Chapitre 5

Les caractéristiques physiques et chimiques

Jacques Lemoalle

Dans ce chapitre nous décrivons les principales caractéristiques physiques et environnementales du lac Victoria. Elles définissent les conditions de milieu dans lesquelles vivent les organismes : espace disponible, bilan hydrologique et renouvellement de l'eau, distribution de la température et de l'oxygène dans la masse d'eau, transparence, éléments chimiques d'importance biologique. Cette description porte sur la première moitié du XX^{e} siècle (jusqu'à 1960-1961) avant sa modification progressive sous l'influence des activités humaines sur son bassin.

⋆

Situé à une altitude de 1 134 mètres, le lac Victoria, le plus grand lac d'Afrique par sa superficie, est localisé à cheval sur l'équateur. Deuxième plus grand lac d'eau douce du monde, il a une superficie d'environ 68 900 km^2 (82 100 km^2 pour le Lac supérieur, Canada – États-Unis [1]).

Bien qu'il ait été découvert après les lacs Tanganyika et Malawi, le lac Victoria a toujours suscité plus d'intérêt auprès des populations occidentales que les autres cuvettes de la vallée du Rift. Les récits de sa découverte et le fait qu'il soit la source principale du Nil en sont certainement la cause (voir chapitre 3, « La vallée du Rift, un haut lieu de l'humanité »). À côté de cet aspect émotionnel et historique, le fait que ce lac contribue au débit du Nil a également attiré l'intérêt des hydrologues. Dès 1900, un premier profil bathymétrique (figure 1) a ainsi été établi et les mesures régulières du niveau du lac sont disponibles depuis 1899.

Malgré des recherches anciennes, l'origine et l'histoire de ce lac suscitent encore de nombreuses controverses. Celle, entre autres, affirmant qu'il s'est plus ou moins asséché, il y a seulement 13-14 000 ans a longtemps prévalu mais reste l'objet de débat (voir chapitre 2, « Origine et genèse d'un grand lac tropical »).

1. On considère parfois que les lacs Michigan – Huron (Canada – États-Unis) constituent une unique entité hydrologique. Dans ce cas, ce complexe de 117 700 km^2 devient la plus grande étendue d'eau douce et le lac Victoria se situe alors en troisième position.

Tableau 1 - Superficie relative partagée par les trois pays riverains du lac Victoria

Pays	Superficie (km²)	% superficie
Kenya	4 100	6
Ouganda	31 000	45
Tanzanie	33 700	49

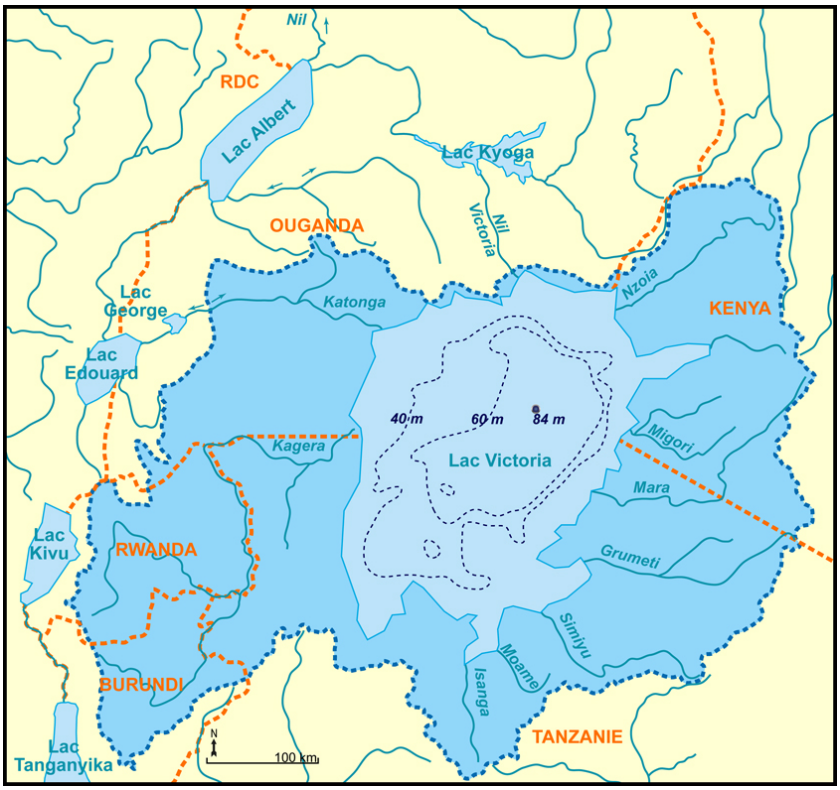


Figure 1 – Bassin versant du lac Victoria

1 Morphométrie

Le lac Victoria est partagé, de façon assez inégale, entre trois pays (tableau 1).

La profondeur maximale connue du lac est de 84 mètres et sa profondeur moyenne de 40 mètres, ce qui en fait un lac particulièrement peu profond comparé aux autres lacs de la région. Il s'étend sur 412 km du nord au sud entre les latitudes 0° 30' N et 3° 12' S, et sur 355 kilomètres d'ouest en est entre les longitudes 31° 37' E et 34° 53' E (figure 1). Sa côte, très irrégulière et dendritique, a un périmètre estimé de 3 460 kilomètres (tableau 2). Il existe d'innombrables baies et embouchures d'affluents dont

l'écologie est généralement différente de celle du lac, proprement dit, du fait d'une moindre profondeur et d'échanges hydriques limités avec le corps principal du lac. La plupart des abords sont marécageux et bordés d'une dense végétation essentiellement composée de papyrus (figure 2).

Tableau 2 - Principales caractéristiques morphométriques du Victoria

Paramètres	Valeurs
Surface du lac (km^2)	68 900
Bassin versant (km^2)	193 000
Périmètre (km)	3 460
Longueur maximale (km)	412
Largeur maximale (km)	355
Volume (km^3)	2 760
Profondeur maximale (m)	84
Profondeur moyenne (m)	40
Altitude (m)	1 134



Figure 2 – Nasses en action de pêche dans un bras adjacent du lac bordé de papyrus, lac Victoria à Kisumu, Kenya (© C. Faudemay)

Très schématiquement, on peut se représenter le lac Victoria comme un ensemble de quatre grandes zones écologiques :

- la masse d'eau centrale, où vivent les organismes pélagiques ;
- les fonds de la zone profonde centrale, peu oxygénés et peuplés par une faune peu diversifiée ;
- une zone de profondeur moyenne, où les peuplements de poissons occupent toute la colonne d'eau et les fonds ;

- et enfin la zone de rivage, couverte de végétation près des rives (papyrus ou jacinthe d'eau), où les conditions de milieu sont de type marécageux. Bien que l'oxygène n'y soit accessible qu'en bordure de zone et à la surface de l'eau, ce milieu abrite de nombreuses espèces et des juvéniles de poissons.

2 Bassin versant et bilan hydrologique

Le bassin du lac Victoria constitue la partie amont du bassin du Nil blanc. La superficie totale du bassin versant du lac n'est qu'environ trois fois supérieure à la surface du lac proprement dit, respectivement 193 000 km^2 et 68 900 km^2. Le bassin est donc relativement petit par rapport au lac, d'où l'importance de la pluie directe dans le bilan hydrologique. Sur le pourtour du lac, le relief, peu élevé, favorise la présence de zones marécageuses et de nombreux lacs satellites.

Les affluents occidentaux, dont le principal est la rivière Kagera (figure 1), drainent les massifs du Burundi, du Rwanda et de la Tanzanie occidentale, le long de la bordure est de la vallée du Rift occidental. Ce sont des rivières assez lentes qui ne présentent pas un régime hydrologique saisonnier très marqué.

Les affluents du nord-est, dont le principal est la rivière Nzoia (figure 1), drainent certains massifs montagneux assez élevés (mont Elgon : 4 321 mètres, et mont Cherangany : 2 700 mètres). Ce sont des rivières au courant assez rapide dont le régime est plus saisonnier.

Les affluents orientaux, comme la célèbre rivière Mara, sont relativement peu importants et drainent des zones de plateau assez arides de Tanzanie, dont les plaines du Serengeti.

La rivière Katonga (figure 1) est un cas particulier. Pour quelques auteurs, c'est un effluent du lac Victoria, car dans cette région, les mouvements tectoniques ont modifié les pentes d'écoulement dirigées initialement depuis le lac Victoria vers le bassin du Congo. En réalité, la Katonga est continue entre le lac Victoria et le lac George, de même que la Kafu est continue entre le Nil à sa sortie du lac Kyoga et le lac Albert. Mais, en fait, chacune des deux rivières coule dans deux directions opposées à partir de marais situés entre les lacs Victoria et George pour la première et entre les lacs Kyoga et Albert pour la deuxième. En définitive, la plus grande partie de la Katonga coule, réellement, vers le lac Victoria bien que les angles qu'elle forme avec ses affluents suggèrent qu'elle coule vers l'ouest sur l'ensemble de son parcours.

Les précipitations qui tombent directement sur le lac apportent plus d'eau que l'ensemble des différents affluents (figure 3 et tableau 3). La pluviosité diminue d'ouest en est à travers le lac, de 2 000 mm/an sur la côte du centre ouest non loin de Bukoba, à 1 100 mm/an à l'extrémité sud-ouest et seulement 750 mm/an au sud-est. Les rives nord reçoivent un peu plus de 1 100 mm/an. Des études récentes indiquent qu'il tombe généralement environ 30 % de plus de pluie sur la zone centrale du lac que ce qui est mesuré sur ses bords (Sutcliffe & Parks, 1999).

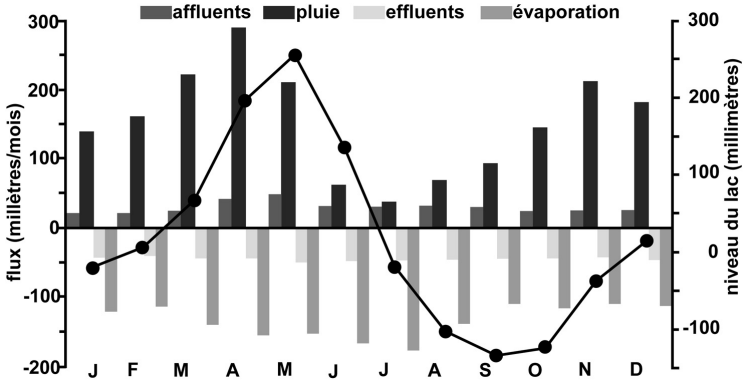


FIGURE 3 – Bilan hydrologique mensuel moyen du lac Victoria. On note que les pluies directes constituent les apports les plus importants. Les apports dus aux affluents et les pertes dues aux effluents sont plus ou moins constants au cours de l'année. Comme l'évaporation est inversement proportionnelle aux pluies, il s'ensuit un bilan très contrasté, très positif d'avril à juin et très négatif d'août à octobre (courbe noire). L'amplitude de variation du niveau du lac atteint près de 40 cm au cours de l'année (redessiné d'après Talling & Lemoalle, 1998)

Tableau 3 - Bilan moyen des entrées et sorties d'eau dans le lac Victoria (d'après Kayombo & Jorgensen, 2006). On notera, d'après les données fournies ci-dessous, que le bilan global est essentiellement dépendant des processus qui concernent la surface du lac proprement dit, la pluie pour les apports et l'évaporation pour les pertes. Le rôle des affluents et de l'effluent principal, le Nil, paraît secondaire. Ce bilan, établi pour la période 1950-2000 est légèrement positif, correspondant à une élévation du niveau du lac de l'ordre de 1 m entre 1950 et 2000

Nature du flux	Flux (m^3/s)	Pourcentage (%)
Apports		
Pluie directe sur le lac	3 631	82
Débit des affluents	778	18
Sorties		
Évaporation du lac	-3 330	76
Nil	-1 046	24
Bilan	33	

Tableau 4 - Variation du niveau du lac Victoria entre 1930 et 2011 mesuré à l'échelle de Jinja, Ouganda (d'après Tate *et al.*, 2004)

Période	Niveau du lac (m)
1931-1960	10,2-11,9
1961-1980	10,8-13,3
1981-2000	11,4-13,0
2001-2011	10,4-12,7

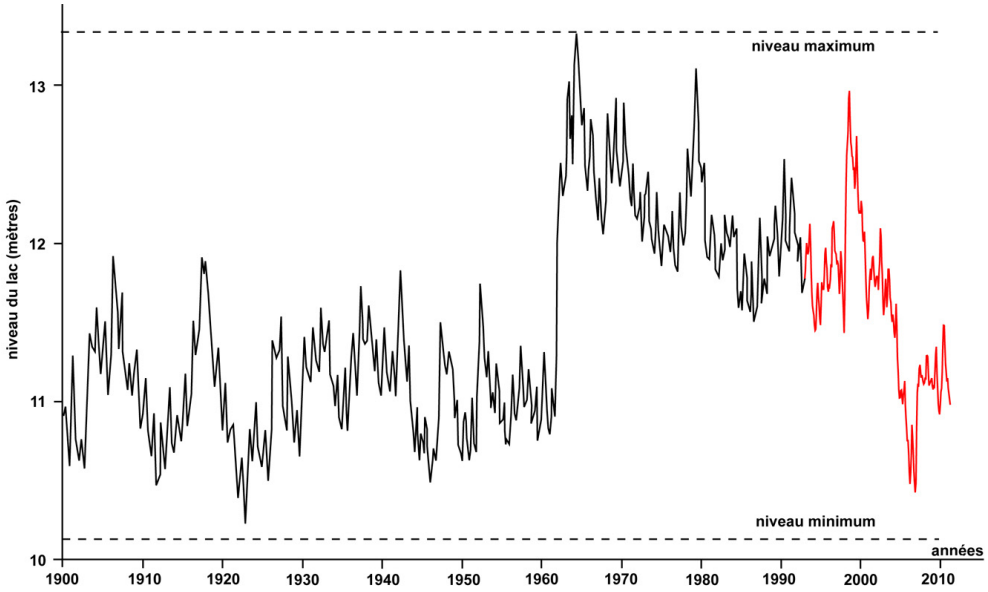


FIGURE 4 – Variation du niveau du lac Victoria à Jinja, Ouganda (en noir Sutcliffe & Parks, 1999 ; en rouge Legos : Crétaux *et al.* 2011). On voit nettement que le niveau du lac a augmenté de façon brusque au début des années 1960 et en 1997-98 à la suite d'années particulièrement pluvieuses. Il a diminué progressivement depuis pour retrouver un niveau correspondant à une pluviométrie interannuelle moyenne

L'exutoire du lac, la source du Nil, a une section relativement étroite, ce qui limite son débit. C'est ce qui explique qu'au cours d'années particulièrement pluvieuses le niveau d'eau du lac monte et met un certain temps, éventuellement plusieurs années, pour regagner son niveau moyen.

On a calculé que le temps de renouvellement des eaux du lac (volume du lac / volume des sorties) est d'environ 140 ans alors que le temps de résidence (volume du lac / volume des entrées) est plus court, estimé à 23 ans (Bootsma. & Hecky, 1993), du fait de l'importance de l'évaporation. Ces valeurs sont assez élevées car il s'agit d'un lac dont le volume est très important (environ 2 800 km^3) par rapport au débit de

sortie. Certes, elles le sont moins que celles des lacs Malawi et Tanganyika, mais le sont suffisamment pour jouer, comme nous le verrons ailleurs, un rôle capital en terme d'inertie et de rétention des matières polluantes au sein des eaux du lac.

Au cours du cycle annuel, le niveau du lac varie en général d'environ 40 cm (figure 3), mais il est arrivé que le niveau monte de près de 1,5 m à la suite d'années particulièrement pluvieuses, liées à des épisodes de l'oscillation océanique, comme au début des années 1960 et en 1997. Comme signalé plus haut, le lac met ensuite un certain temps, jusqu'à plusieurs dizaines d'années, à retrouver son niveau d'équilibre du fait du débit limité de son exutoire.

En 2012, le lac a retrouvé le niveau moyen qu'il avait au cours de la période 1900-1950 (tableau 4, figure 4).

Malgré l'incertitude sur les estimations précises de l'évaporation et de la pluie sur le lac (Yin & Nicholson, 1998), l'ensemble des calculs et des modèles montre que les variations du niveau du lac sont essentiellement conditionnées par les pluies qui s'abattent sur le lac et son bassin versant car les activités anthropiques ont peu d'impact sur le niveau du lac.

Au début des années 2000, la baisse du niveau du lac s'est accentuée au point que de nombreux embarcadères construits pour les pêcheurs lors de hautes eaux se sont trouvés à sec. En quatre années, le niveau du lac a chuté d'environ 1,5 m, ce qui correspond à un déficit pluviométrique prononcé lors de cette même période. Pourtant, en 2006 les médias ont relayé les conclusions du rapport d'une ONG américaine (International River Networks, IRN) qui affirmait que cette baisse du niveau du lac était imputable, pour 55 %, à la gestion des deux centrales situées juste en aval de Jinja, en Ouganda. Selon Daniel Kull (2006), l'expert de l'IRN, pour alimenter ses deux centrales électriques [2], l'Ouganda aurait procédé, secrètement, à des turbinages supérieurs aux normes autosisées. Ces normes ont été redéfinies après la construction du barrage de Owen Falls Dam et il semble, désormais, que l'on veille à leur respect.

Ce règlement rend la gestion du réseau électrique de l'Ouganda difficile. En effet, comme on ne peut pas anticiper ce que sera le niveau du lac qui réagit immédiatement à la pluie, il n'est pas possible de prévoir, même à court terme, l'électricité qui pourra être produite par les centrales situées sur cette portion du fleuve. Rappelons que les centrales hydroélectriques incriminées, distantes du lac d'environ 1 kilomètre, ont été achevées en 1954 (Nalubaale Dam, ex-Owen Falls Dam) et en 2002 (Kiira Dam) (figure 5). Un troisième barrage légèrement plus à l'aval, Bujagali, a été mis en eau en 2012 et double pratiquement désormais la production nationale de l'Ouganda.

On ne peut pas exclure une influence de la gestion des barrages sur le niveau du lac, mais il est clair que les variations climatiques ont eu, dans cet exemple, un impact prépondérant. Pour conforter cette hypothèse, mentionnons que, dès fin 2006, d'abondantes précipitations ont permis au lac de retrouver un niveau proche de la moyenne observée à long terme. De nombreux exemples de variations du niveau de lacs africains, en relation avec la variabilité des pluies, sont connus, en particulier pour les lacs sans exutoire ou ceux pour lesquels la pluie directe est une composante majeure

2. À l'époque du rapport, seuls les barrages de Nalubaale et de Kiira (figure 5) étaient construits.

du bilan hydrique. Outre le lac Victoria, les lacs Sibaya, Chilwa, Naivasha ou le lac Tchad sont connus pour les fluctuations de leur niveau en rapport avec les apports pluviaux (Talling & Lemoalle, 1998).

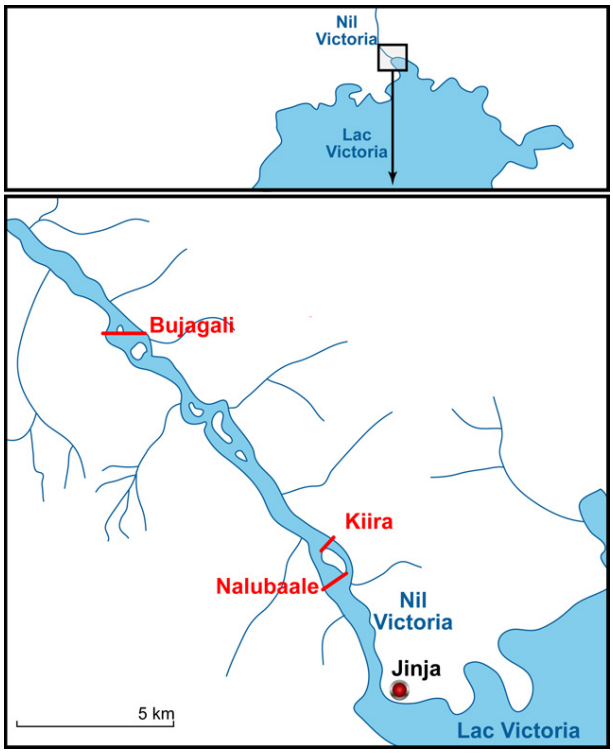


FIGURE 5 – Les barrages situés sur le Nil Victoria en aval de Jinja, Ouganda. Le barrage de Nalubaale (ex Owen Falls dam) a été mis en service en 1954, celui de Kiira en 2002 et celui de Bujagali en 2012. Ils ont, respectivement, des capacités de production de 180 MW, 120 MW et 250 MW. Pour l'anecdote, rappelons qu'en 2007 seules 5 % des habitations ougandaises avaient accès à l'électricité

3 Évolution de la température du lac

Les températures moyennes mensuelles de l'eau du lac varient entre 23 et 27°C. En surface, février et mars sont les mois où l'eau est la plus chaude, tandis qu'elle est plus froide d'août à octobre (figure 6). Le refroidissement superficiel est dû à l'augmentation de l'évaporation au cours de la saison sèche. À cette variation saisonnière se superpose une variation diurne de la température de surface due à l'alternance jour / nuit. Il faut donc tenir compte de cette variation et de l'heure de la mesure pour comparer des séries de données.

Bien que le gradient vertical de la température de l'eau soit généralement peu marqué, le lac est stratifié durant la plus grande partie de l'année, avec des périodes d'homogénéisation (voir encadré « Stratification thermique et thermocline » et figure 8). Compte tenu de la gamme de température observée (23 à 27°C), ces faibles écarts

sont néanmoins suffisants pour assurer une stratification, comme dans d'autres lacs équatoriaux.

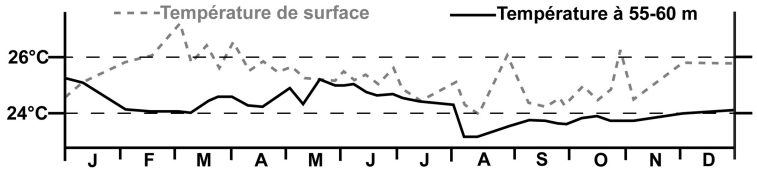


FIGURE 6 – Variation annuelle des températures de surface et de fond en 1960-1961 (redessiné d'après Talling & Lemoalle, 1998). On constate que l'amplitude des températures est assez faible puisqu'elle n'excède pas 3°C en surface et 2°C en profondeur. On notera également la faible différence qui existe entre la température observée en surface et celle qui règne en profondeur. Cette faible différence est une caractéristique de la plupart des lacs de région chaude

Stratification thermique et thermocline

Un lac échange de la chaleur et de l'oxygène avec l'atmosphère à travers sa surface. Lorsque le lac emmagasine de la chaleur, le vent et les turbulences distribuent cette chaleur dans une couche de surface dont la température est à peu près homogène. C'est l'épilimnion ou couche superficielle de mélange. La zone profonde du lac (ou hypolimnion) est alors séparée de l'atmosphère avec laquelle elle n'échange ni chaleur ni oxygène. On dit alors que le lac est stratifié, les deux masses d'eau étant séparées par une couche de transition, la thermocline, où la température décroît rapidement quand on s'enfonce vers le fond (figure 7).

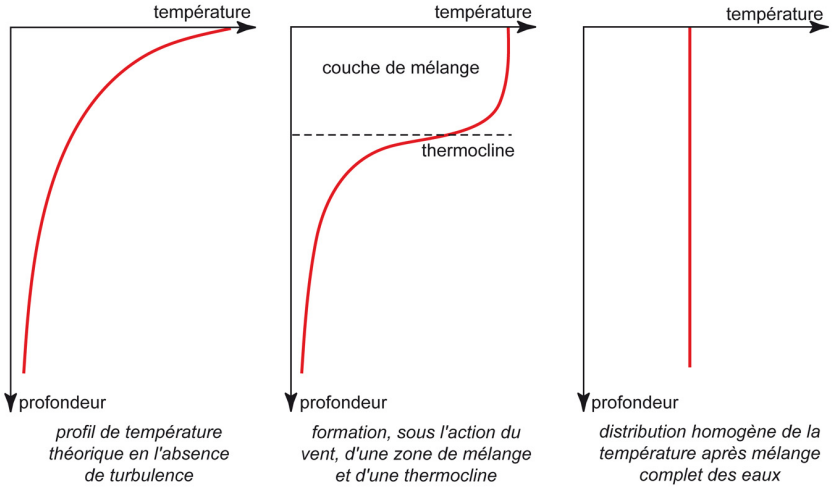


FIGURE 7 – Schéma théorique montrant les principaux profils de température d'un lac en fonction de la profondeur

La stratification est d'autant plus stable que la différence de densité entre les deux masses d'eau est importante. Celle-ci dépend de la différence de température ΔT, d'une part, et, pour un même ΔT, elle augmente lorsque l'eau est plus chaude. Ce qui explique qu'un lac de région chaude peut être stratifié de façon stable pour un gradient vertical de température relativement faible.

Lorsque le lac perd de la chaleur, la couche superficielle se refroidit et la différence de densité entre eau de surface et eau profonde diminue et s'annule. Le lac n'est plus stratifié et les turbulences de surface provoquent un mélange des eaux du lac qui devient alors homogène depuis la surface jusqu'au fond.

L'alternance jour / nuit donne également lieu à des échanges de chaleur et à des modifications de température, mais sur une profondeur très limitée comparativement aux variations saisonnières.

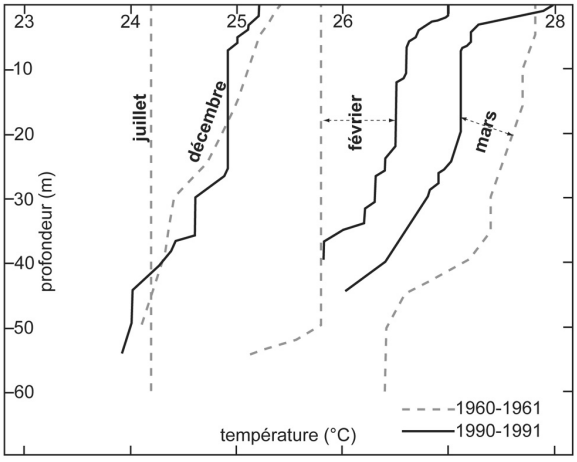


Figure 8 – Profils de la température observés à deux époques différentes sur une station située environ au centre du lac (redessiné d'après Spigel & Coulter, 1996). En juillet 1961, les eaux sont totalement mélangées ; en revanche, on n'observe pas sur ces données d'homogénéisation complète en 1990-91. En mars 1961 et 1991, le gradient vertical bien marqué indique approximativement que la thermocline est plus profonde en 1960 qu'en 1990

En juin et juillet, en saison sèche, les alizés du sud-est refroidissent la surface du lac pendant une période assez courte et à la fin de juillet, la distribution verticale de la température est homogène de la surface au fond. L'ensemble des eaux du lac se mélange et la distribution de l'oxygène et des éléments dissous, y compris les nutriments, est homogène dans l'ensemble du lac, sauf éventuellement dans les baies relativement fermées. Le reste de l'année, la profondeur et la stabilité de la thermocline dépendent de la durée de la période calme de réchauffement et des intermèdes de vent qui contribuent à dissiper la chaleur vers les eaux plus profondes. Les variations saisonnières du climat sont les moteurs de la distribution de la température dans le lac. Lors des premières séries de mesures régulières, dans les années 1960, la thermocline était située vers 30 à 40 m de profondeur. L'homogénéisation de l'ensemble se produisait en général une fois par an (en juillet), mais des mélanges partiels peuvent se produire

à d'autres moments de l'année. En termes de limnologie physique, le lac Victoria est un lac monomictique [3] chaud (mélange vertical des masses d'eau une fois par an, et température toujours supérieure à 4 °C).

En ce qui concerne l'évolution dans le temps, la température de surface de l'eau du lac Victoria en 1990-92 est supérieure en moyenne d'environ 1 °C à ce qu'elle était 1960 (figure 9). En admettant que ces deux séries de mesures soient représentatives de la température moyenne, il y a donc une tendance observable au réchauffement.

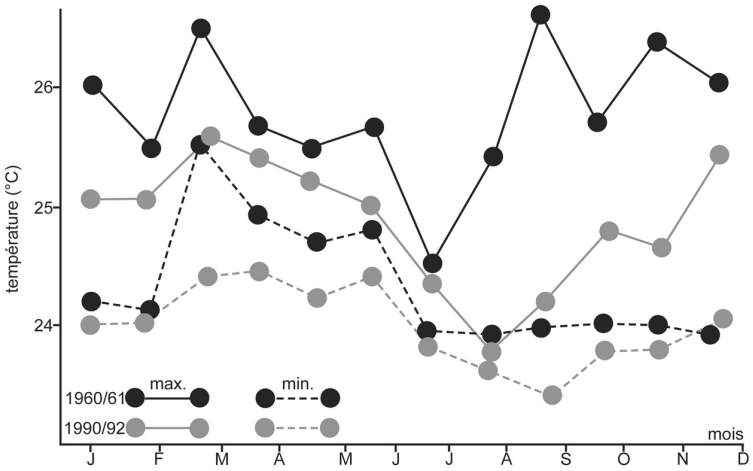


Figure 9 – Températures moyennes minimales (traits pointillés) et maximales (traits pleins) observées dans la colonne d'eau des années 1960-61 (bleu) et 1990-92 (rouge) (d'après Bugenyi & Magumba, 1996)

4 Distribution de l'oxygène : vers une tendance à l'anoxie ?

Comme pour la température, l'essentiel des échanges d'oxygène se fait à travers la surface du lac. Quand le lac est thermiquement homogène, la concentration en oxygène dans toute la masse d'eau tend à s'équilibrer avec l'atmosphère (les pressions partielles s'équilibrent) et on dit alors que l'oxygène est à saturation. La concentration en O_2 à saturation dépend de la température de l'eau et de l'altitude. Dans le lac Victoria, à 25°C et 1130 m d'altitude, la concentration à saturation est d'environ 7,4 mg/l. Quand le lac est stratifié, la couche superficielle reste plus ou moins proche de la saturation, tandis que des processus de dégradation de la matière organique dominent dans la couche profonde et peuvent conduire jusqu'à l'anoxie (disparition complète de l'oxygène) si la matière organique en suspension ou au fond est abondante et si la stratification dure longtemps.

Dans la couche de surface, bien éclairée, la photosynthèse du phytoplancton crée un cycle nycthéméral de la concentration en O_2, avec sursaturation en milieu d'après-midi et déficit en fin de nuit. Il est donc important de savoir à quelle heure ont été faites les

3. Un lac est qualifié de mono, di- ou polymictique selon le nombre de brassages annuels des eaux. Les lacs monomictiques sont ceux qui ne basculent qu'une fois par an et qui n'ont donc qu'un stade de circulation des eaux et de mélange avec les couches profondes.

mesures de façon à apprécier des variations éventuelles de concentration entre deux séries de mesures, et ceci d'autant plus que le milieu est riche en micro-algues.

Avant que le lac n'ait subi l'anthropisation qui prévaut actuellement (voir le chapitre 8, « Pourquoi le lac s'est-il eutrophisé ? Quelles en ont été les conséquences ? »), les eaux de la couche de surface étaient en général assez bien oxygénées, au moins jusqu'à des profondeurs de 30 mètres, avec des concentrations variant de 4,6 à 9,4 mg/l d'oxygène. Dans les années 1960, dans des conditions que l'on peut encore considérer comme naturelles, la distribution de l'oxygène est à peu près homogène lorsque la colonne d'eau est plus ou moins isotherme durant la période maximale de mélange des eaux, en juillet-août. Puis, lorsque commence à apparaître une structure thermique, un gradient d'oxygène se dessine et, selon les cas, une discontinuité se manifeste au niveau de la thermocline entre 30 et 60 mètres selon les conditions météorologiques et les années (figure 10).

En résumé, la plupart du temps, les eaux de surface étaient toujours plus ou moins proches de la saturation (en équilibre avec l'atmosphère), et les faibles concentrations ($< 0{,}7$ mg/l) n'existaient qu'en dessous de 55 mètres et l'anoxie complète ne se manifestait que dans le fond et occasionnellement (figure 10).

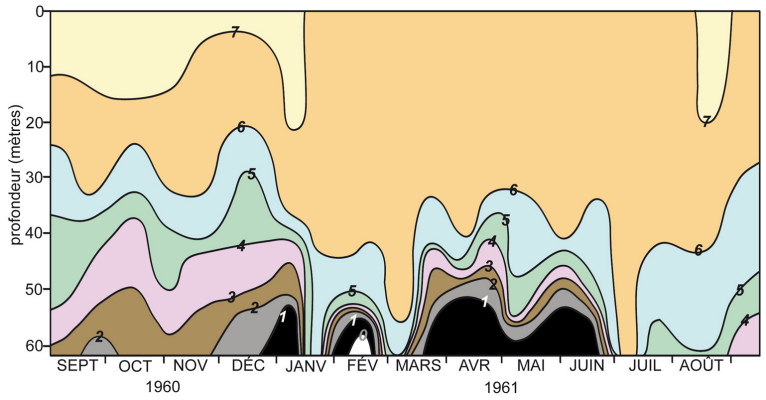


Figure 10 – Diagramme, profondeur-temps, de la distribution de l'oxygène dissous en 1960-1961 dans la colonne d'eau au large de Jinja, Ouganda (redessiné d'après Talling, 1966). On notera la mise en place progressive d'une stratification au cours de laquelle l'oxygène des couches profondes est consommé par la matière organique des sédiments. D'avril à juin il ne reste quasiment plus d'oxygène au fond. Début juillet, toute la couche d'eau est mélangée lors de l'homogénéisation thermique du lac avant que la stratification ne s'installe à nouveau avec déficit croissant de l'oxygène du fond. On notera la relativement faible stratification de septembre à décembre, suivie d'une phase de stratification plus élevée de janvier à juin. Durant cette période, la désoxygénation est presque totale à partir de 50-55 mètres de profondeur. Puis en juillet-août, la teneur en oxygène est de nouveau plus ou moins distribuée de façon homogène. Cette période correspond au mélange des eaux lorsque la colonne d'eau est presque entièrement isotherme

Cette situation observée périodiquement jusque dans les années 1960-1970, s'est progressivement dégradée et à partir des années 1990, la teneur en oxygène a nettement diminué dans les couches moyennes et profondes et a, au contraire, significativement augmenté en surface. Bien évidemment, ces nouvelles conditions de milieu ont une influence majeure, tant sur la répartition des poissons que sur leur survie dans un

écosystème où la quantité d'oxygène nécessaire à la survie de la plupart des espèces devient déficitaire dans certaines parties du lac (Ochumba, 1996).

5 Transparence

Les rivières africaines sont généralement troubles, même lors de la saison sèche lorsque le courant est faible, voire nul. Cette turbidité est liée à l'importante charge en matières minérales en suspension, essentiellement des argiles. Contrairement aux rivières, les grands lacs ont, d'ordinaire, des eaux assez limpides. Adaptés à ces conditions de transparence, les poissons, et parmi eux de très nombreuses espèces de cichlidés, ont développé des stratégies de reconnaissance où la vision joue un rôle primordial. Pour la survie de ces espèces, il est prépondérant que les eaux restent transparentes pour que les espèces puissent se reconnaître et se nourrir.

Dans le lac Victoria, jusque dans les années 1960, la transparence de l'eau, mesurée au disque de Secchi, variait, selon les saisons entre 6,4 à 8,4 mètres [4]. Désormais, du fait, en particulier, de l'augmentation des micro-algues et de l'érosion sur le bassin versant, la transparence est réduite et varie entre 1,3 et 3,4 mètres. Cette diminution de la transparence a plusieurs conséquences. Elle limite la pénétration de l'énergie lumineuse, et donc de la chaleur en profondeur. La thermocline s'établit donc à une profondeur moins importante : le volume de la couche de surface, bien oxygénée et favorable à la vie des poissons, est donc moins important. Elle limite également le développement en profondeur du phytoplancton. Cela n'est évidemment pas sans effet sur les capacités de s'alimenter de certaines espèces planctonophages. Nous verrons également qu'en augmentant, la turbidité du lac a posé certains problèmes quant à la réussite de reproduction de certaines espèces.

6 Nutriments, phytoplancton et zooplancton

Lors des premières recherches effectuées au cours des années 1960, le lac Victoria avait une flore algale essentiellement composée de Diatomées. Ce lac était mésotrophe [5] car les concentrations en phosphore et surtout en azote, composés principaux responsables du développement du phytoplancton et des macrophytes, étaient assez faibles (figure 11). On considérait alors que l'azote était un facteur limitant pour le développement du phytoplancton.

Nous verrons que les perturbations qui ont entraîné des diminutions de silice dissoute, mais des augmentations de phosphates et surtout de nitrates, ont notablement et durablement modifié la composition planctonique puisque, par exemple, les diatomées prédominantes dans les années 1960 sont désormais moins denses et supplantées tout au cours de l'année par des cyanobactéries fixatrices d'azote. Certes les diatomées sont toujours présentes, voire même encore abondantes, mais elles sont beaucoup moins diversifiées, et il y a remplacement des espèces à riche teneur en silice, dominantes dans

4. Le disque de Secchi est un disque blanc et noir tenu horizontalement au bout d'une cordelette et que l'on laisse descendre doucement dans la colonne d'eau. On note la profondeur à laquelle le disque disparaît. C'est la transparence de l'eau exprimée en mètres.

5. On considère qu'un milieu aquatique est mésotrophe lorsque sa teneur en éléments minéraux nutritifs, et en conséquence sa productivité, sont modérées.

les années 1960, par des formes peu riches en silice à l'heure actuelle. Il est d'ailleurs fréquent de constater que l'eutrophisation des lacs est presque toujours accompagnée d'une diminution de la teneur en silice. Quoiqu'il en soit, il semble que la productivité primaire a sensiblement augmenté puisqu'elle est passée, en moyenne, de 7,4 en 1960 à 13,9 en 1990 (en g d'O_2/m^2/jour), soit presque le double (Mugidde, 1993).

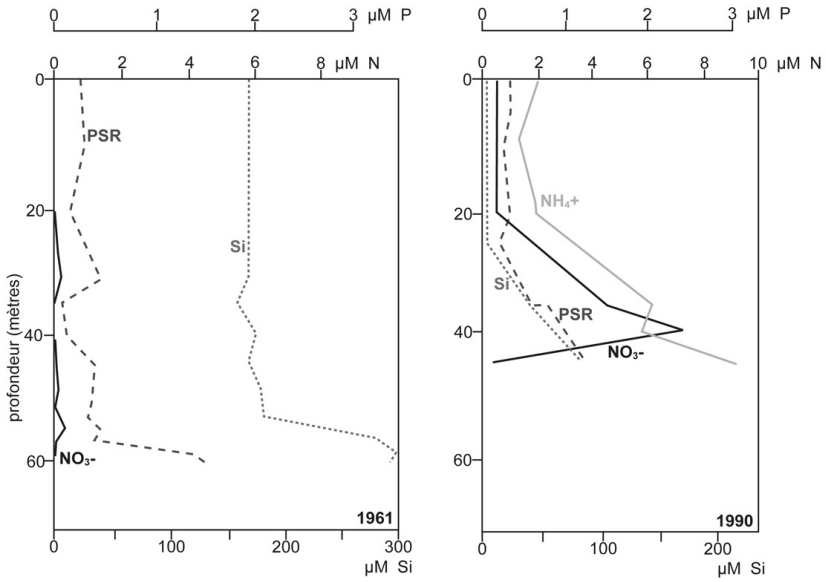


FIGURE 11 – Profils de trois nutriments dans les années 1960 et 1990. On notera l'importante augmentation des concentrations en azote (NO_{-3} et NH_{+4}) et inversement la notable diminution des concentrations en silice (Si). La concentration en phosphore est ici exprimée en Phosphore Soluble Réactif (PSR). Il s'agit essentiellement de phosphate, également appelé orthophosphate (redessiné d'après Bootsma & Hecky, 1993). On voit également que, en 1990, le lac est stratifié et que la consommation en nutriments (plus de photosynthèse) augmente en dessous de 20 mètres

On a longtemps émis l'hypothèse que les introductions d'espèces exotiques de poissons dans les années 1959-1960 pouvaient être la cause de ces changements de concentrations de nutriments et donc de la modification de structure des communautés de phytoplancton. Cependant, force est de constater que l'augmentation de la concentration du phosphore dans les sédiments n'a pas été accompagnée d'une diminution de sa concentration dans la colonne d'eau. Cela signifie donc que les apports du phosphore dans le lac se sont accrus. Même si on n'a pas véritablement de chiffres concernant les apports des affluents, on sait néanmoins que les concentrations en phosphore réactif soluble sont plus importantes en 1990 qu'en 1960 (tableau 5).

Il est curieux de constater que les taux d'azote et de sulfate n'ont pas augmenté de façon aussi importante dans les pluies contrairement aux phosphates qui ne sont pourtant pas particulièrement volatils et qui sont généralement associés à des particules. Cette plus grande charge en particules atmosphériques pourrait, en fait, avoir deux causes principales, le brûlage et l'érosion des sols, toutes deux liées à la déforestation destinée à augmenter les surfaces cultivables et au chauffage (cuisine).

Tableau 5 - Concentrations en nutriments dans les eaux de pluie aux environs du lac Victoria (µmol l-1) (d'après Bootsma & Hecky, 1993)

Année	Azote	Phosphore	Sulfate
1958-1959	64	0,053	19
1991	66	3,4	46

On a parfois suggéré que l'eutrophisation d'un lac pouvait être bénéfique pour les espèces de poissons capables de digérer les cyanobactéries (algues bleues), comme certains tilapias. Toutefois, ces algues bleues sont peu énergisantes pour la plupart des espèces et notamment pour le zooplancton échelon intermédiaire entre le phytoplancton et de nombreuses espèces de poissons. Pour certains (Jonna & Lehman, 2002), l'appauvrissement du nombre d'espèces de poissons phytoplanctonophages a favorisé le développement du phytoplancton avec comme conséquence la croissance de certaines populations de zooplancton herbivores, comme les cladocères. Néanmoins, 85 % du zooplancton est constitué de copépodes. Le zooplancton montre, sur l'ensemble du lac, un cycle vertical nycthéméral [6] bien marqué puisque toutes les espèces migrent vers la surface dès le début ou juste après le crépuscule, pour redescendre vers les couches plus profondes à l'aube. Si comme cela semble s'avérer, les densités de zooplancton ont tendance à croître, il pourrait y avoir une influence positive sur l'extension des espèces de poissons zooplanctonophages.

Références

Bootsma H.A. & Hecky R.E., 1993. Conservation of the African Great Lakes : a limnological perspective. *Conservation Biology*, 7, 3 : 644-656.

Bugenyi F.W.B. & Magumba K.M., 1996. The present physicochemical ecology of Lake Victoria, Uganda : 141–154. *In* Johnson T.C. & Odada E.O. (eds), *The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach Publishers, Overseas Publishers Association, Amsterdam, The Netherlands, 684 p.

Crétaux J.-F. , Jelinski W., Calmant S. , Kouraev A., Vuglinski V., Bergé M., Nguyen , Gennero M-C., Nino F., Abarca Del Rio R., Cazenave A., Maisongrande P., 2011. SOLS : A Lake database to monitor in Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data, *Advances in Space Research*, 47 : 1497-1507 (http ://www-apache.legos.obs-mip.fr/fr/soa/hydrologie/hydroweb/StationsVirtuelles/SV_Lakes/Victoria.html).

Johnson T.C. & Odada E.O., 1996. *The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach Publishers, Overseas Publishers Association, Amsterdam, The Netherlands, 684 p.

Jonna R. & Lehman J.T., 2002. Invasion of Lake Victoria by the large bodied herbivorous cladoceran Daphnia magma : 321-333. *In* Odada E.O. & Olago D.O. (eds), *The East African African Great Lakes : Limnology, Palaeolimnology and Biodiversity*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, Advances in Global Change Research, 12, 586 p.

Kayombo S. & Jorgensen S.E., 2006. *Lake Victoria : experience and lessons learned brief*. ILEC, Lake Basin Management Initiative : 431-446 (http ://www.worldlakes.org/uploads/27_Lake_Victoria_27February 2006.pdf).

6. Le nycthémère désigne une alternance d'un jour et d'une nuit et correspond donc à un cycle de 24 heures.

Kull D., 2006. *Connections between recent water level drops in Lake Victoria, dam operations and drougth* (http ://www.internationalrivers.org/files/attached-files/full_report_pdf.pdf.)

Mugidde R., 1993. The increase in phytoplankton primary productivity and biomass in Lake Victoria (Uganda). *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 25 : 846-849.

Ochumba P.B.O., 1996. Measurement of water currents, temperature, dissolved oxygen and winds on the Kanyan Lake Victoria : 155-167. *In* Johnson T.C. & Odada E.O. (eds), *The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach Publishers, Overseas Publishers Association, Amsterdam, The Netherlands, 684 p.

Odada E.O. & Olago D.O., 2002. *The East African Great Lakes : Limnology, Palaeolimnology and Biodiversity*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, Advances in Global Change Research, 12, 586 p.

Spigel R.H. & Coulter G.W., 1996. Comparison of hydrology and physical limnology of the East African Great Lakes : Tanganyika, Malawi, Victoria, Kivu and Turkana (with references to some North American Great Lakes) : 103-139. *In* Johnson T.C. & Odada E.O. (eds), *The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, 664 p.

Sutcliffe J.V. & Parks Y.P., 1999. *The hydrology of the Nile*. IAHS Press, Wallington, UK, Special Publication n° 5, 179 p.

Talling J.F., 1966. The annual cycle of stratification and phytoplankton growth in Lake Victoria (East Africa). *Internationale Revue des Gesamten HydroBiologie und Hydrogeography*, 51 : 545-621.

Talling J.F. & Lemoalle J., 1998. *Ecological dynamics of tropical inland waters*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 441 p.

Tate E.L., Sutcliffe J.V., Conway D., & Farquharson F., 2004. Water balance of Lake Victoria : update to 2000 and climate change modelling to 2100. *Hydrological Sciences Journal*, 49, 4 : 563-574.

Yin X. & Nicholson S.E., 1998. The water balance of Lake Victoria. *Hydrological Sciences Journal*, 43, 5 : 789-811.