

**ETUDE STATISTIQUES DU ROLE DU PHOSPHORE  
ET DE L'AZOTE TOTAL NKT DANS LE MECANISME  
D'EUTROPHISATION DES LACS DE LA VILLE  
DE YAMOOUSSOUKRO EN COTE D'IVOIRE**

*Gossan ADO ; Henri DESAYES et Daouda MAMA  
Laboratoire des Procédés industriels de Synthèse et de l'Environnement (LAPISEN)  
Département Génie Chimique et Agro Alimentaire de l'INP-HB  
BP: 1093 Yamoussoukro; Côte d'Ivoire*

(Reçu le 15/03/2000 - Révisé le 24/07/2000)

---

**Summary :** This work studies the nutritive elements, like the phosphorus and the nitrogen which play a predominant role in the mechanism of eutrophication of lakes of the Yamoussoukro city in Côte d'Ivoire.

The results of those studies show that the lakes of the town of Yamoussoukro, are tolerant to the nutritive charges as those in temperate zone, because these lakes show that, a minimum density of 0.075 mg/l of phosphorus, quite superior to those shown by WOLLENWEIDER (1) 0,02 mg/l for the waters of temperate zone, for the nitrogen a limiting factor of the NTK/P volving between 10,3 and 50,91, whereas the later becomes a limiting factor if  $NTK/P < (7,2)$

The annual average content in phosphorus is 70% in suspended matter (S.M.) and 30% in water.

For the nitrogen, at these values are divided up in the following ways: 60% in water and 40% for the suspended matters.

The study has revealed that the different values of this two nutrients, phosphorus and the nitrogen, manifest effectively their complicity in the process of algal eutrophication and in the macrophytes of the lakes of Yamoussoukro town.

**Key words :** Lakes, Phosphorus, Nitrogen, NTK, Algal Eutrophication, macrophytes

---

## **I - INTRODUCTION**

Le présent travail repose essentiellement sur l'étude du mécanisme d'eutrophisation des 10 lacs de la ville de Yamoussoukro.

En effet, la prolifération des plantes aquatiques qui est une indication de la nature trophique des eaux se caractérise pour les lacs de la

ville de Yamoussoukro par l'apparition d'algues et de macrophytes. L'eutrophisation de ces lacs est une conséquence de la pollution des eaux dues essentiellement à un apport accru en nutriments azotés et phosphorés.

C'est pourquoi, les paramètres étudiés concernent les éléments comme l'azote et le phosphore dont le rôle dans le domaine de l'eutrophisation est d'une grande importance.

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 les eaux du lac VII et se déverse dans le lac VI.

## II - PARTIE THEORIQUE

L'étude a porté sur une dizaine de lacs de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest).

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 dégradation des propriétés écologiques de ce plan d'eau.

L'étude du phénomène vue sous l'aspect des réponses trophiques, cadre avec les problèmes environnementaux actuels qui font intervenir ici des facteurs physiques et chimiques.

Les paramètres étudiés concernent les éléments nutritifs comme l'azote et le phosphore dont le rôle dans le domaine de l'eutrophisation est d'une grande importance. L'examen systématique du rôle du phosphore et de l'azote et ensuite leur implication dans le phénomène d'eutrophisation a été effectué.

L'élément phosphore est apporté aux plantes sous forme de phosphates par l'intermédiaire des minéraux naturels peu solubles comme  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  les fluorurés-apatite :  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaF}_2$  ou les chlorurés

$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ . Ces minéraux sont transformés par action de l'acide sulfurique en espèces actives, solubles et assimilables<sup>[2]</sup>.

- acide phosphorique  $\text{H}_3\text{PO}_4$

- acide superphosphorique :  $\text{H}_3\text{PO}_4$  enrichi en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , anhydride phosphorique

- ions dihydrogénophosphoriques  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , engagés dans les phosphates et superphosphates.

Naturellement, le phosphore est présent dans l'eau à des concentrations de quelques mg/l à la différence de l'azote, du potassium et du carbone. Il est très abondant dans la nature et fortement retenu par les sols. Les lessives chargées en orthophosphates constituent un nutriment en milieu aquatique. Leur composition fait intervenir plusieurs groupes de substances tels que les adjuvants qui les rendent 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 en 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>[2]</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. 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 concentrations en phosphore augmentent plus vite que les deuxièmes<sup>[2]</sup>; Wollenweider<sup>[1]</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).

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>[3]</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 omniprésente. 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'ammonium 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 de seaux rapportent 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 le degré d'humidité. Une pollution organique des eaux favorisera une humification 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 [4].

Le phosphore et l'azote sont les nutriments majeurs dont le rôle dans le phénomène d'eutrophisation est essentiel. Selon le tableau suivant :

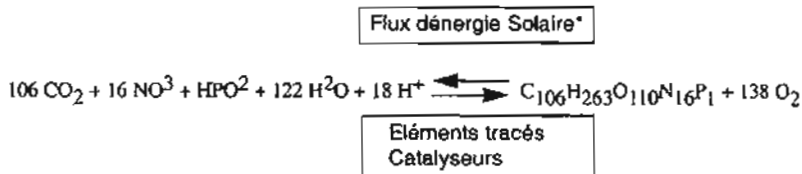
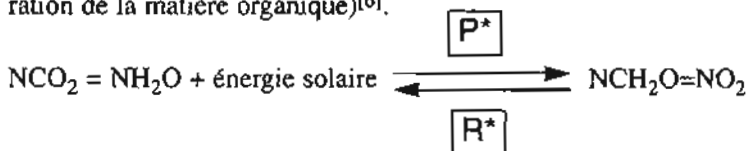
Eléments	% dans le tissu végétal = demande	% dans l'eau naturelle = apport	Demande/Apport
Phosphore	0,98	0,000001	80 000
Azote	0,7	0,000023	30 000

**Tableau 1 :** *Ordre d'insatisfaction des principaux éléments dans les tissus des végétaux aquatiques*

### Notion de facteur limitant

La composition des eaux naturelles est déterminée par deux processus importants. Le processus d'altération et l'interaction entre les organismes et l'eau.

L'équation ci-dessous représente de façon simplifiée les deux processus, la photosynthèse (P\*: vitesse de production de la biomasse), et le processus de respiration (R\*: vitesse de minéralisation par respiration de la matière organique)<sup>[6]</sup>.



Le flux d'énergie nécessaire au système est accompagné sur le cycle des nutriments et celui des éléments tracés. 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 ;  $\Delta C$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta P \Delta \approx 106 : 16 : 1$  où  $\Delta C : \Delta N : \Delta P$  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. Nous nous sommes intéressés à l'étude du facteur limitant par l'intermédiaire de la recherche du nutriment le plus important entre l'azote et le phosphore dont le contrôle peut freiner la production végétale. En effet, ce sont ces éléments essentiels qui interviennent dans la photosynthèse.

Lorsqu'on applique le concept de facteur limitant à une étude donnée, il est à supposer qu'un seul élément est 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>[7,8]</sup> indiquent que l'azote est le facteur limitant en zone tropicale. Dans cette étude le phosphore paraît être le 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.

### III - METHODES EXPERIMENTALE

Les échantillons sont prélevés à l'aide d'une perche à une profondeur de 0,5m environ et dans des boîtes en polystyrène de capacité 1 litre puis conservés et transportés dans une glacière. Les analyses sont effectuées dans les 24 heures qui suivent selon les méthodes suivantes :

#### \* Phosphore total (Ptot)

Référence : NF T90-023 du 23 septembre 1982

La méthode a pour objet le dosage spectrométrique du phosphore présent dans les eaux sous diverses formes.

On procède à une minéralisation à chaud d'une prise d'essais de l'échantillon en présence de l'acide sulfurique et de persulfate de sodium solution à 500g/l.

Le produit de minéralisation sert à préparer une solution avec de l'eau distillée en ajustant le pH entre 1,5 et 2,5. On effectue un dosage spectrométrique par rapport au terme zéro de la gamme d'étalonnage.

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

Référence : la méthode d'analyse reprend la norme française N.F.T.90-110 de décembre 1981.

Elle 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 le dosage direct par titrimétrie.

## IV - RESULTATS

### 4.1 Résultats liés au phosphore

Cette analyse donne la qualité des eaux des différents lacs en comparaison avec les valeurs observées en zones tempérées et 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 l'environnement sur les berges.

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.

#### 4.1.1 Les phosphates

L'analyse des phosphates dans les eaux a été effectuée pendant une année. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 2:

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

**Tableau 2 :** Moyennes annuelles des concentrations pondérales de phosphate  $PO_4^{3-}$  par lac

Les résultats du tableau 2 ci-dessus donnent pur toute l'année, des moyennes quasiment nulles, pour les lacs I, II, III et IV en bordure de la Présidence sans macrophytes et les lacs VII 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 variant de 0, 2 à 0,19 mg/l sont envahis



par des macrophytes. Il semble donc que l'existence des phosphates dans l'eau rend le milieu favorable à la prolifération de ces macrophytes.

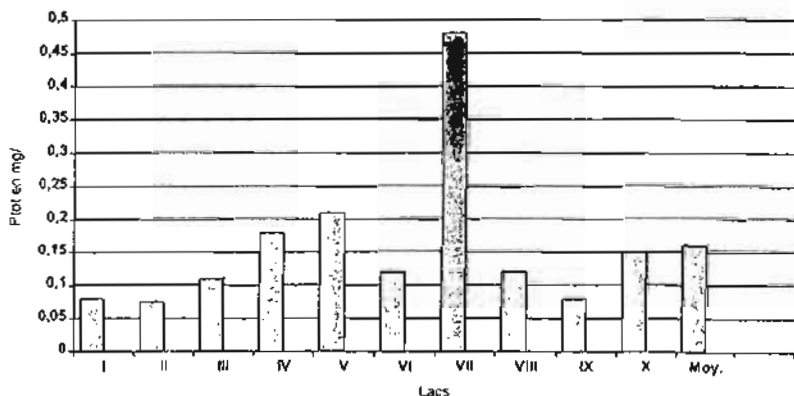
La teneur moyenne annuelle de phosphate est de 0,030 mg/l pour l'ensemble des lacs étudiés.

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

L'analyse du phosphore total dans l'eau brute a été effectuée pendant une année. Les résultats sont consignés dans le tableau 3 et fig.1 suivants :

Lacs	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Moy.
Eau brute	0,080	0,075	0,110	0,180	0,210	0,120	0,480	0,120	0,080	0,150	0,160

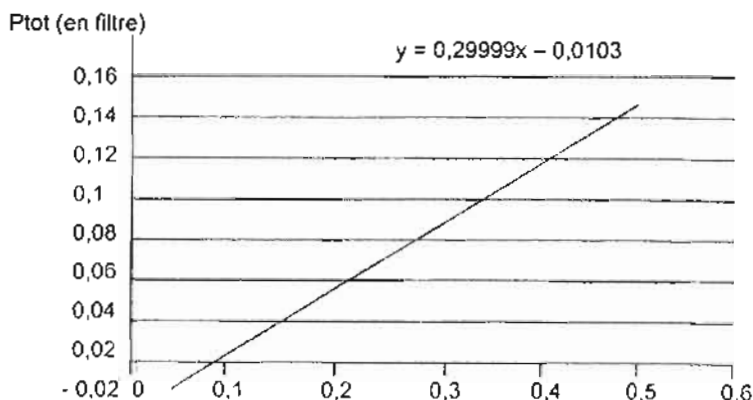
**Tableau 3 :** Moyennes annuelles en mg/l de phosphore total pour l'eau brute



**Figure 1:** Moyennes annuelles de phosphore total de l'eau brute par lac

Le taux de phosphore total augmente quant on se dirige vers le lac V qui recueille toutes les eaux des différents lacs avec une moyenne annuelle globale de 0,21 mg/l de P<sub>tot</sub> pour l'eau brute. Le lac VII affiche un apport de Pot = 0,480 mg/l ; ceci est dû à son débit et à son emplacement. La concentration moyenne des eaux du lac VI est égale à 0,120 mg/l de phosphore. Cette valeur, un peu plus faible que la valeur moyenne générale (0,160 mg/l), s'explique par l'effet épurant exercé par les macrophytes (jacinthes) situées en amont dans le lac V. Le taux de phosphore des eaux du lac I et du lac IX sont équivalents et ont pour valeur 0,080 mg/l. Il faut noter l'absence des plantes dans le lac I et la présence de ces plantes dans le lac X. Le taux annuel pondéral du phosphore total dans l'eau se situe aux environs de 16% selon le tableau 3 et la figure 1.

Si on considère les lacs pour lesquels les teneurs en phosphore total ne sont pas négligeables, la forme soluble dans l'eau est souvent majoritaire. La courbe de tendance linéaire issue de l'équation  $y = 0,29999x - 0,0103$  ; interprétée par la figure 2 ci-dessous met en relief annuellement un taux de phosphore total de 30% dans l'eau brute.



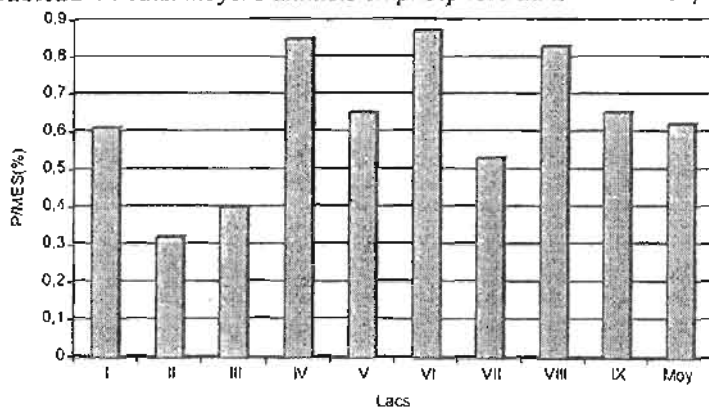
**Figure 2 :** Courbe de corrélation phosphore total eau brute

**4.1.3 - Teneur en phosphore total des Matières en Suspension (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 4 et Fig.3 ci-dessous.

Lacs	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Moy.
(%) P/MES	0,61	0,32	0,40	0,85	0,65	0,87	0,53	0,83	0,65	0,62

**Tableau 4 :** Taux moyens annuels en phosphore dans les M.E.S. par lac



**Figure 3 :** Teneur en phosphore total des matières en suspension par lac

Le taux de Ptot 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.

**4.2 Azote :**

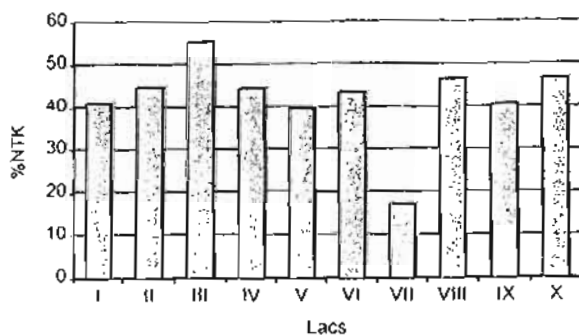
Azote total Kjeldhal (N T.K.)

L'analyse de ce nutriment effectuée pendant une année a donné les résultats suivants regroupés dans le tableau 5 ci-dessous.

Lacs	NTK (EB) (Mg/l)	$\Delta$ NTK (mg/l)	NTK/MES (%)	$\Delta$ NTK/NTK (%)
Lac I	3,58	1,47	12,88	41,06
Lac II	3,82	1,71	9,09	44,76
Lac III	4,70	2,6	10,8	55,30
Lac IV	4,33	1,93	6,11	44,57
Lac V	3,99	1,59	8,04	39,85
Lac VI	3,90	1,70	12,27	43,59
Lac VII	4,95	0,85	2,24	17,17
Lac VIII	3,43	1,53	8,12	44,60
Lac IX	3,25	1,32	16,07	40,60
Lac X	3,65	1,71	12,95	46,85
Moyennes	3,99	1,61	8,11	40,35

**Tableau 5 :** Résultats liés à l'azote Kjeldhal par lac de l'eau brute (E.B.)

Selon les résultats des analyses, les concentrations de l'azote total Kjeldhal est d'environ 40% dans l'eau brute dans les matières en suspension (M.E.S.) Fig.4 suivante.



**Figure 4 :** Proportion de l'azote dans les M.E.S. par lac

Par ailleurs, quels que soient les lacs, les différentes valeurs de N.T.K. dans l'eau brute (E.B.) sont relativement très proches les unes des autres et voisines de la valeur moyenne 3,00 mg/l, hormis pour le lac VII dont la valeur est d'environ 5 mg/l (Tableau 5) Figure 4.

Les rapports NTK/MES et DNTK/TK atteignent les valeurs moyennes de 8,11% et 40,35% (Tableau 5).

L'apport en azote est ici constant malgré la diversité des sources. Les valeurs annuelles dans les eaux brutes sont supérieures à 4 mg/l, pour les lacs III, IV et VII, proches du centre, les autres lacs ayant des valeurs inférieures à 4 mg/l. Tableau 5, Fig.5.

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

Les taux d'azote total observés, placent la plupart des lacs de la ville de Yamoussoukro dans un état d'eutrophisation avancée.

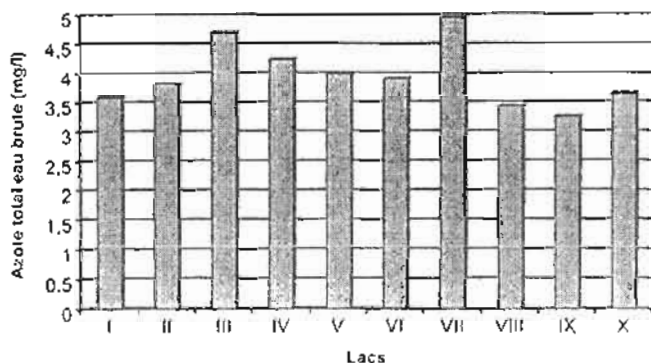


Figure 5 : Moyenne de l'azote total NTK dans l'eau brute par lac

### 4.3 Recherche de facteur limitant

Bien qu'aucune raison majeure ne permette de supposer l'existence dans les conditions originelles, d'une corrélation entre l'azote et le phosphore, les études consacrées aux lacs du programme de

l'O.C.D.E.<sup>[10]</sup> font apparaître une tendance générale de l'azote et du phosphore à se manifester par une concentration accrue, depuis le stade de l'obligotrophie jusqu'à celui l'eutrophie.

Paramètres		
Lacs	NTK/P <sub>tot</sub>	Rang dans le classement de l'état trophique décroissant
Lac I	44,75	10
Lac II	50,90	8
Lac III	42,73	7
Lac IV	24,05	4
Lac V	19,00	2
Lac VI	32,50	3
Lac VII	10,30	1
Lac VIII	28,58	6
Lac IX	40,62	9
Lac X	24,33	5

**Tableau 6 :** Rapport de l'azote total NTK et du phosphore total pour l'eau brute

Selon rapport O.C.D.E.<sup>(10)</sup>, ces règles sont 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 NTK/P<sub>tot</sub> prenne en compte l'azote et le phosphore sous des formes solubles biodisponibles. De nombreux auteurs<sup>[11,12,13]</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 algale. 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. Il apparaît utile d'analyser ce rapport en fonction des lacs.

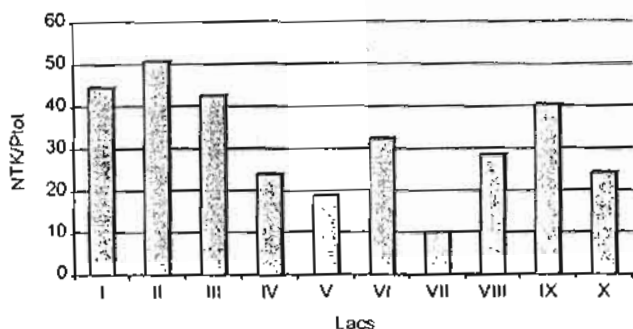


Figure 6 : Rapport NTK/Ptot pour l'eau brute

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>[10]</sup>.

Quelles que soient ici les formes de l'azote ou du phosphore, ce rapport est toujours supérieur à 7,2 comme le montrent le tableau 6 et la figure 6.

Le résultat obtenu, avec 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. Ce rapport diminue pour les autres lacs au fur et à mesure qu'on se dirige vers le lac V. 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.

En effet, les résultats ci-dessus indiquent bien que le phosphore est l'élément limitant dans presque tous les lacs de la ville de Yamoussoukro.

L'absence de jacinthes dans ces premiers lacs confirme cette hypothèse.

A partir des résultats de ces rapports nous avons établi un classement par ordre d'importance d'avancement de l'état trophique des lacs soit : lac VII, lac V, lac VI, lac IV, lac X, lac VIII, lac III, lac II, lac IX et lac I.

En conclusion, le phosphore apparaît dans cette étude comme l'élément fondamental dans le phénomène d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro. Bien qu'il ne faille pas négliger le rôle joué par l'azote NTK.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] - VOLLENWEIDER R.A.; O.C.D.E. PARIS. Rapport technique DAS/CSI 1988 68-27 n° page 250
- [2] - BARRON G.; Aménagement et nature 1976 n°44 page 21-23
- [3] - BENETON J.P.; Rapport de recherche LPC (Laboratoire Central Ponts et Chaussées) 1984; N°130 page 69.
- [4] - ALLE A.O.; Université de Cocody ; INP-HB. Yamoussoukro LAPI-SEN 1996 Mémoire de D.E.A.
- [5] - BIERNAUX ; Anale de Gembloux Belgique 1979 n°85 page 55-64
- [6] - SIGGIL.; STUMM W.; BEHRA P.; Chimie des milieux aquatiques 2<sup>e</sup> Ed. Masson, 1994, Paris, page 180-377.
- [7] - THORNTON J.A. & NDUKU, W.K.; *Water chemistry and nutrient budgets*. In Thornton, J.A., lake Monographiae biologica, 1992, volume 48, page 43-49, Junk Publishes, the Netherlands.
- [8] - ZARET & Coll.; Verh.internat.Verin, 1981 n°21 page 721-724.
- [9] - COLTERMAN H.L.; *Physiological limnology*. Elsevier scientific publishing Co. New York, 1981.
- [10] - O.C.D.E ; *Eutrophisation des eaux*, 1982 : O.C.D.E. bureau des publications, 2, rue André-Pascal 75 775 Paris Cedex 16.
- [11] - RYDING S.O. et RAST W.; *Science de l'environnement* 1993 N°9. Masson éditeur Paris page 294.
- [12] - DROOP M.R.; Jour Phycol 1973 n°9 page 264-277.
- [13] - RHEE. C.Y; *Limnol. Oceanogr* 1978 n°23 page 10-25.