

L'Eau des Lacs

par

H. DAMAS, †

Professeur à l'Université de Liège.

Caractériser en quelques pages l'eau des lacs est impossible, tant de l'un à l'autre, les différences sont grandes. Suivant que les affluents courent sur des terrains anciens peu solubles ou des terrains calcaires, les eaux lacustres seront douces ou dures. Elles seront pratiquement dépourvues de sels, si elles proviennent de tourbières. Généralement, les bicarbonates de Ca et Mg constituent la grosse part des sels dissous dans les eaux dites « douces ». Mais dans le Balaton, en Hongrie, et dans les lacs du Graben central Africain, les sels les plus abondants sont les bicarbonates de Na et K. On pourrait presque dire qu'il y a autant de types d'eaux lacustres que de lacs et ceux-ci se comptent, dans le monde, par centaines de mille.

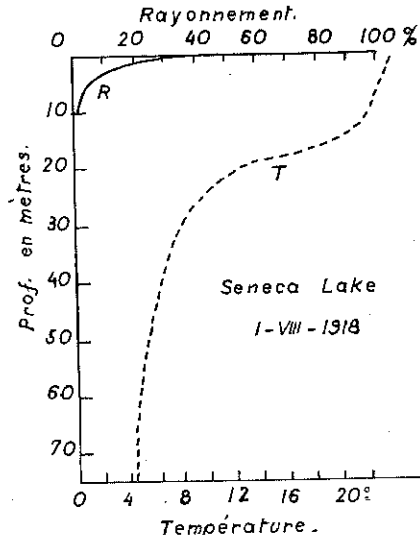
Cependant, une fois retenues, pour un temps plus ou moins long, dans la cuvette du lac, les eaux subissent l'influence des conditions atmosphériques et des populations animale, végétale, bactérienne qu'elles hébergent. A cause de ces actions, le milieu lacustre devient très différent de celui des rivières affluentes. Il est régi par des lois propres, il possède une sorte de vie autonome. Le bilan d'actions biologiques partiellement contradictoires fait qu'un lac apparaît comme une espèce de superorganisme qui a une sorte de métabolisme, se transforme peu à peu et donc vieillit. Il peut même contracter des maladies et les activités humaines favorisent celles-ci. C'est à ce point de vue que l'étude des eaux lacustres sera envisagée ici.

INFLUENCE DU CLIMAT — CYCLE THERMIQUE ANNUEL

Les rayons solaires qui frappent la surface d'un lac sont absorbés par les couches superficielles. Le fait a été démontré par BIRGE et

JUDAY grâce à l'emploi de thermopiles. Or, la courbe de température mesurée en été, dans un lac de région tempérée, de la surface au fond, diffère très fort de la courbe d'absorption des rayons lumineux (fig. 1). Le cycle saisonnier du lac explique ce paradoxe apparent.

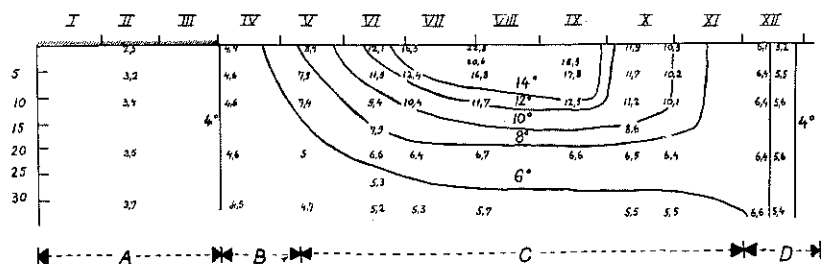
Imaginons un lac dont la surface fut gelée durant l'hiver, et pour débiter, faisons abstraction de la température des eaux profondes. La glace, plus légère, surmonte l'eau qui, à son contact, est évidemment à 0°. Au moment où le réchauffement de l'atmosphère amène la débâcle, la glace fond, puis l'eau se réchauffe. A cause de l'anomalie thermique bien connue de l'eau, son réchauffement augmente sa densité. Devenue ainsi plus lourde, elle coule jusqu'à rencontrer une couche de même densité. Le phénomène continuera jusque soit atteint son point de densité maximum, lequel dépend de sa charge en électrolytes et est



1. — Pénétration des rayons lumineux et stratification thermique.
d'après BIRGE et JUDAY (in RUTTNER).

évidemment voisin de 4° C. A ce moment, l'eau est en mouvement de la surface jusqu'au fond, et la masse entière du lac se trouve à la même température (fig. 2). C'est la période de *circulation printanière* durant laquelle le moindre ébranlement donné à la surface du lac, par le vent

par exemple, suffit à brasser toute la masse de l'eau. Cette période durera plus ou moins longtemps. Elle s'arrêtera dès que l'échauffement superficiel sera suffisant pour assurer entre les eaux de surface et de fond une différence de densité qui s'oppose à un mélange. Ensuite, les eaux de surface continueront à s'échauffer. Le jeu combiné du vent et du refroidissement nocturne amène une augmentation de la température de l'eau sur une certaine profondeur, de l'ordre de 10 à 15 m en général dans nos régions. Ainsi se crée une stratification thermique analogue à celle de la figure 1. De la surface au fond, la chute de la température n'est pas régulière. Elle est particulièrement forte au niveau de la couche de saut thermique ou *thermocline* qui sépare les eaux du lac en deux zones, l'*épilimnion* et l'*hypolimnion*. Le maintien d'une température basse dans l'hypolimnion durant une longue période de *stagnation estivale* prouve qu'aucun mélange n'est possible entre les deux zones.



2. — Cycle thermique du lac de Lunz (Autriche) en 1911.
D'après RUTTNER 1929 (simplifié).

A. Stagnation hivernale.

B. Circulation totale.

C. Stagnation estivale.

D. Circulation automnale.

En abscisse : Mois.

En ordonnée : Profondeur en mètres.

Glaces : |||||

Jusqu'au début de l'automne, la stratification perdure. Mais dès que les nuits deviennent froides, la température des eaux superficielles diminue, ce qui naturellement augmente leur densité et provoque leur descente vers une couche de même densité. Il se produit ainsi un brassage partiel qui atteint des couches de plus en plus profondes, ébranle la masse du lac, provoque par mélange, un léger réchauffement des

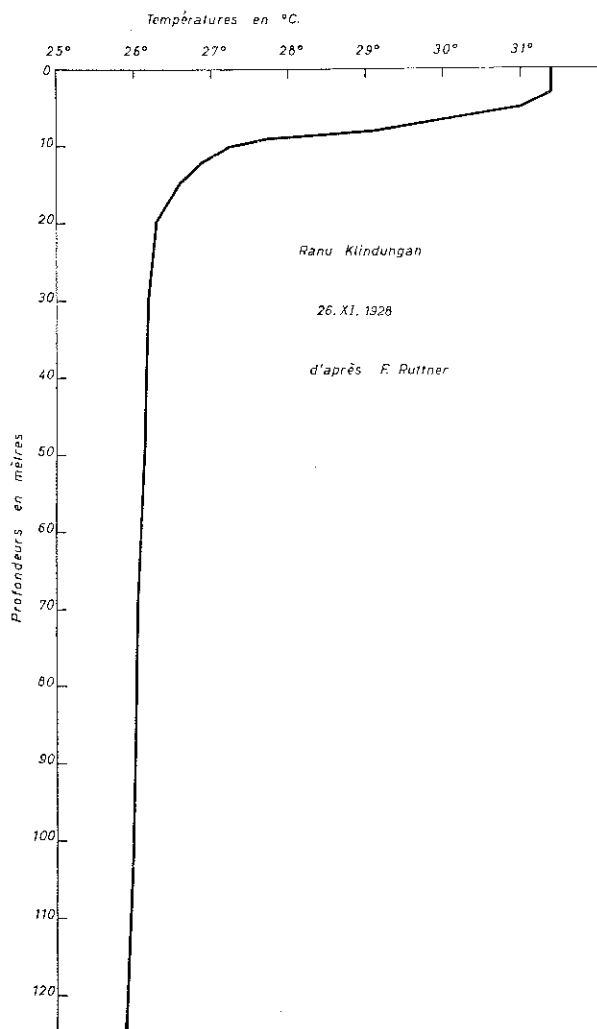
couches profondes et finalement atteint le fond du lac. Cette période de *circulation automnale* durera jusqu'à ce que les eaux de surface atteignent le point de densité maximum de l'eau. A partir de ce moment, tout refroidissement ultérieur amène une nouvelle stratification, stratification inversée cette fois puisque les eaux les plus chaudes sont les plus profondes. Cette *stratification hivernale* atteindra son maximum lorsque la surface du lac gèlera, ce qui arrêtera jusqu'au printemps suivant toute modification nouvelle de la température.

Ce schéma montre immédiatement pourquoi, dans un lac, les prises d'eau sont toujours installées assez profondément : ainsi est assurée, durant toute l'année, la fourniture d'une eau fraîche, de température remarquablement constante.

A des latitudes plus basses, un autre cycle thermique s'observe. Déjà dans les lacs de Garde, au sud des Alpes, ou d'Ohrid à la frontière alban-yougoslave, la température des eaux est toujours supérieure à 4° C. L'année y est divisée en une période de stratification et une de circulation. En fait le brassage vertical des eaux, dû au refroidissement superficiel, n'est complet que durant une brève période, au moment où les eaux de surface sont refroidies au maximum. Dans ces circonstances, une année particulièrement froide peut imprimer pour longtemps sa marque aux eaux les plus profondes. Il faudra attendre une année aussi froide, ou un hiver marqué par de véritables tempêtes, pour que les eaux du lac soient brassées totalement. STANKOVIC (1960) signale que dans le lac d'Ohrid, l'hiver particulièrement froid de 1942 amena les eaux de fond à la température de 5°6 C, qui fut conservée jusqu'en 1952. Durant 11 années, il n'y eut dans ce lac qu'une circulation partielle, n'atteignant jamais le fond.

Dans les lacs de région équatoriale, la situation est analogue : en saison de pluies, le lac est stratifié. La température de l'épilimnion correspond à la température atmosphérique moyenne de la période d'observation, celle de l'hypolimnion indique la température de la période la plus froide précédente. Entre les deux, la différence peut être faible : 1 à 2° C seulement parfois. Cela suffit pour donner aux deux eaux des densités si différentes qu'elles ne tendent pas à se mélanger (fig. 3). En saison sèche, la différence entre la température des deux couches s'atténue. Mais il est probable que la circulation n'est pas totale chaque année.

La profondeur à laquelle s'établit le thermocline, dans les pays équatoriaux, est fonction de l'emprise du vent sur le lac et par conséquent de la taille du lac. En Insulinde, d'après RUTTNER (1936), il se situerait à 4-5 m de profondeur dans les bassins de moins de



3. — Stratification thermique d'un lac équatorial (Java).

2 km², à 12-15 m dans les lacs d'environ 100 km² et 25-30 m dans les lacs de 1.000 km². La règle s'est montrée valable en Afrique : dans le Tanganyika, dont la surface est voisine de 250.000 km², le thermocline est situé aux environs de 65 m (A. CAPART).

Lacs de barrage

Les lacs artificiels actuellement construits dans tous les pays du monde, s'insèrent-ils dans les schémas décrits plus haut? A ce point de vue, il faut distinguer les lacs réservoirs, des lacs utilisés « au fil de l'eau ». Dans ces derniers, surtout lorsque l'eau est rendue à la rivière par le pied du barrage, il est impossible que se développe la moindre stratification. Mais comme le séjour de l'eau dans le bief barré est plus long qu'il ne l'était dans la rivière primitive, les échanges thermiques sont exagérés et le lac sera plus froid en hiver, plus chaud en été que la rivière, avec les conséquences inévitables de cette situation sur la faune, la flore et surtout sur la flore bactérienne des sédiments.

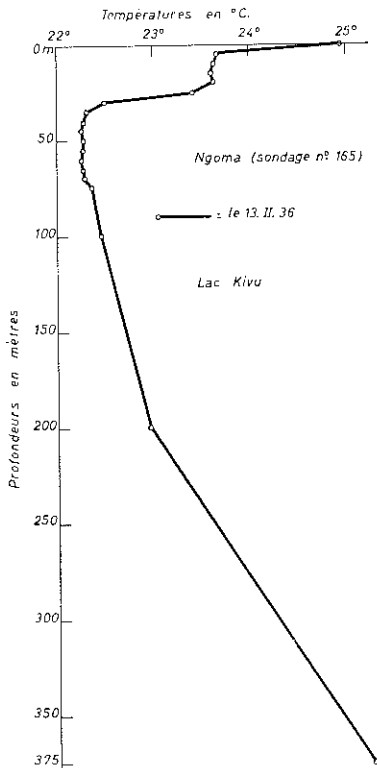
Dans les lacs réservoirs, une stratification thermique peut se développer (fig. 8). Mais souvent elle sera troublée par les courants créés par une rivière d'eau profonde et surtout par les fluctuations du plan d'eau. Dans les régions tempérées, ces fluctuations ont pour conséquence une destruction totale de la flore des berges et une érosion brutale. Dans les pays tropicaux et équatoriaux, elles provoquent une extension des plantes riveraines et l'envahissement de portions plus ou moins grandes du lac par des prairies qui, durant les périodes des hautes eaux, dégénéreront, ce qui provoque une altération spectaculaire de la qualité de l'eau. Le fait a été observé aussi bien dans l'Arkansas, qu'au Katanga ou en Rhodésie. Au point de vue thermique, cependant, ces lacs réservoirs se comportent à peu près comme des lacs naturels.

Lacs à circulation incomplète dits « méromictiques »

Le cycle décrit plus haut ne se réalise pas dans les lacs où les eaux du fond, pour une raison ou une autre, sont plus riches en électrolytes que le restant du lac, ont une densité supérieure à celle de l'eau de surface en période froide. Dans ce cas, la circulation n'atteint jamais le fond du lac. Au fond existe une « couche morte » qui ne

participe pas au cycle normal du lac. Tout au plus, entre elles et les autres couches, peut-il se produire de lents échanges par diffusion. La température de cette couche est fixe, indépendante de celle du lac. Souvent, elle est plus élevée que celle de l'hypolimnion, élévation due à la température du sol ou aux combustions organiques qui s'y passent.

Des situations de ce type ont été découvertes dans toutes les régions du globe. Elles peuvent être dues à l'influence de sources sous-lacustres, à des infiltrations d'eau à travers des roches solubles, parfois à des phénomènes biologiques ou à la pollution. Un des exemples les

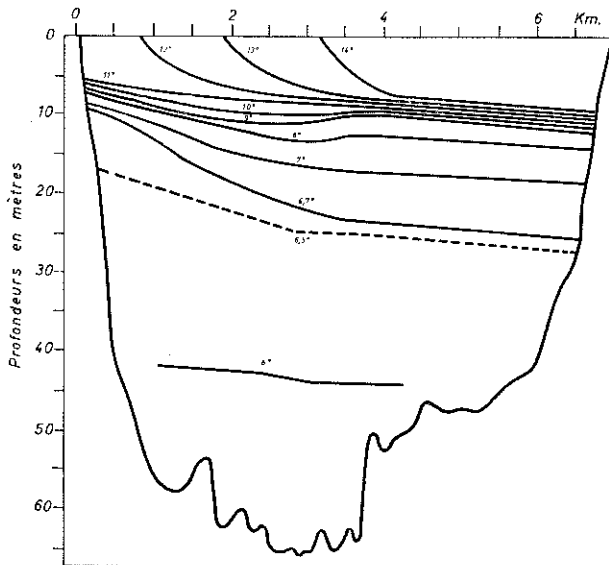


4. - - Stratification thermique d'un lac méromictique équatorial d'après H. DAMAS.

plus remarquables est celui du lac Kivu où 400 m de hauteur d'eau sur 475 m de profondeur totale sont soustraits à la circulation et où la température des eaux de fond est supérieure à celle de surface (fig. 4).

Stabilité des couches — Seiches internes

L'échauffement des couches superficielles de l'eau, en diminuant leur densité, accumule dans le lac une certaine quantité d'énergie. En effet, le centre de gravité de la masse de l'eau se trouve abaissé par rapport à la position qu'il possédait dans la période d'isothermie. Supprimer la stratification par action mécanique en mélangeant les eaux sans échange thermique, ce que tend à faire le vent, exigerait de relever le centre de gravité à son niveau primitif, c'est-à-dire effectuer un travail. Même pour le lac de Lunz (Basse-Autriche) dont la surface n'atteint pas 68 hectares, ce travail qui exprime la résistance du lac



5. — Isothermes dans le bassin nord de Windermere (Grande-Bretagne) d'après MORTIMER, le 9-6-1947.

au vent et par conséquent la stabilité des couches, se mesure en millions de kilogrammes/mètre (SCHMIDT).

Cependant, il ne faudrait pas s'imaginer les limites entre les couches comme parfaitement immobiles. Sous l'action du vent, les couches de l'épilimnion peuvent être accumulées contre une des rives (fig. 5). La zone du thermocline est alors, par compensation, expulsée contre l'autre rive et peut même arriver à toucher la surface. Lorsque le vent s'arrête, les couches tendent à reprendre leur position horizontale primitive mais elles le font par un jeu d'oscillations qui constituent les seiches internes. Une étude très détaillée de ce phénomène a été faite récemment par MORTIMER dans le lac de Windermere et certains lochs écossais.

Stratification chimique des lacs

Durant son séjour dans le lac, l'eau est soumise à l'influence des milliards d'organismes (animaux, végétaux, bactéries). Leur action amène l'apparition dans l'eau, d'une stratification chimique. En effet, dans les couches éclairées, sous l'influence du soleil, les végétaux consomment l'acide carbonique et un certain nombre de substances dissoutes. Leur action libère de l'oxygène. Les organismes consommateurs, comme les animaux et les bactéries, utilisent les substances ainsi fabriquées, consomment de l'oxygène et rejettent de l'acide carbonique en quantité appréciable. Comme ils sont répartis dans tout le lac, tandis que les végétaux ne prospèrent que dans la couche éclairée, le lac est divisé en deux zones : une de production, dite *trophogène*, superficielle, et une de consommation, dite *tropholytique*, profonde. Il va de soi que les caractères chimiques de l'eau sont modifiés de façon très différente dans les deux zones.

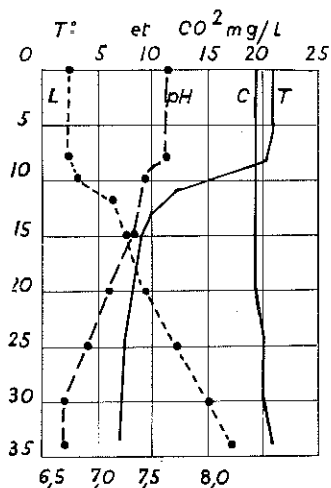
A. Cycle du CO_2 .

Dans les couches superficielles, fortement éclairées, les organismes végétaux (plantes riveraines et surtout algues monocellulaires planctoniques) synthétisent des glucides aux dépens de l'acide carbonique. Leurs besoins en CO_2 durant les heures ensoleillées dépassent largement les quantités produites dans le même temps par les combustions organiques. L'équilibre des bicarbonates alcalino-terreux est troublé par

leur activité. Il en résulte une précipitation de carbonate de Ca et de Mg sous forme d'une poudre blanche qui se sédimente. Ce qui tombe sur les berges est remué par les vagues et repoussé vers la profondeur, vers une couche où l'eau est assez calme pour que les sédiments se maintiennent en place. En pratique, ce dépôt est transporté en dessous du thermocline, dans une région de calme à peu près permanent. Ainsi se forment des bancs de poudre calcaire, très visibles dans certains lacs alpins, qui constituent une ceinture au lac.

L'extraction de l'acide carbonique par la photosynthèse amène évidemment une élévation du pH. Dans certaines circonstances, dans les eaux riches en bicarbonates alcalins, en présence d'énormes quantités de plantes submerses et sous l'action d'une forte insolation, dans le Moero par exemple, le pH peut atteindre 11, ce qui signifie la formation d'hydroxydes.

Dans les eaux obscures, par contre, les métabolismes végétal, animal ou bactérien consomment l'oxygène présent et rejettent du CO_2 . Le milieu s'enrichit en acide carbonique. Les carbonates, tombant des



6. — Température (T), CO_2 libre (L), CO_2 des carbonates (C), et pH dans Trout lake 22 — VIII — 32. D'après JUDAY, BIRGE et MELOCHE.

couches superficielles seront redissous. Eventuellement, surtout si les eaux sont pauvres en calcaire, il existera du CO_2 libre, agressif (fig. 6).

Dans les zones éclairées et obscures, se passent donc des phénomènes très différents. Or durant les périodes de stagnation, le thermocline s'oppose à tout mélange entre les deux couches. L'épilimnion reçoit continuellement des apports nouveaux de CO_2 , de l'atmosphère ou sous forme de bicarbonates transportés par les affluents. Par contre, ce qui tombe dans l'hypolimnion y demeure jusqu'à la prochaine période de circulation totale. La charge en CO_2 et en bicarbonates s'y accroît sans arrêt. Il en résulte une différence de concentration entre les eaux de surface et de fond, ce qui, dans certaines circonstances, peut être le départ de la formation d'une couche morte, plus lourde et stagnante (FINDENEGG).

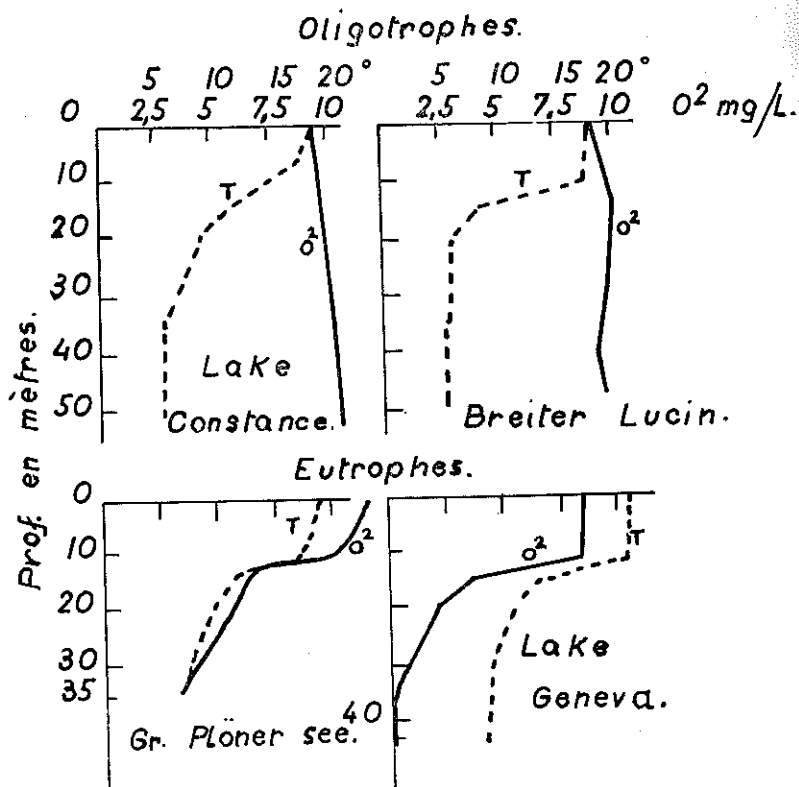
B. Cycle de l' O_2 .

Ce gaz est libéré par la photosynthèse et consommé par les combustions organiques. Par conséquent, les couches superficielles éclairées et en contact avec l'atmosphère seront pratiquement toujours saturées d' O_2 . En période de circulation totale, les courants de convection le répartiront dans toute la masse du lac. Mais dès que s'installe une certaine stratification thermique, les couches profondes sont privées de tout apport nouveau et doivent, jusqu'à la prochaine période de circulation, vivre sur leurs réserves. Dans l'épilimnion, la production d'oxygène se continue, fournit peut-être plus que ce que l'eau peut absorber, mais cet oxygène en surplus s'échappe dans l'atmosphère.

Dans l'hypolimnion, la tension d'oxygène dissous ne peut que diminuer durant une période de stagnation. L'intensité de cette utilisation dépend de plusieurs circonstances.

La première est la durée de la période de stagnation. En général, dans un lac de région tempérée, la consommation d'oxygène sera plus forte durant la période d'été — plus longue — que durant celle d'hiver, bien que la température de l'hypolimnion ne change guère au cours de l'année. Lorsqu'existe une stratification permanente, causée par l'existence d'une zone plus chargée d'électrolytes, la couche morte, qui ne vient jamais en contact avec l'atmosphère, est évidemment privée d'oxygène.

Le second facteur à intervenir est la teneur de l'eau en substances réductrices. Celles-ci peuvent être fabriquées dans le lac et provenir de la population animale, végétale et bactérienne qui l'occupe. Dans certains lacs de nos régions, dont les eaux sont généralement vertes, colorées par des algues planctoniques, l'hypolimnion épuise peu à peu, et parfois complètement, sa réserve d'oxygène. D'autres, à eau plus claire, plus transparente, conservent toute l'année un hypolimnion riche en oxygène (fig. 7). Comme la richesse en organismes des



7. — Distribution de l'oxygène dans les lacs eutrophes et les lacs oligotrophes en période de stagnation estivale.

Lac de Constance (Alpes) — Breiter Lucin (Meklenburg) — Gr. Plöner See (Holstein) — Lake Geneva (Wisconsin), d'après AUERBACH, MAERKER et SCHMALZ, THIENEMANN, BIRGE et JUDAY, in RUTTNER.

premiers est, par unité de volume, beaucoup supérieure à celle des seconds, pour indiquer que la production organique y est très abondante, on leur a donné le nom de *lacs eutrophes* et aux seconds celui de *lacs oligotrophes* (1).

Malgré les courbes de la figure 7, il ne faudrait pas croire que l'hypolimnion d'un lac oligotrophe soit partout extrêmement riche en oxygène : ces courbes ont été arrêtées à 1 m au-dessus du fond. Or, la boue qui tapisse le fond des lacs, boue constituée essentiellement de débris d'organismes, est toujours pratiquement dépourvue d'oxygène. Dans l'eau qui touche immédiatement le sédiment, diffusent des substances réductrices de sorte que la concentration en oxygène présente, dans les derniers centimètres d'eau, un fort gradient décroissant : c'est la *zone de microstratification* d'ALSTERBERG.

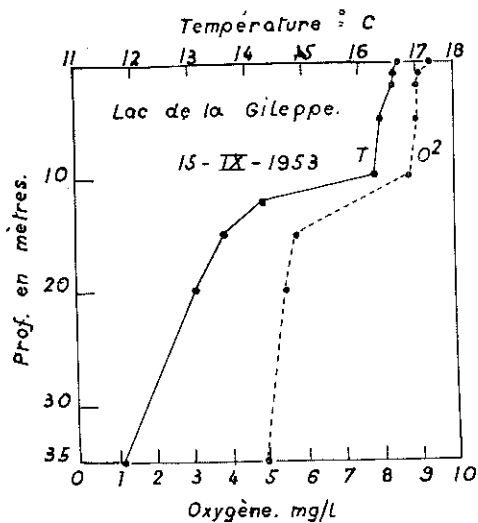
Entre les deux types extrêmes, il existe évidemment toute la gamme des intermédiaires. Les recherches approfondies de THIENEMANN sur cette question, ont montré l'importance, à ce point de vue, de la forme de la cuvette. Le développement des organismes végétaux, début du cycle biologique, est évidemment sous la dépendance, entre autres facteurs, de la quantité d'énergie solaire reçue par le lac et par conséquent, fonction de sa surface. Mais les animaux et les bactéries qui se développent aux dépens des substances organiques fabriquées par les végétaux se répartissent dans toute la masse du lac. Si celui-ci est très profond, possède un hypolimnion volumineux, les phénomènes de réduction agissent sur une grande masse d'eau et diminuent peu sa teneur en oxygène. Le lac aura tous les caractères du type oligotrophe. Plus le volume de l'hypolimnion se réduit, plus les produits de déchets seront concentrés et plus leur action se fera sentir. Un point critique est atteint lorsque le volume de l'hypolimnion devient égal ou inférieur à celui de l'épilimnion. A ce moment, la quantité d'oxygène emmagasinée au début d'une période de stratification est insuffisante pour assurer une oxydation totale des produits de déchets du métabolisme lacustre : le lac prend tous les caractères du type eutrophe.

(1) Cette classification simple en *lacs eutrophes*, *oligotrophes* et *dystrophes* proposée par THIENEMANN, tend maintenant à être remplacée par une classification beaucoup plus compliquée et variant avec chaque auteur. L'intérêt de cette complication n'apparaît guère. Il suffit de se rappeler que toute classification humaine est une simplification des faits que tous les cas existent entre les extrêmes idéaux définis.

Il existe donc une relation entre la profondeur moyenne d'un lac et la teneur en oxygène de ses eaux. Par conséquent, seuls les lacs profonds peuvent constituer durant toute l'année une réserve d'eau à la fois fraîche et bien aérée.

Dans la zone désoxygénée des lacs, un grand nombre de réactions biologiques se passent, dont l'intérêt apparaîtra bientôt.

Les substances réductrices qui agissent sur la concentration en oxygène, ne sont pas nécessairement formées dans le lac même. Elles peuvent être le résultat d'une pollution par les activités humaines, question qui sera envisagée plus loin. Elles peuvent aussi être amenées par les eaux qui alimentent le lac. Le cas le plus fréquent est celui des eaux provenant des tourbières, eaux brunes, chargées de colloïdes organiques, en particulier d'acides humiques. La présence de ces derniers a plusieurs conséquences sur la composition de l'eau. Entrant dans un lac, ils précipitent les sels de Ca, constituant un sédiment gélatineux brun sale nommé *dy* en suédois. L'eau est donc pauvre en électrolytes et de réaction acide, en quoi elle s'oppose à celle des lacs à eau claire, habituellement calcaire. Les colloïdes organiques demeurant en suspension, consomment, plus ou moins, durant les périodes de stra-



8. — Distribution de l'oxygène dans un lac dystrophe (lac artificiel).

tification, l'oxygène de l'hypolimnion. Dans ces lacs *dystrophes*, la courbe de répartition d'O² rappelle celle des lacs eutrophes sans que cela présage rien quant à la productivité biologique du lac (fig. 8). En fait, leurs eaux acides sont généralement très peu peuplées.

Un dernier facteur agit sur la consommation d'O₂ dans les eaux profondes : la température. Dans les régions tempérées, l'hypolimnion conserve toute l'année une température de glacière. Sous l'équateur, il atteint 20 à 25° C. C'est dire si l'activité bactérienne peut y être plus importante que sous nos régions. Aussi, l'hypolimnion de tous les lacs équatoriaux est dépourvu d'oxygène, sauf dans les brefs moments de circulation des eaux. Le jour où fut mesurée, dans le lac Kivu, la courbe de température représentée fig. 4, les eaux des 20 premiers mètres étaient plus que saturées en oxygène; à 25 m, la teneur était de 35 %; à 30 m, de 15 % pour tomber à 0 de 50 à 400 m.

C. Sort du Soufre, du Fer, du Manganèse.

Le Soufre est amené au lac principalement sous forme de sulfates. Dans les couches bien oxygénées, il se maintient en cet état. Mais dans la boue, même au contact de l'eau aérée, il est réduit en sulfures par les bactéries. Si du Fer est présent, du FeS se forme immédiatement et s'incorpore définitivement aux sédiments, leur donnant une teinte noire. Lors des mélanges des eaux, les sulfures non retenus par le fer peuvent être réoxydés en sulfates. Les mêmes transformations peuvent se passer en période de stratification, dans l'hypolimnion des lacs eutrophes ou dystrophes et surtout dans la couche morte des lacs méromictiques. Dans les eaux riches en sulfates, la quantité d'H₂S ainsi formée peut être très grande. Le maximum connu à l'heure actuelle est 786 mgr/litre dans les eaux de fond du Big Soda Lake (Nevada).

Le Fer peut exister en solution dans les eaux lacustres en présence d'Oxygène : au pH 7, des traces de ce gaz le précipitent immédiatement sous forme d'hydroxydes. Il ne se trouve donc en solution, sous forme de sels ferreux, que dans les eaux neutres ou acides dépourvues d'oxygène, c'est-à-dire dans l'hypolimnion d'un lac eutrophe ou dystrophe ou dans une couche morte. Au moment des brassages totaux, amenant de l'oxygène au contact du fond, le fer est entièrement précipité comme oxyde ou phosphate ferrique. Il s'incorpore aux sédi-

ments. Comme fréquemment les eaux qui arrivent aux lacs contiennent des traces de fer, surtout s'il s'agit d'eaux légèrement acides, le lac constitue comme une trappe et sur son fond s'accumule, au fil des années, une couche brune d'oxyde de fer. D'après NAUMANN, cette couche fut l'objet, en Suède, d'une exploitation systématique jusque très récemment.

Le fer existe encore dans les eaux sous forme colloïdale, parfois adsorbé par des substances organiques. Le cas s'observe en grand dans les lacs dystrophes dont les eaux brunes et acides contiennent des complexes d'humus et de fer.

Le manganèse se comporte comme le fer dans les eaux lacustres. Mais il supporte une tension plus élevée d'oxygène (1 mgr/litre au pH 7) et par conséquent se rencontre dans des couches moins profondes que le fer.

D. Cas de l'Azote, du Phosphore, de la Silice.

La croissance des algues aquatiques ne dépend pas seulement de la présence de soleil et d'acide carbonique, mais également de celle de certains éléments qu'elles assimilent. Les plus importants sont l'azote et le phosphore — bases des protéines et des acides nucléiques — et la silice constituant du squelette des diatomées. Une multiplication accélérée des algues répond à tout enrichissement en ces trois substances.

L'azote existe dans les eaux naturelles sous forme de nitrates, en concentration atteignant d'ailleurs rarement le mgr/litre. Durant les périodes de circulation, sa répartition dans le lac est homogène, mais dès qu'apparaît le thermocline, la situation change. Dans les couches éclairées, les algues consomment avidement tout le nitrate présent. Généralement, sa concentration diminue tellement qu'il devient indéterminable par nos méthodes.

Dans l'hypolimnion, la photosynthèse n'intervient pas, ou guère. Le sort des nitrates y dépend de la présence d'oxygène. L'eau bien aérée des lacs oligotrophes contient des nitrates jusqu'au fond. En l'absence d'oxygène, les nitrates sont attaqués par certaines bactéries qui les transforment en nitrites puis en ammoniacque ou en azote moléculaire. Par conséquent, dans l'hypolimnion d'un lac eutrophe, ou dans

la couche morte d'un lac méromictique, ne peuvent exister que des sels ammoniacaux. A la limite inférieure de présence d'oxygène, s'observe généralement une bande étroite chargée de nitrites.

Tous les sels ammoniacaux de l'hypolimnion ne proviennent pas nécessairement de la réduction des nitrates. Au contraire, une bonne partie tire son origine de la décomposition des substances organiques dissoutes ou des protéines des cadavres.

Le phosphore est fourni aux eaux sous forme de phosphates par la décomposition des roches. Il n'y existe jamais qu'en concentration extrêmement faible se mesurant en mg/m³, d'autant que les algues sont capables d'absorber et de stocker tout phosphate présent en excès. Cette absorption se produit évidemment avec une intensité particulière dans les eaux superficielles, éclairées. En période de stabilité des eaux, par conséquent, la concentration des phosphates augmente avec la profondeur. Le phénomène est exagéré par les processus biologiques. En effet, les algues qui ont absorbé le phosphate dissous peuvent être consommées par des organismes animaux qui l'incorporent à leurs protéines, spécialement aux nucléoprotéines. Eventuellement, ces organismes meurent et leurs cadavres tombent dans la couche profonde pour y être l'objet de l'attaque des bactéries. Celles-ci décomposent les protéines en substances plus simples et remettent le phosphore en solution sous forme de phosphates. Durant toute la période de stagnation, il se produit ainsi un transport continu des produits organiques, phosphorés et azotés des eaux superficielles vers les eaux profondes. Ces substances sont momentanément soustraites à l'activité des plantes. La prochaine période de circulation totale, en les transportant de nouveau dans les couches éclairées, les réintroduira dans le jeu de la protosynthèse et du cycle biologique. Une longue période de stagnation amène donc un appauvrissement progressif du lac.

Cependant, lorsque l'eau de fond contient en même temps des sels ferreux et des phosphates, l'apport d'oxygène par les eaux en circulation a comme conséquence la formation de phosphate ferrique qui restera dans le sédiment, et sera difficilement utilisé par les plantes.

Lorsque la couche du fond est perpétuellement immobile — dans le cas d'un lac méromictique — le cycle est interrompu. Tout cadavre pénétrant dans la couche « morte » est définitivement perdu pour l'économie du lac. Les produits de décomposition vont s'accumuler

sans fin. Aussi, dans ces couches, se constatent des teneurs relativement élevées en sels ammoniacaux et en phosphates.

La silice intervient dans la constitution des tests de diatomées, qui sont généralement un des constituants importants du plancton. C'est à ce titre qu'elle peut être considérée comme un élément biogène. A peu près toutes les eaux en contiennent. On peut constater qu'une multiplication abondante des diatomées est accompagnée d'une diminution de la teneur en SiO_2 . D'autre part, les tests de diatomées qui tombent vers le fond s'incorporent aux sédiments ou, repassant en solution, augmentent la teneur des couches profondes par un phénomène analogue au transport de la surface vers le fond, de l'acide carbonique, du phosphore, de l'azote.

E. Autres substances minérales.

Il est impossible de fournir des règles générales sur le comportement des autres substances. Leur concentration varie évidemment d'un lac à l'autre suivant la nature des terrains voisins. En général, les quantités présentes sont telles qu'elles dépassent de beaucoup les besoins des organismes. Même les substances qui sont assimilées par les organismes ne présentent pas de stratification. Cependant, OHLE a pu mettre en évidence une augmentation de la concentration en potassium dans les eaux de fond de quelques lacs du nord de l'Allemagne.

Le cas le plus intéressant est fourni par le chlore, qui est d'habitude compté parmi les éléments biogènes mais qui ne montre jamais dans les lacs une stratification d'origine biologique. En fait une répartition inégale du chlore sur la profondeur d'un lac, démontre l'existence d'apports sous la surface de l'eau et la superposition de couches de natures différentes. Elle ne se rencontre que dans des lacs à stratification permanente.

Substances organiques dissoutes

Les eaux naturelles les plus pures, les plus transparentes, contiennent toutes des substances organiques aussi bien à l'état de colloïdes qu'à celui de particules en suspension. Leur présence s'explique aisément par l'activité des organismes qui rejettent des déchets et dont les cadavres se décomposent.

BIRGE et JUDAY, étudiant les lacs du Wisconsin, ont démontré que les matières organiques dissoutes et en suspension dans l'eau lacustre représentent une quantité plusieurs fois supérieure à celle qui existe dans les organismes planctoniques. D'autre part, cette quantité ne se modifie pas énormément au cours de l'année, ne varie guère d'un lac à l'autre et sa répartition en profondeur ne se montre pas influencée par la présence du thermocline.

L'azote organique dissous, par exemple, est presque toujours à une concentration proche de 0,5 mg/litre aussi bien dans les lacs eutrophes que dans les lacs oligotrophes. Cet ensemble de constatations suggère que, dans les circonstances normales, ces substances sont très peu utilisées par les organismes. L'hypothèse a été émise qu'il s'agit de produits de déchets dont la décomposition et l'utilisation par les organismes est difficile.

En fait, le problème demeure ouvert. On connaît trop peu la physiologie des algues planctoniques pour décider si certaines d'entre elles ne sont pas capables d'utiliser ces substances, peut-être même ne les exigent pas comme facteurs de croissance. Les Cyanophycées par exemple, ne se développent abondamment que dans une eau à peu près privée d'engrais inorganiques mais chargée de produits organiques (PEARSALL-HUTCHINSON). Elles se montrent alors capables de pullulation extrême, et couvrent par exemple la surface des lacs d'une couche compacte (les fleurs d'eau des auteurs allemands et anglo-saxons). De plus, il a été démontré récemment (LEFEVRE et al.) que les algues du plancton rejettent dans l'eau des produits complexes qui, à la façon des antibiotiques, inhibent le développement d'autres formes et permettent la formation de populations denses composées de très peu d'espèces (*substances ectocrines*).

Une forme de substance organique particulièrement importante dans certains lacs est représentée par les acides humiques, provenant des tourbières ou de la décomposition des matières végétales. Leur destruction par les bactéries paraît difficile, mais il a été dit plus haut que, dans un lac, elles sont en grande partie floculées par les ions de calcium et constituent sur le fond des lacs une couche gélatineuse, le *dy*.

Les grosses particules organiques, d'ailleurs, se déposent toujours plus ou moins rapidement dans les sédiments. C'est le sort des restes

des organismes planctoniques et littoraux. Toutes les parties résistantes de ces cadavres s'amassent sur le fond des lacs en une couche pulvérulente gris brun (*Gijttja*) ou noire (*Sapropèle*) qui est retravaillée par les animaux et les bactéries du fond. Dans certaines circonstances, le dépôt est si régulier qu'il montre une structure feuilletée où est enregistrée nettement l'influence de chaque année, voire de chaque saison. L'analyse des dépôts du lac de Zurich à ce point de vue, par NIPKOV, est classique. Elle a permis de mesurer les dépôts formés chaque année entre 1895 et 1920.

Dans les lacs oligotrophes, cependant, ces dépôts sont remaniés par des animaux, vers et larves d'insectes, capables de supporter de faibles teneurs en oxygène. Dans les lacs eutrophes, les organismes les plus actifs sont les bactéries qui décomposent les produits organiques des cadavres en H^2O , CO^2 , H^2S , NH^3 , P^2O^5 et CH^4 . Les bulles de gaz de méthane remuent la surface de la boue et facilitent les échanges avec l'eau du lac. La même action résulte des déplacements des organismes à l'intérieur et à la surface de la boue. Ainsi peuvent être rendus au lac une partie des éléments fertilisants qui avaient été incorporés dans la substance vivante. Ils enrichissent les eaux profondes mais à la prochaine période de circulation totale seront retransportés dans les eaux éclairées où ils prendront de nouveau part au cycle de la matière vivante.

Une partie seulement de ces éléments sera rendue au lac. Le reste demeure fixé dans le sédiment, adsorbé par les colloïdes organiques comme les substances humiques ou inorganiques comme l'oxyde de fer.

Vieillessement des lacs

Un lac est — au sens géologique du terme — un phénomène temporaire. Ses affluents lui apportent continuellement des alluvions et, dans le lac même, des dépôts inorganiques comme organiques se sédimentent. Sous l'influence de ces facteurs, le lac se comble peu à peu. Le phénomène va parfois fort vite : le lac de barrage de Verdon à Quinson, terminé en 1869, d'une contenance de 1.325.000 m³ a été presque entièrement comblé en quatre ou cinq ans (COLLET). Même dans les lacs naturels, le phénomène peut s'observer. Il est évidemment d'autant plus lent que le lac est vaste.

Dans nos régions tempérées, les lacs les plus grands, les plus profonds, sont généralement oligotrophes. La sédimentation qui s'y passe réduit peu à peu leur profondeur, augmente l'étendue des bancs littoraux et par conséquent la surface disponible pour les plantes supérieures dont les feuilles et les tiges constituent des dépôts de plus en plus abondants. Le processus, par conséquent, tend à s'accélérer avec les années. Le moment viendra, où le fond du lac se relevant, le volume de l'hypolimnion ne sera plus supérieur à celui de l'épilimnion. Dès lors, comme il a été dit plus haut, le lac prendra les caractères du type eutrophe, c'est-à-dire que, durant les périodes de stagnation, son hypolimnion sera dépourvu d'oxygène. Il en résulte évidemment que les produits organiques formés dans le lac et qui se déposent sur le fond, ne pourront plus être oxydés au même point. Comme, en même temps, la densité de population sera devenue plus grande, une boue organique plus épaisse se déposera chaque année, et le fond du lac se relèvera d'autant plus vite. Le long des berges, les plantes riveraines étendront de plus en plus leur domaine. Finalement, elles couvriront l'entièreté de la cuvette qui sera transformée en marécage.

L'abondance des déchets végétaux amènera la libération de produits du type acides humiques qui, par précipitation des sels de Ca et par leurs ions libres rendront le milieu légèrement acide. Il en résulte la disparition de certaines espèces végétales tandis qu'apparaissent des cypéracées et des mousses qui transforment l'ancien lac en un marais acide (FLATTMOOR des auteurs anglo-saxons). L'action de ces plantes rendra le milieu encore plus acide et finalement s'installeront les Sphagnum caractéristiques des Fagnes. Le lac, à son dernier stade, sera transformé en une tourbière bombée (HIGHMOOR des auteurs anglo-saxons) possédant parfois encore un trou d'eau au sommet.

Un lac alimenté dès l'origine en eau provenant des tourbières, ne passe évidemment pas par ces stades. Il est acide dès le début et son comblement par la sédimentation le transformera immédiatement en « moor ».

Dans certains pays, comme l'Amérique du Nord ou la Suède, où existent de très nombreux lacs d'âge géologique identique — post-glaciaires — on peut voir, côte à côte, toutes les étapes de ce vieillissement des lacs. Il est en effet plus avancé dans les lacs de petite taille.

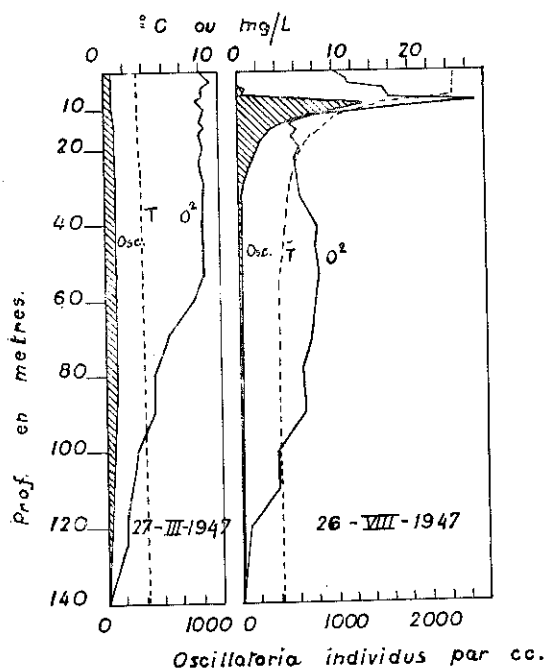
Influences humaines

Le processus d'eutrophisation peut être aisément accéléré. Tout apport anormal de substances réductrices — et spécialement de substances organiques — contribue à user l'oxygène mis en réserve dans l'hypolimnion au début des périodes de stagnation. L'homme peut jouer ici un rôle énorme. Son influence apparaît nettement dans l'évolution actuelle des lacs du pourtour des Alpes, dont beaucoup se sont transformés complètement durant les 100 dernières années.

Il s'agissait autrefois de lacs à eau claire, transparente, riche en oxygène jusqu'au fond. Y vivaient d'ailleurs des organismes exigeants à ce point de vue, par exemple les célèbres Corégones, Salmonides à la chair très prisée. La beauté de leurs eaux a fait de plusieurs de ces lacs, des réservoirs naturels d'eau alimentaire où puisent les communes riveraines. C'est le cas, entre autres, du lac de Zurich.

Or, par suite de l'augmentation de la population riveraine et du progrès de l'hygiène, ces lacs reçoivent des quantités de plus en plus grandes d'eaux chargées de substances organiques. Cet apport accélère le processus d'eutrophisation. Un phénomène analogue s'est passé d'ailleurs dans des lacs de montagnes éloignés de toute agglomération et y a été causé par l'influence des engrais répandus sur les terrains voisins et transportés dans le lac par l'eau de pluie. Le détail du processus n'est pas encore bien connu, mais le résultat est clair : beaucoup de lacs suisses peuvent être considérés comme « malades ». Leurs eaux profondes sont mal oxygénées, la composition du plancton s'est complètement altérée, les poissons nobles ont disparu.

Le cas du lac de Zurich a été particulièrement étudié à cause de son intérêt. Il semble que jusqu'en 1895, le lac ait continué à présenter tous les caractères de l'oligotrophie. En 1896, le diatomée *Tabellaria fenestrata* (LYNGH) se développa d'une façon extraordinaire, inconnue jusqu'alors. Les eaux, de bleu, devinrent vert jaune. En 1898, apparut pour la première fois, la Cyanophycée *Oscillatoria rubescens* D. C., algue qui vit dans la pénombre, pratiquement à la limite inférieure de l'épilimnion. Cette algue, qui colore l'eau en rouge au point de lui donner la couleur du sang, rejette des quantités de produits organiques qui absorbent énormément d'oxygène. Le lac malgré sa profondeur, était devenu eutrophe. Le fait s'observe en particulier dans



9. — Température, O² dissous et densité de *Oscillatoria rubescens* dans le lac de Zurich. D'après THOMAS et MARKI.

T. — Température — — — — —
 O². — Oxygène dissous —————
 Osc. — *Oscillatoria* \\\ \\\ \\\

les sédiments qui depuis cette date sont nettement stratifiés. Les dépôts antérieurs à 1895 sont complètement minéralisés grâce à la richesse en oxygène des eaux de fond. Les dépôts postérieurs contiennent un pourcentage élevé de substances organiques.

Actuellement, les eaux profondes du lac de Zurich sont pauvres en oxygène durant toute l'année (fig. 9). Même durant les périodes d'isothermie, le brassage des eaux n'atteint pas le fond. C'est que la population planctonique du lac est devenue si importante que le transport biologique des bicarbonates a donné aux couches du fond une densité nettement supérieure à celle des couches superficielles. Le lac passe peu à peu au type méromictique.

Cet exemple permet de souligner combien il est facile d'abîmer involontairement — et définitivement — une réserve d'eau naturelle. Dans un cas comme celui-ci, l'épuration habituelle des eaux — même parfaite — ne peut suffire, car elle se contente d'assurer la minéralisation complète des substances organiques. En d'autres termes, au départ des substances organiques, elle fabrique, entre autres, des nitrates et des phosphates, c'est-à-dire qu'elle fournit précisément les corps les plus avidement recherchés par les algues pour leur croissance.

- CAPART, A. : Le milieu géographique et géophysique — *Expl. Hydr. du Lac Tanganyika*. Brux. 1952.
- COLLET, L. W. : Les lacs. — *Doin*. Paris 1925.
- DAMAS, H. : Recherches hydrobiologiques dans les lacs Kivu — Edouard et Ndalaga — *Institut des Parcs nationaux du Congo Belge*. Bruxelles 1937.
- FINDENEKG, I. : Holomiktische und meromiktische Seen — *Int. Rev. Hydr.* 35. 1937.
- HUTCHINSON, G. E. : A treatise on Limnology-I — Geography, Physics and Chemistry — *Wiley and Sons*. N.-Y. 1957.
- JAAG, O. : Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizer Seen. — *Verh. Int. Ver. Limn.* 10. 1949.
- JUDAY, C., BIRGE, A. et MELOCHE, V. W. : The Carbon dioxide and Hydrogen ion content of the lake waters of Northeastern Wisconsin — *Trans. Wis. Acad. Sc. Arts. Lett.* 29. 1935.
- LEFEVRE, M., JACOB, H. et NISBET, M. : Auto et hétéroantagonisme chez les algues d'eau douce. — *Ann. St. C. Hydr. Appl.* 4. 1952.
- MORTIMER, C. H. : The resonant response of stratified lakes to wind. — *Schweiz. Z. Hydr.* 15. 1953.
- RUTTNER, F. : Das Plankton der Lunzer Untersees. — *Int. Rev. Hydr.* 23. 1929.
- RUTTNER, F. : Hydrographische und Hydrochemische Beobachtungen auf Java, Sumatra und Bali — *Arch. f. Hydrob.* — *Suppl. Bd.* 8. 1931.
- RUTTNER, F. : Fundamentals of Limnology. — *Univ. of Toronto Press*. 1953.
- SCHMIDT, W. : Ueber Temperatur und Stabilitätsverhältnisse von Seen — *Geographiska Annaler* 102. 1928.
- STANKOVIC, S. : The Balkan lake Ohrid and its living world — *W. Junk* — Den Haag. 1960.
- THIENEMANN, A. : Der Sauerstoff im eutrophen und oliotrophen Seen. — *Die Binnengewässer*. 4. 1928.
- THOMAS, E. A. et MARKI, E. : Die heutige Zustand des Zurichsees. — *Verh. Int. Ver. Limn.* 10. 1949.
- WELCH, P. S. : Limnology. — *Mc. Graw Hill*. New-York. 1952.