

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

**F.U.L.R.E.A.C.**

FONDATION DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE POUR LES RECHERCHES SCIENTIFIQUES  
AU CONGO ET AU RUANDA-URUNDI

**LE ZOOPLANCTON DES LACS ARTIFICIELS  
DU HAUT KATANGA MÉRIDIONAL,  
ÉTUDE FAUNISTIQUE ET ÉCOLOGIQUE**

PAR

**NOËL MAGIS**

Docteur en Sciences Zoologiques

ÉDITIONS F.U.L.R.E.A.C.  
UNIVERSITÉ DE LIÈGE

—  
1967

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur M. DUBUISSON, Recteur de l'Université et Président de F.U.L.R.E.A.C., pour l'appui et l'intérêt qu'il n'a cessé de me prodiguer depuis qu'il m'a invité à collaborer aux recherches entreprises au Katanga par l'Université de Liège.

C'est avec émotion que j'évoque la mémoire de Monsieur le Professeur H. DAMAS. Il m'a initié à la discipline limnologique en me faisant constamment partager sa grande expérience des eaux lacustres africaines. Pendant mon séjour au Katanga, il a voulu suivre pas à pas l'avancement de mon travail et, à mon retour, a surveillé avec une sollicitude constante le dépouillement et la rédaction de mes observations. Ses encouragements, conseils et critiques restent pour moi autant de marques de l'amitié paternelle qu'il voulait bien me témoigner. C'est à sa mémoire que je dédie respectueusement ce travail.

Il m'est également agréable de remercier :

Monsieur H. BRENY, Professeur à l'Université de Liège et Madame E. DEFRISE-GUSSENHOVEN, attachée au Laboratoire d'Anthropologie de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, qui m'ont aidé à éclaircir certaines questions relevant de la statistique et de la biométrie ;

Monsieur Ch. JEUNIAUX, Chargé de Cours Associé, qui ne m'a pas ménagé son aide et ses conseils pour la présentation finale de mon travail ;

Messieurs A. TOUSSAINT et R. GROSJEAN, préparateurs, qui ont apporté tous leurs soins à l'illustration de ce mémoire.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	9
--------------	---

### Première partie

#### L'environnement « Lac artificiel intertropical », ses caractères physiques et chimiques et leurs variations chronologiques

I. INTRODUCTION	15
II. DESCRIPTION DES HABITATS	
1. Le lac de retenue de la Lufira ou lac de Mwadingusha	15
2. Le lac réservoir de Koni	18
3. Le lac de retenue du Lualaba ou lac de N'Zilo I	19
III. CARACTÈRES PHYSIQUES DES LACS ARTIFICIELS	
1. Le régime hydraulique	23
2. Le cycle thermique	27
IV. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX, VARIATIONS CHRONOLOGIQUES ET STRATIFICATION	
1. Instruments et méthodes	32
2. Lac de retenue de la Lufira	37
A. Les eaux de la Lufira en amont de la retenue	37
B. Les eaux de la retenue proprement dite	44
C. Conclusions	70
3. Réservoir de Koni	72
4. Lac de retenue de N'Zilo I	79
V. POSITION DES LACS ARTIFICIELS PARMIS LES ÉCOSYSTÈMES LACUSTRES	
1. Lacs artificiels et naturels, similitudes et différences	92
2. Caractéristiques particulières des lacs artificiels	94

### Seconde partie

#### Les biocoenoses zooplanctoniques, leur structure, leurs variations chronologiques

I. INTRODUCTION	99
II. MÉTHODES DE RÉCOLTE ET D'ANALYSE DU ZOOPLANCTON	
1. Récolte du matériel	99
2. Examen microscopique du matériel	100
3. Expression des résultats	101
4. Appréciation du degré d'abondance du phytoplancton	102

III. DESCRIPTION DES COMMUNAUTÉS ZOOPLANCTONIQUES	
1. Inventaire faunistique général	102
2. Structure des biocoenoses des trois lacs artificiels	104
3. La biocoenose littorale et la biocoenose des eaux libres de la retenue de Mwadingusha	109
4. Conclusions	111
IV. DYNAMIQUE DES POPULATIONS DES PRINCIPALES ESPÈCES DU ZOOPLANCTON DES TROIS LACS ARTIFICIELS	
1. Phénologie	114
2. Reproduction	118
3. Variations quantitatives des espèces dominantes	126
4. Influence de la stratification des eaux sur la répartition verticale du zooplancton	131
5. Conclusions	134
V. INDICES DE LA PRODUCTIVITÉ BIOLOGIQUE DES LACS ARTIFICIELS DU HAUT KATANGA	
1. Les variations chronologiques du « standing crop »	138
2. Position des lacs artificiels dans la classification trophique des écosystèmes lacustres	144

Troisième partie

**Influence des conditions écologiques sur la morphologie du Rotifère *Brachionus falcatus* Zacharias**

I. INTRODUCTION	151
II. MATÉRIEL ET MÉTHODES	
1. Matériel	153
2. Mensurations	154
3. Échantillonnage	156
III. LIMITES DE VARIABILITÉ DE LA LONGUEUR DE LA LORICA ET DES ÉPINES LOMBAIRES DANS UNE POPULATION	
1. Longueur de la lorica	159
2. Longueur des épines lombaires	161
3. Longueur relative des épines lombaires	162
4. Nature de la relation entre la longueur des épines lombaires et celle de la lorica	164
5. Conclusions	166
IV. VARIATION MORPHOLOGIQUE TEMPORELLE DANS LES POPULATIONS SUCCESSIVES DU BRACHIONUS FALCATUS	
1. Populations originaires de l'exutoire	167
2. Populations originaires du Shangalele	170
3. Conclusions	170

V. INTERPRÉTATION DE LA VARIATION MORPHOLOGIQUE TEMPORELLE	
1. Existence de populations morphologiquement distinctes dans des biotopes voisins	171
2. Évolution croissante des épines chez les femelles de l'exutoire	173
3. Les changements de rythme de l'accroissement des épines	173
VI. DISCUSSION ET CONCLUSIONS	174
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	178
BIBLIOGRAPHIE	186
ANNEXES	191
1. Tableaux	193
2. Planches	

## INTRODUCTION

« L'Afrique orientale a aujourd'hui la chance de pouvoir organiser son avenir scientifiquement, c'est-à-dire écologiquement. Si elle ne veut pas perdre cette chance, elle doit rapidement faire une étude générale de l'utilisation de la contrée afin d'avoir une base pour le plan d'organisation et la politique d'utilisation du pays. »

Sir Julian HUXLEY,  
(Endeavour, 1962).

En face de la marée montante de populations humaines déjà sous-alimentées, « l'espoir des hommes » (DUVIGNEAUD et coll., 1962) réside dans un accroissement sans délai de la productivité de la biosphère. Les moyens immenses que la Science moderne met à la disposition de l'humanité peuvent certainement contribuer à augmenter les ressources alimentaires. On en veut pour preuve le fait que le monde scientifique a justement choisi la productivité biologique comme thème central du Programme Biologique International. A côté de travaux poursuivis dans les laboratoires spécialisés, ce programme prévoit également des recherches coordonnées au contact immédiat des différents types de milieux. Celles-ci auront comme but essentiel de définir les conditions optimales et les modalités d'exploitation des ressources alimentaires traditionnelles ou nouvelles offertes par ces mêmes milieux.

Dans les régions où règne la malnutrition, la pêche et la pisciculture couvrent ou peuvent couvrir une part importante des besoins alimentaires des populations. Elles le peuvent d'autant mieux que l'exploitation du poisson fait très souvent partie intégrante de leurs activités coutumières.

Les eaux douces représentent un des grands types d'environnement de la biosphère et la limnologie constitue certainement aujourd'hui un des chapitres les mieux connus de l'écologie dynamique. On ne peut cependant pas ignorer deux faits fort importants. Tout d'abord, c'est sur les bords du Léman que FOREL, à l'aube de ce siècle, a jeté les bases scientifiques de cette science. En second lieu, c'est en Europe également que sont nées les notions de « production » et de « productivité » des eaux naturelles. Les recherches hydrobiologiques dans les zones tropicales

trouvent par conséquent leur justification à la fois sur le plan de leur application et sur celui des connaissances théoriques.

Par ses recherches dans les lacs de l'Archipel de la Sonde, RUTNER (1931) a inauguré l'étude de la biologie lacustre des régions chaudes du globe. Cependant, si les explorations se sont multipliées depuis, les observations s'évalent souvent sur des périodes de temps trop courtes. Dans ces régions où les différences climatiques ne sont ni aussi tranchées ni aussi familières que sous nos latitudes, les connaissances des cycles chronologiques demeurent encore fragmentaires. Celles-ci sont pourtant fondamentales si l'on veut préciser correctement la productivité biologique de ces milieux et assurer la rentabilité de l'exploitation des ressources qu'ils peuvent fournir. Ce sont, par ailleurs, les grands lacs qui ont attiré les principales missions d'exploration, tandis que l'étude des pièces d'eau peu profondes demeure largement inédite.

Parmi les recherches que la Fondation de l'Université de Liège pour les recherches scientifiques en Afrique Centrale (F.U.L.R.E.A.C) a entreprises au Congo, figurait l'étude de trois lacs de barrage. Ces réservoirs, construits exclusivement à des fins industrielles, sont devenus assez fortuitement des centres de pêche importants dont l'activité restait néanmoins entièrement subordonnée aux impératifs de l'exploitation industrielle des retenues.

C'est au regretté Professeur H. DAMAS que Monsieur le Recteur DUBUISSON, Président de F.U.L.R.E.A.C., confia la responsabilité des études limnologiques projetées par cet organisme. C'est également sous la direction de Monsieur DAMAS que nous avons prospecté pendant deux ans les différents lacs de retenue et que nous avons réalisé ensuite le long travail de coordination et de synthèse des résultats. Dans deux rapports antérieurs (GOORTS, MAGIS et WILMET, 1961 ; MAGIS 1961a), nous avons exposé les différentes questions intéressant les aspects dynamiques et descriptifs de la faune ichthyologique et de son exploitation. Les recherches complémentaires de RUWET (1961) ont définitivement précisé les conditions optimales qui doivent être réunies pour exploiter rationnellement les populations des deux poissons économiquement les plus intéressants (*Tilapia macrochir* BOULANGER et *T. melanopleura* DUMESNIL), tout en assurant le renouvellement régulier de leur stock.

Le *Tilapia macrochir*, qui représente à lui seul 80 à 95 % de la production commercialisée, est un poisson planctonophage et est donc directement tributaire de la biomasse planctonique. D'autres motifs justifiaient d'ailleurs d'accorder une attention toute spéciale au plancton de ces lacs artificiels. Le plancton, en effet, est l'association animale et

végétale dont la densité s'apprécie le plus aisément. D'autre part, sa composition qualitative, ses fluctuations chronologiques comme sa répartition verticale reflètent particulièrement bien l'influence des conditions du milieu sur les organismes.

Quand on consulte les comptes-rendus des explorations hydrobiologiques qui se sont succédées en Afrique et notamment dans notre ancienne colonie, on remarque que les chapitres traitant du plancton l'envisagent bien plus souvent comme un ensemble d'individus (biomasse), que d'une biocoenose faite de populations d'espèces distinctes qui réagissent, tant entre elles qu'à leur environnement, selon des normes qui leur sont propres. Dans cette optique, l'étude du plancton exige assurément certaines précautions dans le choix des méthodes de récolte et réclame surtout plus de soins et de temps pour les inventorier. Ces efforts sont très largement compensés par les précisions importantes qu'ils apportent à l'enquête. Il est matériellement impossible d'étudier simultanément le phytoplancton et le zooplancton de façon aussi détaillée ; aussi nous sommes-nous limités au zooplancton. Le phytoplancton, au travers duquel se reflète la productivité primaire des milieux lacustres, a été examiné superficiellement. Nous n'étions d'ailleurs pas équipé matériellement pour aborder ce problème important à l'aide des techniques adéquates. Malgré l'absence de données numériques sur la productivité primaire, l'analyse critique et comparée de toute une série de faits permettra cependant d'obtenir une idée approchée des capacités de production biologique des lacs artificiels. C'est là, d'ailleurs, la conclusion escomptée d'une mission qui, malgré sa durée, n'en avait pas moins un caractère exploratoire.

Avant d'aborder l'étude des biocoenoses planctoniques, il convenait de définir préalablement les principaux facteurs de leur environnement et surtout de préciser l'étendue de leurs variations chronologiques. Étant donné l'origine récente et artificielle des milieux, il était en outre important de rechercher dans ces variations la part relevant de l'exploitation et celle attribuable aux modifications des facteurs climatiques. L'ensemble de ces questions fait l'objet de la première partie du travail.

La composition, la structure, la densité des populations zooplanctoniques et leur évolution chronologique respective sont analysées dans la seconde partie du mémoire. Les faits établis dégageront les traits communs et les particularités des différents lacs étudiés. Ils donneront également une idée de la richesse des eaux en organismes et permettront de situer les trois retenues dans la classification synécologique des écosystèmes lacustres.

Bon nombre d'espèces d'algues et d'animaux planctoniques manifestent des variations morphologiques en rapport avec les modifications des conditions écologiques. Ce phénomène, qualifié fréquemment de « cyclomorphose » en raison de sa périodicité, a été fort étudié dans les régions tempérées, mais on ne possède pas encore d'informations détaillées sur les espèces peuplant les eaux tropicales. L'abondance de nos récoltes et surtout leur étalement dans le temps nous ont incité à aborder l'étude morphométrique d'une espèce de Rotifère dans le but de savoir quels étaient les facteurs susceptibles de modifier son expression morphologique. On trouvera les résultats de cette enquête dans la troisième partie du travail.

PREMIÈRE PARTIE

L'ENVIRONNEMENT « LAC ARTIFICIEL INTER-  
TROPICAL », SES CARACTÈRES PHYSIQUES ET  
CHIMIQUES ET LEURS VARIATIONS  
CHRONOLOGIQUES

« A clear comprehension of habitat relationships requires a separate estimate of the responsible factors. Whereas it may be true enough that the living community as a whole is the best indicator of the total prevailing conditions, it must be correlated with a certain conjunction or alignment of physical factors. »

F. DANSEREAU, 1957.

## I. INTRODUCTION

Avant d'aborder l'étude de la composition, de la structure et de la dynamique des populations zooplanctoniques et d'analyser les causes de leur répartition dans l'espace et dans le temps, il est nécessaire de donner d'abord une définition de l'environnement avec lequel ces organismes sont, de façon directe ou indirecte, en relation d'échange perpétuelle. Cette définition se fera en trois étapes. En premier lieu, chacune des trois retenues sera décrite en insistant plus particulièrement sur ses caractères physiographiques et en soulignant l'intérêt qu'elle présente au point de vue écologique. En second lieu, seront envisagées les variations périodiques de leurs principales caractéristiques physiques. On analysera ensuite les variations de la composition chimique de leurs eaux. En possession de ces arguments, on cherchera à situer les lacs de retenue katan-gais dans l'ensemble du système lacustre.

## II. DESCRIPTION DES HABITATS

### 1. — Le lac de retenue de la Lufira ou lac de Mwadingusha (fig. 1)

La zone inondée par le barrage de la Lufira aux Chutes Cornet s'étale entièrement dans une plaine alluviale ancienne, principale dépression du complexe des plaines de la Lufira supérieure. La documentation sur la situation de cette plaine avant son inondation en 1926 est sommaire. Cependant, en confrontant maints détails de toponymie, quelques renseignements épars fournis par la société exploitante et par des autochtones âgés, en examinant les détails que font apparaître les levés aériens photographiés aux basses eaux, en envisageant, enfin, le mode actuel d'alluvionnement de la Lufira lorsqu'elle pénètre dans la retenue, on peut accepter l'opinion émise par BETTE (1931). D'après cet auteur, cette plaine alluviale largement arrivée à sa maturité, était sillonnée par le réseau ramifié et sinueux des méandres de la rivière et de ses nombreux petits affluents. Elle se présentait, en somme, comme une mosaïque de dépressions séparées par de faibles reliefs où s'isolaient des marécages et des étangs naturels.

Sous leur forme actuelle, les rives du lac dessinent schématiquement un parallélogramme. La Lufira y pénètre par un petit delta et le traverse suivant une diagonale longue d'une vingtaine de kilomètres et orientée S.W.-N.E. Ce vaste plan d'eau se complète par un étroit chenal méandrique, d'une quinzaine de kilomètres, qui vient buter contre le barrage érigé immédiatement en amont des chutes de Mwadingusha (Chutes Cornet), hautes de 115 mètres.

Comparé aux sites habituellement choisis pour assurer la réserve énergétique des centrales hydroélectriques, celui du lac de la Lufira est assez inhabituel. La profondeur du lac, tout d'abord, est extrêmement faible. Au niveau maximum (cote 210,05 correspondant à une altitude de 1.105,7 mètres), elle est en moyenne de 2,60 m. seulement ; 70 % de la superficie du lac ont alors moins de trois mètres de profondeur et 95 % moins de quatre mètres. La physiographie du bassin lacustre se caractérise en outre par une particularité fort importante, qui ressort immédiatement de l'examen des courbes bathymétriques des surfaces et des volumes (voir fig. 2). Ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le souligner (MAGIS, 1962), le volume d'eau s'accroît régulièrement avec la profondeur, mais la courbe figurant les augmentations de surface est loin de présenter la même continuité. Comme on le remarque, entre la cote 208,5 et le niveau maximum, la superficie du plan d'eau passe seulement de 360 à 410 km<sup>2</sup> ; cette augmentation comparativement plus faible se traduit par une nette inflexion de la courbe bathymétrique des surfaces. Il en résulte que la surface mise à nu chaque année est susceptible de varier *brutalement* et *considérablement* suivant que la cote critique de 208,5 est ou non dépassée à la décrue.

La morphométrie assez particulière du lac de retenue de la Lufira a pour conséquence :

1° un morcellement de la cuvette lacustre en petits bassins plus ou moins autonomes ;

2° une extension considérable de la zone littorale aux dépens des régions typiquement pélagiques et, par conséquent, une restriction au sens du mot « lac » applicable à la retenue ;

3° l'absence de toute solution de continuité entre le plan d'eau et les nombreux marais fort étendus qui bordent une partie importante de sa périphérie.

Ces divers aspects purement géographiques constituent un ensemble de conditions extrêmement favorables à l'implantation d'une biocoenose

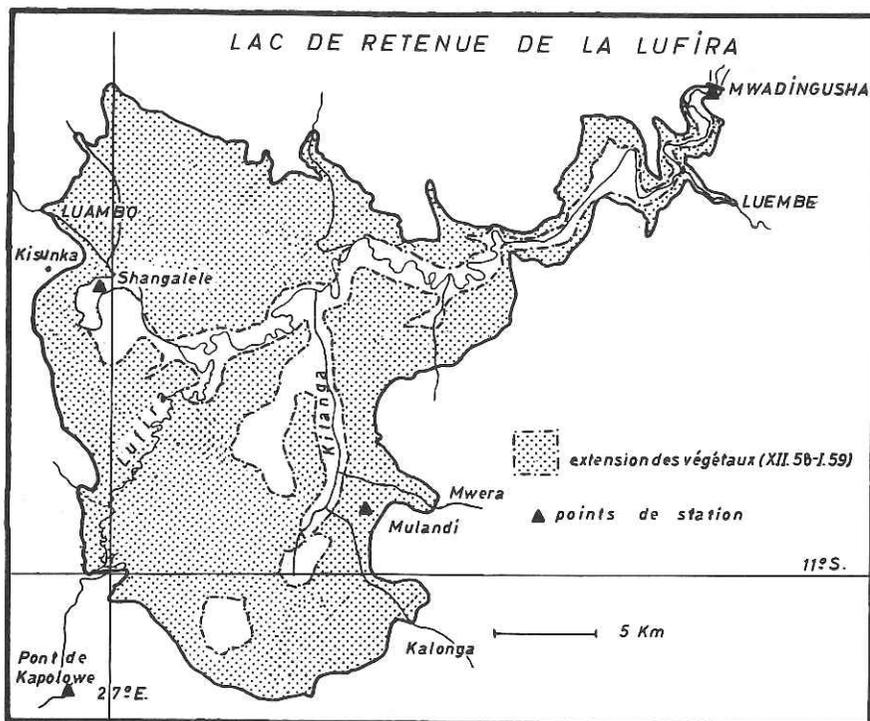


Fig. 1. — Retenue de la Lufira

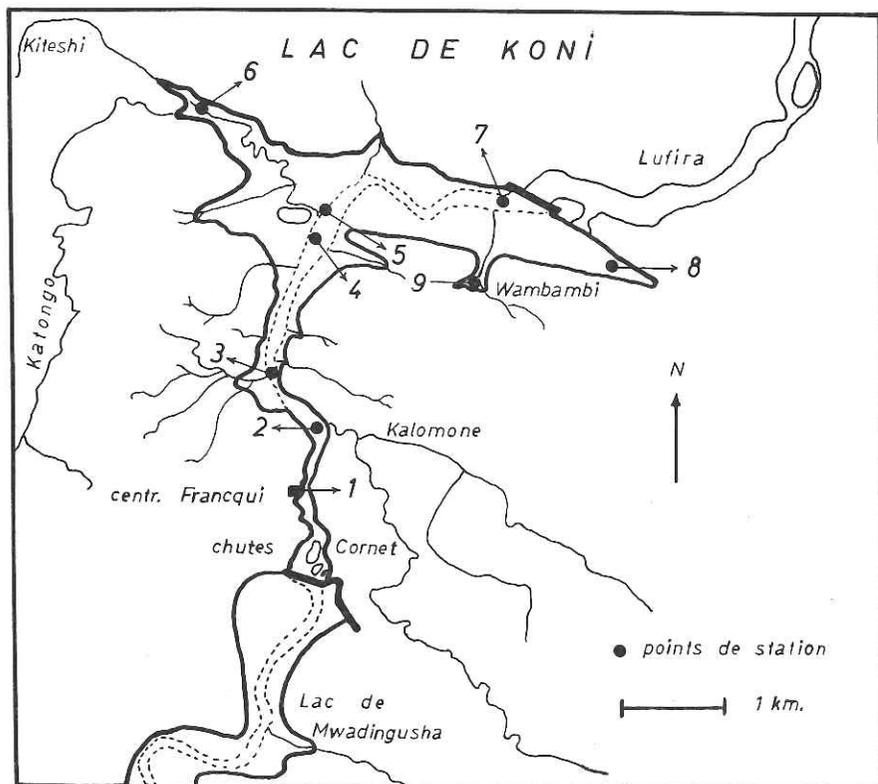


Fig. 3. — Réservoir de Koni

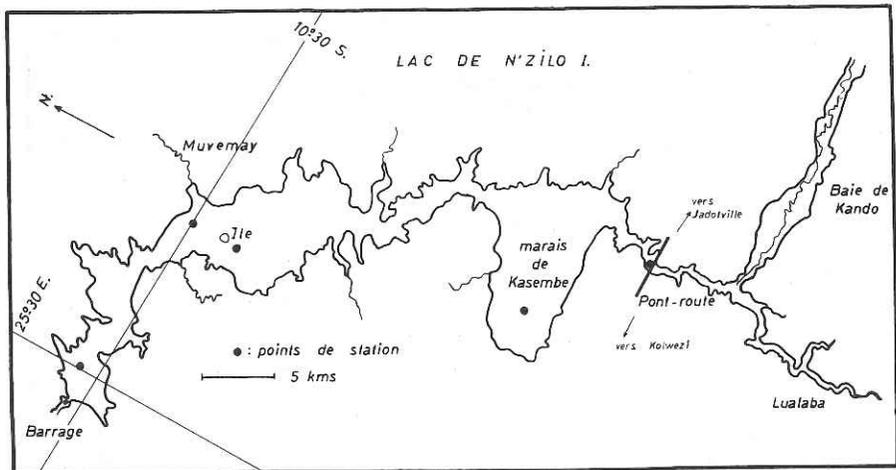


Fig. 4. — Retenue du Lualaba

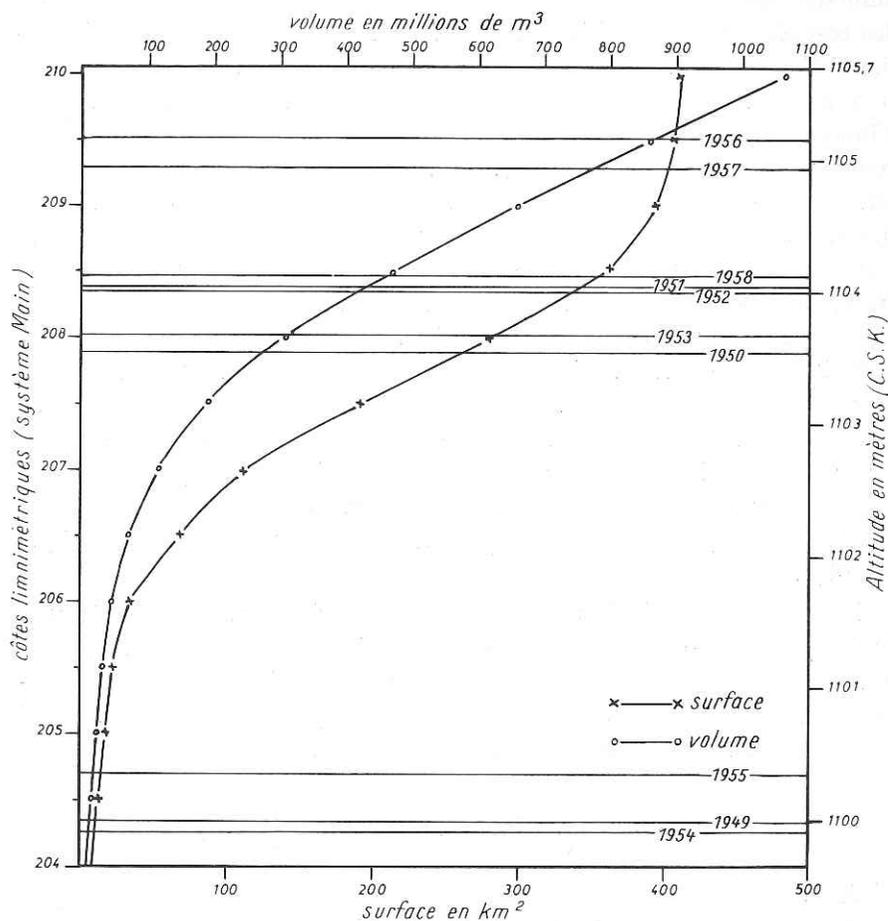


Fig. 2. — Variations de la surface et du volume de la retenue de la Lufira en fonction du niveau (d'après les documents de la société exploitante). Les cotes d'étiage pour la période 1949-1958 sont également renseignées sur ce graphique (MAGIS, 1962).

végétale constituée de plantes supérieures, au demeurant banales et coutumières des milieux humides katangais. Les espèces du genre *Typha*, *Leersia*, *Oryza* et *Vossia* en constituent les éléments dominants les plus caractéristiques. L'écologie des différents faciès botaniques du lac a été analysée par NASSOGNE (in DAMAS, MAGIS et NASSOGNE, 1959) et par VINCKE (1959).

Leurs observations montrent qu'à la décrue, ces végétaux colonisent

immédiatement les sédiments mis à nu et constituent, à partir des rives, des roselières et des prairies très touffues. En phase de crue, ces formations, d'abord immergées, peuvent se détacher du fond avec leurs racines et leurs rhizomes et venir ensuite flotter en surface. Il se forme ainsi d'immenses prairies flottantes qui dérivent sur le plan d'eau au gré des vents et des courants lacustres. Adaptées à ces conditions nouvelles, elles sont capables de subsister un certain temps sous cet état flottant. Si les circonstances s'opposent à leur réancrage, les végétaux subissent une lente dégénérescence, suivie de la décomposition rapide des chaumes fanés, des rhizomes et des racines mortes. La prairie, précédemment vivace, finit par sombrer, couvrant le fond du lac d'amas organiques partiellement putréfiés. Mais au contraire, lorsque les conditions permettent à ces îlots ou ces coussins de reprendre contact avec le sol, ils régénèrent très rapidement et cette nouvelle croissance prolonge d'autant leur cycle vital. Les études précitées prouvent clairement que l'extension de cette végétation dépend directement des variations du niveau du plan d'eau, particulièrement lorsque celui-ci descend sous la cote critique de 208,5.

L'extension formidable prise, certaines années, par cette végétation semi-aquatique <sup>(1)</sup> et les conséquences qu'elle exerce sur la composition et la richesse en plancton des eaux de la retenue font que tous les problèmes du lac Mwadingusha doivent être envisagés en fonction du degré variable d'extension de cette végétation littorale.

## 2. — Le lac réservoir de Koni (fig. 3)

Après la traversée de la « cluse » des Chutes Cornet (ROBERT, 1956), la Lufira poursuit son trajet au travers des Monts Koni en dévalant une série de rapides. En 1949, le cours de la rivière a été barré en amont de ces rapides de façon à récupérer les eaux de la Lufira après leur passage dans les turbines de la centrale FRANCOU. Ce lac réservoir s'étale entre de hautes collines. Sa forme rappelle celle d'un « T » dont la branche verticale, orientée SSW-NNE, correspond à l'ancien lit rocheux de la rivière. Très étroite, elle compte pourtant des profondeurs de l'ordre de 6 à 7 mètres. Trois kilomètres en aval, la Lufira s'infléchit vers l'Est. L'axe qu'elle forme avec l'un de ses anciens affluents (la Katongo) est

(1) Elle couvrait 90 % de l'ensemble de la superficie du lac en 1957 (DAMAS, in F.U.L.R.E.A.C, 1957), 60 % encore, lorsque nous avons quitté le Katanga en septembre 1959.

orienté ESE-WNW et correspond à la branche horizontale du « T », longue de cinq kilomètres environ. Non loin des berges, la sonde mesure très rapidement des profondeurs comprises entre 8 et 10 mètres ; la profondeur maximum est de 16 mètres dans le lit de la Lufira, à l'aplomb du barrage.

La surface du lac (4,5 km<sup>2</sup>) est 90 fois plus faible que celle du lac de Mwadingusha. Outre cette différence de superficie, le bassin du réservoir se distingue de celui de Mwadingusha par les caractères suivants :

1° étalé entièrement dans un site de collines assez élevées, la cuvette est plus encaissée et sa profondeur moyenne sensiblement plus grande que celle de la retenue de la Lufira,

2° ses berges, souvent accores, limitent l'importance des zones littorales par rapport aux régions typiquement pélagiques ; de plus, l'abrupt des rives s'oppose à l'installation et à l'extension des groupements végétaux rencontrés en amont des Chutes Cornet,

3° étant un bassin de récupération, le réservoir de Koni fonctionne à niveau pratiquement constant ; la stabilité du plan d'eau est un autre facteur limitant l'extension de la végétation riveraine.

On retrouve à Koni une végétation semi-aquatique tout à fait semblable à celle observée en amont ; les rives basses caractérisant le fond de certaines baies sont ceinturées de *Typha* ancrés. La branche verticale du « T » est encombrée d'îlots flottants originaires de l'amont ; ils y sont, en effet, basculés au travers des chutes lors des ouvertures des vannes de crue ; ils subsistent à Koni en usant de leurs possibilités temporaires de régénération.

L'intérêt de l'étude hydrobiologique du réservoir de Koni réside dans le fait qu'il est alimenté en permanence par des eaux salies en amont par un contact plus ou moins prolongé et plus ou moins intime avec les végétaux. Comme la surface du réservoir est elle-même relativement libre, il est ainsi possible de connaître et de préciser quantitativement les modifications nouvelles que subissent ces eaux, aussi bien sous l'angle de leur composition chimique que sous celui de leur composition en plancton.

### 3. — Le lac de retenue du Lualaba ou lac de N'Zilo I

(fig. 4)

Le plan général de la retenue du Lualaba est tout à l'opposé de celui de la Lufira. Il s'agit d'une zone d'inondation étirée et serpentiforme

qui suit pratiquement l'ancienne vallée du fleuve (1). Le lac actuel est assez encaissé. Des berges rocheuses, à pente assez raide, forment une partie importante de son périmètre. Exception doit toutefois être faite pour les régions de Kazembe et de Kando. La première, située dans le second tiers du lac, se présente comme une très grande baie triangulaire dont l'axe est perpendiculaire au lit du fleuve. Les rives y sont basses et largement colonisées par une ceinture de végétation palustre ancrée où dominent *Typha* et *Polygonum*. La seconde, localisée à la tête amont de la retenue, est un affluent permanent de la rive droite du Lualaba. Par suite de l'élévation du niveau du plan d'eau, la région où les eaux de la Kando confluent dans le Lualaba a acquis le faciès d'une baie étroite, étirée et peu profonde, colonisée sur ses rives par les végétaux palustres.

La zone d'inondation couvre une superficie de 217km<sup>2</sup> ; sa profondeur moyenne est de 8,2 mètres au niveau maximum, mais est comprise entre des valeurs extrêmes fort étendues. Ainsi, depuis la baie de Kazembe jusqu'à l'entrée des gorges, l'ancienne plaine est couverte d'une couche d'eau dont l'épaisseur passe progressivement de 15 à 45 mètres, atteignant même 55 mètres à l'aplomb du barrage. A l'exception des baies de Kando et de Kazembe, l'importance des régions littorales est faible étant donné les caractères physiographiques propres de ce bassin lacustre.

L'intérêt de l'étude hydrobiologique du lac de N'Zilo I apparaît :

1° par le fait qu'il s'agit d'une eau apparemment plus propre que celle de la retenue de la Lufira, puisqu'elle n'a pas l'occasion d'être souillée par des masses végétales en putréfaction ;

2° parce que le lac artificiel est comparativement beaucoup plus jeune que celui de Mwadingusha : mis sous eau en 1952, ce n'est qu'en 1956 qu'il a été comblé pour la première fois ;

3° du fait que sa profondeur moyenne est plus élevée que celle de la retenue de la Lufira, on peut, à première vue, le qualifier de « lac » et non d'étang, sinon de marécage.

Les principales caractéristiques géographiques, physiographiques et hydrauliques des trois lacs artificiels étudiés sont réunies dans le tableau comparatif suivant.

(1) D'après ROBERT (1956), la zone d'inondation actuelle occuperait l'emplacement d'une expansion lacustre quaternaire. Cette dernière aurait été formée à la suite de mouvements tectoniques qui, à N'Zilo, auraient mis en place une barre rocheuse. Le Lualaba y aurait creusé ultérieurement les gorges qui se voient aujourd'hui.

TABLEAU I  
Caractéristiques diverses des lacs artificiels.

	Retenue de la Lufira (l. de Mwadingusha)	Réservoir de Koni (l. de Koni)	Retenue du Lualaba (l. Delcommune ou de N°Zilo 1)
Position géographique	27° long. E., 11° lat. S. — 1.100 m.	27,15° long. E., 10,45 lat. S. — 985 m.	25,30° long. E., 10,30° lat. S. — 1200 m.
Mise sous eau	1930 le barrage actuel résulte de plusieurs rehaussements successifs	1949	1952 achevée pour la première fois en 1956
Forme du lac	Parallélogramme dont la diagonale est longue de 25 km. prolongé par un chenal étroit et méandreux.  rives basses, densément colonisées par une végétation semi-aquatique	forme d'un T dont la branche verticale correspond à l'ancien lit encaissé de la Lufira  très encaissé, berges accores, végétaux, surtout issus de l'amont, dans le lit de la Lufira.	étirée et sinueuse, s'ouvrant dans son second tiers dans la baie de Kazembe, prolongée par la baie de Kando dans sa partie amont. rives basses dans ces baies, colonisées par une végétation semi-aquatique peu dense, berges généralement accores partout ailleurs.
Mode d'alimentation	Lufira  apports faibles et temporaires de petits affluents dont la plupart filtrent au travers de marécages	eaux de la Lufira turbinées à la centrale de Mwadingusha, déversement éventuel des eaux du lac de Mwadingusha  apports faibles et temporaires de petits affluents	Lualaba  apports réguliers mais faibles de la Kando, faibles et temporaires de petits affluents.
Superficie (au niveau maximum)	410 km <sup>2</sup>	4,5 km <sup>2</sup>	217 km <sup>2</sup>
Volume (au niveau maximum)	1.063.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	16.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1.773.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>

	Retenue de la Lufira (l.de Mwadingusha)	Réservoir de Koni (l. de Koni)	Retenue du Luaba (l. Delcommune ou de N'Zilo I)
Profondeur maximum	14 m	16,5 m	55 m
Profondeur moyenne	2,6 m	env. 4 m	8,3 m
Position de la prise d'eau	colonne d'eau comprise entre la surface et la cote 203, 7 m en dessous du niveau maximum	colonne d'eau dont le seuil est situé 3,5 m en dessous du niveau maximum	peruis de 6 m. de diamètre, situés en profondeur entre les cotes 1.226 et 1.220 m, 20 m en dessous du niveau maximum.
Variations du niveau du plan d'eau	très étendues d'une année à l'autre	pratiquement nulles	très étendues d'une année à l'autre

### III. CARACTÈRES PHYSIQUES DES LACS ARTIFICIELS

Pour comparer les retenues entre elles et les situer dans la classification générale des lacs, il était nécessaire d'effectuer régulièrement la mesure de certains caractères physiques. En raison de leur origine artificielle, une attention toute spéciale a été accordée à leur régime hydraulique. D'autre part, étant donné le rôle primordial de la température, une part importante de notre activité a été consacrée à l'étude du cycle thermique annuel des trois lacs.

L'analyse du régime hydraulique s'appuie entièrement sur les relevés limnimétriques effectués quotidiennement par la SOGEFOR et collationnés dans les archives de cette société. Pour la thermométrie, nous avons utilisé un électrothermomètre « Thermistor », construit dans les ateliers du Service d'Ecologie selon les indications de MORTIMER et MOORE (1953). L'appareil était étalonné tous les deux mois en se référant aux mesures données par un thermomètre contrôlé à mercure gradué au 1/20° C. Dans les endroits trop peu profonds, on s'est servi d'un thermomètre bimétallique à cadran, intercalé sur le courant d'aspiration d'une pompe à main (DAMAS, 1954). Cet instrument, un peu moins précis que l'électrothermomètre, permet cependant d'estimer la température au 0,1° C, précision largement suffisante pour le genre de notre étude.

### 1. — Le régime hydraulique

Le niveau d'un lac naturel est soumis à des variations saisonnières qui dépendent principalement des facteurs et des éléments climatiques locaux ainsi que de la nature de leur bassin de drainage (HUTCHINSON, 1957). Dans les réservoirs hydroélectriques, au contraire, le niveau du plan d'eau est régularisé : la cote maximum y représente un point fixe et les oscillations du plan d'eau dépendent étroitement du mode d'exploitation de la réserve d'eau accumulée en amont du barrage. Certaines centrales hydroélectriques sont établies en vue d'une production électrique de pointe ou d'appoint et fonctionnent donc fort irrégulièrement. Cette irrégularité se traduit par des variations amples et rapides du plan d'eau selon une fréquence absolument arbitraire. Les Membres de la Commission d'Étude du lac d'Eguzon ont montré les profondes répercussions qu'un tel type d'exploitation exerçait sur l'évolution biologique de cette retenue (1956). Dans les lacs artificiels katangais, au contraire, la production de houille blanche est non seulement continue, mais encore assez semblable d'une année à l'autre, de sorte que la consommation d'eau est tout à fait régulière. Entre le type d'exploitation de la retenue d'Eguzon et celui des lacs de Mwadingusha et de N'Zilo peuvent s'inscrire de nombreux intermédiaires qui, au point de vue de l'évolution des masses d'eau, représenteront autant de cas particuliers.

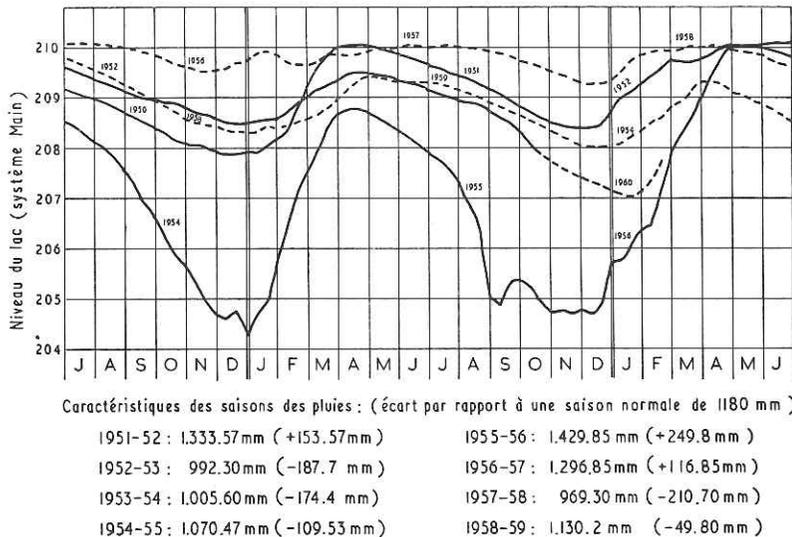


Fig. 5. — Variations du niveau du plan d'eau de la retenue de la Lufira. Période de référence comprise entre juillet 1950 et février 1960. (MAGIS, 1961 b)

Les fig. 5 et 6, ci-dessus, collationnent les relevés limnimétriques étalés sur une dizaine d'années (Mwadingusha, fig. 5) et depuis la mise sous eau de la retenue de N'Zilo (fig. 6). Nous résumerons ici les observations détaillées dans deux publications antérieures (MAGIS, 1961b, 1962).

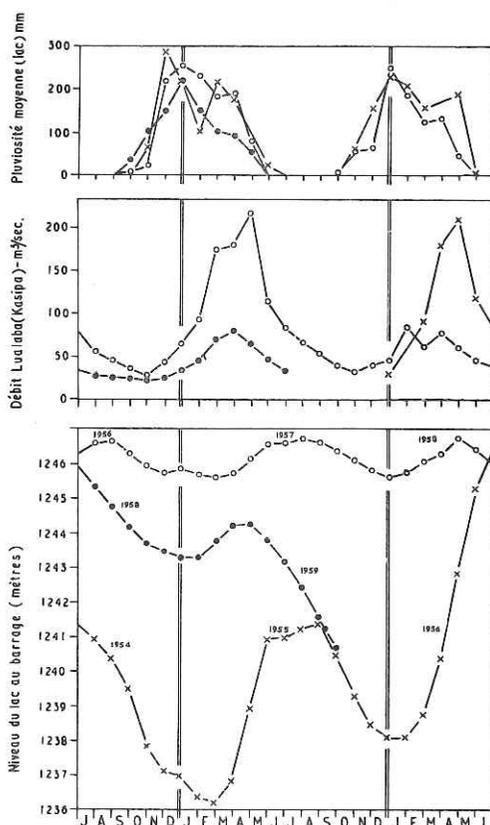


Fig. 6. — Rapports entre la pluviosité, le débit du Lualaba et le niveau du lac de N'Zilo I (MAGIS, 1961 b).

1° En raison du caractère continu de l'exploitation industrielle, le niveau des eaux subit des fluctuations *saisonnnières*, directement en rapport avec la pluviosité et le débit des rivières affluentes (fig. 6) :

— la crue débute habituellement à la fin-décembre, au moment où la cote udométrique tend vers son maximum ; elle s'achève généralement à la mi-avril, à la fin de la saison des pluies. La crue peut être précoce (novembre 1956, fig. 5) ou tardive (janvier 1960, fig. 5) ;

- l'étale est de durée très variable, tantôt il ne se manifeste pas (1955, fig. 5), tantôt il est très long (1956, fig. 5). Dans ce dernier cas, les lacs présentent ainsi une phase de hautes eaux qui empiète largement sur la saison sèche ;
- la décrue s'achève en décembre, à la fin du premier tiers de la saison des pluies. Cet écart, un peu inattendu, s'explique du fait que les premières pluies sont assez locales et surviennent en outre à une époque où l'évaporation atmosphérique reste voisine de son maximum. Le ruissellement des eaux météoriques est par conséquent limité et incapable d'influencer déjà le régime des affluents.

2° En raison du caractère continu de l'exploitation de la réserve, l'amplitude des variations saisonnières du plan d'eau peut également être très variable d'une année à l'autre. Les courbes des années 1955-56 et 1956-57 (fig. 5) expriment clairement la rupture d'identité pouvant survenir entre deux cycles successifs.

3° En comparant l'amplitude des variations du plan d'eau à la valeur des cotes udométriques correspondantes inscrites sous le fig. 5, on constate immédiatement que les fluctuations du niveau sont directement tributaires de la pauvreté ou de l'abondance des pluies.

Afin de mieux comprendre les chapitres suivants, il est utile de situer la période de nos observations dans le cadre des facteurs qui viennent d'être envisagés.

a. *Le lac de retenue de la Lufira* : ainsi que nous l'avons signalé précédemment (p. 18), l'aspect du lac et la composition des biocoenoses végétales qui l'occupent peuvent varier considérablement d'une année à l'autre par suite de la rupture d'identité des cycles successifs du niveau du plan d'eau. A la suite de trois saisons des pluies nettement déficitaires (cf. fig. 5, années 1952-53, 1953-54 et 1954-55), la retenue n'a pu être comblée. En outre, en douze mois, le niveau est tombé deux fois consécutivement sous la cote 205 (novembre 1954-janvier 1955 d'une part, octobre-décembre 1955 d'autre part). Ces chutes de 5 mètres, réduisant la surface du lac à moins de 20 km<sup>2</sup>, correspondent à une vidange pratiquement complète de la retenue. Toutes les conditions ont donc été réunies à ces époques pour favoriser la prolifération massive de la végétation à partir des énormes surfaces exondées. La cote maximum est atteinte à nouveau en 1956. Cette crue rapide et continue est suivie d'une très longue période d'étale (4 mois). La végétation ancrée ou semi-ancrée est noyée mais s'adapte à ces nouvelles conditions. 90 % de la surface du

plan d'eau revenue à 410 km<sup>2</sup> (DAMAS, 1957) se couvrent dès lors de prairies et d'îlots flottants. La saison 1956-57, également bénéfique, limite la décrue à 50 cm seulement et l'étalement se prolonge sur trois mois. Notre période d'observation commence en septembre 1957, au début de la décrue qui, dans les mois suivants, ne dépassera pas un mètre. La saison des pluies 1957-58 est déficitaire, mais les pertes d'eau sont limitées par les bénéfices antérieurs et la décrue se limite à 1,5 m. La cote udométrique 1958-59 est légèrement déficitaire par rapport à la normale et ne permet pas de combler entièrement la retenue. Notre période d'observation s'achève en septembre tandis que le niveau connaît une décrue plus sensible : la cote d'étiage de 206, 97 est atteinte le 31 janvier 1960 (RUWET, 1963).

La période comprise entre septembre 1957 et septembre 1959 peut donc se caractériser comme suit :

- au point de vue de la pluviosité : deux saisons déficitaires ;
- amplitude des variations du niveau : très faible mais normale et toujours inférieure au seuil critique de 208,5 — un très long étalement suivi d'un très court l'année suivante ;
- développement de la végétation : le maintien d'un plan d'eau élevé a favorisé l'élimination progressive de la végétation flottante (voir note infra-paginale, p. 18).

b. *Lac de N'Zilo I* : les facteurs climatiques affectent le bassin versant du lac de la même façon que celui de la retenue de la Lufira (MAGIS, 1962). La période de travail présente les caractéristiques suivantes :

- pluviosité : deux saisons déficitaires ;
- régime hydraulique : variation de faible amplitude en 1957-58, plus accentuée en 1958-59 ; le début de nos observations (octobre 1957) se situe immédiatement après le premier comblement du lac ;
- développement de la végétation : très faible colonisation au sommet des baies exondées en 1958-59 (observations limitées à la baie de Kazembe).

c. *Lac de Koni* : ce réservoir est conçu comme un simple bassin d'accumulation, le niveau de son plan d'eau reste par conséquent pratiquement constant en toute saison. Des manœuvres techniques d'entretien y déterminent occasionnellement des baisses rapides du plan d'eau. Comme elles sont toujours suivies d'un retour aussi rapide à la normale, les effets biologiques de ces fluctuations peuvent être considérés comme mineurs.

## 2. — Le cycle thermique

### a. — Les variations de la température en surface

En comparant les fig. 7 (Mwadingusha) et 8 (Koni et N'Zilo), on remarque immédiatement que les variations de la température des eaux de surface y ont une périodicité identique, laissant apparaître les étapes successives suivantes :

a. une période de réchauffement : débute en août, dans la seconde moitié de la saison sèche, couvre les mois de septembre et d'octobre et s'achève en novembre, au moment où les pluies deviennent abondantes. Le réchauffement de l'eau correspond à celui de l'atmosphère, mais il est

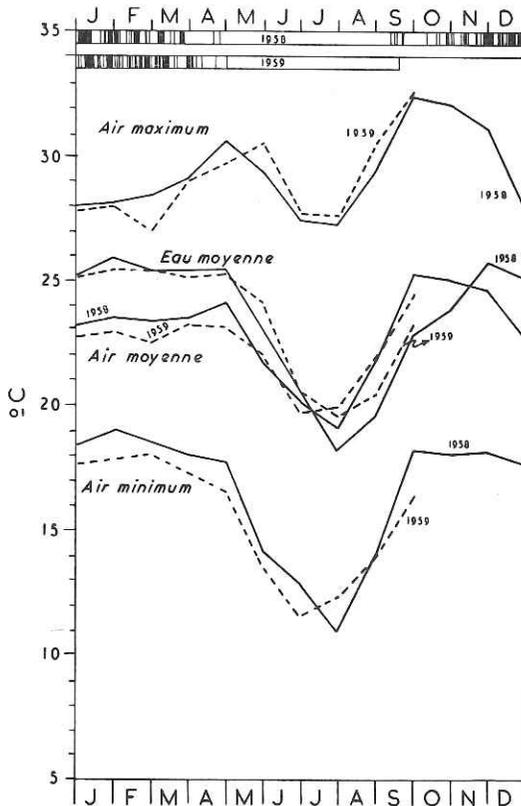


Fig. 7. — Variations de la température moyenne de l'eau de surface dans la retenue de la Lufira (secteur du barrage) et variations de la température atmosphérique (MAGIS, 1961 b).

plus lent. Le décalage de deux mois s'explique facilement en tenant compte des différences de chaleur spécifique de l'air et de l'eau. Jusqu'en octobre, l'eau est plus froide que l'air ambiant ;

b. une période de constance thermique relative lui succède immédiatement. Elle couvre toute la saison des pluies et s'achève en avril. La température moyenne de l'eau oscille entre 25 et 26° C et est de 1 à 3 degrés plus chaude que l'air. Les conditions atmosphériques favorisent cette constance thermique : écarts journaliers fort réduits par suite d'une température nocturne relativement constante et élevée (MAGIS, 1962) ; évaporation faible par suite des précipitations ; vents moins violents qu'en saison sèche froide. Le refroidissement temporaire des eaux de surface, effet des pluies directes (voir plus loin) est absorbé par la masse des eaux dans un lac aussi peu profond que celui de Mwadingusha ; il est plus apparent dans les retenues de Koni et de N'Zilo (cf. fig. 7 et 8) ;

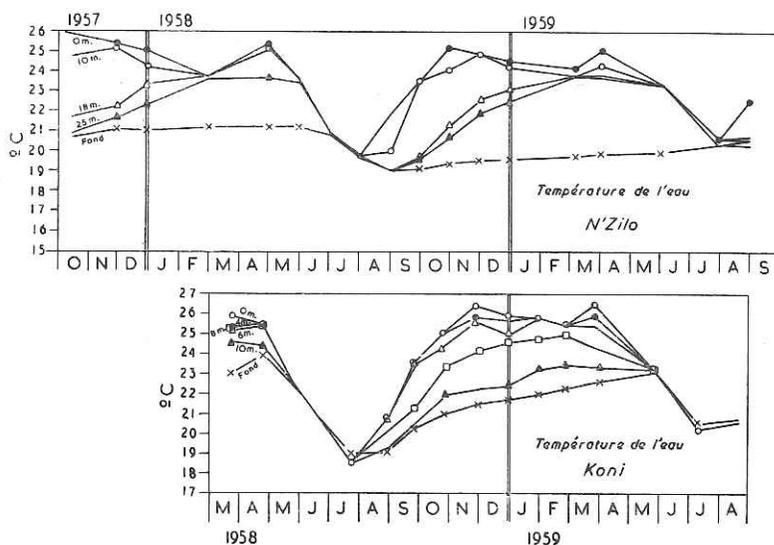


Fig. 8. — Variations de la température de l'eau à différents niveaux dans le lac de N'Zilo I et dans celui de Koni. (MAGIS, 1961 b).

c. une période de refroidissement, comprise entre avril et juillet, couvre la première moitié de la saison sèche et coïncide avec le refroidissement de l'atmosphère. L'eau reste plus chaude que l'air jusqu'au mois de juin, mais en juillet, la température moyenne de l'air rattrape en quelque sorte celle de l'eau avant de la dépasser jusqu'en octobre.

En confrontant ce schéma fondamental aux résultats publiés récem-

ment sur la thermique des lacs naturels africains : Kivu, Edouard et Albert (VERBEKE, 1957), baie nord du lac Tanganika (DUBOIS, 1957), Upemba (VAN MEEEL, 1953), on doit conclure que le régime thermique des retenues artificielles du Haut Katanga est comparable en tous points à celui de ces lacs naturels. Les eaux du lac Kariba, retenue artificielle construite récemment sur le Zambèze, sont soumises aux mêmes variations thermiques (HARDING, 1961).

Le cycle thermique des trois lacs étudiés présente de très grandes ressemblances avec celui de divers lacs japonais étudiés par YOSHIMURA (1936) ; elles permettent d'apparenter les lacs artificiels du Haut Katanga au type des lacs *subtropicaux* défini par ce même auteur. On soulignera cependant que l'amplitude des écarts de température qui est d'une vingtaine de degrés dans les lacs japonais étudiés par YOSHIMURA, est comprise ici entre 5 et 10° C seulement (MAGIS, 1962).

#### b. — Stratification thermique et importance du thermocline

Les courbes illustrant les variations de température des différentes couches d'eau à Koni et à N'Zilo (fig. 8) démontrent que la température de l'eau tend à s'uniformiser à l'époque du refroidissement du début de la saison sèche. L'homogénéité thermique s'établit normalement plus tôt à Koni qu'à N'Zilo, en raison de la profondeur moindre. Le refroidissement continu et progressif de l'eau engendre donc une circulation totale qui se prolonge jusqu'en fin juillet ou début août.

A la fin de la période de réchauffement, en novembre, les eaux de surface sont de 4 à 5° C plus chaudes que celles du fond. Cette diminution de température en fonction de la profondeur est loin d'être progressive, mais se manifeste au contraire de façon brutale entre des profondeurs déterminées. La colonne d'eau est ainsi divisée en trois parties distinctes : un épilimnion superficiel, une zone de saut thermique (thermocline) et un hypolimnion profond. Cette stratification thermique s'accompagne de la stratification parallèle de certains facteurs chimiques (voir chapitre IV). La fig. 8 montre que les eaux demeurent stratifiées pendant toute la saison des pluies ; on doit par conséquent considérer le phase de constance thermique relative comme caractérisant une véritable période de *stagnation* qui s'oppose à la période de *circulation* décrite au début de ce paragraphe.

Dans les lacs des régions tempérées, le maintien d'une température basse dans l'hypolimnion durant la longue période de stagnation estivale prouve que le thermocline crée une véritable barrière rendant tout

mélange impossible entre épi- et hypolimnion. Tel ne semble pas être le cas des lacs étudiés. Ainsi à N'Zilo (fig. 8), on constate qu'en février, la température de l'eau est pratiquement uniforme sur 25 mètres d'épaisseur. La comparaison avec les relevés thermiques précédents démontre que cette uniformisation résulte d'une double modification de la température : un refroidissement des couches comprises entre 0 et — 10 mètres d'abord, un réchauffement des niveaux compris entre 18 et 25 mètres ensuite. Le transport de calories de la surface vers la profondeur dénote l'existence d'un brassage. Quelle en est l'origine? En confrontant divers facteurs de l'exploitation industrielle et du climat, nous avons été amenés à reconnaître que ce double mouvement était engendré par les précipitations atmosphériques (MAGIS, 1962). Si nous retenons le fait que les précipitations peuvent influencer petit à petit une colonne d'eau épaisse de 25 mètres et que cette profondeur est rare dans le lac de N'Zilo en dehors de sa portion extrême-aval, on doit conclure que dans les zones moins profondes, le brassage n'est plus partiel mais total. Des relevés de température effectués occasionnellement dans ces régions confirment parfaitement cette déduction théorique. Un autre fait démontre également le caractère labile du thermocline qui se développe dans les lacs artificiels katangais. Dans le lac de Koni (fig. 8) où le thermocline persiste pourtant durant toute la période de stagnation et où l'épilimnion comme l'hypolimnion conservent pratiquement le même volume pendant cette même période, on constate que la température des eaux du fond est en perpétuelle augmentation. A l'inverse de ce qui s'observe dans les régions tempérées, le thermocline ne s'oppose donc pas totalement aux transferts de calories de la surface vers la profondeur.

Dans le lac de barrage de la Lufira, la période de réchauffement des eaux (seconde moitié de la saison sèche) entraîne aussi leur stratification. La différence de température qui sépare les eaux de surface et celles du fond est toutefois beaucoup plus faible que dans les deux autres lacs (différence maximum : 2,2° C). Dès lors, un simple refroidissement de la température ambiante, un coup de vent violent suffisent à la réduire et engendrent une nouvelle phase de brassage. On ne peut donc parler de période de stagnation dans la retenue de la Lufira <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> En dehors de la phase de refroidissement des eaux, des relevés journaliers de la température prouvent que les conditions atmosphériques influencent journellement 4 à 6 mètres d'eau. (MAGIS, 1962). La hauteur de cette colonne d'eau est bien supérieure à la profondeur moyenne du lac ; ces circonstances expliquent très aisément la fréquence des brassages.

### c. Conclusions

1. Les variations saisonnières de la thermique des eaux sont superposables à celles de la température moyenne de l'atmosphère, mais elles ne correspondent pas à l'alternance des périodes sèches et pluvieuses, pourtant bien tranchées sous cette latitude.

2. Le cycle thermique annuel de ces lacs artificiels est absolument comparable à celui qui caractérise d'autres lacs africains. L'existence de trois périodes (réchauffement, constance thermique relative et refroidissement) apparente les lacs artificiels du Haut Katanga au type des lacs subtropicaux.

3. Il existe, dans les deux lacs les plus profonds, une stratification thermique mais elle revêt toujours un caractère fort précaire. Elle ne peut être strictement comparée à la stratification estivale qui se développe dans les lacs des climats tempérés, car le thermocline ne s'oppose pas radicalement aux échanges calorifiques entre épi- et hypolimnion. Dans la retenue de la Lufira, la moins profonde, les eaux sont pratiquement brassées toute l'année.

4. Les travaux consacrés à l'étude de la thermique des lacs des régions chaudes s'accordent généralement pour démontrer que la stabilité des couches est favorisée par la saison des pluies tandis que les mois le plus froids de la saison sèche entraînent la circulation totale des eaux. Nous sommes amenés à nuancer quelque peu cette opinion. Sous la latitude du Haut Katanga, la circulation des eaux peut avoir deux origines distinctes. En saison sèche, le refroidissement atmosphérique, les vents violents et la forte évaporation s'unissent pour créer des courants de convection qui rendent les eaux thermiquement et chimiquement homogènes. En saison des pluies, l'importance des précipitations l'emporte sur les autres conditions climatiques. Les pluies refroidissent les eaux superficielles et engendrent des courants verticaux dont l'intensité est toutefois beaucoup plus faible que celle des courants du début de la saison sèche.

#### IV. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX, VARIATIONS CHRONOLOGIQUES ET STRATIFICATION

Après avoir défini les deux caractéristiques physiques principales des lacs et en avoir analysé les variations cycliques, nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'étude systématique de certaines substances chimiques dissoutes. Pour réaliser cette enquête, des prélèvements d'eau ont été faits chaque mois en divers endroits et aux diverses profondeurs et ces échantillons ont servi aux différents dosages. Un millier environ d'informations ont été ainsi recueillies pendant deux ans. La répartition de ces données entre les différents lacs est cependant inégale (tableau II). En effet, l'importance des pêcheries et surtout la menace que la végétation palustre fait peser sur la retenue de Mwadingusha y nécessitaient une prospection plus minutieuse que dans les deux autres milieux.

En réalisant la synthèse de ces nombreuses données <sup>(1)</sup>, nous tenterons de mettre en évidence les cycles de variation des différentes substances étudiées. Nous essayerons, notamment, de dégager les rapports existant entre la stratification chimique et la stratification thermique ; ceci nous amènera à discuter l'origine de la stratification dans ces lacs artificiels intertropicaux. Dans le cas particulier de la retenue de la Lufira, nous chercherons également à préciser l'influence de la végétation sur la composition chimique de cette retenue.

Les arguments supplémentaires apportés par cette étude permettront non seulement de dégager les traits communs et les particularités écologiques des trois lacs artificiels, mais aussi de les situer dans le système lacustre.

Avant d'étudier chacun des lacs, nous donnerons d'abord quelques indications sur les instruments et les méthodes employées.

##### 1. — Instruments et méthodes

###### a. — Prélèvements des échantillons d'eau.

Les échantillons d'eau nécessaires aux analyses ont été récoltés à l'aide d'une bouteille à eau du type utilisé par RUTTNER. Celle-ci était

<sup>(1)</sup> Nous remercions ici M. Jean LIETAR qui s'est intégré bénévolement dans la « Mission des lacs » et qui nous a apporté une collaboration particulièrement précieuse dans l'étude du lac de la Lufira.

fixée à un cabestan muni d'un compte-tours qui donnait directement la profondeur désirée. L'instrument a été descendu en prenant systématiquement comme point de départ l'ouverture de la bouteille placée au ras de la surface. Dans les endroits de faibles profondeurs explorés par LIETAR, on a utilisé une pompe à main analogue à celle décrite par DAMAS (1954). Le tube en caoutchouc fixé au téton d'aspiration de l'appareil était gradué de 0,5 en 0,5 mètre.

### b. — Méthodes d'analyses chimiques

Les réactifs et les solutions titrées nécessaires aux dosages ont été préparés au Laboratoire de Recherches de la Direction Générale de l'Union Minière du Haut Katanga.

a) *Concentration totale en sels dissous* : estimée par la mesure de la conductibilité électrique au pont de KOHLRAUSCH (appareil « PONTAVI » à vibreur). Les mesures ont été systématiquement ramenées à 18° C et multipliées par 10<sup>6</sup>. L'appareil et les électrodes ont été contrôlés avant chaque emploi à l'aide d'une solution de KCl 0,1 N de température et de résistivité connues.

b) *Dureté totale* : le dosage de la somme des ions calcium et magnésium présents dans l'eau a été exécuté à l'aide de la méthode complexométrique développée par STASSART (1950). En titrant 100 ml. d'eau par une solution de versénate sodique 0,01 N, le nombre de ml. de réactif utilisé indique immédiatement la dureté totale en degrés français (un degré français de dureté est équivalent à 10 mg. p. l. CaCO<sub>3</sub>).

c) *Titre alcalin* : La quantité de substances à réaction alcaline dissoutes dans l'eau (1) a été déterminée par titration de 100 ml. d'eau non filtrée au moyen d'HCl 0,1 N en présence de méthylorange comme indicateur de fin de réaction. Du volume d'acide nécessaire à la neutralisation, on a soustrait systématiquement 0,09 ml, quantité nécessaire pour obtenir le virage de l'indicateur dans l'eau distillée (DAMAS, 1954). Ce titre alcalin est synonyme du titre alcalin au méthylorange (T. A. M.) défini par le « LIVRE DE L'EAU » (1954).

d) *pH* : mesuré par colorimétrie à l'aide de l'appareil comparateur de

(1) C'est-à-dire les alcalis, les carbonates et bicarbonates alcalins, alcalino-terreux et parfois, simultanément, les borates, silicates, phosphates et l'ammoniaque libre (GOSSEF, 1952).

HELLIGE. En utilisant deux indicateurs dont les zones de virage se recouvrent, on peut obtenir une précision de 0,05 unité pH.

e) *Anhydride carbonique libre* : est dosé dans 100 ml d'eau par  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0,1 N, en présence de phénolphtaléine. La correction de WINKLER (MAUCHA, 1932) a été appliquée aux résultats bruts. Dans les eaux dépourvues de  $\text{CO}_2$  libre, l'indicateur rosit spontanément et le dosage s'effectue alors à l'aide d'HCl 0,1 N. Cette dernière opération revient à déterminer le titre alcalin à la phénolphtaléine (T. A. P.) du « LIVRE DE L'EAU ».

f) *Oxygène dissous* : la méthode par différence d'iode (OHLE, 1953) a été préférée à la méthode classique de WINKLER, car elle s'avère particulièrement indiquée pour des eaux riches en substances réductrices. La quantité d'oxygène est fournie en mg. p. l. Pour comparer plus aisément les résultats, ces valeurs ont été transformées en % de la saturation en appliquant les coefficients de correction d'altitude pour la pression barométrique et en utilisant l'abaque publié par WELCH (1948).

g) *Substances réductrices* : nous avons employé la réduction à chaud pour le permanganate de potassium en présence d'acide sulfurique. Les résultats expriment la quantité d'oxygène absorbé en mg. p. l. La solution d'hyposulfite de sodium 0,01 N utilisée dans ces deux dernières analyses a été titrée par une solution de biiodate de sodium selon les indications de MAUCHA (1932).

### c. Transparence et couleur propre de l'eau

La transparence a été déterminée à l'aide d'un disque de SECCHI métallique de 20 cm de diamètre, marqué de quatre secteurs égaux peints alternativement en noir et en blanc. L'appareil était fixé à une canne à sonder munie d'un compte-tours donnant la profondeur en décimètres. Les valeurs retenues sont la moyenne entre les mesures prises à la descente et à la remontée de l'instrument.

Nous avons estimé la couleur propre de l'eau à l'aide de l'échelle de comparaison de FOREL-ULE. Les solutions colorées étaient conservées en tubes scellés.

### d. — Localisation et périodicité des observations

a) *Lac de retenue de la Lufira* : après une reconnaissance générale du lac, quatre endroits ont été retenus en guise de points fixes. Leur choix

s'est fait en fonction de certains caractères représentatifs de l'hétérogénéité du milieu (voir p. 16). Ce sont, de l'amont vers l'aval : 1° la Lufira à son entrée (Kapolowe) ou nettement en amont de la retenue (pont de Kapolowe) ; 2° la zone littorale de Mulandi, sur la rive sud-ouest du lac avec des profondeurs comprises entre 0,6 et 3 mètres ; 3° l'ancien étang de Shangalele, sur la rive opposée, avec des fonds variant de 1,20 à 3 m. et 4° l'exutoire du lac, de 4 à 500 mètres en amont du barrage de Mwadingusha, avec les plus grandes profondeurs comprises entre 10 et 14 m.

b) *Réservoir de Koni* : les stations hydrographiques et les récoltes de plancton ont été réalisées dans la région voisine du barrage, la plus profonde (12 à 16 m.). Des observations ont été faites occasionnellement en d'autres endroits, entre autre dans l'ancienne vallée de la Lufira réunissant la centrale Franqui au lac proprement dit (voir fig. 3).

c) *Lac de retenue du Lualaba* : les documents les plus nombreux ont été récoltés dans les gorges de N'Zilo (profondeur de 20 à 45 m.). Entre octobre 1957 et octobre 1958, les stations hydrographiques et les pêches planctoniques quantitatives ont été faites en prenant comme point d'ancrage le milieu de la grille flottante, tendue d'une rive à l'autre à un km environ en amont du barrage. Après la suppression de cette grille par les autorités exploitantes, le point d'attache a été reporté plus en amont, dans une zone couvrant l'ancienne galerie forestière (prof. 17-19 m.) Afin de ne pas perdre le bénéfice des observations précédentes, des relevés de température ont été néanmoins poursuivis en installant les instruments sur une plate-forme construite au milieu du barrage. Quelques observations accessoires ont été réalisées au cours de diverses traversées du lac, elles seront spécifiées dans l'exposé.

Le tableau suivant fournit le bilan des documents sur lesquels s'appuient toutes les conclusions de ce travail. Il précise pour chacun d'eux les périodes pendant lesquelles ils ont été réunis.

TABLEAU II

*Bilan des divers documents recueillis au cours de la mission.*

Régions	Période d'observation des analyses d'eau	Nombre de relevés et d'anal. chimiques	Période d'observation des pêches qualitatives	Nombre d'échantillons	Période d'observation des pêches quantitatives	Nombre de pêches et d'échantillons	Remarques
<b>RETENUE DE LA LUFIRA</b>							
Lufira (*) (Kapolowe)	3 mois 9.VIII.57 9.IX.57	3	3 mois 9.VII.57 9.IX.57	6	— —	—	L'accès trop difficile fait reporter cette station à la suivante
Lufira (*) (Pont-route)	29 mois 15.X.57 18.II.60	29	4 mois 15.X.57 07.I.58	4	—	—	mesure de la sédimentation
Mulandi (*)	26 mois 14.I.58 17.II.60	26	20 mois 14.I.58 29.VIII.59	36	—	—	
Shangalele (*)	32 mois 3.VII.57 17.II.60	32	25 mois 3.VII.57 16.VII.59	76	—	—	
Secteur Nord	26 mois 16.VII.57 17.VIII.59	25	26 mois 16.VII.57 18.VIII.59	36	23 mois 07.X.57 18.VIII.59	19 124	mesures thermiques hebdomadaires : entre le 11.I.58 et le 17.VIII.59. Cycle thermique et chimique journalier 21.X, 19.XII.57, 20.I., 24.IV et 17.VII.58.

(\*) prospections, analyses des eaux et récoltes de plancton réalisées par J. LIÉTAR.

Régions	Période d'observation des analyses d'eau	Nombre de relevés et d'anal. chimiques	Période d'observation des pêches qualitatives	Nombre d'échantillons	Période d'observation des pêches quantitatives	Nombre de pêches et d'échantillons	Remarques
RÉSERVOIR DE KONI	21 mois 18.XII.57 22.VIII.59	17	21 mois 18.XII.57 24.VIII.59	17	17 mois 24.III.58 24.VIII.59	14 98	mesures de température et d'oxygène dans diverses régions du lac.
RETENUE DE N'ZILO	23 mois 12.X.57 02.IX.59	23	23 mois 12.X.57 02.IX.59	16	18 mois 02.III.58 02.IX.59	13 107	mesures de température et d'oxygène dans diverses régions du lac.

## 2. — LAC DE MWADINGUSHA

### A. — Les eaux de la Lufira en amont de la retenue

#### 1° Les électrolytes dissous :

La composition ionique des eaux de la Lufira est représentée graphiquement sur la fig. 9. Cette dernière a été construite sur les modèles préconisés par KUFFERATH (1951) et se base sur les résultats d'une analyse effectuée par les soins du laboratoire de Recherche de la Direction Générale de l'Union Minière.

Le diagramme montre la présence des six ions rencontrés les plus communément dans les eaux douces naturelles. Les eaux de la Lufira peuvent, par conséquent, être immédiatement classées dans la catégorie des eaux hexaioniques ou complètes définies par KUFFERATH.

La forme de ce polygone indique également la forte proportion des ions  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  et  $CO_3^-$ . D'autres analyses du même type, effectuées plus régulièrement dans la retenue elle-même, permettent d'affirmer que cette

composition reste qualitativement semblable tout au long de l'année (MAGIS, 1961 b, 1964).

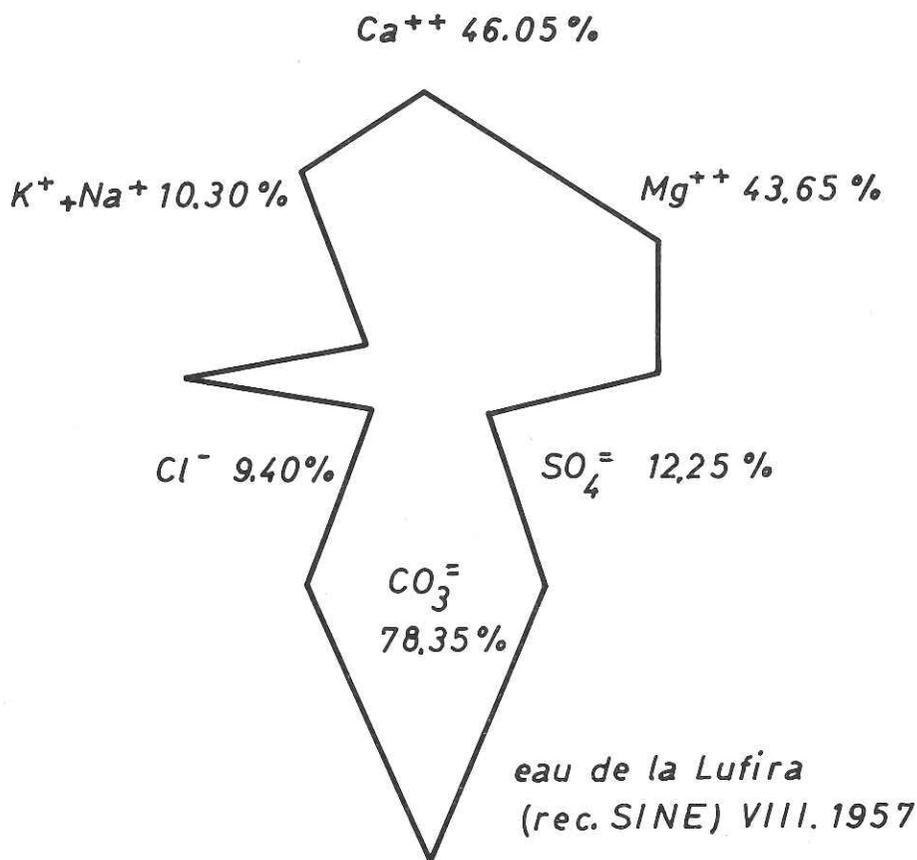


Fig. 9. — Exemple de la composition ionique des eaux de la Lufira en amont du lac de retenue. Graphique dressé suivant les modèles proposés par KUFFERATH (1951)

Le titre de dureté totale des eaux de la Lufira est compris entre 11,6 et 33,8° français. Lorsque les concentrations en calcium et en magnésium sont mises en rapport avec le débit mensuel moyen de la rivière, le nuage des points ainsi formé traduit une corrélation négative (fig. 10) : plus le débit est élevé, plus la concentration de ces électrolytes est faible. Les variations annuelles du titre de dureté sont donc nettement tributaires du régime de l'affluent : lors des crues, les eaux se diluent, elles se concentrent progressivement au fur et à mesure que le débit de la Lufira tend vers sa cote d'étiage. Selon les années, l'amplitude des variations de la dureté totale se chiffre entre 12 et 20° fr.

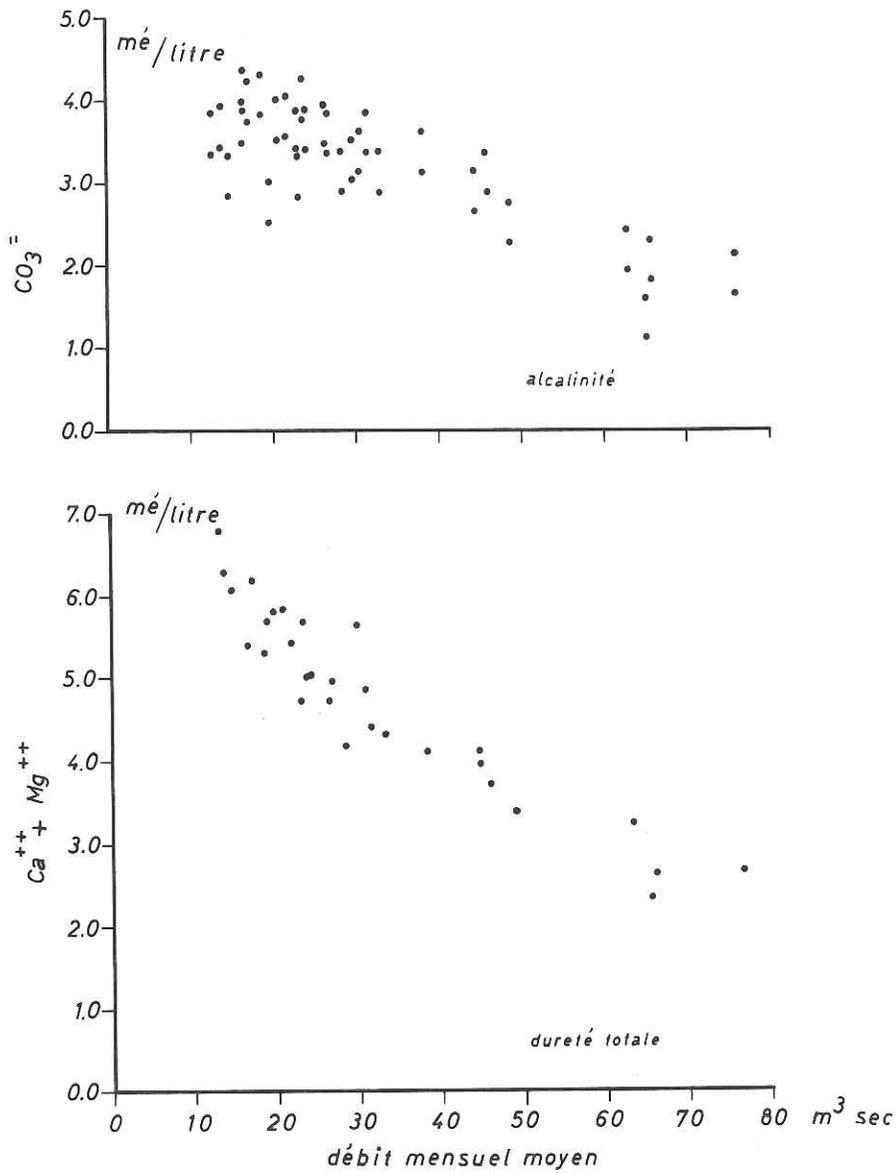


Fig. 10. — Corrélations entre le débit mensuel moyen de la Lufira, l'alcalinité (exprimée en milliéqu./l.) et la dureté totale (exprimée également en milliéqu./l. de la somme  $\text{Ca} + \text{Mg}$ ).

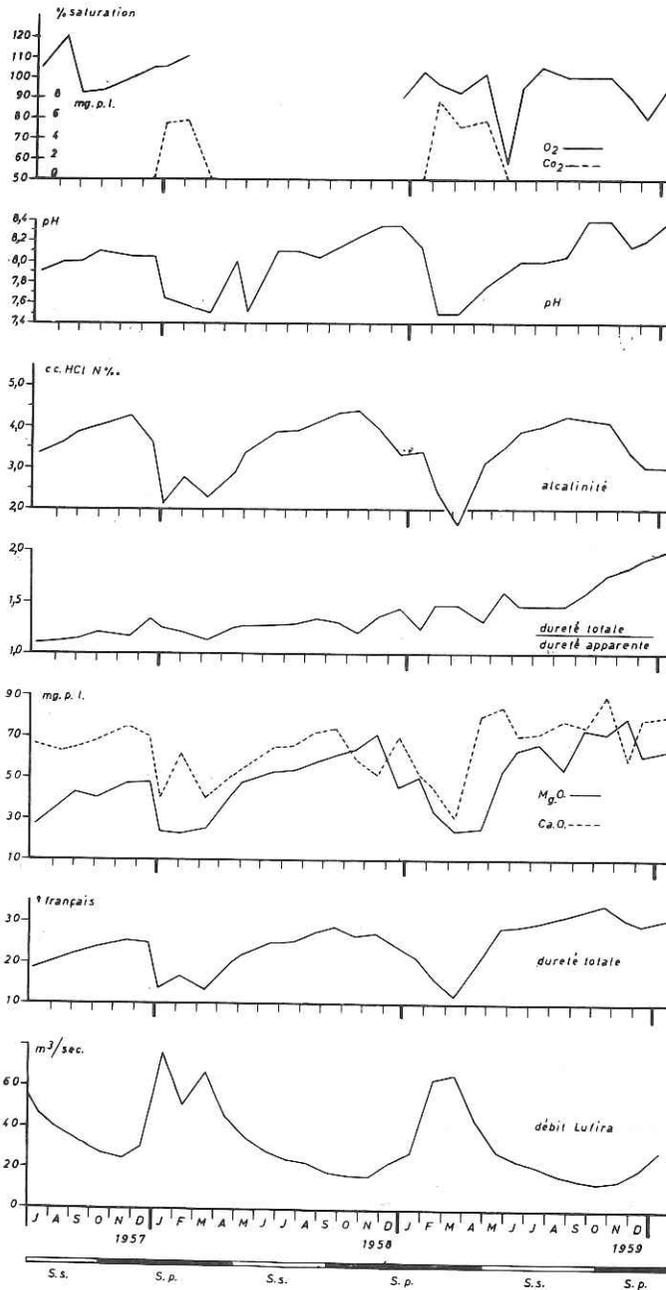


Fig. 11. — Variations du débit de la Lufira et évolution de quelques substances dissoutes durant la période comprise entre juillet 1957 et décembre 1959.

La fig. 11 permet de se rendre compte que les variations quantitatives du calcium et du magnésium ne sont pas rigoureusement parallèles. Le calcium manifeste des variations non seulement plus grandes, mais aussi plus brutales lors des modifications principales du débit (e. a. janvier-mars 1958, janvier-avril 1959, octobre-novembre 1959). Le magnésium se concentre plus lentement que le calcium de sorte que ses valeurs peuvent, en octobre-novembre, être plus grandes que celles du calcium. Aux autres époques de l'année, les eaux de la Lufira sont toujours plus riches en calcium.

Dans différentes rivières appartenant au bassin hydrographique de la Panda, la teneur en Mg, plus faible pendant les pluies, devient relativement plus importante pendant la saison sèche. Elle approche et peut même dépasser occasionnellement la concentration du Ca (LIETAR, 1956). Les variations de ces deux ions observées dans la Lufira sont du même type et ne constituent par conséquent pas une particularité du tronçon de rivière étudié.

Pendant toute la durée des observations, les eaux de la Lufira se sont progressivement enrichies en ion Mg. L'élévation du degré hydrotimétrique total, particulièrement sensible dès le mois de mai 1959 (fig. 11), résulte donc plus d'une augmentation de la concentration du Mg que du Ca. Les causes de ces modifications dont la périodicité échappe entièrement au rythme régulier des crues et des décrues sont malaisées à définir mais doivent être soulignées. On ne peut, à priori, négliger cependant l'influence possible des eaux de la Panda qui confluent justement un peu en amont du point fixe choisi pour l'étude systématique des eaux de la Lufira.

La quantité de substances à réaction alcaline titrable par l'acide fort (TAM) manifeste avec le débit de la Lufira le même type de corrélation que la dureté totale (fig. 10). La quantité d'acide chlorhydrique nécessaire à la neutralisation a varié entre 1,6 et 4,36 cc. Les différences annuelles entre la valeur la plus basse (crue) et la plus élevée (étiage) se chiffrent respectivement à 2,12 (1957-58) et 2,76 (1958-59) cc HCl N°/100. Les valeurs successives du TAM se reproduisent donc mieux d'une année à l'autre que celles de la dureté totale (fig. 11).

On exprime fréquemment l'alcalinité en termes de dureté en supposant implicitement que tous les ions  $\text{CO}_3^-$  existent sous la forme bicarbonate (dureté apparente). Cette estimation de la dureté peut alors être comparée à la dureté totale ou réelle fournie par le titrage aux complexons. Dans la Lufira, ce rapport des duretés est compris entre 1,10 et 1,93. Puisque les fluctuations périodiques de l'alcalinité et de la dureté totale s'effec-

tuent dans le même sens, les modifications de leur rapport sont entièrement indépendantes du débit. La fig. 11 montre que ce rapport dessine une courbe d'allure générale ascendante. Entre avril et mai 1959, il passe de 1,3 à 1,6, il se stabilise ensuite jusqu'en août (1,5) puis augmente progressivement jusqu'en décembre (1,9). Cette augmentation est explicable si l'on compare la stabilité relative du TAM et l'augmentation régulière du titre de dureté dans le même laps de temps. Le rapport des duretés étant systématiquement supérieur à l'unité, on peut légitimement penser que les sels de calcium et de magnésium dissous dans les eaux de la Lufira ne se présentent pas exclusivement sous forme de carbonates et de bicarbonates, mais aussi comme chlorures ou sulfates. La balance ionique représentée fig. 9 tendrait en effet à le prouver. Le pourcentage de millivalences-grammes par litre de  $\text{CO}_3^-$  y est effectivement inférieur de 11,35 % à celui nécessaire pour équilibrer complètement les pourcentages des cations  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ . Comme les proportions de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{K}^+$  correspondent bien à celles du  $\text{Cl}^-$ , le pourcentage de l'anion  $\text{SO}_4^-$  pourrait donc combler la fraction de  $\text{Ca}^{++}$  et de  $\text{Mg}^{++}$  non saturée par  $\text{CO}_3^-$ .

## 2° pH- acide carbonique libre.

Les eaux de la Lufira sont franchement alcalines. Pendant l'année, leur pH oscille entre un minimum de 7,5 et un maximum compris, selon les cas, entre 8,1 et 8,4. La fig. 11 montre la périodicité de ces variations qui dépend aussi du rythme et de l'importance des crues et des décrues. La légère acidification des eaux que l'on constate chaque année à l'époque des hautes eaux s'explique immédiatement par la présence simultanée de l'anhydride carbonique libre, en quantités comprises entre 5 et 8 mg. p. l. Les rapports entre le  $\text{CO}_2$ , les bicarbonates et les carbonates (en % molaires) qui correspondent aux pH mesurés aux hautes eaux sont alors les suivants (BAAS-BECKING, 1934) :

$\text{H}_2\text{CO}_3$	: de 6,5 à 9 %
$\text{HCO}_3^-$	: de 91 à 93,5 %
$\text{CO}_3^-$	: 0 %

En d'autres termes, les ions calcium et magnésium liés à l'acide carbonique sont à ces époques exclusivement des bicarbonates. Aux autres périodes, les eaux de la Lufira colorent spontanément la phénolphthaléine et ne contiennent donc aucune trace d'acide libre ; les proportions sont alors :

$\text{H}_2\text{CO}_3$	: de 1 à 2,8 %
$\text{HCO}_3^-$	: de 96,7 à 98 %
$\text{CO}_3^-$	: de 0,5 à 1 %

Autrement dit, en dehors des périodes de crue, les sels de calcium et de magnésium liés à l'acide carbonique se présentent à la fois sous la forme de bicarbonates et de carbonates.

Il convient de souligner l'amplitude remarquablement faible — inférieure ou tout au plus égale à une unité — des variations annuelles du pH. LIÉTAR (1956) a fait des constatations semblables dans diverses rivières environnant Jadotville, tributaires de la Panda. Les écarts annuels peu importants du pH s'expliquent certainement par l'apport des eaux « dures » de son affluent (1) et par le fait que le cours de la Lufira traverse lui-même des terrains de nature calcaire, feldspathique et dolomitique (BOURGUIGNON, P., STREEL, M. et CALEMBERT, J., 1960).

### 3° Oxygène dissous :

La recherche de l'oxygène dissous n'a pas été faite de façon aussi systématique. Les documents obtenus (fig. 11) suffisent cependant à prouver le caractère bien oxygéné des eaux puisque les quantités d'oxygène qui ont été dosées correspondent rarement à moins de 90 % de la saturation. De faibles sursaturations peuvent être mises en évidence aussi bien en saison des pluies qu'en saison sèche ; les quantités d'oxygène dissous semblent, par conséquent, fort peu influencées par les facteurs saisonniers.

Les faits qui viennent d'être exposés mettent particulièrement en évidence les notions suivantes :

1. La composition chimique des eaux de la Lufira est largement, sinon exclusivement, tributaire du régime de la rivière. Les eaux se diluent en période de crue tandis que l'équilibre entre carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium se modifie sous l'action de l'anhydride carbonique existant à l'état libre. Il en résulte une diminution de la proportion des carbonates au profit des bicarbonates et un déplacement corrélatif du pH vers des valeurs légèrement moins alcalines. Lorsque la décrue apparaît et que la Lufira tend vers son débit d'étiage, les eaux se concentrent progressivement tandis que l'équilibre entre carbonates et bicarbonates se déplace, cette fois dans le sens d'une augmentation de la proportion de l'ion  $\text{CO}_3^-$ .

2. L'examen de l'évolution du rapport entre les quantités de calcium et de magnésium — cations les plus abondants dans l'eau de la Lufira —

(1) Dureté des eaux de la Panda : 25,5° français en saison des pluies, 40° français en saison sèche (LIÉTAR, 1956).

démontre non seulement que celui-ci se modifie au cours d'un cycle annuel, mais aussi qu'il ne varie pas nécessairement de façon identique au cours des cycles successifs. Les causes de ces fluctuations posent un problème qui n'est pas encore résolu, mais qui devait néanmoins être souligné comme étant susceptible d'influencer l'économie biologique de la retenue proprement dite.

3. Les concentrations en gaz dissous comme les valeurs du pH indiquent, sans aucun doute possible, l'absence de toute pollution organique dans les eaux de l'affluent de la retenue. Le lac est donc alimenté en permanence par des eaux très propres, caractérisées en outre par leur dureté totale. Les quantités de carbonates et de bicarbonates de calcium et de magnésium assurent ainsi une réserve alcaline élevée, capable de neutraliser d'importantes quantités d'anhydride carbonique sans trop grandes variations du pH.

## B. — Les eaux de la retenue proprement dite

### a. — Les eaux du Shangalele

Dans l'étude de la composition chimique des eaux de la retenue proprement dite, l'évolution de la qualité de l'eau du Shangalele sera envisagée en premier lieu car cet ancien étang, en communication avec la Lufira par le lit ancien de la Luambo, s'est présenté comme un plan d'eau pratiquement libre de toute végétation. On examinera ensuite les variations de la composition chimique des eaux baignant la région littorale de Mulandi, car c'est à partir de ces zones peu profondes que la végétation prolifère ; Mulandi est en outre plus éloigné et en rapport moins direct avec le lit primaire de la Lufira. L'étude des eaux qui s'étendent immédiatement en amont du barrage de Mwadingusha sera abordée en dernier lieu en raison d'abord de leur position géographique et ensuite, parce qu'elles couvrent la partie la plus profonde de la retenue.

#### 1° Les électrolytes dissous (fig. 12) :

La dureté totale et l'alcalinité manifestent une succession très régulière de maxima et de minima qui démontrent clairement la nature cyclique de leurs variations. La comparaison des courbes du Shangalele et de la Lufira (fig. 11) fait aussitôt ressortir leur parenté. Dans le Shangalele, les différents points d'inflexion apparaissent toutefois un mois plus tard environ que dans l'affluent. Ce décalage dans le temps est causé princi-

palement par la force d'inertie que développe le volume d'eau entreposé dans la retenue. Cette force est d'autant plus capable de s'opposer momentanément aux effets de la dilution et de la concentration des eaux de la Lufira que le niveau du lac ne suit pas immédiatement les fluctuations du régime de la rivière.

La comparaison des autres courbes intéressant les électrolytes dissous (Ca, Mg, rapport des duretés) suffit à montrer que les faits commentés à propos de l'analyse des eaux affluentes peuvent également être mis en évidence dans la région du Shangalele.

Dans l'un comme dans l'autre site, la dureté, habituellement calcique, peut devenir momentanément magnésienne par suite de l'augmentation plus lente et plus longue de la concentration du Mg durant les décrues

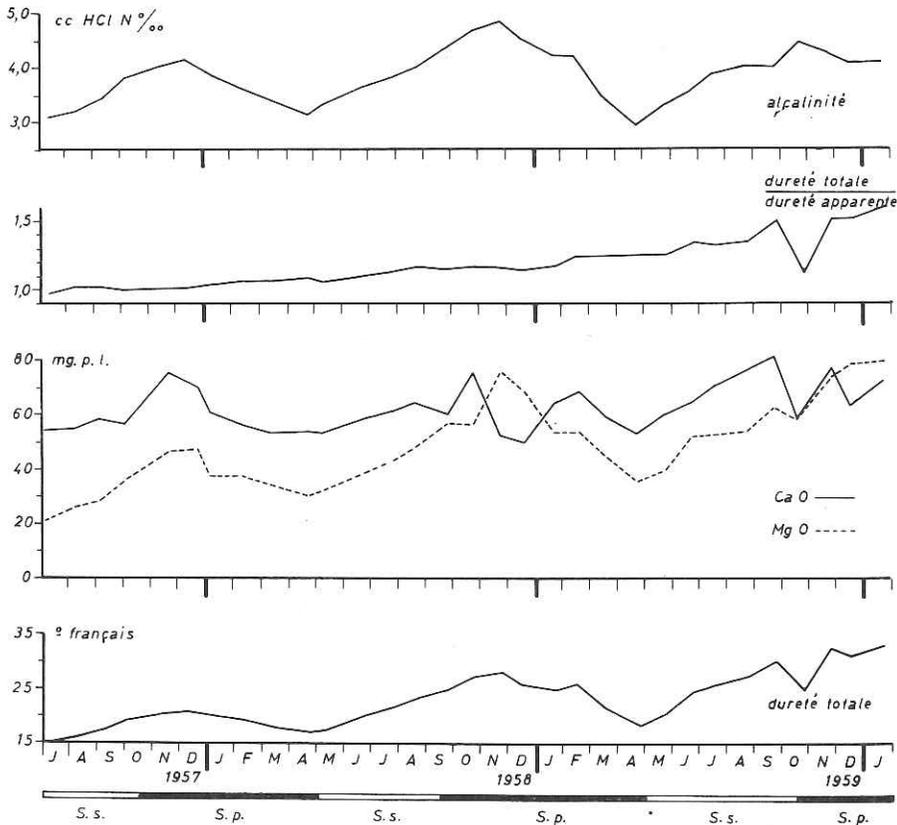


Fig. 12. — Variations des principaux électrolytes dans les eaux du Shangalele.  
Période de référence : juillet 1957-janvier 1960.

(novembre-décembre 1958, octobre 1959-janvier 1960). Outre ces variations de nature cyclique, on doit également noter l'élévation du degré hydrotimétrique total des eaux, lié, comme dans la Lufira, à une augmentation proportionnellement plus forte du magnésium, comme le prouve bien la courbe relative à cet ion.

Le rapport des duretés est systématiquement plus faible dans le Shangalele, mais ses valeurs successives se distribuent aussi selon un ordre croissant, spécialement à partir de juin 1958. Supérieur à l'unité (1,10-1,61), il indique qu'une proportion de plus en plus grande de sels de calcium et de magnésium se présente sous une forme non carbonatée.

Cet ensemble de données convergentes constitue un indice qui permet d'affirmer que la zone libre du Shangalele reste, en permanence, sous l'influence de la Lufira. Le décalage d'un mois qui, dans cet endroit, reflète les variations de la composition saline des eaux affluentes prouve incontestablement que les eaux courantes de la Lufira se sont, à ce niveau, définitivement mélangées aux eaux stagnantes de la retenue.

#### 2° L'oxygène dissous :

Les variations des pourcentages de saturation en oxygène ont été représentées graphiquement sur la fig. 13. Leur examen conduit aux constatations suivantes :

— la tension d'oxygène en surface comme au fond est généralement inférieure à la saturation. De très légères sursaturations se manifestent occasionnellement et sont normalement plus fréquentes en surface. Les eaux du Shangalele sont donc, en général, moins bien oxygénées que celles de la Lufira ;

— pendant toute la durée des observations, les quantités d'oxygène se sont avérées fort variables aussi bien en surface que dans la profondeur. Les pourcentages de saturation les plus élevés se groupent néanmoins entre les mois de novembre et de mars, pendant la phase de constance thermique relative des eaux. Entre juillet et août, la courbe traduit une seconde augmentation du taux d'oxygène. Plus courte que la précédente, elle se situe à la fin de la période de refroidissement et des brassages totaux quotidiens. Cette circulation explique immédiatement la correspondance entre les mesures faites en surface et au contact du fond. L'oxygène augmenterait ainsi deux fois au cours d'un cycle annuel. Le graphique montre que la périodicité de ces variations est cependant moins accusée que celle caractérisant les modifications de la charge en sels ;

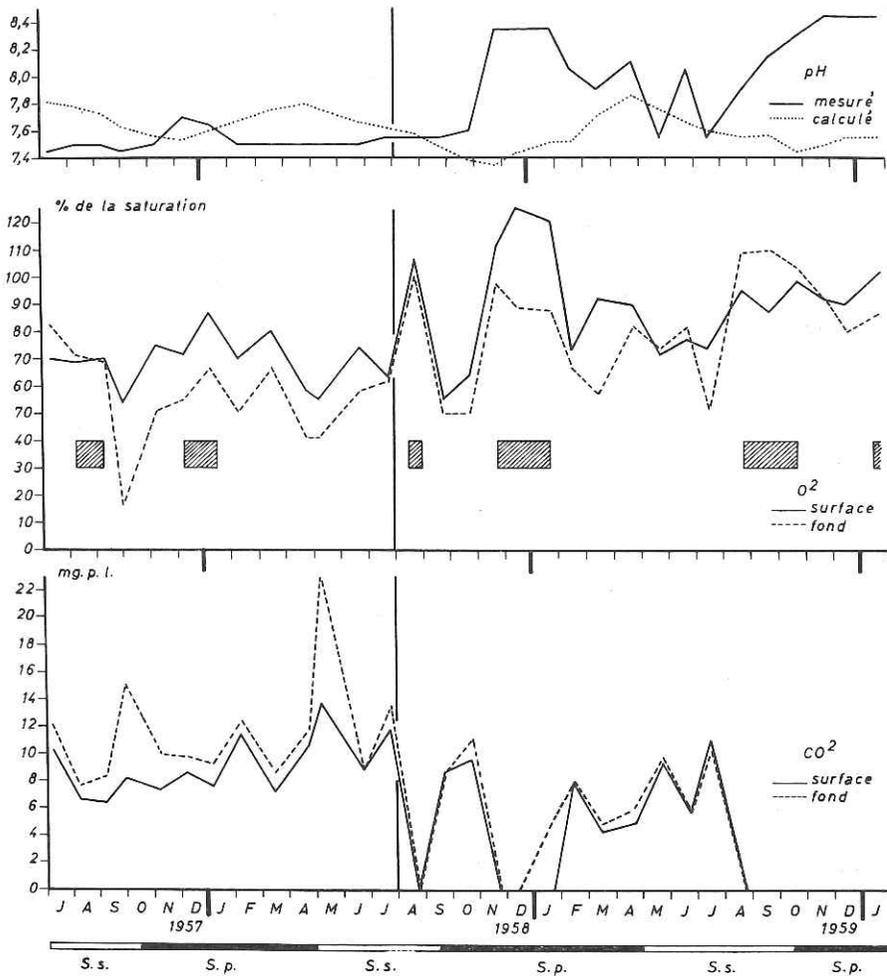


Fig. 13. — Variations du pH mesuré « in situ » et calculé à partir de l'alcalinité, de l'oxygène et de l'anhydride carbonique dans le secteur du Shangalele. Les rectangles hachurés localisent les périodes de recrudescence de l'activité photosynthétique des algues planctoniques (voir texte).

— les différents maxima relevés pendant la durée des observations ont atteint en 1958-59 un plafond nettement plus élevé qu'en 1957-58. Les pourcentages caractéristiques des différents minima révèlent un phénomène semblable : entre février et juin 1959, la pellicule superficielle est saturée à raison de 75 % au lieu de 55 % aux époques antérieures correspondantes. L'examen de tous les chiffres montrent, en fait, que les

minima de 1959 correspondent aux maxima mesurés en 1957 et 1958. La brusque augmentation du taux de saturation constatée en août 1958, ainsi que la sursaturation prolongée qui lui succède entre novembre et janvier, séparent donc la série des observations en deux périodes nettement distinctes :

1° entre juillet 1957 et juillet 1958, l'oxygénation de l'eau est médiocre, systématiquement déficitaire : la valeur « moyenne » de ces 13 stations est de 69 % en surface et de 56 % seulement au fond. Les valeurs très faibles observées par DAMAS en mars 1957 (25 % en surface et 24 au fond, DAMAS, 1957) semblent bien indiquer que nous n'avons connu qu'une partie seulement de cette période pauvrement oxygénée ;

2° entre février 1959 et janvier 1960, l'oxygénation de l'eau est meilleure ; le déficit de saturation se maintient encore durant la phase du minimum, mais la concentration du gaz tend incontestablement vers la saturation au cours des mois suivants. La teneur « moyenne » de cette seconde période est de 89 % en surface et de 83 % au fond. L'augmentation considérable du taux de saturation des eaux profondes est particulièrement significative de l'amélioration de la qualité de l'eau du Shangalele.

3° pH, anhydride carbonique libre :

La courbe résumant les variations du pH (fig. 13) peut être immédiatement dissociée en deux périodes très distinctes.

— entre juillet 1957 et octobre 1958, le pH des eaux superficielles est presque constamment égal à 7,5 ; une légère augmentation de 0,2 unité peut seulement être notée entre novembre 1957 et février 1958. La stabilité du pH dans le Shangalele pendant plus d'une année constitue un contraste frappant avec les modifications cycliques que ce facteur manifeste dans la Lufira. Les différences ne sont d'ailleurs pas uniquement qualitatives, puisque les eaux de cette zone lacustre sont aussi sensiblement moins alcalines que celles de l'affluent ;

— entre octobre et novembre 1958, le pH passe brutalement de 7,6 à 8,35. Cette augmentation subite marque le début de la seconde période. Le pH y sera plus alcalin qu'auparavant et variera selon un rythme plus voisin de celui de la rivière. Nous savons que des variations acycliques peuvent se manifester dans la Lufira, mais on a vu qu'elles se répercutent peu après dans le Shangalele. Tel n'est absolument pas le

cas du pH durant la première période. Son comportement entre juillet 1957 et octobre 1958 est donc déterminé par une — ou plusieurs — causes intralacustres.

TILLMANS et SCHAPERCLAUS ont établi expérimentalement les relations d'équilibre entre le  $\text{CO}_2$  et le pH d'eaux renfermant des quantités croissantes de bicarbonates alcalino-terreux. En utilisant l'abaque publié par RUTTNER (1953), on peut immédiatement comparer le pH effectivement mesuré à un pH théorique, correspondant à celui de l'alcalinité au méthylorange de l'échantillon.

Entre juillet 1957 et août 1958, le pH effectivement mesuré dans les eaux superficielles est inférieur à celui qui devrait correspondre à leur alcalinité. Cette diminution des pH réels est causée, soit par un excès de  $\text{CO}_2$  libre, soit par la présence de dérivés humiques. Cette phase d'acidification relative est brièvement interrompue entre décembre 1957 et janvier 1958. L'examen d'ensemble de la courbe des pH démontre que ce phénomène d'alcalinisation se manifeste ultérieurement à la même époque ; cette répétition permet de le considérer comme cyclique.

A partir d'août 1958, le pH mesuré dans les eaux superficielles du Shangalele est, au contraire, plus alcalin que celui déterminé à partir du TAM. Les mesures obtenues en mai puis en juillet 1959 font seule exception à cette règle. Le caractère relativement alcalin des eaux reflète exactement la situation que l'examen des deux pH mettrait en évidence dans la Lufira ; il doit par conséquent dépendre directement de la composition des eaux affluentes.

La comparaison qui vient d'être entreprise appuie solidement la distinction en deux périodes faite au début de ce paragraphe, mais y apporte des nuances. La période comprise entre juillet 1957 et août 1958 doit être considérée comme une période d'acidification et doit être directement opposée à celle qui, débutant en septembre, s'achève avec la fin des observations dans ce secteur de la retenue.

Le  $\text{CO}_2$  dissous dans les eaux superficielles et profondes varie qualitativement et quantitativement de façon très différente de la Lufira. Les courbes (fig. 13) permettent de reconnaître les deux périodes décrites à propos du pH : aux pH comparativement plus acides correspondent des concentrations plus élevées d'anhydride (période 1), inversement à pH comparativement plus alcalins correspondent des concentrations très faibles d'anhydride, pouvant aller jusqu'à la disparition de toute trace d'anhydride libre (novembre et décembre 1958 ; septembre-janvier 1960). Les effets du  $\text{CO}_2$  libre sur le pH se marquent particulièrement lorsque

sont établies les proportions respectives des différents états sous lesquels le  $\text{CO}_2$  dissous est disponible.

TABLEAU III

*Variations du potentiel de l'acide carbonique dans les eaux de surface (en % molaires).*

	PERIODE 1	PERIODE 2
pH minimum	7,45	7,55
$\text{H}_2\text{CO}_3$	9,70	8,50
$\text{HCO}_3^-$	90,30	91,50
$\text{CO}_3^{=}$	0,00	0,00
pH maximum	7,70	8,45
$\text{H}_2\text{CO}_3$	6,00	1,00
$\text{HCO}_3^-$	94,00	98,00
$\text{CO}_3^{=}$	0,00	1,00
Fréquence de la présence du $\text{CO}_3^{=}$	0/14	11/17

L'absence complète de l'ion  $\text{CO}_3^{=}$  durant toute la première période indique clairement le déplacement de l'équilibre entre carbonates et bicarbonates sous l'influence de quantités d'acide carbonique supérieures à celles que contiennent les eaux de la Lufira en période de crue.

### b. — La région littorale de Mulandi

#### 1° Les électrolytes dissous (fig. 14) :

Nous rappellerons que l'étude de cette région du lac a débuté en 1958 seulement. D'autre part, en raison de l'abaissement accentué du plan d'eau en 1959, il a fallu s'éloigner de plus en plus du littoral proprement dit pour trouver des plages d'eau suffisantes pour appliquer les méthodes de prélèvement. Les données obtenues à partir du mois d'octobre 1959 ne sont donc pas strictement comparables aux résultats antérieurs.

Bien que la série des observations soit plus courte que dans la Lufira et dans le Shangalele, les différentes courbes de la fig. 14 indiquent que la concentration saline des eaux littorales obéit aux mêmes lois de dilution (saison des pluies) et de concentration (saison sèche). L'analyse précédente a montré que la composition saline des eaux du Shangalele

demeurait constamment sous la dépendance des apports réguliers de la Lufira. La situation apparaît plus complexe dans le secteur envisagé ici.

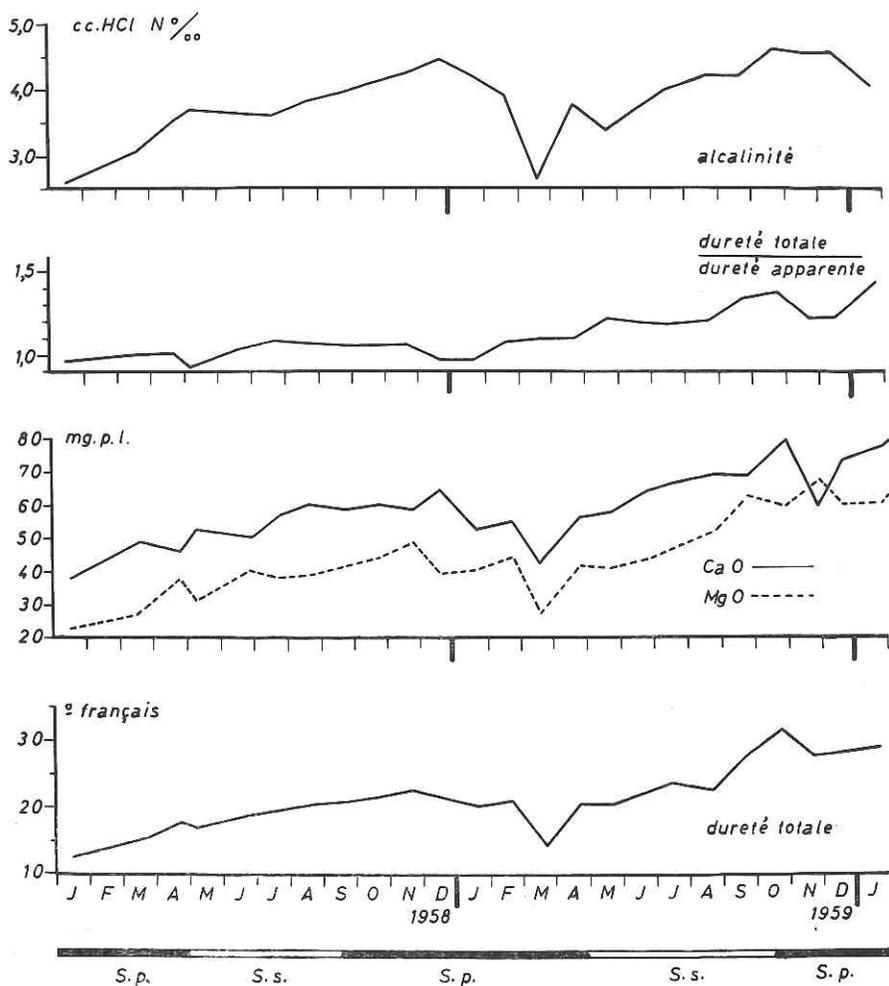


Fig. 14. — Variations des principaux électrolytes dans les eaux de la zone littorale de Mulandi. Période de référence : janvier 1958-janvier 1960.

En effet, en comparant la dureté totale et l'alcalinité mesurées entre novembre 1958 et avril 1959 (fig. 14) à Mulandi et dans la Lufira (fig. 11), on peut conclure qu'un flux d'eau de l'affluent en crue (mars) influence immédiatement les eaux littorales puisque la dureté et l'alcalinité y

atteignent simultanément leur minimum annuel. Cette dépendance se remarque également par le fait que les dosages successifs enregistrent un accroissement constant des titres de dureté et d'alcalinité, exactement comme dans la Lufira et dans le Shangalele.

A l'exception de la courte période où le flux de crue se fait directement sentir dans la région littorale, on remarque (fig. 11, 12 et 14) que la dureté totale y est de 5° français environ plus faible que dans la Lufira et de 3° français inférieure à la dureté totale des eaux du Shangalele. D'autre part, l'analyse des deux rapports : dureté totale / dureté apparente et calcium / magnésium montre, notamment en saison sèche, que la composition ionique des eaux de Mulandi diffère plus que ne le laissent supposer les deux mesures globales précédentes.

Ainsi, le rapport dureté totale / dureté apparente est non seulement beaucoup moins variable, mais surtout constamment plus proche de l'unité que dans le Shangalele et surtout dans la Lufira. Autrement dit, dans ces eaux, les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sont associés en grande partie, voire dans leur totalité, à l'anion  $\text{HCO}_3^-$ , alors que dans les deux autres régions, une fraction de ces mêmes cations est liée à l'anion  $\text{SO}_4^-$  (cf. p. 42).

Dans le Shangalele et dans la Lufira, à la fin de chaque saison sèche, la concentration du magnésium dépasse celle du calcium. La fig. 14 montre, au contraire, que le calcium est toujours plus abondant que le magnésium.

En faisant un rapport entre ces deux constatations, on est porté à croire que la composition particulière de ces eaux littorale résulte principalement d'un appauvrissement significatif en ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{SO}_4^-$ .

Nous ne sommes pas en mesure d'expliquer clairement l'origine et les causes de ces particularités. Des données fragmentaires suggèrent le rôle possible des apports exogènes de la Luafi et de la Lupembashi. Ces rivières confluent, en effet, en amont du point de station (1). Elles possèdent effectivement des eaux dont la concentration en  $\text{SO}_4^-$  est de 10 à 20 fois inférieure à celle de la Lufira. D'autre part, leur rapport Ca/Mg est compris entre 2,3 et 2,7 alors qu'à la même date, il est de 1,75 seulement dans la Lufira.

Mais on doit aussi faire remarquer que les nombreux dosages successifs réalisés dans le Shangalele indiquent également une diminution de la concentration des ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{SO}_4^-$  par rapport à la Lufira. Or, dans le Shangalele, l'interférence d'eaux affluentes est impossible. Dès lors, il est

(1) Le rôle de la Kalonga, rivière plus proche encore de Mulandi, paraît négligeable en raison de son assèchement périodique.

très probable que le métabolisme des diverses biocoenoses lacustres intervient simultanément, cette fois comme cause endogène, pour modifier significativement la composition ionique des eaux.

### 2° L'oxygène dissous :

La courbe traduisant les pourcentages de saturation successifs démontre (fig. 15) que les eaux littorales sont particulièrement mal oxygénées puisque les quantités d'oxygène dosées en surface dans les conditions les plus favorables ne correspondent jamais à plus de 60 % de la saturation. Chronologiquement parlant, ce sont les mois de juillet et d'août qui présentent les situations les meilleures. Ces accroissements se manifestent à l'époque du refroidissement des eaux et des brassages quotidiens les plus intenses et s'observent simultanément dans la zone littorale et le Shangalele. Les teneurs en oxygène enregistrées en janvier et mars 1958, en décembre 1959 et janvier 1960, tendent à faire admettre un second accroissement de l'oxygène en saison des pluies, mais les valeurs mesurées à la fin de 1958 et au début de 1959 prouvent que celui-ci ne se produit pas aussi régulièrement que dans le Shangalele.

Si les eaux de surface sont particulièrement mal aérées, celles du fond le sont moins bien encore. Pendant de longs mois (juin 1958 à juin 1959), l'oxygène dosé au contact du fond correspond rarement à plus de 10 % de la saturation, même lorsque des augmentations momentanées se manifestent en surface. Des déficits de saturation aussi prononcés n'ont jamais été observés au contact du fond de la cuvette du Shangalele où la profondeur est cependant un peu plus grande.

### 3° pH, anhydride carbonique libre :

Sur les 25 mois qu'ont duré les observations, le pH (fig. 15) a varié en surface entre un minimum de 7,0 (avril et mai 1958) ou de 7,05 (mars 1959) et un maximum de 7,45 (septembre-novembre 1958) ou de 7,55 (septembre 1959). Les dosages effectués en dehors de la région littorale proprement dite porteraient ce maximum à 7,9 (janvier 1960).

Les quelques mesures faites dans les eaux de fond montrent que le pH y est normalement plus faible qu'en surface, mais on voit sur la courbe qu'il peut transgresser le point de neutralité.

Les divergences entre la courbe des pH mesurés « in situ » et celle des pH calculés à partir de l'alcalinité de ces mêmes échantillons prouvent clairement la présence de corps chimiques à réaction acide. La fig. 15 montre, en effet, que les pH calculés fluctuent entre des limites déplacées

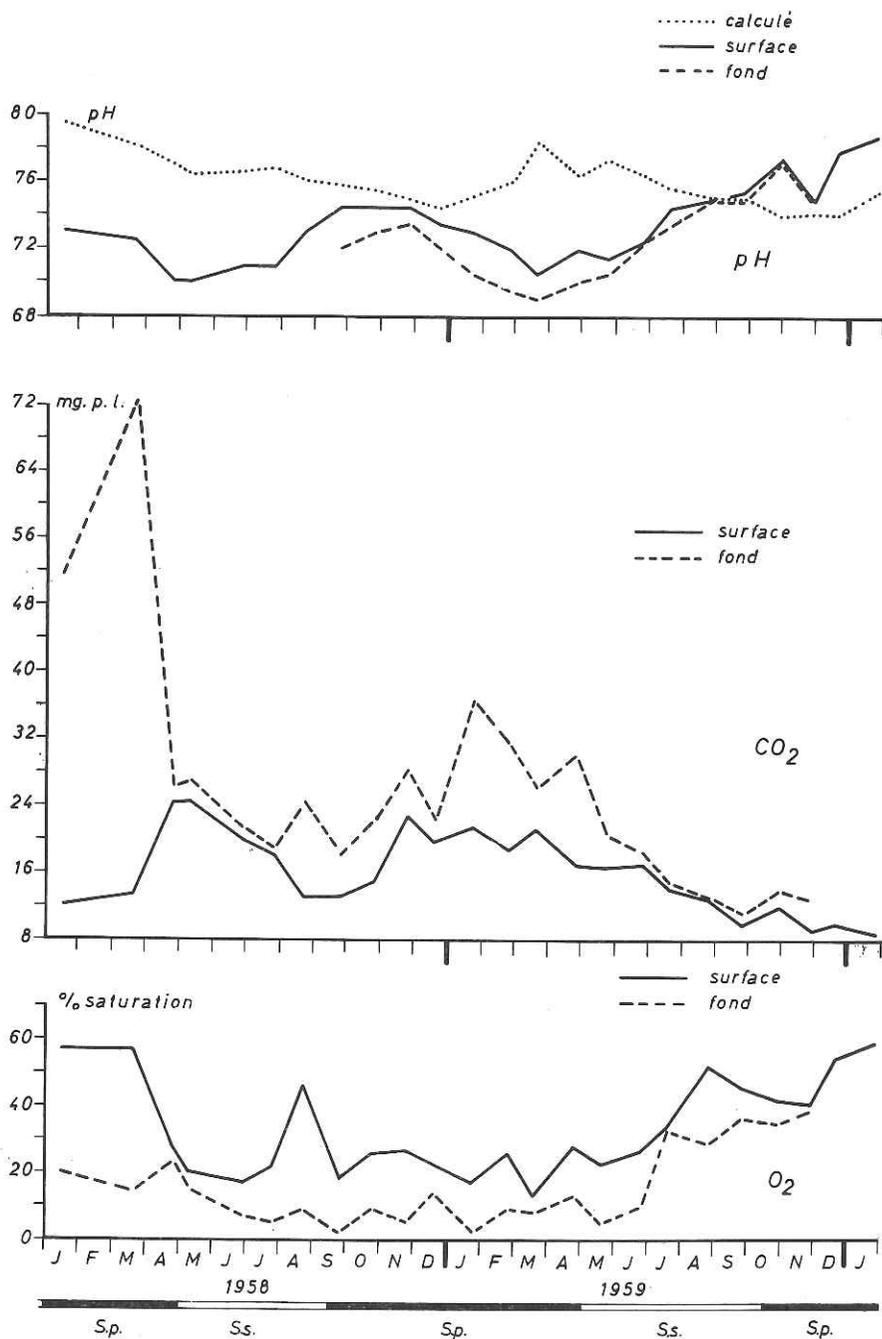


Fig. 15. — Variations du pH (mesuré et calculé), de l'oxygène et de l'anhydride carbonique dans la zone de Mulandi.

systématiquement vers la zone alcaline. Ce n'est qu'en août et septembre 1959, à la fin de la série des observations dans le littoral proprement dit, que la concentration en ions  $H^+$  effectivement mesurée correspond à l'équilibre entre le  $CO_2$  et les bicarbonates.

Entre janvier et septembre 1958, le  $CO_2$  dissous varie en raison inverse du pH. Le bilan de l'acide carbonique (en % molaires) s'y établit ainsi :

pH réel	$H_2CO_3$	$HCO_3^-$	$CO_3^{=}$
minimum			
7,00	22,20	77,80	0,00
maximum			
7,45	9,70	90,30	0,00

les mêmes calculs effectués à partir du pH théorique fournissent les résultats suivants :

pH théorique	$H_2CO_3$	$HCO_3^-$	$CO_3^{=}$
minimum			
7,58	7,50	92,50	0,00
maximum			
7,95	3,70	96,30	0,00

la comparaison des deux séries de pourcentages permet de conclure à l'influence réelle de l'acide carbonique sur le pH.

En octobre 1958 et mars 1959, la comparaison des variations du  $CO_2$  et du pH (fig. 15) indique que leurs rapports réciproques sont beaucoup moins nets, tant en ce qui concerne les eaux de surface que celles du fond. Les bilans réels et théoriques calculés pour les eaux de surface — le TAM des eaux de fond n'a pas été déterminé — démontrent que les quantités de  $H_2CO_3$  ne suffisent plus à expliquer l'abaissement du pH vers son point de neutralité. Dès lors, il est nécessaire de faire appel à d'autres substances manifestant une réaction acide. Dans un milieu aussi marécageux que celui du littoral de Mulandi, il est logique de faire appel aux corps humiques.

Les diverses courbes du graphique 15 démontrent que la composition chimique des eaux de surface peut être très différente de celle des eaux de fond. La fig. 16 fournit trois exemples de cette « stratification ». En janvier 1958, lors de la petite saison sèche, une courte période de stagnation s'est établie sur tout le lac (MAGIS, 1962) ; elle explique la différence de 2° C entre la température des niveaux que nous étudions. Bien que la température reste pratiquement identique entre 2 et 2,75 m., les quantités

d'oxygène et d'anhydride carbonique dissous se modifient considérablement entre ces mêmes niveaux. En mars comme en mai, les différences de température sont moins accusées ; l'heure des prélèvements (10 heures) suffit à expliquer le réchauffement léger des couches superficielles. Malgré cela, le  $\text{CO}_2$ , l' $\text{O}_2$  et surtout le pH se modifient de manière beaucoup plus importante. Les caractères spéciaux des eaux profondes ne sont donc pas dus au fait que cette strate reste séparée de la surface par une zone de saut thermique, ainsi qu'il est habituellement de règle dans un lac en période de stagnation prolongée. Ils résultent, au contraire, de l'influence des sédiments organiques et expriment l'intensité des processus de dégradation qui se déroulent dans leur masse. Le simple jeu des variations thermiques journalières suffit pour ramener en surface tous les produits du catabolisme de la vase maintenus à son contact durant la période d'insolation.

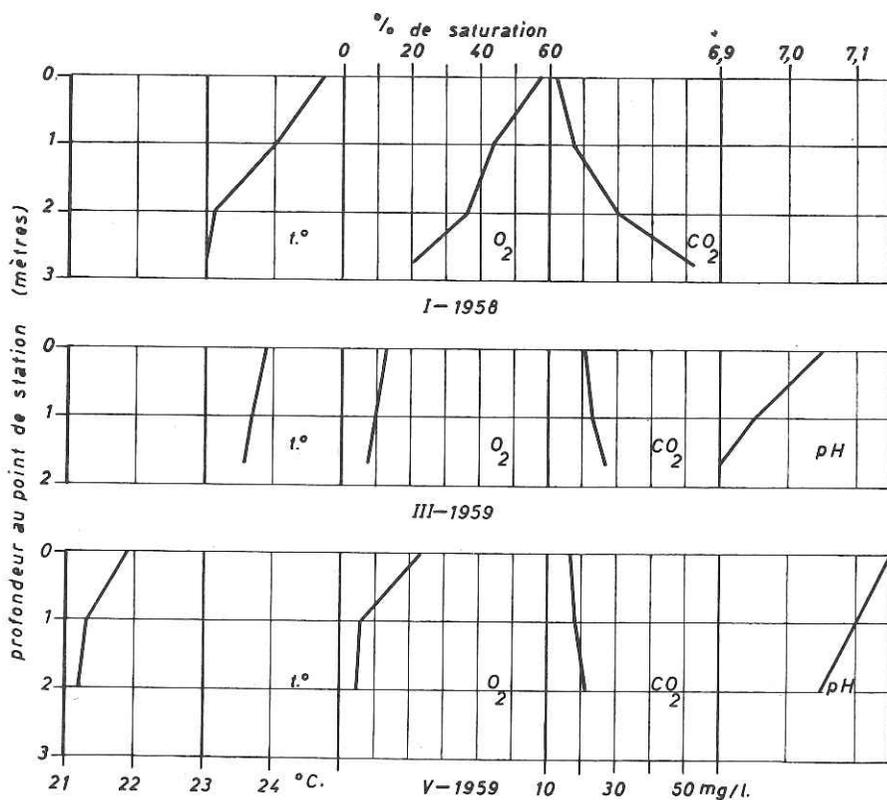


Fig. 16. — Trois exemples de la répartition de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ), de l'oxygène (% de la saturation) et de l'anhydride carbonique (mg/l) en fonction de la profondeur.

L'influence des sédiments paraît avoir été particulièrement forte durant la saison des pluies 1958-59, plus exactement entre les mois de décembre et de mai. L'intensité du catabolisme de la boue organique suffirait ainsi à expliquer d'abord l'absence de toute poussée d'oxygène analogue à celles que montrent les différentes courbes de la fig. 15 entre janvier et mars 1959 et entre décembre 1959 et janvier 1960, ensuite l'amélioration incontestable de la qualité de tout le volume d'eau dès le début de la saison sèche 1959.

### c. — L'exutoire du lac de retenue

1° Les électrolytes dissous :

Les variations du titre de dureté des eaux de l'affluent demeurent encore sensibles dans l'exutoire de la retenue comme le prouve la courbe de la fig. 17. Leur amplitude, déjà réduite dans le Shangalele, l'est

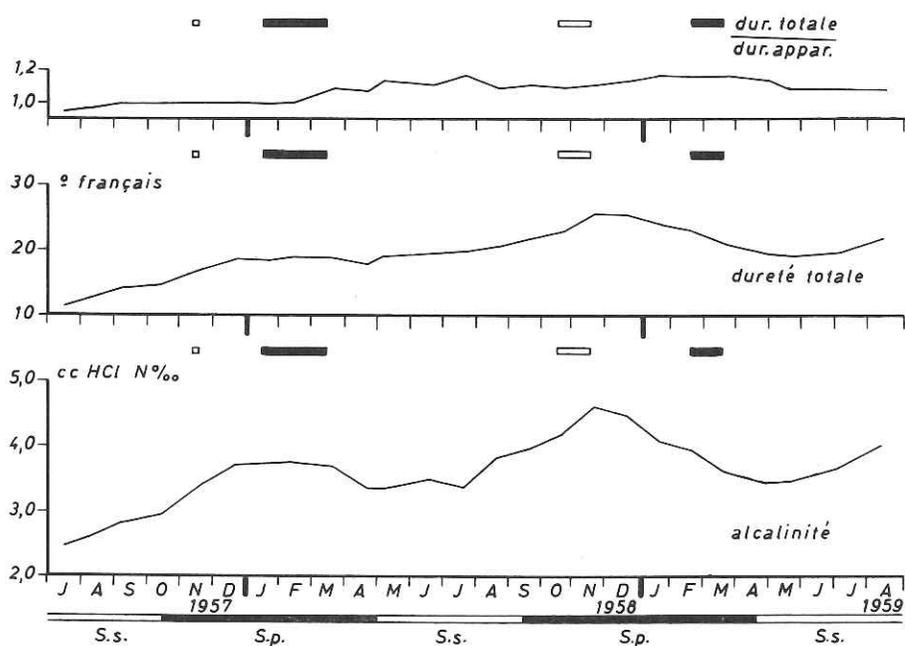


Fig. 17. — Variations de l'alcalinité, de la dureté totale et du rapport dureté totale/dureté apparente dans l'exutoire de la retenue de la Lufira. Période de référence : juillet 1957 — août 1959. Les barres blanches et noires rappellent respectivement les débits moyens de l'étiage et de la crue de la Lufira, indiqués sur la fig. 11.

cependant plus encore dans l'extrême aval du lac ; la comparaison montre enfin que les décalages observés entre les maxima et les minima y sont également plus grands qu'en amont. Le tableau IV, qui donne quelques valeurs caractéristiques de la dureté, fournit la preuve que le degré hydrotimétrique total des eaux de l'exutoire est significativement plus faible. Il existe donc dans le lac de retenue un gradient décroissant de dureté orienté de l'amont vers l'aval.

TABLEAU IV

*Comparaison de la dureté totale des eaux affluentes et lacustres (° français)*

	LUFIRA	SHANGALELE	BARRAGE
Juillet 1957	18,50	15,00	11,50
Décembre 1957	24,30	20,90	18,60
Avril 1958	19,70	17,00	17,75
Novembre 1958	27,00	28,00	26,45
Avril 1959	20,50	18,30	19,30
Août 1959	30,90	27,20	21,75

Les variations de la quantité de bicarbonates données par l'alcalinité TAM suivent parfaitement le rythme de la dureté. Le titre alcalin est cependant, en moyenne, plus élevé que celui de l'affluent. Compris entre 3 et 4 cc HCl N°/100, il fluctue entre des limites pratiquement identiques à celles relevées dans le Shangalele (fig. 12 et 17).

Indépendamment de ces variations périodiques d'amplitude relativement faible, les résultats des titrages successifs de la dureté et de l'alcalinité se classent aussi selon un ordre croissant qui reflète les variations aperiodiques survenues dans la composition saline des eaux affluentes.

Le rapport dureté totale/dureté apparente oscille entre 1,00 et 1,17. On en déduit que les sels de calcium et de magnésium qui confèrent leur dureté aux eaux de l'exutoire sont presque toujours des bicarbonates. Les valeurs de ce rapport sont significativement plus faibles que dans le Shangalele et surtout dans la Lufira, mais du même ordre de grandeur que dans la région de Mulandi. Ainsi qu'on l'a vu précédemment, les modifications quantitatives et qualitatives de la composition saline des eaux de la Lufira, lors de leur traversée de la retenue de Mwadingusha, résultent plus que certainement des activités métaboliques des différentes biocoenoses (1).

(1) VAN MEEL (1953) a montré, au lac Upemba, la proportionnalité existant

## 2° L'oxygène dissous :

Dans les conditions les plus favorables, la quantité d'oxygène dissous dans les eaux de surface correspond seulement à 65-70 % de la saturation, tandis que dans les situations les moins bonnes, on mesure tout au plus une dizaine de pourcents. La fig. 18 montre également que les eaux de fond sont encore plus mal aérées et sont même assez souvent entièrement désoxygénées.

Si l'on fait abstraction des résultats aberrants obtenus en juillet 1957 <sup>(1)</sup>, il est possible de dégager sur la courbe un rythme de variations assez régulier, dont la périodicité correspond parfaitement à celle décelée dans le Shangalele :

— la tension d'oxygène augmente dans tout le volume d'eau au moment de la phase du refroidissement (saison sèche froide) pour atteindre un maximum en surface en août-septembre. A ce moment, début de la saison sèche chaude, les eaux sont thermiquement stratifiées, ce qui explique facilement la diminution brutale de la concentration en O<sub>2</sub> des eaux profondes ;

— ce maximum est immédiatement suivi d'une courte période de faibles concentrations en octobre ;

— la courbe de surface dessine ensuite un second maximum compris entre novembre et janvier, pendant la première moitié de la saison des pluies.

Durant la saison des pluies 1957-58, il n'est pas possible de mettre clairement en évidence une poussée d'oxygène semblable à celle qui se manifeste à cette époque dans le Shangalele et qui serait l'homologue de l'augmentation de la concentration d'oxygène observée dans l'exutoire en 1958-59. Les pourcentages de saturation remarquablement faibles observés en 1957-58 (10 à 25 % contre 35 à 60 % l'année suivante) suggèrent déjà l'existence de variations indépendantes des facteurs saisonniers.

entre la concentration en chlorophylle du nanoplancton et celle du magnésium dissous. Le rôle particulièrement important joué dans le cycle du soufre par différentes bactéries est aussi bien connu (HUTCHINSON, 1957 ; DUSSART, 1966).

<sup>(1)</sup> Résultats peut-être entachés d'une erreur de manipulation au moment de la récolte des échantillons d'eau. J. LIÉTAR qui surveillait alors cette région du lac, était dans l'impossibilité matérielle de refaire immédiatement d'autres prélèvements qui auraient permis le contrôle de ces chiffres absolument inhabituels.

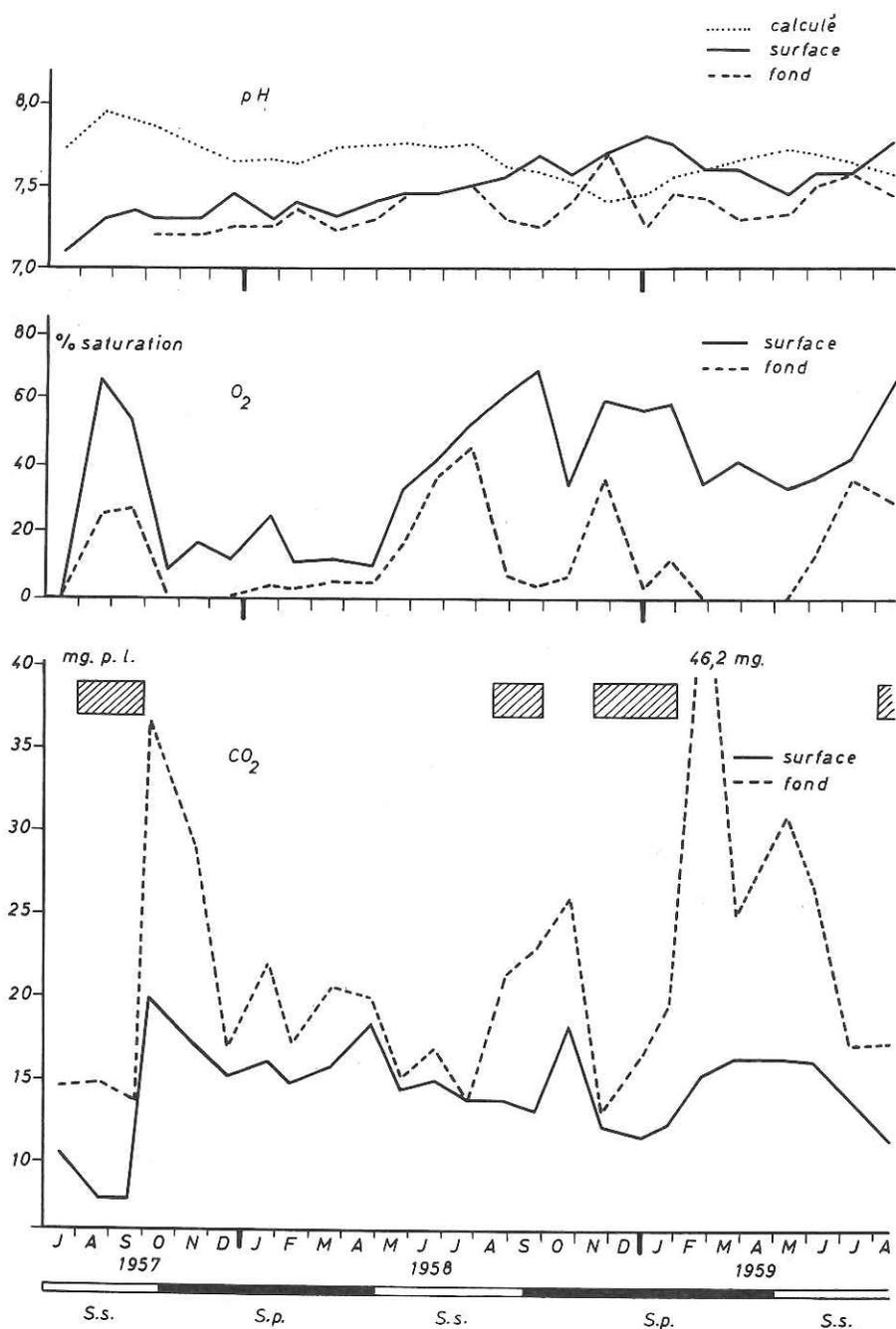


Fig. 18. — Variations du pH (mesuré et calculé), de l'oxygène et de l'anhydride carbonique dans les eaux de l'exutoire. Les rectangles hachurés ont la même signification que sur la fig. 13.

Le tableau V ci-dessous résume les résultats d'une série de stations hydrographiques entreprises en vue de connaître les variations journalières de la concentration en oxygène dans le plan d'eau libre qui s'étend immédiatement en amont du barrage de Mwadingusha.

TABLEAU V  
Variations journalières de la concentration en oxygène (mg./l.)

HEURES	06	09	12	15	18	21-22	03-06
19.XII.1957							
0-1 m.	1,51	0,86	1,44		1,25	1,10	
6 m.	0,11	0,33	0,80		0,35	0,28	
20.I.1958							
0-1 m.	1,15	0,94	0,97	1,40	1,42	1,25	
6 m.	0,62	0,38	0,22	0,32	0,41	0,10	
23-24.IV.1958							
0-1 m.	0,22	0,38	1,00	1,00	0,84	0,78	0,31
6 m.	0,22	0,31	0,68	0,53	0,83	0,58	0,56
17-18.VII.1958							
0-1 m.	1,79	1,97	4,32	4,95	4,64	4,93	3,75
6 m.	1,59	1,71	3,32	3,74	4,48	3,28	3,71

PHYTOPLANCTON :

19-XII-57, *Synedra* sp. (2) — 20-1-58, *Synedra* sp. (2) — 23-IV-58, *Lyngbia limnetica* (3) — 17-VII-58, *Synedra* sp. (2), *Melosira granulata* (2), *Microcystis* sp. (4) (2) : isolé — (3) : dispersé — (4) : nombreux (cf. p. 102)

Lors des trois premiers essais — effectués précisément pendant la période incriminée — l'augmentation de la concentration de l'O<sub>2</sub> n'atteint même pas 1 mg/l. et quelques heures d'obscurité suffisent, en outre, à abaisser sensiblement la tension du gaz dans ce même premier mètre d'eau. En juillet, par contre, la situation est très différente et manifestement plus conforme à ce qu'on peut théoriquement attendre des effets de la photosynthèse. La concentration en oxygène augmente de 3 mg/l. environ tandis que les pertes nocturnes se chiffrent à 1,2 mg. seulement par litre d'eau de surface. Le bilan de cette série — qui correspond au début de la seconde période dont il est fait mention plus haut — se solde donc par un bénéfice appréciable tandis que la balance des trois essais précédents indiquait tout au plus un statu-quo. La carence de la production diurne d'oxygène doit être mise en rapport avec la pauvreté du peuplement algal comme le prouve la comparaison des indices d'abondance du phyto-

plancton. Loin de refléter des situations accidentelles et momentanées, les taux de saturation anormalement faibles enregistrés dans l'exutoire entre octobre 1957 et avril 1958 expriment donc un réel état de déséquilibre entre les facteurs biologiques de production et de consommation.

### 3° pH, anhydride carbonique libre :

La courbe exprimant les variations du pH mesuré dans les eaux superficielles (fig. 18) montre que celui-ci s'est accru tout au long de la période de surveillance. Cette augmentation n'est pas absolument continue, mais est entrecoupée de deux paliers principaux. Le premier s'étend depuis août 1957 jusqu'en mars 1958 et montre un pH continuellement voisin de 7,3. Le second, compris entre février et juillet 1959, se reconnaît par des valeurs oscillant légèrement autour de 7,6 ; les 0,3 unité qui distinguent ces deux paliers confirment cependant le sens général de la modification survenue dans l'exutoire. Celle-ci est également corroborée par les relevés successifs pris au contact du fond (fig. 18) mais elle ressort mieux encore de la confrontation des pH effectivement mesurés et ceux calculés à partir de l'alcalinité des mêmes échantillons.

Entre juillet 1957 et août 1958, soit pendant plus d'un an, les pH effectivement mesurés sont systématiquement inférieurs aux pH théoriques. Les eaux de la région nord du lac tiennent donc en dissolution une ou des substances qui accentuent leur acidité. La poussée de photosynthèse, qui se manifeste entre août et septembre 1957 par une augmentation significative du taux d'oxygénation et par une diminution corrélative de la concentration en  $\text{CO}_2$  ne modifie pas cet état. En août 1958, le pH mesuré correspond à celui de l'équilibre mais, à partir de septembre et jusqu'en janvier 1959, le rapport entre pH expérimental et théorique s'inverse, indiquant ainsi un état d'alcalinisation. Une nouvelle période d'acidification survient entre février et juillet 1959 mais moins forte que la précédente si l'on se réfère aux écarts modestes qui séparent les deux courbes. Une période d'alcalinisation semble débiter en août. La longue période d'acidification apparaissant dans la région de l'exutoire est tout à fait comparable à celle qui a été mise en évidence dans le Shangalele, elle se situe d'ailleurs exactement à la même époque.

Les différents états de l'eau diagnostiqués à partir du pH se reconnaissent également sur la courbe figurant les variations du  $\text{CO}_2$  dissous en surface (fig. 18). Le  $\text{CO}_2$  est cependant plus concentré dans les eaux de l'exutoire que dans celles du Shangalele. Dans ce dernier il fluctue entre 6 et 14 mg./l. durant la phase d'acidification mais est compris entre

8 et 20 mg./l. dans l'exutoire. La différence de concentration est encore plus nette dans la suite lorsqu'on tient compte des cas, assez fréquents, où les eaux de surface du Shangalele ne montrent aucune trace d'anhydride libre ; de telles décalcifications biologiques n'ont jamais été observées dans la partie nord de la retenue, même aux époques de fortes productions.

Si les quantités accrues de  $\text{CO}_2$  peuvent expliquer les écarts entre pH théoriques et réels, d'autres corps doivent intervenir, momentanément au moins, dans le même sens. On ne pourrait comprendre autrement les résultats des stations hydrographiques effectuées en juillet, août et septembre 1957. On y a mesuré, en effet, les concentrations les plus faibles de  $\text{CO}_2$  (8-10 mg./l.) et simultanément les pH les moins alcalins (7,1-7,35). Cette conclusion n'est pas anormale si on la compare à la situation décrite dans la région de Mulandi (p. 55).

#### 4° la stratification chimique :

Les figures précédentes ont montré que les eaux de la surface pouvaient avoir momentanément une composition chimique très différente de celle des eaux de fond. Les trois courbes présentées fig. 19 illustrent quelques modalités de cette stratification chimique.

a. — en juillet 1958, au moment des brassages quotidiens du volume d'eau, la composition chimique des divers niveaux est parfaitement homogène aussi bien en ce qui concerne les concentrations des gaz que celles des électrolytes dissous et du pH.

b. — le 27 août 1958, au début de la période du réchauffement, les six premiers mètres ont même température mais 1° C sépare brutalement les niveaux — 7 et — 9. Cette barrière thermique suffit à modifier très légèrement la composition saline et le pH des couches inférieures à 7 m. Les variations verticales de l'oxygène et de l'anhydride carbonique se montrent beaucoup plus indifférentes à cette barrière thermique puisque leurs concentrations respectives se modifient dès le cinquième mètre, c'est-à-dire, à un niveau plus proche de la surface que celui marquant le début du thermocline.

c. — le 24 septembre 1958, en saison sèche chaude et après un mois de stratification thermique continue (MAGIS, 1962), les eaux de surface sont 2,65° C plus chaudes que celles du fond. Il n'y a pas de thermocline à proprement parler mais les différences de température divisent néanmoins le volume d'eau en deux régions distinctes ; une première, entre 0 et — 5 m. est homéotherme et peut, de ce fait, être considérée comme un

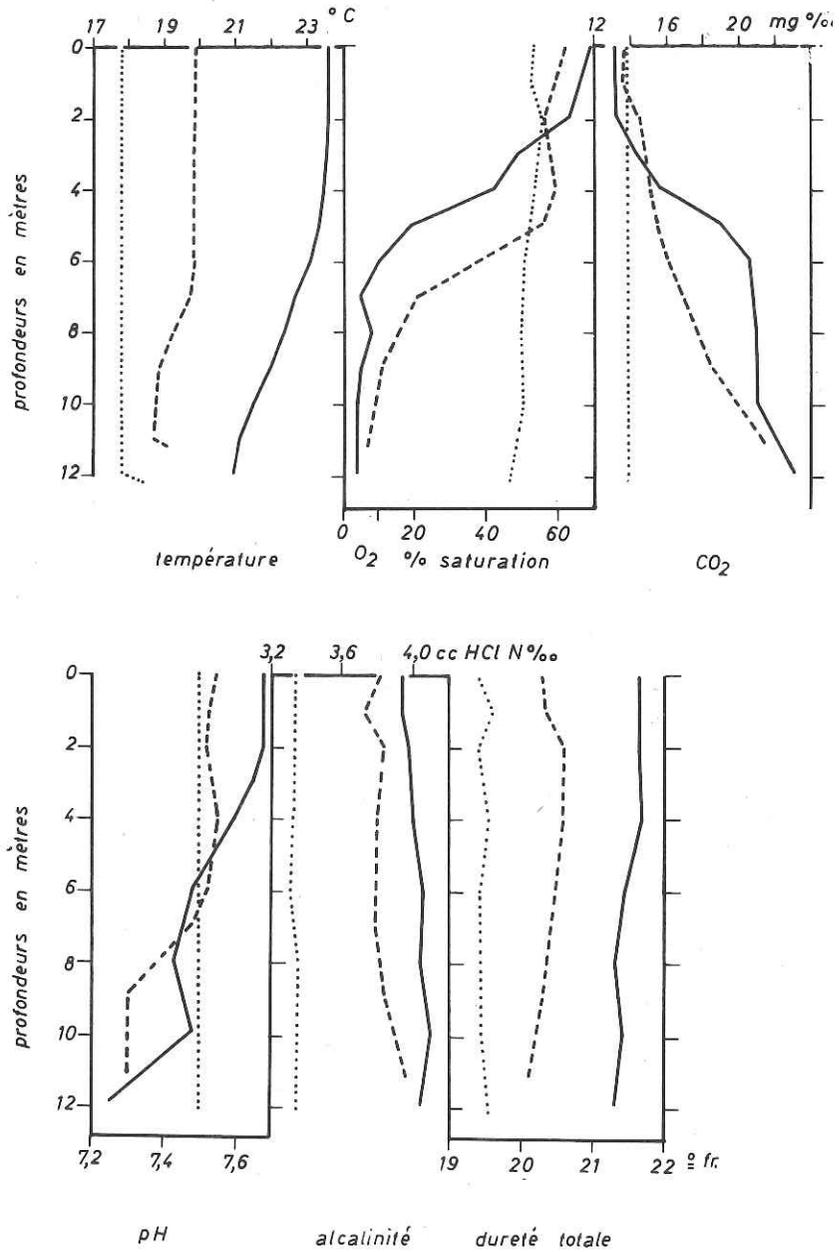


Fig. 19. — Trois exemples de la stratification thermique et chimique des eaux de l'exutoire de la retenue de la Lufira.

- 1) traits pointillés : juillet 1958
- 2) traits interrompus : août 1958
- 3) traits pleins : septembre 1958

épilimnion ; une seconde occupe tout le volume restant et est formée d'une série de couches progressivement de plus en plus froides. Si la composition ionique de ces deux masses d'eau est peu différente, elles s'opposent toutefois de façon très nette lorsque leurs concentrations en gaz dissous et leur pH sont pris en considération. Comme en août, les variations verticales de ces derniers facteurs ne correspondent pas aux différences thermiques puisque leurs concentrations se modifient dès le second mètre.

Malgré la profondeur relative de l'exutoire, ces trois exemples, choisis parmi de nombreux autres, prouvent que la stratification thermique et la stratification chimique des eaux sont fort indépendantes. Il importe de faire immédiatement la distinction entre les facteurs intéressant la composition ionique qui ne se stratifient pas ou guère et ceux qui sont en rapport plus intime avec les activités biologiques. Pour ces derniers, de légères différences thermiques suffisent à provoquer leur stratification immédiate. Mais on constate qu'il n'y a aucune corrélation entre la position du thermocline et celle du saut chimique. Ce dernier se situe toujours entre des niveaux plus superficiels de sorte que la désoxygénation des eaux profondes, leur enrichissement en anhydride carbonique et la diminution de leur pH se manifestent dans un volume d'eau plus grand que celui qui correspond à l'hypolimnion thermique.

Ces particularités importantes doivent être mises en rapport avec les faits précédemment décrits dans le littoral de Mulandi où, par suite de la profondeur réduite, l'influence des sédiments se fait sentir jusque dans la pellicule superficielle.

#### **d. — Influence du cycle de la végétation palustre sur la composition chimique des eaux lacustres**

Nous avons dit précédemment que l'ensemble des problèmes biologiques du lac de Mwadingusha ne pouvait être dissocié des variations cycliques à long terme de la végétation semi-aquatique qui envahit sa surface.

On doit également se souvenir que toutes les observations qui viennent d'être commentées se situent pendant une période de régression du couvert végétal, succédant à la transgression des années 1954 et 1955. Pour interpréter définitivement les faits précédents et tenter d'en dégager la synthèse, il était nécessaire de chercher au préalable des preuves plus directes de l'action des végétaux sur la composition de l'eau. Dans ce but, des échantillons ont été prélevés au sein des différents groupements, à des

profondeurs de 0,6-0,7 m., correspondant à la limite inférieure la plus courante de l'horizon des racines. Comme termes de comparaison, des prélèvements ont été effectués simultanément aux même profondeurs dans les zones libres les plus voisines des prairies étudiées. Le tableau VI présente l'ensemble des résultats des différents titrages et dosages.

TABLEAU VI

*Concentrations en gaz dissous et pH des eaux baignant l'horizon des racines des plantes palustres*

	O <sub>2</sub> mg. p. l.	CO <sub>2</sub> mg. p. l.	H <sub>2</sub> S mg. p. l.	pH
1. — Témoin « amont » eau libre	1,69	15,6	5,8 <sup>(1)</sup>	7,45
2. — prairie d' <i>Oryza</i>	0,00	22,8	7,2	7,30
3. — idem	0,40	24,8	7,2	7,25
4. — Témoin « aval », lisière des prairies	1,03	22,7	6,2	7,30
5. — Témoin « amont » eau libre	2,04	14,5	0,00	7,50
6. — prairies de <i>Vossia</i>	0,00	20,6	0,75	7,30
7. — idem	0,90	19,8	0,40	7,45
8. — lisière des prairies	1,32	17,0	0,55	7,45
9. — Témoin « aval », eau libre	1,90	14,1	0,50	7,45
10. — Témoin « amont » eau libre	1,10	17,0	0,00	7,40
11. — îlots d' <i>Oryza</i>	0,25	18,4	0,60	7,30
12. — idem	0,46	22,6	0,50	7,35
13. — plage d'eau libre au milieu des îlots	0,49	17,8	traces	7,40
14. — coussins de <i>Leersia</i> en décomposition	0,00	25,0	1,15	7,25
15. — Témoin « aval », eau libre	0,94	17,8	0,50	7,45
16. — Témoin, plage d'eau libre entre les îlots	1,70	16,8	0,10	7,30
17. — îlots de <i>Leersia</i>	0,00	22,2	0,35	7,20
18. — prairie d' <i>Oryza</i>	0,70	18,0	0,55	7,30
19. — Témoin, plan d'eau libre entre les îlots	3,38	11,0	—	7,55
20. — prairie de <i>Vossia</i>	0,69	16,6	—	7,35

<sup>(1)</sup> Les valeurs indiquées pour cette série d'essais intéressent la quantité de matières oxydables par KMnO<sub>4</sub> (mg. O<sub>2</sub> p. l.).

Par rapport aux témoins, les eaux baignant directement les racines et les rhizomes des plantes flottantes présentent les particularités suivantes ;

- diminution très accusée de la quantité d'oxygène dissous,
- augmentation de la concentration en  $H_2S$  et en produits oxydables par le permanganate,
- augmentation de la teneur en anhydride carbonique,
- diminution faible mais très régulière du pH.

Les différences de concentration mises en évidence dans le tableau VI sont d'autant plus significatives qu'il faut tenir compte du fait que les flots de végétation palustre sont continuellement en mouvement. Tantôt ils s'agrègent les uns aux autres et forment une véritable éponge au travers de laquelle doit filtrer le courant lacustre. Tantôt ils se désagrègent en unités plus petites et forment un réseau discontinu. Dans les méats ainsi ménagés, les eaux superficielles bénéficient à nouveau du contact avec l'atmosphère. La retenue est, par ailleurs, traversée par un courant certes lent mais continu qui apporte au lac des eaux qui ne manifestent aucune trace de pollution organique (cf. p. 44). En d'autres termes, le jeu combiné, mais incontrôlable sur l'ensemble de la surface lacustre, de ces différents facteurs fait très heureusement obstacle au confinement prolongé des réactions mises en évidence dans le tableau VI. Ces mêmes facteurs permettent simultanément un étalement des effets de cette pollution, aussi bien dans l'espace que dans le temps.

Le sens du déplacement des concentrations des gaz dissous, les modifications du pH et surtout les corrélations que ces facteurs de l'environnement présentent entre eux, prouvent incontestablement que les vastes prairies de végétaux palustres sont effectivement à l'origine d'une pollution organique du milieu semi-stagnant qu'est la retenue de la Lufira.

Au point de vue des seuls facteurs analysés, l'action des plantes palustres sur la composition de l'eau se traduit surtout par une consommation rapide et pratiquement totale de l'oxygène dissous et par une libération de substances à caractère réducteur. En ce qui concerne l'oxygène, les résultats de Mwadingusha corroborent parfaitement ceux obtenus par HARDING (1961) dans les zones du lac Kariba couvertes par *Salvinia auricularia*, plante semi-aquatique qui s'est abondamment multipliée dès la mise sous eau de la retenue du Zambèze.

Les dosages réguliers des gaz dissous et les mesures simultanées du pH dans les trois régions « pilotes » de la retenue ont mis en évidence d'importantes différences au sein du lac :

a. — le secteur du SHANGALELE où le plan d'eau est resté pratiquement toujours libre de toute végétation semi-aquatique :

- saturation en  $O_2$  exceptionnellement inférieure à 50 %, parfois eaux légèrement sursaturées,
- concentrations en  $CO_2$  comprises entre 5 et 15 mg./l. assez souvent aucune trace d'anhydride libre dans les eaux superficielles,
- pH alcalin, compris entre 7,45 et 8,45, assez souvent compatible avec l'existence de l'ion  $CO_3^-$ .

b. — la zone de l'EXUTOIRE où se récoltent les eaux de l'amont :

- saturation en  $O_2$  faible, dépassant assez rarement 50 %, parfois inférieure à 10 %, jamais de sursaturations aux heures matinales des stations hydrographiques,
- concentrations en  $CO_2$  comprises entre 10 et 20 mg./l., pouvant atteindre 30 à 50 mg. au contact du fond ;  $CO_2$  toujours dosable à l'état libre,
- pH moins alcalin, compris entre 7,1 et 7,7, jamais inférieur à 7,0 même dans les eaux de fond,
- stratification très marquée de ces éléments mais fort indépendante de la stratification thermique ; la différence de niveau entre le thermocline et ce chémocline réduit le volume des couches épilimniques et augmente corrélativement celui de l'hypolimnion.

c. — le secteur de MULANDI, zone littorale abondamment envahie par les plantes palustres :

- Oxygénation très médiocre, habituellement comprise entre 20 et 30 % de la saturation, de 2 à 10 % seulement au contact du fond en dépit de la faible profondeur,
- eaux riches en  $CO_2$ , concentrations moyennes voisines de 20 mg. p. l. en surface, de 25 mg. au fond mais avec des maxima occasionnels de 50 et même de plus de 70 mg./l.  $CO_2$  également toujours dosable à l'état libre ;
- pH compris, en surface, entre 7,0 et 7,7, eaux de fond présentant parfois une réaction faiblement acide avec un pH minimum de 6,9 ;
- stratification parfois très marquée malgré la très faible profondeur et la fréquence des brassages, entièrement déterminée par les sédiments organiques couvrant le fond.

Cette diagnose, volontairement établie en fonction du degré croissant d'enherbement des secteurs pilotes, montre un gradient de pollution parallèle à celui mis en évidence dans les eaux baignant directement ces mêmes formations végétales. Ces dernières peuvent, par conséquent, être tenues comme les principales responsables des différences observées d'une région à l'autre du lac de retenue.

La longue durée de nos observations permet également de conclure que ce parallélisme se traduit non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. C'est, en effet, en fonction de la végétation que doivent s'expliquer les variations à long terme de la qualité de l'eau, telles que la succession régulière des dosages des gaz dissous et les relevés du pH les ont mises en évidence dans l'ensemble du lac.

Ainsi, le développement massif de la végétation palustre à la faveur des baisses importantes du niveau en 1954 en 1955, a entraîné dans le lac une très longue période d'acidification relative qui s'est prolongée jusqu'en juillet 1958. Mais la disparition progressive des plantes, favorisée par le maintien d'un plan d'eau peu variable et constamment élevé jusqu'en 1959, s'est soldée par une amélioration sensible de la qualité des eaux. Ce retour vers des conditions plus favorables a pris son départ au mois d'août 1958. Dans la zone littorale de Mulandi, où la colonisation végétale fut la plus dense, la période de pollution s'est toutefois prolongée jusqu'en août 1959.

Nos recherches ont en outre montré que ce sont les sédiments qui, plus que la température, conditionnent en fait la stratification chimique des eaux. Les carottes de sondage prélevées dans ces dépôts (DAMAS, MAGIS et NASSOGNE, 1959) montrent immédiatement l'importance que prend la végétation dans la sédimentation. Les photos publiées mettent en évidence deux strates très distinctes : l'horizon superficiel, épais de 20 à 30 cms, est constitué de débris végétaux plus ou moins bien conservés, il surmonte une strate de boue fluide, épaisse selon les endroits de 30 à 70 cms, dont la coloration noire indique clairement la nature organique.

L'influence du cycle de la végétation palustre sur la composition chimique des eaux lacustres se traduit donc non seulement par des actions superficielles, localisées dans le feutrage des racines et des rhizomes des prairies flottantes, mais également par des actions profondes au niveau des sédiments.

### C. — Conclusions

Les variations de la composition chimique des eaux du lac de retenue de la Lufira sont très différentes selon que l'on considère leur composition ionique fondamentale ou les éléments liés plus immédiatement à l'activité des organismes.

Dans le cadre de la nomenclature proposée par KUFFERATH, les eaux de la Lufira sont des eaux hexaioniques mais spécialement riches en carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium (eaux moyennement à franchement dures). Une partie de ces cations existe néanmoins sous une forme non carbonatée, liée très vraisemblablement à l'ion  $\text{SO}_4^-$ . Les proportions relatives des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  ne se modifient pas seulement au cours d'un cycle annuel mais aussi au cours des cycles successifs.

Les rapports entre la concentration des électrolytes dissous et le régime de la Lufira s'expriment par une corrélation négative ; cette dernière traduit le jeu normal des phénomènes physiques de la dilution et de la concentration. L'amplitude des variations, très forte dans l'affluent — la dureté totale y est doublée ou triplée à l'étiage — est normalement amortie dans la retenue. La périodicité des maxima et des minima y est en outre décalée et l'écart est d'autant plus grand qu'on s'avance vers l'aval. L'entrée des sels de calcium et de magnésium dans le cycle de la biomasse lacustre est prouvée par l'existence d'un gradient de dureté, décroissant de l'amont vers l'aval.

L'étude des facteurs qui dépendent plus immédiatement du métabolisme des biocoenoses lacustres ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  et pH) décèle également des variations périodiques dont le rythme est entièrement indépendant de l'affluent et qui relèvent de deux causes très distinctes. Un premier cycle, qui peut être qualifié de cycle à court terme, est lié à la poussée des algues planctoniques dont l'activité photosynthétique peut être appréciée par les modifications corrélatives de l'oxygène, de l'anhydride carbonique et du pH. Deux pics se dessinent ainsi au cours d'une année : le premier en août-septembre, coïncide avec le passage de la saison sèche froide à la saison sèche chaude, le second, entre novembre et janvier, se manifeste durant la première moitié de la saison des pluies. Deux maxima de photosynthèse caractérisent également le cycle annuel du lac Upemba (VAN MEEL, 1953), ils apparaissent le premier en mars (saison des pluies) et le second en août (saison sèche). Les concordances sont frappantes et méritent d'être soulignées.

En même temps que les variations à court terme dont il vient d'être question, les gaz dissous et le pH se sont modifiés suivant un rythme de

plus grande amplitude. Deux grandes périodes ont pu ainsi être envisagées dans l'ensemble du lac. Leur durée respective (juillet 1957-juillet-août 1958 d'abord ; septembre 1958 — fin de la période des observations, ensuite) chevauche les saisons sèches et pluvieuses comme les crues et les décrues du lac et de son affluent. Les différentes qualités des eaux lacustres doivent par conséquent s'expliquer par l'intervention d'un facteur ayant son origine dans le lac lui-même. L'ensemble des facteurs étudiés pendant de longs mois amène à découvrir une diminution progressive du pouvoir réducteur des eaux durant la seconde période. Le sens de cette transformation est le même que celui apparaissant lorsque sont comparés des échantillons d'eau pris à l'intérieur et en dehors des formations végétales semi-aquatiques. Les variations à long terme de la composition chimique des eaux de la retenue de la Lufira sont donc liées à l'extension et au retrait progressif de la végétation palustre qui envahit son plan d'eau.

Même dans la zone la plus profonde du lac (12 à 14 m.) la conductibilité électrique, la dureté totale et l'alcalinité ne se modifient guère sur toute la hauteur d'eau. Les gaz dissous et le pH par contre, se stratifient fortement dès qu'une légère différence thermique se manifeste entre les différentes couches. Lorsque les eaux sont thermiquement stratifiées, on remarque cependant que la zone du saut thermique se situe entre des niveaux plus profonds que ceux où se produisent les variations rapides des gaz dissous et du pH. Cette discordance a pour résultat de limiter le volume des couches épilimniques au profit de l'hypolimnion où règnent des conditions peu favorables aux organismes planctoniques. Un des résultats les plus notables des recherches entreprises est de montrer que les caractères spéciaux des eaux de fond ne sont pas dus au fait qu'elles sont séparées de la surface par une couche de saut thermique mais sont la conséquence de l'influence des sédiments. Le fait doit être certainement mis en relation avec la température élevée où sont maintenus ces sédiments (cf. fig. 7 et 8).

Ce type de stratification chimique, plus biologique que thermique, apparaît également dans plusieurs lacs naturels de la plaine rwandaise de la Nyawarongo (DAMAS, 1954) et pourrait donc être caractéristique de tous les lacs centre-africains peu profonds.

### 3. — RÉSERVOIR DE KONI

#### a. — Les électrolytes dissous

La composition ionique des eaux de Koni doit, en principe, être semblable à celle déterminée devant le barrage de Mwadingusha puisque ce sont les eaux de cette portion terminale de la retenue de la Lufira qui alimentent le réservoir, après avoir traversé les turbines de la centrale électrique. Les trois exemples réunis dans le tableau ci-dessous prouvent qu'il en est effectivement ainsi. Ces résultats sont, d'autre part, entièrement confirmés par les mesures routinières de la conductibilité électrique et de la dureté totale effectuées pendant plus d'un an, de mars 1958 à août 1959.

TABLEAU VII

*Composition saline des eaux du lac de Koni et de la partie Nord de la retenue de la Lufira (mg./l).*

	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	rédis. sec.	résid. calc.
janvier 1959									
KONI									
surf.	46	29	254	20	8	20	21	316	213
fond.	43	28	292	10	8	13	21	318	206
MWADINGUSHA									
surf.	47	29	260	20	8	18	23	318	206
fond.	47	26	255	20	9	26	24	344	237
mai 1959									
KONI									
surf.	41	22	209	17	2	14	17	267	165
fond.	41	22	191	16	2	18	18	280	175
MWADINGUSHA									
surf.	39	22	189	15	2	16	20	265	170
fond.	41	21	185	15	2	15	16	260	158
août 1959									
KONI									
surf.	46	24	239	26	2	16	26	292	186
fond.	44	25	232	26	1	19	26	291	191
MWADINGUSHA									
surf.	46	25	242	26	2	15	27	295	212
fond.	48	24	238	35	1	18	25	296	191

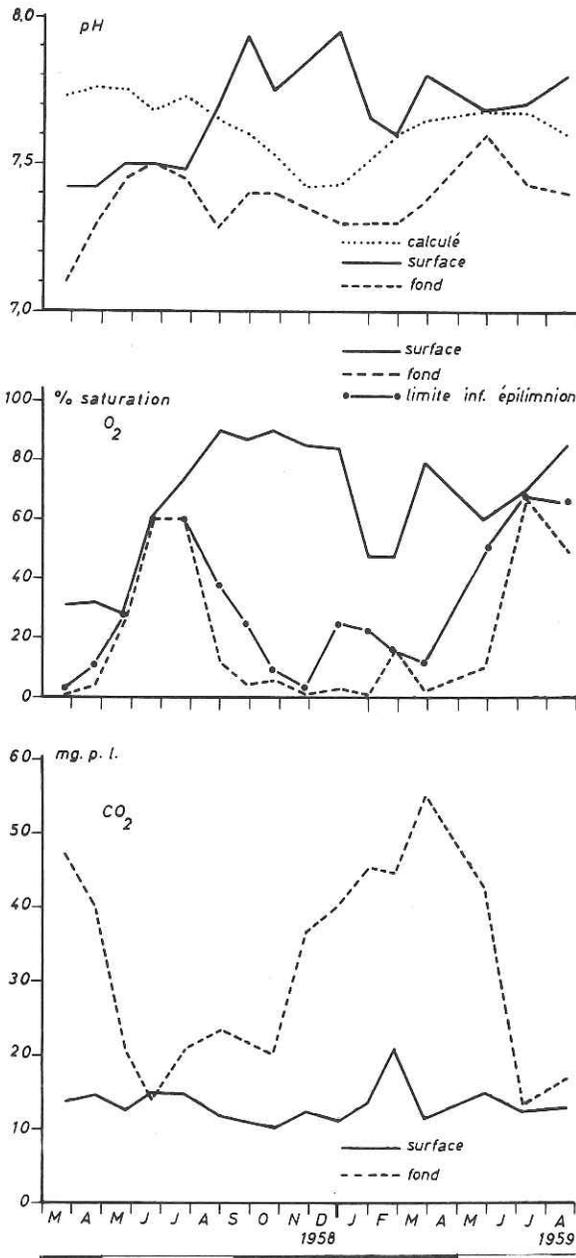


Fig. 20. — Variations du pH (mesuré et calculé), de l'oxygène et de l'anhydride carbonique dans le réservoir de Koni. Période de référence : mars 1958 — août 1959.

## b. — Les gaz dissous, le pH

En comparant les positions des différentes courbes des fig. 18 et 20 par rapport à leurs ordonnées respectives, on constate immédiatement que les eaux de Koni contiennent en général plus d'oxygène dissous, renferment moins de  $\text{CO}_2$  et ont un pH légèrement plus alcalin que celles de l'exutoire de la retenue de la Lufira.

D'autre part, en confrontant les pH mesurés dans les échantillons de surface et ceux calculés à partir de leur titre alcalin au méthylorange, on constate, au début des observations, que les eaux ont en réalité un pH plus acide que celui qui correspond théoriquement à leur alcalinité. Cette période d'acidification s'achève en juillet 1958, c'est-à-dire en même temps que dans l'exutoire de la retenue de la Lufira. Étant donné la stabilité relative de la concentration de l'anhydride carbonique de ces mêmes eaux superficielles, on doit admettre que le  $\text{CO}_2$  n'est pas le seul corps acidificateur. Il s'y ajoute très certainement les substances humiques provenant de la décomposition des masses végétales qui envahissent la retenue de la Lufira <sup>(1)</sup>.

Le tableau VIII présente les résultats d'une série d'analyses d'oxygène dans des échantillons prélevés, le même jour, dans l'exutoire de la Lufira et en différents points du réservoir de Koni, entre la centrale Francqui et le barrage. La position exacte des endroits de prélèvement est donnée sur la carte du lac (fig. 3).

Ces différentes mesures démontrent que le passage des eaux de l'exutoire dans les turbines de la centrale hydroélectrique s'accompagne d'un accroissement très significatif de leur concentration en oxygène. Dans le cas étudié, le brassage de l'eau par les turbines a pratiquement doublé le pourcentage de saturation. Les dosages effectués en aval de cette « chute » artificielle démontrent aussi que l'action favorable du brassage mécanique des eaux prolonge ses effets sur une notable étendue, tout au moins dans la pellicule superficielle. Ceci résulte de l'action combinée de plusieurs causes locales. Primo, l'existence d'un fond caillouteux ou très légèrement vaseux, sur près d'un kilomètre ; secundo la localisation des prairies en dehors du courant principal. Les stations 4 et 5 montrent cependant l'influence immédiate des sédiments dès que la profondeur acquiert une certaine importance et que les effets du courant s'amortissent.

(1) La coloration propre de l'eau correspond, à Koni comme à Mwadingusha, aux étalons n° 14, 15 et 16 de l'échelle de FOREL-ULE. Ces teintes brun-jaunâtres plus ou moins foncés sont bien caractéristiques d'eaux chargées de dérivés humiques.

Les trois courbes de la fig. 20 suggèrent que la période qui a suivi immédiatement la circulation totale de juin-juillet 1958 marque le début d'une première poussée annuelle de phytoplancton. Elle répond parfaitement à celle qui a été décelée dans la retenue de la Lufira, à la même époque. Cette situation se maintient à Koni jusqu'en décembre, elle serait, par conséquent, un peu plus longue que dans la retenue de la Lufira. Par

TABLEAU VIII  
*Variations locales du pourcentage de saturation d'oxygène.*

LOCALISATION	Taux de saturation (%)
A. — Exutoire lac Lufira	
0 m.	33
— 2 m.	26
— 5 m.	17
— 10 m.	18
— 12 m.	17
B. — Sortie des turbines (station 1)	
0 m.	63
— 1,3 m.	62
C. — Zone de transition	
station 2	
0 m.	62
— 1 m.	60
— 4,7 m.	58
station 3	
0 m.	55
— 1 m.	55
— 5,5 m.	48
station 4	
0 m.	57
— 1 m.	57
— 5,7 m.	50
station 5	
0 m.	72
— 1 m.	67
— 5 m.	55
— 11 m.	24
D. — Aplomb du barrage (station 7)	
0 m.	60
— 1 m.	62
— 5 m.	55
— 13,9 m.	25

suite du degré plus élevé de pollution en 1958 (cf. également l'exutoire de la retenue de Mwadingusha, fig. 18) et d'une interruption momentanée des prélèvements en 1959, on ne peut prouver, avec la précision souhaitable, l'existence d'une nouvelle recrudescence des activités photosynthétiques durant la seconde moitié de la saison des pluies.

### c. — La stratification chimique

A Koni, les eaux demeurent stratifiées thermiquement durant toute la saison des pluies tandis qu'elles sont remises en circulation dans le courant du mois de juillet (cf. fig. 8). Le thermocline ne s'oppose toutefois pas à tout échange entre l'épi- et l'hypolimnion puisque la température mesurée au contact du fond ne cesse d'augmenter progressivement entre deux périodes de circulation totale successives.

Toutes les courbes de la fig. 20 montrent immédiatement les fortes différences existant dans la composition chimique des eaux de surface et des eaux profondes au moment où la masse lacustre est stratifiée thermiquement.

Sur le diagramme relatif aux tensions d'oxygène, on a indiqué les pourcentages de saturation du gaz relevés à la limite inférieure des couches épilimniques ou entre les niveaux de — 7 ou — 8 m. qui, en dehors des périodes de stagnation, sont pratiquement homologues. La répartition de ces points entre des pourcentages de saturations beaucoup plus voisins de ceux mesurés dans les couches hypolimniques que dans les strates épilimniques est particulièrement suggestive ; elle amène à conclure, en effet, que la stratification des gaz dissous est fort indépendante de la stratification thermique du lac. Cette discordance est tout à fait semblable à la situation rencontrée dans la partie la plus profonde du lac de Mwadingusha.

Les trois graphiques réunis dans la fig. 21 illustrent la répartition verticale de quelques facteurs chimiques régulièrement analysés. Au moment de la circulation totale (A), les eaux de Koni ont une composition en gaz dissous et en électrolytes pratiquement semblable de la surface au fond. Tout au début de la stagnation (B) un thermocline apparaît entre 7 et 10 mètres de profondeur. Cette division thermique du volume d'eau s'accompagne immédiatement d'une stratification des gaz dissous et du pH tandis que la répartition verticale des sels dissous ne semble pas affectée par les différences de température. On doit aussi remarquer que l'oxygène commence à décroître considérablement dès 4 m., c'est-à-dire trois mètres au-dessus du niveau où débute le thermocline. Les courbes de

l'exemple C ont été dressées à partir des résultats d'une station hydrographique faite à la fin de la période de stagnation. Elles montrent les faits importants suivants :

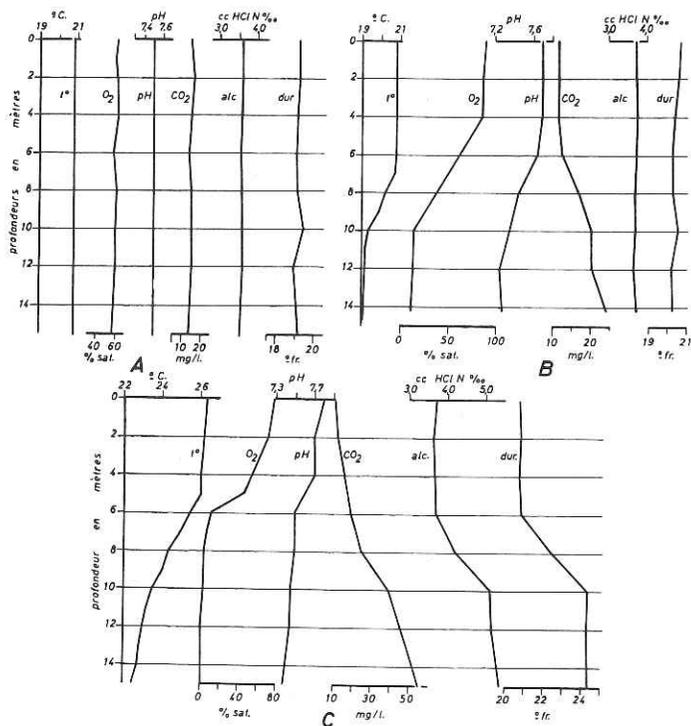


Fig. 21. — Trois exemples de la stratification thermique et chimique des eaux du réservoir de Koni.

- A. — juin 1958 : pendant la circulation totale
- B. — août 1958 : au début de la stratification
- C. — mars 1959 : à la fin de la stratification

a. la répartition de la dureté totale et de l'alcalinité suit parfaitement la courbe des températures. L'augmentation du TAM et du nombre de degrés français dans tout l'hypolimnion est absolument classique d'un lac où la période de stagnation est longue et durable ;

b. les variations verticales des concentrations en gaz dissous comme celles du pH ne se superposent pas exactement aux précédentes. Les courbes d'O<sub>2</sub> et du pH et, dans une moindre mesure, celle du CO<sub>2</sub>, s'infléchissent entre 4 et 6 m. de profondeur tandis que les autres courbes sont brisées entre 6 et 10 m.

En d'autres termes, la zone profonde désoxygénée, plus riche en  $\text{CO}_2$  et à pH moins alcalin occupe un volume plus grand que celui correspondant à l'hypolimnion thermique.

#### d. — Conclusions

Les données numériques fournies par les analyses périodiques de la composition ionique confirment les rapports étroits unissant les eaux de Koni et celles de l'exutoire de la retenue de la Lufira. Le seul caractère diagnostique méritant d'être signalé est le fait que la stagnation, qui persiste pendant toute la saison des pluies dans le réservoir proprement dit, entraîne, à la longue, un léger enrichissement de la concentration saline des couches hypolimniques. Cette situation a pour conséquence de limiter l'amplitude des variations saisonnières des sels dissous lorsque ces derniers sont remis en circulation à l'époque des brassages totaux.

Comparées à celles de l'exutoire de la retenue de la Lufira, les eaux de Koni sont systématiquement mieux oxygénées, plus alcalines et plus pauvres en  $\text{CO}_2$ . Sous cet angle, leur composition chimique est plus voisine de celle observée dans le Shangalele, en amont de l'exutoire, que dans la portion terminale de la retenue elle-même. Ces comparaisons conduisent à penser que les eaux, plus ou moins fortement polluées, qui alimentent continuellement le lac de Koni y subissent une certaine épuration. Notre enquête a mis effectivement celle-ci en évidence. Il apparaît qu'elle résulte de l'action simultanée et complémentaire de plusieurs facteurs, les uns naturels, les autres artificiels.

Le rôle des turbines est indubitable et particulièrement bénéfique puisqu'il s'exerce au moment même où les eaux pénètrent dans le réservoir. Cette épuration mécanique ne peut cependant agir que sur les gaz dissous dans l'eau. L'examen des variations des pH expérimentaux et théoriques et de leurs rapports avec les modifications de l'anhydride carbonique libre laisse croire, en effet, que les éléments organiques et inorganiques libérés en amont par les plantes supérieures subsistent après le brassage des eaux dans les turbines.

Par ailleurs, les eaux partiellement épurées au départ sont immédiatement entraînées dans l'ancien lit de la Lufira et aboutissent dans le lac proprement dit sans subir de contact prolongé avec les prairies ancrées ou flottantes.

Enfin, le peuplement des algues planctoniques, toujours plus dense à Koni que dans l'exutoire du lac de Mwadingusha, exerce superficielle-

ment une auto-épuration naturelle également bénéfique (tableau 1 et 2 de l'Annexe 1).

Malgré la perméabilité relative du thermocline, les eaux restent chimiquement stratifiées pendant toute la durée de la période de stagnation. Cette stratification est complexe. Tandis que les sels dissous présentent, à la longue, une répartition verticale qui répond à celle de la température, les éléments les plus en rapport avec les activités biologiques de synthèse ou de dégradation manifestent, au contraire, une grande indépendance vis à vis de l'état thermique de l'eau. Comme dans le lac de Mwangusha, ces divergences aboutissent, en définitive, à une réduction du volume des couches épilimniques, les plus favorables au phytoplancton. On voit donc que l'action des substances réductrices et l'influence des sédiments demeurent tout aussi importantes à Koni que dans la retenue de la Lufira.

#### 4. — RETENUE DE N'ZILO I

##### a. Les électrolytes dissous

Le tableau IX qui réunit les résultats de plusieurs analyses effectuées par les Laboratoires de l'Union Minière, permet immédiatement de classer les eaux du Lualaba dans la même catégorie que celles de la Lufira. Les différences qui se manifestent sont, on le voit, purement quantitatives. En comparant les résidus fixes, on constate ainsi que la concentration totale en sels est près de deux fois plus faible dans le Lualaba. Ces différences sont entièrement confirmées par les données préliminaires publiées par DAMAS (1957) et surtout par les mesures routinières de la conductibilité électrique que nous avons effectuées entre novembre 1957 et août 1959.

Ces différences quantitatives intéressent l'ensemble des ions, elles affectent pourtant beaucoup plus le sodium qui est près de cinq fois moins concentré et plus encore les sulfates, dont la concentration se situe pratiquement aux limites de précision des méthodes.

En calculant la concentration relative de chaque ion en % de la somme des anions et des cations exprimés en millival.gr./l., on constate que les proportions des alcalino-terreux et du  $\text{CO}_3$  sont légèrement plus élevées dans la retenue de N'Zilo que dans celle de la Lufira.

Il n'est pas dénué d'intérêt de signaler accessoirement que les eaux du lac Upemba, partiellement tributaires d'un tronçon plus aval du Lua-

laba, ne renferment plus que des carbonates et des bicarbonates de calcium et de magnésium (eaux triioniques sensu KUFFERATH) (VAN MEEL, 1953).

TABLEAU IX

Composition ionique des eaux de surface de l'exutoire du lac de retenue de N'Zilo I. (quantités absolues en mg.p.l. ; quantités relatives en % de la somme des millival. gr.p.l.)

DATES	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>	résidu fixe
29.VII.58 (circulation)	27 53,45 %	11 35,91 %	5,0 10,64 %	2,0 6,41 %	140 94,35 %	2 1,72 %	3,4 3,93 %	76 mg./l.
03.XII.58 (stagnation)	29 58,45 %	13 32,74 %	non déterm. 8,81 % (*)		150 94,85 %	1 0,81 %	4,0 4,34 %	82 »
01.VIII.59 (circulation)	30 54,20 %	12 35,75 %	5,8 10,10 %	1,0 3,03 %	145 93,65 %	1 0,82 %	5,0 5,53 %	102 »
Lac M'sha 17.VIII.59	46 41,50 %	25 37,2 %	26,0 21,40 %	2,0 1,64 %	242 89,0 %	27 6,3 %	15 4,7 %	191 »
Lac M'sha lac N'Zilo I	1,60	2,0	4,48	2,0	1,73	27 env.	3,0	1,87

(\*) calculé par différence.

Le tableau X rassemble quelques résultats d'analyses effectuées occasionnellement dans différentes régions de la retenue. L'examen de ces données montre que la concentration des différents sels dissous est plus élevée en amont qu'en aval. La seconde série de dosages précise, d'autre part, que ce sont les concentrations du calcium, du magnésium et du CO<sub>3</sub> qui diminuent le plus significativement. Dans la retenue de N'Zilo I, comme dans celle de Mwadingusha, se manifeste donc un gradient de salinité décroissant ; il résulte d'une diminution significative des concentrations de carbonates et de bicarbonates de calcium et de magnésium, c'est-à-dire des sels les plus directement liés à l'activité métabolique des diverses biocoenoses.

TABLEAU X

Variations horizontales de la concentration saline des eaux (réf. : carte, fig. 4)

	amont -----> aval			
	confluent Kando-Lua- laba	Pont-route Lualaba	baie de Kazembe	gorges de N°Zilo I
<b>XII.1957</b>				
alcalinité (cc HCl N°/∞)	3,35	—	2,71	2,02
conductibilité électrique ( $\chi_{180} \cdot 10^6$ )	—	—	248	173
dureté totale (° français)	18,25	—	13,95	9,73
<b>VII.1959</b>				
résidu de calcination (mg.p.l.)	—	144	113	103
Calcium (mg.p.l.)	—	42	34	30
Magnésium (mg.p.l.)	—	17	13	12
Sodium (mg.p.l.)	—	6	6	6
Potassium (mg.p.l.)	—	1	1	1
CO <sub>2</sub> (mg.p.l.)	—	199	158	145

La fig. 22 montre comment le degré hydrotimétrique total et le titre alcalin au méthylorange des eaux de surface ont varié dans l'exutoire pendant la période de surveillance du lac.

On voit que la dureté totale et l'alcalinité des eaux superficielles ont augmenté de façon pratiquement ininterrompue depuis le début des observations, en novembre 1957, jusqu'en avril 1959. Par après, les titres de dureté et d'alcalinité ont décreu parallèlement jusqu'à la fin-juillet puis se sont à nouveau élevés en août, immédiatement après la période de circulation totale des eaux.

L'étude de la retenue de la Lufira a montré que, dans son exutoire, les variations quantitatives des sels dissous ont sans doute une très faible amplitude mais peuvent, néanmoins, être mises en rapport avec les périodes successives de crue et de décrue de l'affluent ainsi qu'en relation avec les fluctuations régulières du niveau du plan d'eau. Les courbes de la fig. 22 indiquent que les rapports avec ces facteurs physiques — dont les variations saisonnières sont schématisées à la base du graphique — sont ici beaucoup plus lâches. On voit, par exemple, la dureté

totale demeurer pratiquement stationnaire lors de la crue du lac de 1957-58 tandis qu'elle augmente pendant la période correspondant à la crue de 1958-59. L'interprétation de ces modifications apériodiques est malaisée en l'absence de renseignements réguliers sur la composition des eaux du Lualaba et de diverses régions lacustres situées en amont des gorges. L'augmentation simultanée de la dureté totale et de l'alcalinité des eaux de l'exutoire est cependant semblable à celle qui a été observée dans la retenue de la Lufira. Elle doit certainement s'interpréter de la même façon : une augmentation de la concentration des eaux affluentes en rapport avec le débit moyen du Lualaba, nettement plus faible en 1958 et 1959 qu'en 1956 et 1957 (MAGIS, 1962).

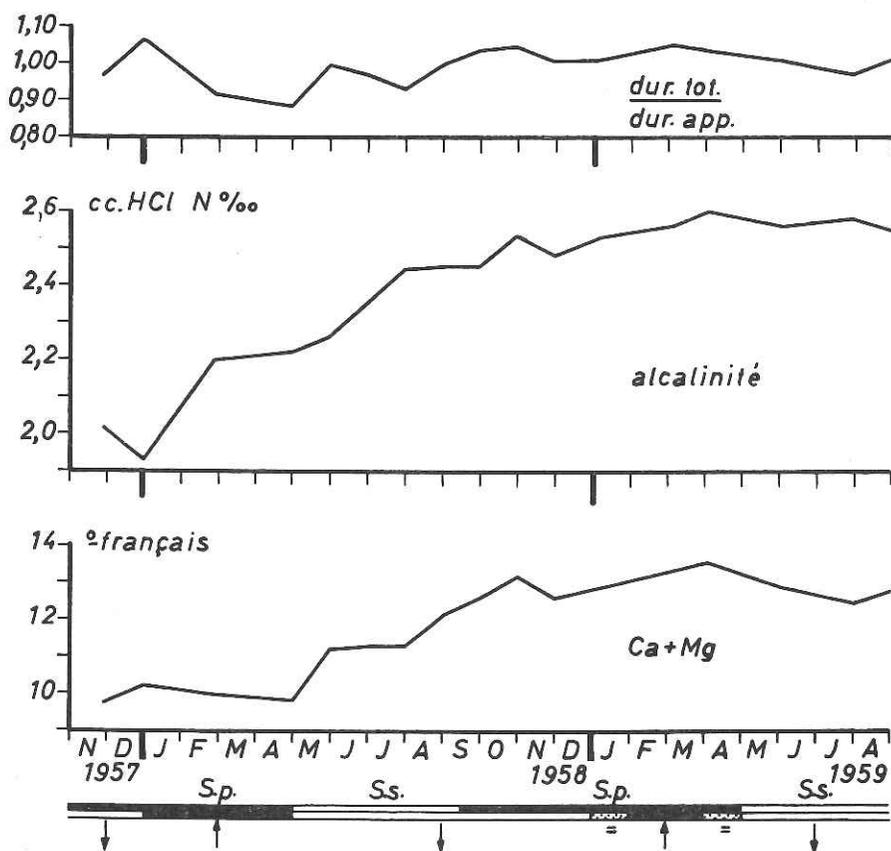


Fig. 22. — Variations de la dureté totale, de l'alcalinité et du rapport dureté totale/dureté apparente des eaux de l'exutoire de la retenue du Lualaba. Période de référence : novembre 1957-août 1959.

Les observations de HARDING (1961, 1964) durant le remplissage progressif du lac Kariba montrent également l'existence de modifications dans la concentration saline des eaux, sans rapport avec les facteurs saisonniers. L'absence de périodicité constatée à N'Zilo pourrait être aussi une conséquence de la « jeunesse » d'une retenue, comblée seulement pour la première fois en 1956, quatre ans après sa mise sous eaux <sup>(1)</sup>.

### b. — Les gaz dissous — le pH

Le pH des eaux superficielles (fig. 23) a varié entre un minimum de 7,7 (XI-1957) et un maximum de 8,5 (IX-1958) ; la courbe montre, par ailleurs, que les pH inférieurs à 8 sont plutôt rares dans le secteur étudié. En comparant ces derniers à ceux obtenus dans l'exutoire de la retenue de la Lufira, on constate immédiatement que les eaux de N'Zilo ont une réaction franchement plus alcaline.

La comparaison des pH mesurés « in situ » et calculés à partir de l'alcalinité amène à scinder, sous ces rapports, la période de surveillance du lac en trois parties :

a. entre novembre 1957 et février 1958, les pH réels (7,7-7,8) sont inférieurs aux pH calculés. Le 30.III.57, le pH mesuré était de 7,3 (DAMAS, 1957) ; le pH théorique correspondant à l'alcalinité de 1,99 est, par contre, de 7,99. Ce renseignement laisse supposer que l'état d'acidification est bien antérieur à la date où nous l'avons mis en évidence et qu'il a dû se maintenir pendant toute une année au moins ;

b. entre avril et juillet 1958 (les renseignements manquent en mars) les pH mesurés et calculés sont pratiquement identiques ;

c. après cette période de transition, les pH théoriques sont presque toujours inférieurs à ceux mesurés directement dans les échantillons prélevés entre août 1958 et août 1959. Cette relation indique que les eaux se trouvent alors en état de décalcification biologique. Cette conclusion est parfaitement corroborée par la réaction positive des échantillons d'eau à la phénolphthaléine (T.A.P.) indiquant la présence simultanée des ions  $\text{CO}_3^{=}$  et  $\text{HCO}_3^-$  dans le cycle de l'anhydride carbonique.

<sup>(1)</sup> le 30 mars 1957, le Professeur DAMAS relevait devant les gorges de N'Zilo une dureté totale de 9,75° français et une alcalinité de 1,99 cc HCl N°/100. Ces résultats s'inscrivent parfaitement dans le groupe de valeurs que nous avons mesurées personnellement au même endroit, en novembre et décembre 1957. (DAMAS, 1957).

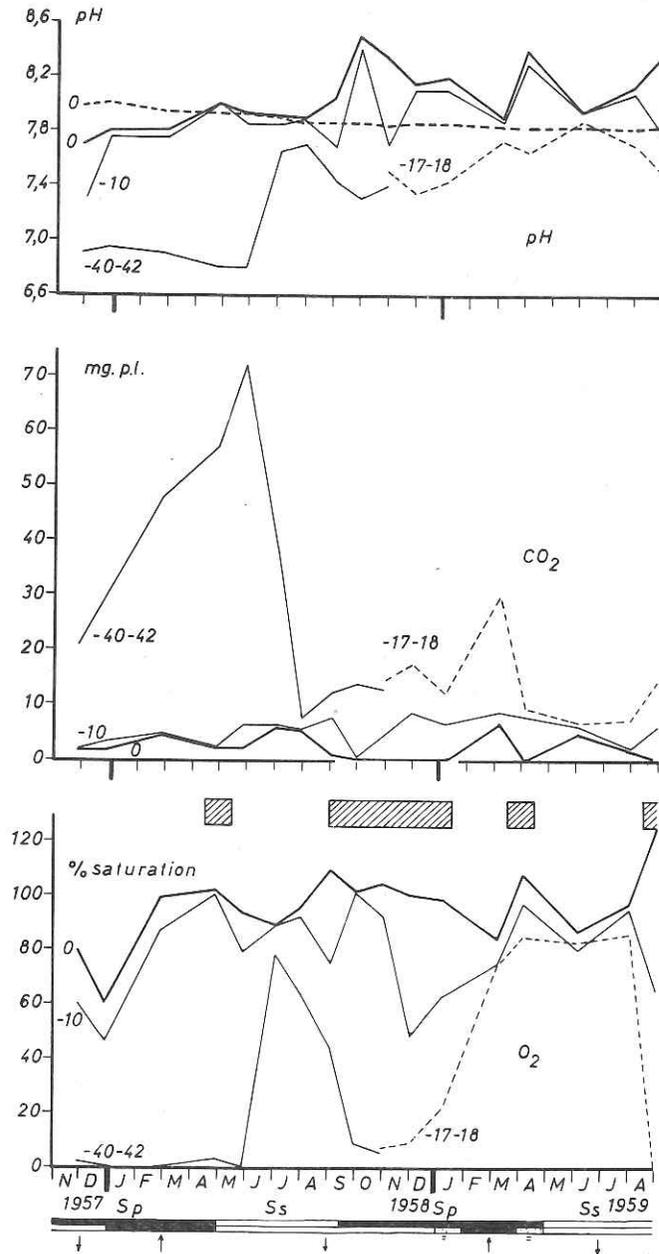


Fig. 23. — Variations du pH, du CO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> dissous dans les eaux de l'exutoire de la retenue du Lualaba. Les rectangles hachurés localisent les époques de recrudescence de l'activité photosynthétique des algues planctoniques.

L'existence d'une phase d'acidification de longue durée précédant la circulation totale des eaux de juillet 1958 peut paraître surprenante dans un lac où la végétation palustre du type rencontré sur la Lufira reste remarquablement clairsemée. Cette longue période d'acidification, tout à fait indépendante des facteurs saisonniers, présente cependant quelques analogies avec les observations faites récemment par HARDING (1964) dans la retenue de Kariba.

Pendant toute la durée du remplissage de la retenue du Zambèze, le pH a oscillé entre 7,2 et 7,4 seulement. Or à N'Zilo, les pH incriminés ont été justement mesurés immédiatement après le premier comblement de la retenue. Les documents de HARDING sont publiés sans commentaires ; il est cependant possible que l'immersion progressive des galeries forestières et des couverts végétaux voisins ait été à l'origine d'une libération de substances « acides », résultant de la décomposition de ces matières organiques exogènes. Cette interprétation, faut-il le rappeler, s'appuie sur la séquence des faits décrits dans la retenue de la Lufira. Dans l'exemple de la retenue du Lualaba il est également possible que les dérivés siliceux des sols, lavés par la masse d'eau, puissent intervenir simultanément dans le même sens.

Le fait le plus important à retenir des variations du pH dans les eaux profondes est que celles-ci peuvent manifester une réaction légèrement acide durant la période de stagnation (cf. novembre 1957 à juin 1958) <sup>(1)</sup>. Ceci n'est toutefois observable qu'au-dessus des plus grandes profondeurs. Dans la série des prélèvements réalisés par 17-18 mètres de fond (1958-59), un pH minimum de 7,3 a été enregistré au moment où les eaux y étaient le plus fortement stratifiées.

Les quantités d'anhydride carbonique dosées en surface restent remarquablement faibles à toutes les époques du cycle annuel. Le CO<sub>2</sub> augmente légèrement en février-mars (fig. 23) de même qu'en juin-juillet. Ces accroissements temporaires résultent des brassages partiels ou totaux qui ramènent en surface des eaux qui en avaient été momentanément isolées par le thermocline.

Entre septembre 1958 et janvier 1959, aucune trace de CO<sub>2</sub> libre n'a pu être décelée dans les eaux de surface. Cette particularité, qui s'explique par une activité photosynthétique particulièrement intense,

<sup>(1)</sup> le 30 mars 1957, lors de la précédente période de stagnation, DAMAS (1957) a mesuré un pH de 6,6 dès le 25<sup>e</sup> mètre de profondeur. Cette observation renforce l'interprétation que nous avons émise pour expliquer les causes responsables de l'abaissement du pH dans les couches épilimniques pendant la période initiale des observations.

doit être signalée, car une telle décalcification biologique n'a jamais été observée dans les eaux de l'exutoire de la retenue de la Lufira.

Les variations de l'anhydride carbonique mesuré au contact du fond s'expliquent facilement, spécialement dans le cas des stations hydrographiques effectuées à hauteur de la grille flottante. La fig. 23 exprime clairement l'accumulation progressive du gaz dans les couches hypolimniques jusqu'à un maximum de 70 mg.p.l. atteint en mai-juin, à la fin de la période de stagnation. Sous l'action des brassages qui, pendant la saison sèche froide, animent progressivement toute la masse d'eau, le  $\text{CO}_2$  décroît rapidement. En fin-juillet sa concentration est ainsi pratiquement semblable entre la surface et le fond. Lorsque la profondeur est moins grande (17-18 m.), les stations successives décèlent un phénomène similaire. L'enrichissement de l'hypolimnion y est cependant moins régulier et moins prononcé. Le fait s'explique, d'abord par l'influence plus grande des brassages partiels de la saison des pluies (cf. janvier 1959), ensuite par l'apparition plus hâtive des brassages totaux du début de la saison sèche (cf. juin 1959).

L'oxygène dosé en surface est compris entre un minimum de 4,58 et un maximum de 9,31 mg.p.l., quantités qui correspondent respectivement à 60 et à 125 % de la saturation. Ces valeurs extrêmes sont néanmoins occasionnelles. L'examen de la courbe (fig. 23) prouve que les eaux de l'exutoire du lac sont généralement saturées <sup>(1)</sup> ou légèrement désaturées (80 %).

Relativement faibles, ces variations manifestent cependant une périodicité certaine. On observe, en effet, une diminution systématique de la tension d'oxygène lors du refroidissement des eaux (mai-juillet 1958, juin-juillet 1959). Lors des périodes de saturation — ou de légère sursaturation — la comparaison des graphiques de l' $\text{O}_2$ , du  $\text{CO}_2$  et du pH dégage immédiatement l'interdépendance des trois facteurs. Ces corrélations indiquent une intensification des processus de photosynthèse qui modifie ostensiblement les caractères chimiques des eaux de surface et épilimniques (cf. courbe du niveau — 10 m.). Ainsi, comme dans la retenue de la Lufira, le cycle annuel du lac artificiel du Lualaba est influencé par deux poussées de photosynthèse. La première succède immédiatement à la période de circulation totale et se maintient, semble-t-il, jusqu'en janvier. La seconde, plus courte, se manifeste à la fin de la saison des pluies.

Les rapports réciproques entre pH,  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$  durant la saison des

(<sup>1</sup>) Résultats d'autant plus significatifs que les échantillons ont été systématiquement recueillis entre 7,30 et 8,30 heures, au début de la période d'insolation.

pluies 1957-58 sont moins étroits et paraissent échapper à la règle précédente. L'état d'acidification dans lequel se trouvent alors les eaux du lac pourrait expliquer cette anomalie.

Tout comme les variations de l'anhydride carbonique, celles de l'oxygène dissous dans les eaux profondes sont tributaires du cycle thermique annuel. Durant la stagnation, les couches hypolimniques sont pratiquement désoxygénées tandis que le gaz se répartit presque uniformément de la surface au fond lors des brassages totaux. Les données obtenues en octobre 1958 indiquent toutefois que l'oxygène qui a pénétré dans les couches profondes est très rapidement consommé. Par 17-18 mètres de fond les effets de la stratification thermique se font sentir de façon plus immédiate (cf. X.58 et surtout VIII. 59) mais, par suite de la fréquence plus grande des brassages, les sédiments sont mis en contact avec de notables quantités d'oxygène plusieurs fois par an (cf. III. 59 et IV. 59).

### c. La stratification chimique

La suppression de la grille flottante en septembre 1958 a entraîné le déplacement du point initial des stations hydrographiques. L'élément « hauteur d'eau », facteur le plus important de cette discussion, a donc été profondément modifié. Ce déplacement s'est produit, de surcroît, à un moment où, nous l'avons vu, la qualité de l'eau changeait radicalement elle aussi. La synthèse des faits relatifs à la stratification chimique est donc difficile.

En amont des gorges, la distribution verticale des éléments les plus en rapport avec les activités biologiques, illustrée ici par l'oxygène et le pH, reproduit fidèlement l'état thermique de l'eau (fig. 24). La composition ionique est manifestement beaucoup plus stable et les sels se concentrent aussi plus tardivement dans les couches hypolimniques (cf. 30.X et 01.XII.58, fig. 24).

La comparaison des courbes dressées successivement durant la saison des pluies 1958-59 démontre cependant l'extrême labilité de la stratification chimique. Cette situation résulte moins de la perméabilité relative du thermocline que de la fréquence des brassages qui animent tout le volume d'eau de la zone étudiée.

Les observations faites en 1957-58 à l'entrée des gorges de N'Zilo apportent la preuve que, d'une période de circulation totale à l'autre, les couches sous trente mètres possèdent seules les particularités chimiques d'eaux longuement séparées de la surface. Les couches sus-jacentes sont

atteintes successivement par les brassages partiels et leur composition chimique en subit parallèlement les conséquences (MAGIS, 1961).

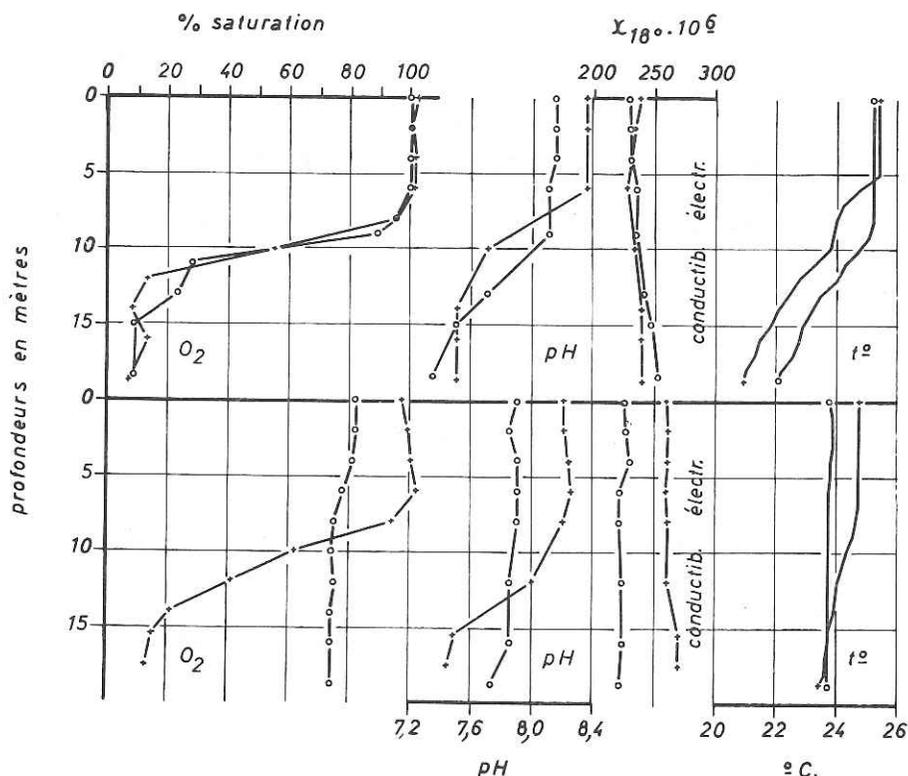


Fig. 24. — 4 exemples de la stratification des eaux pendant la saison des pluies 1958-59.

Au-dessus : x ..... x : 30.X.58 ; o ..... o : 01.XII.58  
 En-dessous : x ..... x : 05.I.59 ; o ..... o : 07.III.59

Les résultats des prélèvements d'eau du 3 mars 1958 ont été réunis à titre d'exemple dans le tableau ci-dessous. La position du thermocline est précisée par la différence de 1°C qui sépare la température des niveaux — 32 et — 35 mètres. On est immédiatement amené à conclure que cette diminution rapide de la température n'oriente nullement la distribution verticale des facteurs chimiques analysés, spécialement celle des gaz dissous et du pH. Il suffit, pour s'en convaincre, d'examiner et de comparer les valeurs indiquées en regard du niveau — 30, au seuil supérieur du thermocline. Toutes sont, en effet, beaucoup plus voisines de celles

relevées aux profondeurs plus grandes que de celles obtenues plus près de la surface. Le déséquilibre entre l'état thermique des eaux et leur composition chimique est particulièrement bien indiqué par les étalons de l'échelle de FOREL-ULE entre 0 et 25 m. d'une part, entre les niveaux — 30 et — 43 m. d'autre part. La teinte jaunâtre déjà apparente dans la partie inférieure de l'épilimnion confirme ainsi l'extension du volume de l'hypolimnion chimique au détriment de toutes les couches formant la thermocline et même des strates les plus internes de l'épilimnion. La couleur propre de ces eaux indique, en outre, la présence de corps humiques dont l'action sur le pH est particulièrement nette (tableau XI).

TABLEAU XI

*Résultats des prélèvements du 03-III-58*

Niveaux (en mètres)	Température °C	O <sub>2</sub> % satur.	CO <sub>2</sub> mg. p. l.	pH	alcalinité ccHCl N ‰	coloration Forel-Ule
0	24,00	99	4,20	7,80	2,14	XI
5	24,05	98	—	—	—	
10	23,80	87	4,70	7,75	2,23	
15	23,70	78	5,20	7,70	—	
20	23,65	53	6,40	7,60	—	
25	23,60	21	8,10	7,40	2,25	
30	23,50	5	13,00	7,10	2,33	XIV
32	23,30					
33	23,15					
34	22,65					
35	22,30	3	34,00	6,95	2,47	
36	22,05					
37	21,80					
38	21,60					
39	21,45					
40	21,30	0	46,00	6,90	2,63	
43	21,15	0	48,00	6,85	2,75	

Ces derniers aspects de la stratification chimique sont, en somme, très semblables à ceux qui ont été observés et décrits dans les deux autres milieux. A Mwadingusha et à Koni l'influence des sédiments expliquait

les différences entre la position du saut thermique et celle correspondant à la variation rapide de l'O<sub>2</sub>, du CO<sub>2</sub> et du pH. Dans la région des gorges de N'Zilo, les observations et analyses répétées s'accordent à minimiser l'action des sédiments. Mais il convient de rappeler que la stagnation thermique ne manifeste d'effets durables que sous trente mètre d'eau. Partout ailleurs des brassages totaux, comme ceux observés dans la retenue de la Lufira, assurent l'homogénéisation plus ou moins répétée de la température et de la composition chimique de l'eau (cf. ci-dessous et fig. 23). Cette situation est favorable à la formation de courants internes qui circulent plus ou moins horizontalement. Ils proviennent de régions normalement moins profondes où l'influence des sédiments — ou des produits de désintégration des galeries forestières et de leur couvert végétal — peut être plus marquée. Ces courants débouchent dans les gorges à un niveau situé dans l'épilimnion et sont donc susceptibles de modifier sa composition chimique dans le sens qui vient d'être expliqué.

#### d. Conclusions

Les eaux de la retenue du Lualaba se classent également dans la catégorie des eaux complètes ou hexaioniques (tableau IX). Elles sont toutefois plus douces et renferment sensiblement moins de sodium et de sulfates que celles de la Lufira et de sa retenue. Comme dans cette dernière, la concentration saline est plus élevée en amont qu'en aval. Cette diminution est graduelle et affecte les ions Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> et CO<sub>3</sub><sup>-</sup> plus que tous les autres. On peut en déduire que les eaux fluviales du Lualaba acquièrent des caractères d'eau stagnante lorsqu'elles s'accumulent dans la retenue. Les lacs artificiels de la Lufira et du Lualaba sont donc comparables à ce point de vue.

L'analyse régulière des facteurs chimiques les plus en rapport avec les activités biologiques permet de scinder la période des observations en deux époques, séparées par la circulation totale des eaux de juillet 1958. Antérieurement à celle-ci, les eaux de l'exutoire ont montré régulièrement des signes de pollution organique qui peuvent être déduits des trois ordres de faits suivants :

a. en surface, par des pH plus acides que ceux résultant de la réaction d'équilibre entre bicarbonates, carbonates et anhydride carbonique effectivement mesurés ;

b. en profondeur, par des pH légèrement inférieurs à 7,0 et par la coloration jaunâtre des eaux suggérant la présence de corps humiques ;

c. dans le volume d'eau, par la position plus superficielle de la zone des variations brusques des gaz dissous et du pH, comparativement à celle du saut thermique.

Ces particularités sont absolument semblables à celles qui furent observées à la même époque dans la retenue de la Lufira ; elles paraissent d'ailleurs bien résulter de la combinaison de facteurs consécutifs à des variations étendues du plan d'eau. A Mwadingusha, la destruction progressive du couvert végétal exogène et la pollution organique qui en est la conséquence se sont produits après que la retenue eût retrouvé et maintenu un niveau élevé de son plan d'eau. A N'Zilo, la pollution organique s'est manifestée immédiatement après le premier comblement du lac et après l'immersion subséquente des galeries forestières et du couvert végétal des terrains nouvellement inondés.

Les documents réunis en 1958-59 en amont des gorges ont montré l'instabilité de la stratification chimique. On constate cependant qu'il suffit de minimes différences de température entre les couches pour entraîner un clivage immédiat dans la répartition verticale des gaz dissous et du pH. Cette stratification rapide des facteurs étroitement liés à l'activité des organismes planctoniques suggère que ces derniers sont effectivement les agents principaux de cette stratification.

## V. POSITION DES LACS ARTIFICIELS PARMI LES ÉCOSYSTÈMES LACUSTRES

Arrivé au terme de l'étude descriptive des facteurs physiques et chimiques principaux des trois retenues hydroélectriques, il convient de dégager de l'ensemble de ces considérations les arguments susceptibles d'apporter une réponse aux deux questions suivantes :

- dans quelle mesure ces lacs de barrage artificiels peuvent-ils être apparentés aux milieux dulcaquicoles naturels et géographiquement voisins ?
- quelle sont leurs caractéristiques particulières, capables d'influencer la dynamique de leur peuplement zooplanctonique ?

## 1. — LACS ARTIFICIELS ET NATURELS, SIMILITUDES ET DIFFÉRENCES

### a. — Le régime hydraulique

Le régime hydraulique des retenues du Lualaba et de la Lufira peut être comparé à celui du lac Upemba pour lequel VAN MEEL (1953) a donné quelques indications. Il apparaît ainsi (MAGIS, 1961, 1962) que les corrélations entre la pluviosité, le débit des affluents et le niveau des lacs sont fondamentalement comparables. Ces homologues s'expliquent surtout en raison du caractère continu de l'exploitation de l'énergie hydro-électrique. Mais cette continuité entraîne également quelques différences. Dans un lac naturel, l'amplitude des cycles successifs est habituellement semblable d'une année à l'autre. Il n'en est pas de même dans les lacs artificiels où les variations du plan d'eau peuvent fluctuer entre des limites fort étendues. Ces larges variations peuvent provoquer, par conséquent, une véritable rupture d'identité entre des cycles successifs. D'autre part, dans les cas de saisons des pluies abondantes, la durée de l'étalement peut être prolongée en saison sèche, alors que la décrue se serait manifestée bien antérieurement dans un lac naturel. Si la saison des pluies est déficitaire, la phase d'étalement peut, au contraire, disparaître et la décrue fait ainsi immédiatement suite à la crue. Ces divergences, qui dépendent avant tout de la cote udométrique annuelle, n'ont donc aucun caractère systématique et n'altèrent pas fondamentalement les parentés que la comparaison met en évidence.

### b. — Le cycle thermique

Le cycle thermique annuel à trois périodes, qui apparente les trois milieux étudiés au type des lacs subtropicaux défini par YOSHIMURA, est absolument conforme aux données publiées récemment sur la thermique des lacs naturels africains : Kivu, Edouard et Albert (VERBEKE, 1957), baie nord du lac Tanganika (DUBOIS, 1957), zone sud du même (COULTER, 1963) et lac Upemba (VAN MEEL, 1953). Il est aussi absolument comparable à celui que HARDING (1961) décrit dans la retenue de Kariba, mise sous eau dernièrement.

La preuve la plus indiscutable du caractère réellement lacustre des eaux retenues est apportée par la comparaison des températures relevées dans la Lufira et dans sa retenue (MAGIS, 1962). On remarque ainsi que l'ensemble du volume d'eau (surface et fond) est perpétuellement plus

chaud dans les divers secteurs lacustres étudiés que dans l'affluent. Celui-ci, par ailleurs, ne montre jamais de stratification tandis que les eaux lacustres se stratifient chaque année. Cette stratification est sans doute labile mais cette précarité dépend surtout de la profondeur du milieu, habituellement inférieure à celle que peut effectuer journallement la pénétration des radiations solaires.

L'étude est moins complète dans la retenue du Lualaba. Les observations successives qui y ont été faites ne sont cependant pas en désaccord avec la conclusion précédente. Si le réservoir de Koni, conçu pour fonctionner à niveau constant, possède un régime hydraulique peu naturel, l'examen détaillé du cycle thermique annuel et de la stratification de ses eaux prouve, qu'à ces derniers points de vue, il ne diffère pas d'un lac naturel.

### c. — Modifications de la composition chimique des eaux affluentes

Dans la retenue de la Lufira, la concentration des bicarbonates de calcium et de magnésium — sels dissous les plus abondants dans les trois lacs artificiels — subit des variations cycliques qui dépendent incontestablement de la dilution et de la concentration périodiques des eaux affluentes mais dont l'amplitude est notoirement plus faible. Mais on constate néanmoins, d'abord que l'alternance des minima et des maxima de dureté et d'alcalinité est déplacée dans le temps par rapport à leur périodicité dans la Lufira, et qu'ensuite, ces écarts sont d'autant plus prononcés que les dosages se font plus près de l'exutoire.

Dans le lac de N'Zilo comme dans celui de Mwadingusha, un gradient décroissant de salinité se dessine nettement de l'amont vers l'aval. Cette diminution affecte principalement les sels de calcium et de magnésium, ions directement en rapport avec la vie organique des lacs.

Les pluies sont non seulement à l'origine des variations de la charge en électrolytes des eaux affluentes mais également des modifications de leurs concentrations en gaz dissous et de leur pH. Dans les lacs, au contraire, les variations de ces derniers dépendent plus directement des activités de synthèse et de dégradation des organismes vivants, planctoniques et benthiques et sont affectées secondairement par le système thermique particulier des eaux lacustres (stagnation et brassage plus ou moins répétés).

L'ensemble des faits développés dans ces différents paragraphes démontre clairement que le temps de séjour des eaux derrière les barrages est suffisamment long que pour provoquer leur stagnation et pour trans-

former, par le fait même, leurs caractéristiques d'eau fluviales. La réponse à la première question posée s'avère donc affirmative : LES TROIS LACS ARTIFICIELS PEUVENT ÊTRE LARGEMENT ASSIMILÉS A DES MILIEUX LACUSTRES.

## 2. — CARACTÉRISTIQUES PARTICULIÈRES DES LACS ARTIFICIELS

### a. La stratification

Les analyses de la température et des substances dissoutes en fonction de la profondeur, montrent que l'eau des trois lacs tend à se stratifier, même dans les régions littorales et dans les baies où la profondeur est cependant réduite. Pour influencer réellement les biocoenoses lacustres, la stratification doit être suffisamment durable pour permettre l'isolement progressif des couches profondes ou hypolimniques. Toute notre étude des facteurs physiques et chimiques démontre que les eaux des lacs artificiels de la Lufira et du Lualaba sont brassées de façon pratiquement continue dans la majeure partie de leur bassin. Une stratification persiste cependant dans l'exutoire du lac de N'Zilo, en raison de sa profondeur brutalement accrue. Le cas du réservoir de Koni paraît légèrement différent puisque la séparation du volume d'eau en épi — et en hypolimnion y est durable. Toutefois, le réchauffement progressif des eaux profondes suffit à montrer que le thermocline ne s'oppose pas à tout échange entre les masses d'eau qu'il est censé isoler.

En raison de sa précarité, on peut affirmer que la stratification n'exerce pas un rôle majeur sur l'évolution saisonnière des trois écosystèmes, ainsi qu'elle peut le faire dans les lacs des régions tempérées et dans les grands lacs de l'est africain.

Aussi instable soit-elle, la stratification des eaux n'en montre pas moins des particularités intéressantes, susceptibles d'influencer les biocoenoses, au moins pendant de courtes périodes.

Au point de vue chimique, ce sont les caractères les plus sensibles aux activités biologiques ( $O_2$ ,  $CO_2$  et pH) qui varient immédiatement dès que se manifeste la plus légère différence de température entre la surface et le fond. Par contre, la conductibilité électrique, la dureté et l'alcalinité ne se modifient pas sur toute la hauteur d'eau de la zone la plus profonde de la retenue de la Lufira. Dans les deux autres milieux, la concentration saline des eaux ne varie d'ailleurs pas de façon très importante, malgré la durée plus longue de la stratification.

Mais la particularité la plus intéressante et aussi la plus importante pour les organismes réside dans le fait que la répartition verticale des gaz dissous et du pH est absolument indépendante de la stratification thermique. Cet hiatus se traduit, en définitive, par une augmentation du volume des couches profondes tropholytiques aux dépens du volume des couches épilimniques où se déroulent les réactions biologiques de production (zone trophogène). Cette situation, dont on pressent immédiatement les conséquences sur les animaux planctoniques, et attribuable aux processus de dégradation des sédiments organiques maintenus continuellement à des températures 3 à 5 fois plus élevées que dans les régions tempérées. C'est évidemment dans la retenue de Mwadingusha, où la profondeur moyenne se réduit à moins de trois mètres et où les régions littorales acquièrent proportionnellement le plus d'ampleur, que l'influence des sédiments est la plus sensible. Des phénomènes du même type ont néanmoins été observés dans l'exutoire du lac de N'Zilo, dans la période qui a suivi immédiatement son premier comblement. Par après, la distribution des gaz dissous et du pH s'est mieux superposée à celle de la température, tandis que les concentrations des sels dissous restaient pratiquement semblables sur toute la hauteur d'eau.

L'emprise des sédiments sur la stratification chimique des lacs tropicaux a été également mise en valeur par DAMAS (1954) dans différents lacs peu profonds de la plaine rwandaise de la Nyabarongo et par BRAUN (1952) dans plusieurs petits lacs de l'Amazonie. On peut donc conclure que dans les lacs équatoriaux et tropicaux peu profonds, d'origine naturelle ou artificielle, la stratification chimique est déterminée principalement par les sédiments. Cette analyse montre, en outre, que la retenue de N'Zilo, malgré ses caractères physiographiques, ne peut être entièrement assimilée à un lac profond.

#### **b. — Variations des conditions du milieu en fonction des fluctuations du plan d'eau**

Les gaz dissous et le pH manifestent des variations cycliques qui relèvent de deux causes distinctes. Le premier cycle, à court terme, exprime les effets des deux multiplications annuelles du phytoplancton ; il est comparable à celui qui a été mis en évidence par VAN MEEL (1953) dans le lac Upemba. Le second cycle, à long terme, est la conséquence d'une série de réactions interdépendantes dont le point de départ est une baisse accentuée et inhabituelle du niveau du plan d'eau. L'étude détaillée de la retenue de la Lufira, exposée dans les chapitres précédents,

montre qu'il n'est pas exagéré d'affirmer que la qualité de ses eaux est une fonction directe du rythme des vidanges et de la longueur des périodes durant lesquelles le niveau du lac reste élevé. C'est en raison de la topographie de son bassin que la retenue de la Lufira reste autant tributaire des modalités de son exploitation. Cependant, on l'a vu à propos du lac de N'Zilo, les retenues hydroélectriques plus profondes n'échappent pas nécessairement à cette loi.

Par conséquent, c'est dans la mesure où les variations du niveau seront strictement contrôlées, que tous les lacs artificiels tropicaux pourront conserver des propriétés écologiques stables, comparables à celles des milieux lacustres naturels.