,4 | 29,2 | 27,8 | 27,1 |
|        | 9   |      |      |       |      |      | 27,8    | 27   | 27,5 | 27,7 | 28,9 | 27,7 | 27,4 |
|        | 10  |      |      |       |      | 28,3 | 28,3    | 25,8 | 26,2 | 27,8 | 29   | 27,8 | 27,5 |
|        | 11  | 27,5 | 27,1 | 27,8  | 28,2 | 27,8 | 27,7    | 27   | 28,3 | 27,9 | 28,6 | 28   | 27,2 |
|        | 12  |      |      | 28,8  | 28,3 | 28,4 | 28,3    | 27,2 | 28,3 | 28,3 | 28,8 | 28,6 | 27,7 |
|        | 13  |      |      | 29,2  | 28,3 | 28   | 28,3    | 27,5 | 29,1 | 28,4 | 30   | 28,6 | 27,9 |
| Lac 6  | 14  |      |      |       |      |      |         |      |      |      |      |      |      |
|        | 15  | 28,0 | 28   | 28,1  | 28,3 | 28,4 | 27,5    | 26,2 | 28,2 | 26,7 | 26,9 | 25,7 | 24,8 |
| Lac 7  | 16  | 28,0 | 26,8 | 26,7  | 27   | 26,6 | 27,8    | 27   | 28   | 26,3 | 26,2 | 25,4 | 24,8 |
| Lac 8  | 17  |      | 29,4 | 29,6  | 28,9 | 28,4 | 28,1    | 26,8 | 27,8 | 27,7 | 28,4 | 27,4 | 27,2 |
|        | 18  |      | 29,6 | 29,6  | 28,6 | 27,7 | 27,7    | 26,3 | 28,6 | 27,9 | 28,9 | 28,1 | 27,5 |
| Lac 9  | 19  |      | 28   | 28    | 27,8 | 27,9 | 26,8    | 25,8 | 27   | 27,8 | 28,2 | 28   | 27,4 |
| Lac 10 | 20  |      | 29   | 28,8  | 27,2 | 27   | 26,3    | 25,2 | 26,7 | 26,4 | 26,9 | 26,2 | 24,7 |
| MOY.   |     | 27,3 | 28,6 | 29,2  | 28,5 | 28,2 | 27,6    | 26,9 | 27,9 | 27,6 | 28,5 | 27,5 | 26,8 |

Annexe 2: Evolution du PH

| MOIS    |     | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Sept | Oct | Nov  | Déc | Janv |
|---------|-----|-----|------|-------|-----|------|---------|------|------|-----|------|-----|------|
| Lac     | ech |     |      |       |     |      |         |      |      |     |      |     |      |
| Lac 1   | 0   |     |      |       |     |      |         |      |      |     |      |     |      |
|         | 1   | 6,6 | 7,2  | 7,6   | 7,2 | 7,5  | 7,4     | 7,4  | 7,1  | 7,3 | 7,6  | 7,6 | 7,9  |
| Lac 2   | 2   | 6,7 | 8,2  | 8,3   | 7,9 | 7,8  | 8,9     | 9,3  | 8,9  | 8,8 | 8,5  | 8,2 | 8,2  |
|         | 3   | 6,9 | 7,7  | 8,4   | 7,7 | 8,2  | 8,5     | 8,5  | 8,0  | 7,7 | 8,1  | 8,2 | 8,2  |
| Lac 3   | 4   | 6,6 | 8,1  | 8,1   | 7,5 | 7,6  | 7,8     | 8,9  | 8,4  | 8,3 | 7,9  | 8,0 | 7,3  |
|         | 5   | 7,8 | 7,9  | 8,3   | 7,8 | 7,4  | 7,5     | 8,6  | 7,8  | 7,6 | 8,0  | 7,9 | 8,9  |
| Lac 4   | 6   | 9,5 | 9,3  | 9,1   | 7,9 | 8,3  | 8,3     | 9,0  | 8,2  | 7,7 | 8,1  | 8,1 | 8,0  |
|         | 7   | 9,8 | 9,0  | 9,1   | 8,3 | 7,9  | 8,2     | 7,9  | 7,8  | 7,6 | 7,6  | 7,9 | 9,0  |
| Lac 5   | 8   | 6,1 | 7,9  | 6,5   | 6,6 | 6,2  | 7,0     | 7,5  | 7,9  | 7,7 | 8,4  | 7,6 | 7,9  |
|         | 9   |     |      |       |     |      | 7,5     | 6,5  | 7,9  | 7,5 | 8,04 | 7,8 | 8,0  |
|         | 10  |     |      |       |     |      | 7,1     | 7,2  | 7,2  | 7,4 | 8,23 | 7,8 | 7,79 |
|         | 11  | 6,3 | 6,5  | 6,4   | 6,6 | 6,9  | 6,9     | 7,2  | 7,6  | 7,4 | 8,0  | 7,8 | 8,3  |
|         | 12  |     |      | 6,5   | 6,6 | 6,7  | 7,1     | 7,2  | 7,6  | 7,5 | 7,6  | 8,0 | 8,2  |
|         | 13  |     |      | 6,4   | 6,6 | 6,3  | 7,0     | 7,3  | 8,0  | 7,8 | 8,2  | 8,2 | 7,8  |
| Lac 6   | 14  |     |      |       |     |      |         |      | 7,9  | 7,6 | 7,5  | 7,6 | 7,7  |
|         | 15  | 6,5 | 6,7  | 6,7   | 6,7 | 6,8  | 6,9     | 6,6  | 6,7  | 6,6 | 6,6  | 6,6 | 6,6  |
| Lac 7   | 16  |     | 6,9  | 7,0   | 7,2 | 6,7  | 7,2     | 7,0  | 7,0  | 7,2 | 7,4  | 7,3 | 7,3  |
| Lac 8   | 17  |     | 7,2  | 7,5   | 7,3 | 7,2  | 7,3     | 7,2  | 7,2  | 7,3 | 7,5  | 7,8 | 7,7  |
|         | 18  |     | 7,2  | 7,2   | 7,0 | 7,0  | 7,3     | 7,2  | 7,6  | 7,5 | 8,0  | 7,9 | 7,5  |
| Lac 9   | 19  |     | 6,9  | 6,7   | 6,7 | 6,8  | 6,8     | 6,7  | 6,9  | 7,1 | 7,3  | 7,3 | 7,6  |
| Lac 10  | 20  |     | 6,7  | 6,6   | 6,7 | 6,3  | 6,6     | 6,7  | 6,7  | 6,7 | 6,8  | 6,9 | 6,8  |
| Moyenne |     | 7,3 | 7,6  | 7,4   | 7,2 | 7,2  | 7,4     | 7,6  | 7,7  | 7,5 | 7,8  | 7,7 | 7,9  |





















Annexe 9: Evolution du NTK

|     |    | NTK EAUX FILTRES |     |     |     |     |     |       |      |      |      |     |     |      |      |  |
|-----|----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|------|-----|-----|------|------|--|
|     |    | Juil             |     |     |     |     |     | Août  |      |      | Sept | Oct | Nov | Déc  | MG   |  |
| lac | 0  |                  |     |     |     |     |     |       |      |      |      |     |     |      |      |  |
| 1   | 1  |                  |     |     |     |     |     |       |      |      |      |     |     |      |      |  |
|     |    | 4,48             | 2   | 3,2 | 2,8 | 1,1 | 1,1 | 1,68  | 1,68 | 3,92 | 2,8  | 1,4 |     | 1,5  | 2,11 |  |
| 2   | 2  | 4,48             | 2,2 | 3,4 | 2,2 | 2,2 | 1,7 | 2,053 | 1,68 | 2,8  | 2,24 | 1,6 |     | 1,87 | 2,22 |  |
|     | 3  | 2,8              | 3,6 | 3,2 | 3,4 | 1,1 | 1,7 | 2,067 | 1,12 | 2,24 | 1,68 | 1,8 |     | 1,3  | 2,01 |  |
| 3   | 4  | 2,24             | 3,1 | 2,7 | 4,5 | 2,2 | 2,2 | 2,987 | 1,68 | 2,24 | 1,96 | 1,4 |     | 2,12 | 2,22 |  |
|     | 5  | 3,36             | 5,3 | 4,3 | 2,8 | 1,1 | 1,7 | 1,867 | 1,68 | 1,68 | 1,68 | 0,2 |     | 1,8  | 1,98 |  |
| 4   | 6  | 3,64             | 1,4 | 2,5 | 2,8 | 2,8 | 1,7 | 2,427 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 1,1 |     | 1,91 | 2,05 |  |
|     | 7  | 4,48             | 5,3 | 4,9 | 2,8 | 2,8 | 2,2 | 2,613 | 28   | 2,8  | 2,8  | 1,6 |     | 2,12 | 2,8  |  |
| 5   | 8  | 1,12             | 3,9 | 2,5 | 3,4 | 2,2 | 2,2 | 2,613 | 2,8  | 2,8  | 2,8  | 1,1 |     | 1,96 | 2,21 |  |
|     | 9  |                  | 1,4 | 1,4 | 2,2 | 2,8 |     | 2,52  | 2,24 | 3,92 | 3,08 | 0,2 |     | 2,35 | 1,92 |  |
|     | 10 |                  | 2,5 | 2,5 | 3,9 | 4,5 | 2,2 | 3,547 | 3,36 |      | 3,36 | 0,9 |     | 2,39 | 2,54 |  |
|     | 11 | 4,48             | 3,6 | 4,1 | 3,9 | 2,2 | 3,4 | 3,173 | 2,8  | 3,92 | 3,36 | 2,3 |     | 2,19 | 3,01 |  |
|     | 12 | 2,8              | 3,9 | 3,4 | 2,2 | 1,7 | 2,8 | 2,24  | 2,8  | 3,92 | 3,36 | 2,1 |     | 1,8  | 2,56 |  |
|     | 13 | 3,36             | 2,2 | 2,8 | 2,8 | 1,7 | 2,2 | 2,24  | 2,24 | 4,48 | 3,36 | 1,1 |     | 1,98 | 2,3  |  |
| 6   | 14 |                  |     |     |     |     |     |       |      |      |      | 0,9 |     | 2,6  | 1,76 |  |
|     | 15 | 3,64             | 1,1 | 2,4 | 1,7 | 1,7 | 2,8 | 2,053 | 3,36 | 3,92 | 3,64 | 0,7 |     | 2,42 | 2,24 |  |
| 7   | 16 | 3,64             | 3,9 | 3,8 | 7,3 | 3,4 | 2,8 | 4,48  | 3,36 | 2,8  | 3,08 | 4,6 |     | 4,35 | 4,05 |  |
| 8   | 17 | 1,12             | 0,6 | 0,8 | 3,9 | 3,4 | 2,8 | 3,36  | 3,92 | 4,48 | 4,2  | 1,6 |     | 1,03 | 2,2  |  |
|     | 18 | 0,56             | 1,4 | 1   | 2,2 | 1,7 | 0,6 | 1,493 | 1,68 | 2,8  | 2,24 | 1,1 |     | 2,01 | 1,57 |  |
| 9   | 19 | 3,08             | 1,7 | 2,4 | 2,8 | 2,2 | 2,8 | 2,613 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 1,4 |     | 1,05 | 1,93 |  |
| 10  | 20 | 0,56             | 0,8 | 0,7 | 2,2 | 2,2 | 2,8 | 2,427 | 2,8  | 4,48 | 3,64 | 0,9 |     | 2,03 | 1,94 |  |
| M   |    |                  |     | 2,7 |     |     |     | 2,55  |      |      | 2,83 | 1,4 |     |      | 2,38 |  |

## Annexe 10: Evolution du NTK

|     |     | NTK EAUX BRUTES |     |     |      |     |     |       |      |      |      |     |  |      |      |
|-----|-----|-----------------|-----|-----|------|-----|-----|-------|------|------|------|-----|--|------|------|
|     |     | Juil            |     |     | Août |     |     | Sept  | Oct  | Nov  | Déc  | M.G |  |      |      |
| lac | éch |                 |     |     |      |     |     |       |      |      |      |     |  |      |      |
| 1   | 1   | 5,6             | 2,8 | 4,2 | 5,6  | 1,7 | 2,8 | 3,36  | 3,92 | 5,04 | 4,48 | 2,3 |  | 2,42 |      |
|     |     |                 |     |     |      |     |     |       |      |      |      |     |  | 2,83 | 3,58 |
| 2   | 2   | 8,68            | 2,8 | 5,7 | 5,6  | 1,7 | 2,8 | 3,36  | 3,92 | 3,36 | 3,64 | 2,1 |  | 3,24 | 3,7  |
|     | 3   | 4,48            | 3,9 | 4,2 | 5    | 4,5 | 4,5 | 4,667 | 3,92 | 4,48 | 4,2  | 2,7 |  | 3,76 | 3,95 |
| 3   | 4   | 5,6             | 6,4 | 6   | 5    | 3,4 | 6,2 | 4,853 | 5,04 | 6,72 | 5,88 | 3   |  | 4,01 | 4,93 |
|     | 5   | 3,64            | 5,6 | 4,6 | 5,6  | 6,2 | 4,5 | 5,413 | 5,04 | 5,6  | 5,32 | 2,5 |  | 3,94 | 4,47 |
| 4   | 6   | 3,92            | 4,2 | 4,1 | 4,5  | 3,9 | 5   | 4,48  | 5,04 | 5,04 | 5,04 | 2,3 |  | 4,65 | 3,97 |
|     | 7   | 4,76            | 5,9 | 5,3 | 6,7  | 3,9 | 5   | 5,227 | 4,48 | 5,6  | 5,04 | 3,2 |  | 4,35 | 4,69 |
| 5   | 8   | 4,2             | 5   | 4,6 | 5,6  | 2,2 | 5,6 | 4,48  | 6,72 | 6,72 | 6,72 | 3,2 |  | 4,35 | 4,69 |
|     | 9   | 0,84            | 2,2 | 1,5 | 3,9  | 2,8 |     | 3,36  | 3,92 | 3,92 | 3,92 | 3   |  | 4,97 | 2,95 |
|     | 10  |                 | 2,8 | 2,8 | 4,5  | 4,5 | 3,4 | 4,107 | 3,36 | 4,48 | 3,92 | 3,2 |  | 4,74 | 3,5  |
|     | 11  | 4,48            | 3,6 | 4,1 | 6,7  | 2,8 | 6,2 | 5,227 | 6,72 | 6,72 | 6,72 | 3   |  | 5,4  | 4,74 |
|     | 12  | 3,64            | 4,5 | 4,1 | 6,2  | 2,8 | 3,9 | 42,93 | 5,04 | 6,16 | 5,6  | 2,7 |  | 2,05 | 4,17 |
|     | 13  | 3,64            | 2,5 | 3,1 | 5    | 3,4 | 4,5 | 4,293 | 5,6  | 5,6  | 5,6  | 25, |  | 2,19 | 3,87 |
| 6   | 14  |                 |     |     |      |     |     |       |      |      |      |     |  |      |      |
|     | 15  | 3,92            | 2,2 | 3,1 | 2,2  | 4,5 | 3,4 | 3,36  | 3,92 | 5,04 | 4,48 | 4,8 |  | 2,94 |      |
|     |     |                 |     |     |      |     |     |       |      |      |      |     |  | 4,1  | 3,93 |
| 7   | 16  | 5,32            | 4,2 | 4,8 | 7,8  | 4,5 | 3,4 | 5,227 | 3,36 | 8,96 | 6,16 | 3,7 |  | 4,83 | 4,95 |
| 8   | 17  | 4,48            | 2,2 | 3,4 | 5    | 5,6 | 2,8 | 4,48  | 4,48 | 6,72 | 5,6  | 3,7 |  | 1,96 | 4,28 |
|     | 18  | 1,68            | 1,7 | 1,7 | 5,6  | 2,8 | 1,1 | 3,173 | 2,24 | 5,04 | 3,64 | 1,8 |  | 2,01 | 2,58 |
| 9   | 19  | 3,64            | 3,1 | 3,4 | 4,5  | 3,9 | 3,4 | 3,92  | 3,36 | 3,92 | 3,64 | 2,1 |  | 1,41 | 3,25 |
| 10  | 20  | 5,6             | 2,5 | 4,1 | 5    | 3,4 | 3,9 | 4,107 | 3,36 | 4,48 | 3,92 | 2,5 |  | 2,19 | 3,65 |
| M   |     | 4,34            | 3,6 | 3,9 | 5,3  | 3,6 | 4   | 4,284 | 4,39 | 5,45 | 4,92 | 2,8 |  | 3,47 | 3,99 |



Annexe 11: Evolution de l'indice permanganate

| INDICE PERMANGANATE (mg/L) |     |         |      |      |      |     |      |             |       |       |      |      |      |
|----------------------------|-----|---------|------|------|------|-----|------|-------------|-------|-------|------|------|------|
| EAU BRUTE                  |     |         |      |      |      |     |      | EAU FILTRÉE |       |       |      |      |      |
| Lac                        | ech | Juillet | Août | Sept | Oct  | Nov | Moy  | Jui<br>1    | Août  | Sept  | Oct  | Nov  | Moy  |
| 1                          | 1   | 4,52    | 4,6  | 4,6  | 4,64 | 4,1 | 4,49 | 3,5         | 3,66  | 3,1   | 3,5  | 3,17 | 3,39 |
| Lac 2                      | 2   | 4,72    | 4,8  | 5,9  | 5,7  | 4,3 | 5,07 | 3,6         | 3,18  | 3,22  | 3,35 | 3,07 | 3,28 |
|                            | 3   | 4,58    | 5,5  | 6,2  | 5,53 | 4,6 | 5,29 | 3           | 3,07  | 2,97  | 3,25 | 3,13 | 3,09 |
| Lac 3                      | 4   | 6,53    | 6,1  | 6,6  | 6,45 | 5,7 | 6,27 | 3,8         | 3,49  | 3,44  | 3,55 | 3,39 | 3,52 |
|                            | 5   | 6,77    | 6,6  | 6,7  | 6    | 5,9 | 6,38 | 4           | 3,33  | 3,29  | 3,33 | 3,2  | 3,43 |
| Lac 4                      | 6   | 6,43    | 7    | 7,4  | 6,55 | 6,6 | 6,80 | 3,9         | 3,4   | 3,08  | 3,35 | 3,2  | 3,38 |
|                            | 7   | 9,2     | 7,3  | 7    | 6,52 | 6,6 | 7,31 | 4,9         | 3,55  | 3,26  | 3,35 | 3,17 | 3,64 |
| Lac 5                      | 8   | 5,81    | 6,4  | 7,3  | 6,46 | 5,8 | 6,35 | 4,9         | 4,59  | 3,74  | 3,85 | 3,64 | 4,14 |
|                            | 9   | 4,66    | 5,4  | 8,2  | 7,4  | 6,6 | 6,45 | 2,9         | 3,95  | 4,46  | 3,8  | 3,62 | 3,74 |
|                            | 10  | 7,38    | 7,1  | 7,4  | 8,68 | 7,3 | 7,56 | 6,7         | 5,68  | 5,36  | 4,1  | 3,72 | 5,12 |
|                            | 11  | 9,88    | 6,3  | 6,5  | 5,85 | 6,2 | 6,94 | 5,7         | 3,29  | 3,9   | 3,65 | 3,52 | 4,01 |
|                            | 12  | 8,84    | 5,9  | 7,1  | 6,8  | 6,1 | 6,93 | 6,1         | 4,59  | 3,88  | 3,88 | 3,56 | 4,39 |
|                            | 13  | 6,64    | 6,5  | 7    | 7,13 | 6,4 | 6,72 | 5,6         | 4,48  | 3,81  | 3,64 | 3,41 | 4,19 |
| Lac 6                      | 14  |         |      | 6,9  | 6,21 | 6,5 | 6,55 |             |       | 4     | 3,84 | 3,7  | 3,85 |
|                            | 15  | 6,51    | 5,4  | 5,7  | 6    | 6,4 | 6,00 | 5,6         | 4,42  | 4,5   | 4,8  | 4,72 | 4,81 |
| Lac 7                      | 16  | 1,04    | 6,5  | 8,8  | 7,17 | 5,9 | 7,75 | 8,1         | 5,07  | 5,3   | 6,4  | 4,15 | 5,81 |
| Lac 8                      | 17  | 5,05    | 4,6  | 5,5  | 6,11 | 5,7 | 5,39 | 3,6         | 3,59  | 3,27  | 3,87 | 3,17 | 3,50 |
|                            | 18  | 4,08    | 3,9  | 5,2  | 5,14 | 5   | 4,67 | 2,6         | 2,63  | 3,19  | 3,55 | 3,07 | 3,00 |
| Lac 9                      | 19  | 2,82    | 3,3  | 4,9  | 5    | 4,1 | 4,02 | 2,4         | 2,27  | 2,82  | 3,42 | 2,64 | 2,70 |
| Lac 10                     | 20  | 3,6     | 3,2  | 4,2  | 4,67 | 4,9 | 4,11 | 3           | 2,48  | 2,75  | 3,17 | 2,59 | 2,80 |
| MOY.                       |     | 6,23    | 5,6  | 6,4  | 6,2  | 5,7 | 6,04 | 4,4         | 3,722 | 3,667 | 3,78 | 3,78 | 3,87 |

## MOTS CLES:

- EUTROPHISATION
- VEGETAUX AQUATIQUES ENVAHISSANTS (V.A.E)
- LACS DE YAMOUSSOUKRO
- ELEMENTS FERTILISANTS
- POLLUTION ORGANIQUE

## RESUME

La prolifération des plantes aquatiques qui est une réponse de l'état trophique des eaux, se caractérise pour les lacs de Yamoussoukro par l'apparition des algues et des végétaux aquatiques envahissants (macrophytes). L'eutrophisation de ces lacs n'est qu'une forme de pollution des eaux, due essentiellement à un apport accru en nutriments azotés et phosphorés.

Le phosphore apparaît comme un facteur limitant de l'eutrophisation de ces lacs. Les facteurs d'environnement comme la pluviométrie jouent un rôle important dans l'ampleur du phénomène. La principale source de fertilisation reste les eaux usées domestiques dont la teneur en phosphore provient généralement des lessives ; cependant d'autres sources de moindre importance comme les feux de brousse et les excréments des caïmans ont été relevées. Les paramètres de pollution organique DBO et DCO ne sont pas sans rapport avec l'eutrophisation à macrophytes enracinés.

La lutte contre la prolifération des plantes aquatiques et partant de l'eutrophisation des lacs, impose une maîtrise et un contrôle des sources polluantes. En effet, l'eutrophisation est en aval des problèmes d'assainissement et l'inefficacité de la gestion des eaux usées domestiques des quartiers versants ; toute solution durable doit s'attaquer à la cause du phénomène. Dans ce cadre, à l'issue de cette étude, les traitements au charbon de bois et par lagunage avec développement des algues semblent adaptés pour lutter contre l'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro.

L'efficacité des différents traitements proposés dépendra de la sensibilisation de la population dont le comportement inhibe souvent toute action d'amélioration du cadre de vie.



