

# *Facteurs limitant la productivité phytoplanktonique dans 49 petits barrages*

**Robert Arfi**

**Marc Bouvy**

**Philippe Cecchi**

**Marc Pagano**

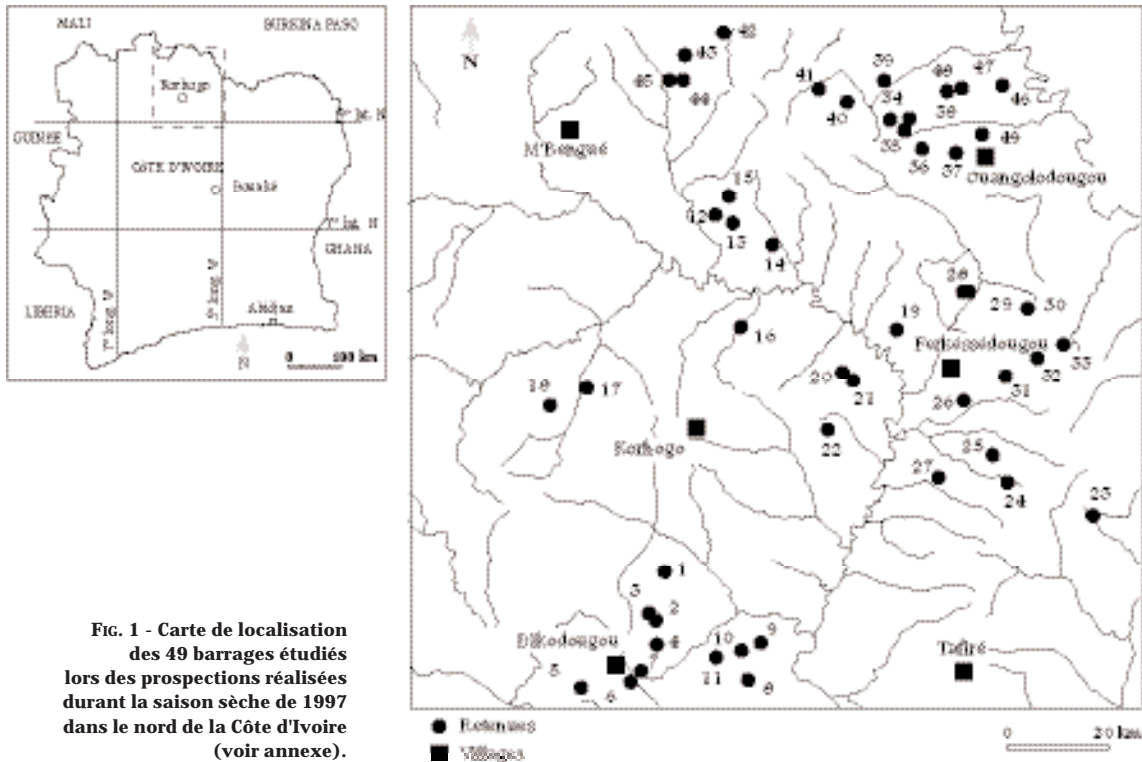
**Lucien Saint-Jean**

**Serge Thomas**

Le nord de la Côte d'Ivoire est caractérisé par un climat relativement humide (1 200 mm par an), mais avec des périodes très sèches qui alternent avec des périodes de fortes précipitations. Le contrôle de l'eau à des fins d'intensification des activités agricoles et pastorales y est apparu comme une nécessité. Plusieurs centaines de petites retenues d'eau (surface < 1 km<sup>2</sup>) souvent formées à partir d'une digue barrant un bas-fond ont ainsi été créées au cours des dernières décennies autour de Korhogo. Au cours d'un cycle annuel, les conditions hydrologiques évoluent de la dilution (entrée d'eau lors des crues de saison des pluies) à la concentration (évaporation en saison sèche). De nombreux facteurs locaux (géographiques, hydrologiques, mais aussi anthropiques) concourent cependant à induire une importante hétérogénéité spatiale des conditions écologiques rencontrées dans ces milieux.

**h**

Le présent chapitre vise à préciser les caractéristiques limnologiques rencontrées en fin de saison sèche dans 49 de ces retenues (fig. 1 + annexe). En parallèle aux mesures *in situ*, des essais de stimulation nutritive ont été réalisés afin de définir les facteurs qui contrôlent la productivité algale et d'ébaucher une typologie de ces écosystèmes.



**Fig. 1 - Carte de localisation des 49 barrages étudiés lors des prospections réalisées durant la saison sèche de 1997 dans le nord de la Côte d'Ivoire (voir annexe).**



Quarante-neuf retenues situées dans le nord de la Côte d'Ivoire ont été visitées à la faveur d'un passage unique en cœur de saison sèche (avril 1997). La prospection a duré une quinzaine de jours, durant lesquels, chaque matin, de trois à cinq retenues ont été échantillonnées. Les collectes ont été conservées au frais et à l'obscurité quelques heures au maximum avant leur analyse.

Les prélèvements ont été réalisés dans la partie la plus profonde des réservoirs, à proximité de la digue. Chaque station comportait des profils verticaux (lumière, température et oxygène), une mesure de transparence, deux prélèvements d'eau à 50 cm sous la surface et à 50 cm au-dessus du fond, et une incubation *in situ* simulée en vue d'estimer la production phytoplanctonique. Sur ces prélèvements, des mesures chimiques (conductivité, pH, éléments nutritifs) de matières en suspension et de chlorophylle ont été réalisées selon les méthodes standard (STRICKLAND et PARSONS, 1968).

Des expériences d'enrichissement ont été conduites en laboratoire. Pour chaque lac, l'échantillon collecté a été fractionné en 4 aliquotes dans des flacons de 300 ml : l'un servait de témoin, les 3 autres étaient enrichis avec respectivement 3  $\mu\text{M}$  de P- $\text{PO}_4$ , 10  $\mu\text{M}$  de N- $\text{NO}_3$  et (3  $\mu\text{M}$  de P- $\text{PO}_4$  + 10  $\mu\text{M}$  de N- $\text{NO}_3$ ). Les flacons ont été placés en lumière atténuée sur un agitateur à mouvement orbital lent. Les fluorescences *in vivo* ont été mesurées au moyen d'un fluorimètre Turner Designs pour chaque flacon à  $t_0$ ,  $t_{24}$  et  $t_{48}$ . Une augmentation de fluorescence supérieure à 30 %, 48 heures après l'enrichissement, est considérée comme une réponse positive à la stimulation nutritive.

Sur deux tableaux de données hydrologiques (profondeur, transparence, température et concentration d'oxygène en surface, écarts verticaux de température et d'oxygène dissous) et particulières (poids et volumes, biomasses chlorophylliennes par classe de taille), une partition des sites a été faite à partir d'une analyse en composantes principales et d'une classification ascendante hiérarchique des réservoirs caractérisés par leurs premières coordonnées factorielles.

La superficie des lacs est comprise entre 0,2 et 15 ha, et la surface des bassins versants est comprise entre 1 et 30 km<sup>2</sup>. Pour la plupart, ils présentaient un niveau relativement bas (profondeur maximale 2,8 m) caractéristique de fin de la saison sèche (tabl. I).



*Turbidité* : les eaux sont turbides ; la plupart des valeurs de disparition du disque de Secchi sont comprises entre 0,1 et 0,4 m. Les épaisseurs euphotiques (comprises entre la surface et la profondeur à laquelle ne se retrouve plus que 1 % de la lumière incidente) sont faibles : si 4 lacs ont leur colonne d'eau totalement éclairée, la couche euphotique représente en moyenne 47 % de la hauteur d'eau.

*Stratification* : toutes les situations de structuration verticale sont observées, depuis les 24 sites homothermes jusqu'aux sites à la stratification thermique marquée. Cette organisation se retrouve pour l'oxygène : si 11 lacs présentent un hypolimnion (zone profonde à tendance anoxique), 24 sites ont une différence de concentration entre la surface et le fond inférieure à 1 mg l<sup>-1</sup>. Lorsqu'un hypolimnion est présent, le gradient d'oxygène est fort. Dans de nombreux cas, la limite entre l'épi- et l'hypolimnion correspond au bas de la couche euphotique. Mais parfois, le métalimnion est éclairé, comme peut l'être le haut de l'hypolimnion.

			Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Don	6		6	2	9	
Z <sub>0</sub> (m)			0	0	6	
chl <sub>a</sub> (%)	2	6	0	2		
chl <sub>a</sub> (µg l <sup>-1</sup> )			0	0	0	8
N(M)		0	0	2	0	
N(M)		8	0	2	0	
ppM		8	2	5	0	
N(M)		0	0	0	3	
chl <sub>a</sub> (µg l <sup>-1</sup> )		<sup>1)</sup>	0	0	0	8
chl <sub>a</sub> (µg l <sup>-1</sup> )		<sup>1)</sup>	0	6	10	6
% chl <sub>a</sub> / Z <sub>0</sub>	8	1	8	7		
% chl <sub>a</sub> / Z <sub>0</sub>		6	4	2	2	
chl <sub>a</sub> (µg l <sup>-1</sup> )		<sup>1)</sup>	13	2	7	14
% chl <sub>a</sub> / Z <sub>0</sub>	1	2	7	2		
% chl <sub>a</sub> / Z <sub>0</sub>	0	0	8	8		
chl <sub>a</sub> (%)		0	3	0		

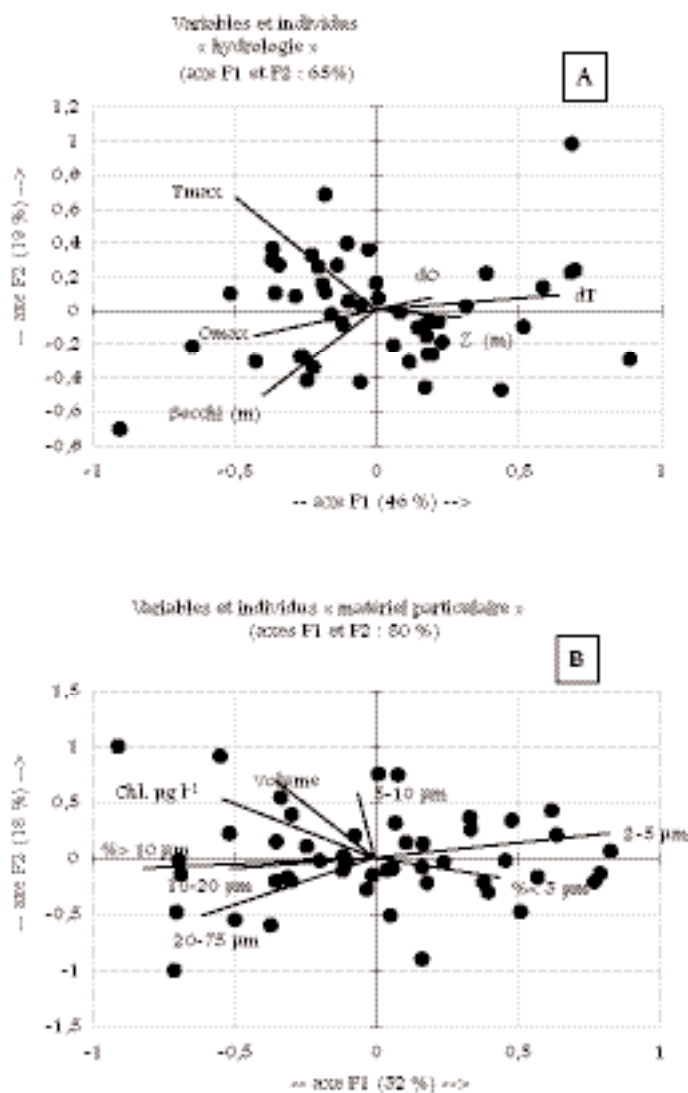
**Tabl. I - Caractéristiques limnologiques des 49 lacs étudiés.**

*Hydrochimie* : les lacs présentent des conductivités comprises pour la plupart entre 50 et 100  $\mu\text{s cm}^{-1}$ . Les pH sont plutôt acides, avec un minimum de 5,13 et un maximum de 7,27. Si la gamme des concentrations en nitrites, nitrates et orthophosphates de la couche de surface est large, cela tient aux teneurs particulièrement élevées notées dans 4 lacs. Si on élimine ces valeurs, ces paramètres présentent une moindre variabilité. En profondeur, on a le même schéma et des concentrations souvent peu différentes de celles de la surface. Exception faite de l'ammoniaque en quelques sites, il n'y a pas d'accumulation en éléments nutritifs dans la couche profonde, et la présence d'une oxycline n'implique pas obligatoirement de fortes teneurs en N-NH<sub>4</sub> ou P-PO<sub>4</sub>.

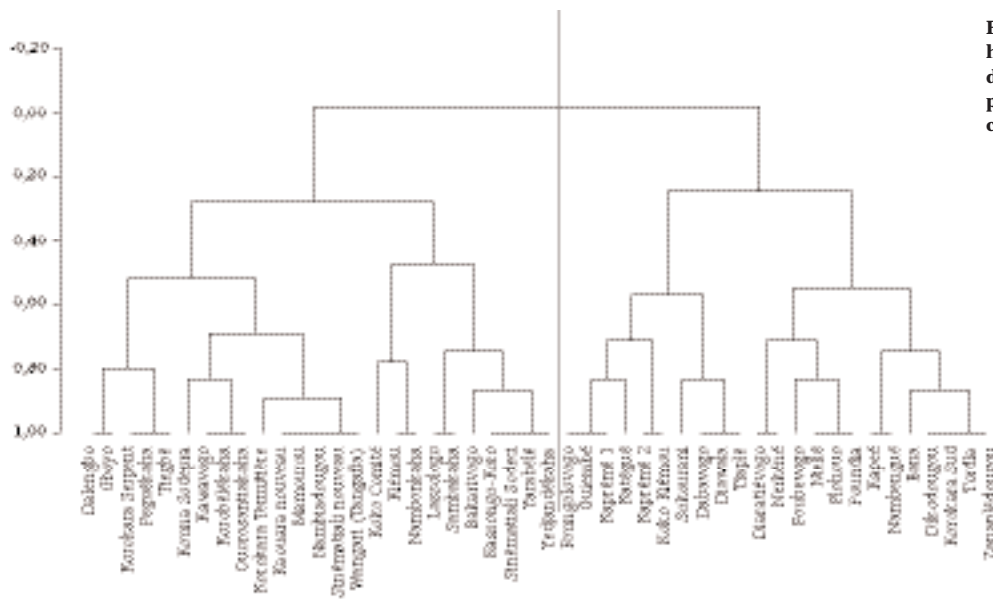
*Particules* : les lacs présentent de fortes charges en matières en suspension, avec souvent accumulation de particules près du fond. Si l'on excepte le site de Korokara Palmier (1 790  $\mu\text{g l}^{-1}$ ), la biomasse chlorophyllienne présente dans la couche superficielle des lacs varie de 6 à 432  $\mu\text{g l}^{-1}$ . La valeur moyenne ( $\approx 160 \mu\text{g l}^{-1}$ ) reflète la richesse phytoplanctonique de ces milieux, même si 5 lacs ont des concentrations inférieures à 25  $\mu\text{g l}^{-1}$ .

Les algues assimilées au picophytoplancton ( $< 3 \mu\text{m}$ ) représentent moins de 30 % de cette biomasse pour 44 des lacs étudiés, et moins de 10 % pour 16 d'entre eux. Les algues de taille  $> 10 \mu\text{m}$  ont une distribution plus homogène, avec un mode à 50 % de la biomasse.

*Production primaire* : la variabilité est forte, avec des sites où les valeurs n'excèdent pas  $0,1 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$  et d'autres présentant des valeurs supérieures à  $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ . Toutefois, 26 lacs ont une production inférieure à  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ . Les algues picoplanctoniques (de taille  $< 3 \mu\text{m}$ ) représentent



**FIG. 2 - Premiers plans factoriels des analyses de correspondance des tableaux « hydrologie » et « matériel particulaire ».** (Le réservoir n° 23, Korokara Palmier, a été écarté des analyses en raison de ses caractéristiques particulières : profondeur la plus faible, éclaircissement non mesurable, biomasse la plus élevée rencontrée pendant la campagne,  $\approx 1,8 \text{ mg l}^{-1}$ , etc.).



**Fig. 3 - Classification hiérarchique ascendante des réservoirs caractérisés par leurs premières coordonnées factorielles.**

moins de 20 % de cette activité. Pour les algues de taille supérieure à 10  $\mu\text{m}$ , ce pourcentage est bien plus élevé (moyenne de 49 %). Les rendements photosynthétiques sont pour la plupart des sites inférieurs à 0,5 %.

*Réponse à la stimulation nutritive* : sur les 49 sites, 26 ont répondu positivement à l'enrichissement. Dix-huit ont été stimulés par l'ajout de nitrates (réponse N et N + P), 3 par l'ajout de phosphates (réponse P et N + P) et 5 par l'ajout simultané de nitrates et de phosphates (réponse N, P et N + P).

Le traitement des données hydrologiques met en évidence l'importance de la profondeur et de la turbidité mais aussi du gradient de stratification verticale dans la définition du 1<sup>er</sup> plan factoriel, où s'opposent les lacs profonds, stratifiés et peu turbides et les lacs peu profonds, non stratifiés et turbides (fig. 2 A). Ces systèmes paraissent aussi les plus productifs (fortes concentrations en oxygène dissous).

L'analyse du tableau des données particulières montre le rôle fondamental de la qualité du matériel particulaire, puisque les regroupements se font sur la base de la taille des particules (fig. 2 B). La classification ascendante hiérarchique des réservoirs oppose finalement (fig. 3, de gauche à droite) un groupe de 25 lacs caractérisé par l'importance des petites particules (taille < 5  $\mu\text{m}$ ) et du picophytoplancton (< 3  $\mu\text{m}$ ), à un ensemble de 23 lacs dominé par les particules et les algues de grande taille.

Les sites étudiés présentent une large gamme de concentrations en éléments nutritifs. Si l'on élimine les lacs présentant des teneurs en N-NO<sub>3</sub> et P-PO<sub>4</sub> supérieures à 4 µM (4 et 3 sites, respectivement), on obtient des moyennes de 0,26 µM pour N-NO<sub>3</sub> et 0,59 µM pour P-PO<sub>4</sub>. Ces concentrations sont faibles pour des milieux soumis *a priori* à une forte fréquentation pastorale (usage initial des réservoirs).



L'essentiel de l'azote inorganique dissous se trouve sous forme d'ammoniac, mais dans ce cas également, si l'on élimine les 6 lacs qui présentent des concentrations supérieures à 20 µM, on obtient une moyenne de 4,49 µM. Comme dans d'autres sites tropicaux, l'azote pourrait limiter la productivité algale des lacs turbides de la région de Korhogo. Les biomasses phytoplanctoniques étant élevées, on peut considérer que la pauvreté nutritive observée provient de la consommation algale.

Dans de tels systèmes à la saisonnalité très marquée, seuls des événements épisodiques (orages, coups de vent, tornades) peuvent enrichir temporairement les sites en saison sèche. Par certains aspects, les lacs les plus productifs de la région de Korhogo se rapprochent de bassins de lagunage (dimensions réduites, faible profondeur, très forte turbidité essentiellement liée aux cellules phytoplanctoniques). Des blooms avec accumulation de tapis algaux (efflorescences) ont fréquemment été observés en surface près des digues. L'enrichissement de ces milieux par

**Développement d'une efflorescence à cyanobactéries : les organismes se concentrent en surface puis s'accumulent en rubans plus ou moins épais et durables le long des berges. Ici, à Nambengué, l'intense fréquentation du plan d'eau par le bétail est indubitablement un facteur d'enrichissement du milieu qui explique sa tendance prononcée à l'eutrophisation et au développement récurrent de tels blooms.**



les matières organiques issues des troupeaux (déjections) est très probable et sera d'autant plus important que l'usage pastoral des sites est intense. Il y a là un risque d'eutrophisation, en particulier en saison sèche.

La profondeur des sites, leur stratification et l'éclairement de la colonne d'eau sont les principales variables environnementales discriminantes. La biomasse phytoplanctonique est associée à deux types de communautés bien différenciées sur la base de la taille des organismes qui les composent. En combinant les résultats des analyses statistiques réalisées sur les tableaux « hydrologie » et « matériel particulaire », 5 groupes de lacs (tabl. II et III) peuvent être définis :

Groupe 1 (n = 3). Des lacs profonds, stratifiés et turbides, aux fortes concentrations en éléments nutritifs, mais aux faibles biomasses phytoplanctoniques et peu productifs.

*Aucun de ces 3 lacs n'a répondu à l'enrichissement.*

Groupe 2 (n = 6). Des sites profonds et stratifiés, moins turbides, aux faibles concentrations en éléments nutritifs et peu productifs. La relative transparence des eaux (66 % de la colonne d'eau éclairée) doit favoriser l'activité phytoplanctonique, au moins au début du cycle. Mais une fois la réserve nutritive de l'épilimnion consommée, la stratification ne permet pas de réapprovisionner la couche euphotique. Il y a un contrôle nutritif largement basé sur l'absence d'échanges entre les couches superficielles et profondes (sauf événement épisodique type orage ou tornade, susceptible d'homogénéiser la colonne d'eau et d'autoriser sa réalimentation en nutriments à partir de l'interface eau-sédiment).

*Cinq des 6 lacs ont répondu à l'enrichissement, le sixième présentant une réponse positive mais inférieure à 30 %.*

Groupe 3 (n = 7). D'autres lacs profonds et stratifiés et aux fortes biomasses algales, plutôt productifs. Les éléments nutritifs azotés sont épuisés, mais pas les phosphates : des eaux moins turbides et des concentrations encore élevées en P-PO<sub>4</sub> semblent permettre le maintien d'une forte biomasse et d'une production relativement élevée.

*Six lacs sur 7 ont répondu à la stimulation nutritive.*

Groupe 4 (n = 16). Le quatrième ensemble regroupe des sites peu profonds, turbides et relativement productifs. La faible profondeur et l'absence de stratification autorisent les échanges entre les couches euphotiques et aphotiques, mais la pauvreté de cette dernière en éléments nutritifs réduit les possibilités de réapprovisionnement en nutriments.

*Il y aurait un contrôle nutritif permanent de ces sites, 11 des 16 lacs du groupe ayant répondu à l'enrichissement.*



Groupe 5 (n = 17). Le dernier groupe est composé de lacs peu profonds, turbides, mais productifs. Ils ne sont pas épuisés en éléments nutritifs, même si les concentrations ne sont pas très élevées. En revanche, les teneurs moyennes en N-NH<sub>4</sub> y sont fortes. En dépit de la forte turbidité, ces concentrations élevées peuvent expliquer la bonne productivité de ces lacs et l'importance de la biomasse qui s'y accumule.

Dans ce groupe, 4 sites sur 17 ont répondu à l'enrichissement nutritif.

**Tabl. II - Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) des paramètres limnologiques pour les différents groupes de lacs. Korokara Palmier n'est pas pris en compte dans le groupe 5.**

Groupe		1	2	2	4	5
h <sub>lim</sub>	20	20	20	20	20	
Z <sub>tr</sub> (m)		00	00	00	00	00
N <sub>3</sub> (M)	00	00	00	00	00	
N <sub>4</sub> (M)	30	30	30	30	30	
P <sub>4</sub> (M)	00	00	00	00	00	
N <sub>3</sub> (M)	00	00	00	00	00	
N <sub>4</sub> (M)	00	00	00	00	00	
P <sub>4</sub> (M)	00	00	00	00	00	
h <sub>lim</sub>	<sup>1)</sup>	00	00	00	00	00
h <sub>lim</sub>	<sup>2) j<sup>1)</sup></sup>	20	20	20	20	20

	Lacs profonds					Lacs peu profonds	
	R	h	hN	hP	R		
Z <sub>tr</sub> (m)	0	0	0	0	0	0	
N <sub>3</sub> (M)	3	2	6	0	0		
P <sub>4</sub> (M)	0	0	0	0	0		
h <sub>lim</sub>	<sup>2) j<sup>1)</sup></sup>	0	0	0	0	0	
h <sub>lim</sub>	N	0	0	0	0		
h <sub>lim</sub>	0	0	0	0	0		
h <sub>lim</sub>	0	0	0	0	0		
h <sub>lim</sub>	0	0	0	0	0		

**Tabl. III - Caractéristiques des groupes de lacs issus de la classification.**

Les possibilités d'enrichissement en éléments nutritifs vont donc conditionner la productivité de ces retenues. Les milieux considérés comme eutrophes peuvent souvent se transformer en systèmes limités par les nutriments, en particulier en période chaude en zone tempérée (FORSBERG et HEYMAN, 1984).

L'élément limitant est souvent le phosphate (KALFF et KNOECHEL, 1978 ; KALFF, 1983), mais nos résultats montrent que dans la plupart des lacs limités en sels nutritifs de la région de Korhogo, le facteur de régulation est l'azote, et plus particulièrement les nitrates.

Des événements hydrodynamiques ponctuels aboutissant au mélange vertical permettent l'installation de courtes séquences riches en nutriments (BOSTRÖM *et al.*, 1982 ; SOMMER, 1989). Les sites profonds susceptibles d'être enrichis par de tels apports depuis l'interface eau-sédiment (faible gradient de densité, faible profondeur, morphologie du lac et situation géographique favorable à l'action des vents) réagiront donc rapidement à ces événements, même s'ils sont de courte durée et si l'importante biomasse algale en présence consomme rapidement ces apports.

Les lacs des groupes 2 et 3 peuvent correspondre à ces critères, 11 des 13 lacs ayant répondu à l'enrichissement et en particulier aux apports en nitrates. Les lacs peu profonds (groupe 4), épuisés en éléments nutritifs, réagissent également aux apports extérieurs.

En revanche, ceux qui disposent encore de réserves nutritives (groupe 5) sont productifs, et la limitation semble alors provenir de la lumière. *In fine*, c'est la composition de la communauté algale au moment de l'événement enrichissant épisodique qui va conditionner sa réponse à la stimulation nutritive, les espèces ayant différents mécanismes de réponse (SOMMER, 1985 ; SUTTLE *et al.*, 1987 ; SPIJKERMAN et COESAL, 1998). La fréquence et l'intensité de ces perturbations pourront en retour apparaître comme des forces sélectives puissantes susceptibles de contrôler la composition des communautés phytoplanctoniques (HARRIS, 1986).



Les 49 lacs étudiés sont dans leur majorité eutrophes ou hyper-eutrophes, probablement en raison du fort enrichissement nutritif du début de cycle (crue annuelle), auquel s'ajoutent les réserves organiques des sites non déforestés et les apports épisodiques (orages, déstratification). Une fois ces stocks épuisés, et en l'absence de réalimentation par les couches

profondes, les éléments nutritifs deviennent limitants. Les systèmes qui conservent des réserves sont, eux, limités par la lumière. La profondeur contrôle en partie la productivité. Les lacs peu profonds sont ceux qui présentent la plus forte activité phytoplanctonique. L'hydrodynamique des masses d'eau joue par ailleurs un rôle fondamental (ARFI *et al.*, 2001). Dans les lacs profonds et durablement stratifiés, l'enrichissement en nutriments ne se produit qu'à la faveur d'événements climatiques intenses mais épisodiques. À l'inverse, dans les lacs petits et non stratifiés, qui présentent une zone riche en sels nutritifs à proximité du sédiment, la régularité des mélanges verticaux permet le soutien d'une importante productivité.

## Références

- ARFI, R. B., W. MC E. P.  
 P. MT. S. D.  
 B. J. J.  
 P. J. J.  
 S. J. J.  
 A. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 4(2) : 3.
- B. J. J. M. C.  
 S. J. J.  
 J. J. *Arch. Hydrobiol.*, 3: 3.
- F. J. C. H. M. U. J.  
 J. J. J.  
 J. J. J.  
*Verh. Int. Verein. Limnol.*, 2: 3.
- H. J. C. J. *Phytoplankton Ecology. Structure, function and fluctuation.* J. J. J.
- K. J. K. R. S.  
 J. J. J.  
 J. J. J.  
*Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 9: 3.
- K. J. J. J.  
 J. J. J.  
*Hydrobiologia*, 0: 3.
- S. J. U. J. J.  
 J. J. J.  
 J. J. J.  
*Oceanogr.*, 3: 3.
- S. J. U. J. J. J. J.  
 J. J. J.  
 J. J. J. *In S. J. U.*  
 (J. J. J. *Plankton ecology: succession in plankton communities.* N. J. J. J.)
- S. J. J. C. J. J. J. J.  
 J. J. J. J.  
 J. J. J. J. J. J.
- (J. J. J.)  
 J. J. J. *J. Phycol.*, 3: 3.
- S. J. J. J. P. J. J. J. J. J. J. J.  
 J. J. J. *A practical handbook of seawater analysis.* J. J. J. J.
- S. J. C. A. S. J. J. J. J. G.  
 H. J. P. J. J. J. J. J. J. J.  
 J. J. J. J. J. J. J. J. J. J. J. J.  
*Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 4: 3.

## Annexe

### Localisation des 49 réservoirs étudiés

Numéro	Site	Latitude N	Longitude W
1	En	033	625
2	En	038	642
3	En	037	640
4	En	038	633
5	En	008	620
6	En	029	635
7	En	020	638
8	En	020	638
9	En	007	627
0	En	057	638
1	En	049	629
2	En	020	630
3	En	053	661
4	En	032	628
5	En	037	630
6	En	009	658
7	En	031	654
8	En	023	659
9	En	007	680
0	En	051	620
2	En	030	628
2	En	022	628
2	En	026	637
2	En	020	662
2	En	023	675
0	En	020	615
2	En	027	635
2	En	047	603
2	En	040	603
0	En	025	635

Numéro	Site	Latitude N	Longitude W
1	10	508	608
2	11	508	608
3	12	508	601
4	13	502	608
5	14	505	608
6	15	509	605
7	16	508	604
8	17	502	609
9	18	506	608
10	19	509	602
11	20	508	605
12	21	503	604
13	22	506	600
14	23	502	602
15	24	506	602
16	25	505	606
17	26	502	610
18	27	502	602
19	28	502	606