ÉTUDE MORPHOMÉTRIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE DE NEUF LACS DU MASSIF DE NÉOUVIELLE (HAUTES-PYRÉNÉES)

par J. CAPBLANCQ et H. LAVILLE¹

SOMMAIRE

Introduction	276
I. — Situation géographique — Géologie	277
II. — Climat et végétation	278
III. — Morphométrie et végétation des lacs	280
1. — Lacs du Vallon de Port-Bielh	280
1.1. — Lac de Port-Bielh	280
1.2. — Gourguet	282
1.3. — Gourg Nère Moyen	282
1.4. — Gourg Nère Inférieur I	285
1.5. — Gourg Nère Inférieur II	285
2. — Lacs du Vallon d'Estibère	285
2.1. — Lac Supérieur	285
2.2. — Lac Long	286
2.3. — Lac d'Anglade	288
2.4. — Lac Inférieur	288
IV. — Régime thermique	289
V. — Propriétés optiques	295
VI. — Alcalinité — Dureté — Conductivité	295
1. — Méthodes	295
2. — Résultats	296
VII. — pH	301
1. — Méthodes	301
2. — Résultats	303
VIII. — Gaz carbonique	304
1. — Méthodes	304
2. — Résultats	306

1. Ce mémoire constitue une partie commune à deux thèses présentées devant la Faculté des Sciences de Toulouse en vue de l'obtention du Doctorat ès Sciences naturelles.

IX. — Oxygène	306
1. — Méthodes	306
2. — Résultats	307
X. — Nitrates — Silice — Phosphates	311
1. — Méthodes	311
1.1. — Nitrates	311
1.2. — Silice	312
1.3. — Phosphates	312
2. — Résultats	312
2.1. — Nitrates	314
2.2. — Silice	314
2.3. — Phosphates	315

INTRODUCTION²

Dans l'importante littérature limnologique, le nombre de travaux donnant des résultats physico-chimiques suivis pour des lacs de haute montagne sensu STEINBÖCK [1938 p. 404-405] sont relativement peu nombreux. PECHLANER [1966], dans son étude de deux lacs du massif du Kühtai, donne une excellente révision bibliographique de ces travaux. Ils concernent essentiellement plusieurs lacs des Alpes autrichiennes [LEUTELT-KIPKE 1934, 1936, STEINBÖCK 1934, TURNOWKY 1946, 1954, 1961, GUTMANN 1962], des Alpes suisses [SUCHLANDT et SCHMASSMANN 1935] et des Alpes italiennes [MALDURA 1936, 1947, WOLFF 1948, MORANDINI 1949] ainsi que quelques lacs d'altitude du Canada [RAWSON 1942, 1953] et des Montagnes Rocheuses du Colorado [PENNAK 1955, 1958].

En ce qui concerne les Pyrénées, les recherches sur les lacs de haute altitude remontent à l'époque des études entreprises en vue de l'exploitation des ressources hydroélectriques. Dans le travail de GAURIER [1934] se trouve une monographie des principaux systèmes lacustres des Pyrénées françaises avec quelques données morphométriques. NUSSBAUM [1934] fait l'inventaire de 567 lacs du versant français et de 446 lacs du versant espagnol et décrit plus particulièrement leur genèse et leur situation topographique, 62 % d'entre eux se trouvant sur terrain granitique. Il y a peu de renseignements de nature physico-chimique dans ces deux travaux sinon

2. Nous remercions J.-N. TOURENQ pour l'aide qu'il nous a apportée lors des relevés planimétriques et bathymétriques des lacs. Les mesures d'hiver au Vallon de Port-Bielh ont pu être réalisées grâce au concours de la Base Aérienne 119 de Pau dont nous remercions M. le Colonel Commandant ainsi que le Chef d'Escadron d'hélicoptères. Nos remerciements vont également à M. CHIMITS et aux Gardes du Parc National dont l'aide nous fut précieuse pour la réalisation de ces expéditions hivernales héliportées.

quelques données fragmentaires sur la couleur, la transparence et la température des eaux.

L'étude de la région lacustre du Massif de Néouvielle a été entreprise à la fin du siècle dernier par BELLOC [1895]. Il note la présence de 56 nappes d'eau dont 38 sont réparties dans le Bassin de l'Adour et 18 dans le Bassin de la Garonne. Les lacs du Vallon d'Estibère ne sont pas mentionnés dans cette étude à caractère hydrogéographique qui a le grand mérite d'avoir mis l'accent sur l'intérêt limnologique de cette région. PRAT et CHOUARD [1928, 1929], CHOUARD [1931] font une étude précise de la végétation aquatique des bassins lacustres de la région d'Orédon, de l'évolution des ceintures végétales et de la formation des tourbières. On trouve chez CAMPARDOU et SECONDAT [1941] et chez DUSSART [1952] quelques renseignements physico-chimiques recueillis lors d'une unique visite de quelques lacs du Massif. ANGELIER [1961] fournit d'intéressantes données sur le régime thermique, la flore et la faune des cinq lacs du Vallon d'Estibère.

Dès 1880, avec le début des travaux du barrage d'Orédon, commence l'aménagement des principales cuvettes lacustres en réservoirs artificiels en vue d'une utilisation à la fois agricole (irrigation des coteaux de Gascogne) et hydroélectrique (Centrales de Fabian et Eget - Les Echarts). Ainsi tous les lacs importants du Massif (Aumar, Cap de Long, l'Oule, Aubert) ont-ils été transformés en bassins de retenue entre 1902 et 1953 et sont, de ce fait, soumis à d'importantes et fréquentes variations de niveau.

Dans le cadre d'une étude de l'écologie du plancton et du benthos et de la production primaire et secondaire dans les lacs d'altitude, nous avons étudié plus particulièrement 9 lacs naturels du Bassin de l'Oule, d'une superficie et d'une profondeur moindres. Nous donnons ici les résultats de relevés morphométriques et de mesures physico-chimiques effectuées régulièrement, pendant quatre années consécutives, durant les cinq mois où ces lacs sont libérés de leur couverture hivernale. Pour le lac de Port-Bielh, ces mesures ont été poursuivies pendant l'hiver 1968-1969. Cette étude a pu être réalisée grâce à de fréquents séjours au laboratoire d'Orédon (1 851 m) ainsi qu'au refuge du lac Vert ou gourg de Port-Bielh (2 100 m) dans le Vallon de Port-Bielh.

I. — SITUATION GÉOGRAPHIQUE — GÉOLOGIE

D'une étendue de plus de 400 kilomètres carrés, le Massif de Néouvielle (52° 50' latitude N, 0° 10' longitude E) est situé dans les Pyrénées centrales entre le Gave de Pau à l'Ouest, l'Adour au Nord, la Neste d'Aure à l'Est et la frontière espagnole au Sud. Il est parcouru par une ligne de crête sinueuse, la plus élevée du

versant français où culminent le Pic du Midi de Bigorre (2 887 m), le Pic d'Arbizon (2 831 m), le Pic Long (3 191 m), le Pic de Néouvielle (3 091 m). A cette crête se rattachent des branches secondaires délimitant des bassins élevés parsemés de lacs dont les eaux se déversent à l'Ouest dans les Gaves, au Nord dans l'Adour, à l'Est et au Sud dans les Nests.

Le Bassin de l'Oule de 28,2 km² de superficie [INGRAND 1961] se subdivise d'Ouest en Est en trois vallons (Carte hors-texte) :

— le Vallon d'Estibère orienté NE-SW,

— le Vallon de Port-Bielh et le Vallon de Bastan ouverts tous deux au Sud.

Les eaux de ces trois vallons sont recueillies dans le réservoir de l'Oule (16,4Mm³) et se déversent ensuite dans la Neste de Couplan, elle-même affluent de la Neste d'Aure.

Quatre lacs du Vallon d'Estibère et cinq lacs du Vallon de Port-Bielh ont été suivis régulièrement. Ils s'échelonnent entre 2 120 m (Lac Inférieur d'Estibère) et 2 325 m (Lac Supérieur d'Estibère).

Au cœur de la zone axiale des Pyrénées, le Massif de Néouvielle est constitué par le centre d'une voûte anticlinale où l'érosion a fait apparaître le soubassement granitique. Il se présente ainsi comme un grand affleurement ovalaire de granite entouré d'une auréole de schistes métamorphiques. En contact au Nord et au Sud, des terrains Carbonifères forment les flancs redressés de l'anticlinal [Carte géologique au 1/80 000 — n° 251 Luz]. L'érosion glaciaire y a été très active et a creusé un ensemble de vallées en auge où se sont installés de nombreux lacs, essentiellement en amont de verrous, plus rarement en amont de barrages morainiques comme par exemple le lac d'Aumar (2 192 m).

II. — CLIMAT ET VÉGÉTATION

Le climat et la végétation de la Vallée d'Aure et du Massif de Néouvielle sont bien connus grâce aux travaux de GAUSSEN [1931, 1949], CHOUARD [1931, 1937, 1949], CASSAGNAU [1961], INGRAND [1961], DÉCAMPS [1967]. Nous dégagerons simplement les caractéristiques climatiques essentielles pouvant avoir une influence sur l'hydrographie du Bassin de l'Oule.

Abrité des vents d'Ouest par la ligne de crête, son orientation S-SE le soumet plus directement aux influences méridionales et détermine un climat relativement sec. L'action du vent du Sud, associée à l'insolation et à la sécheresse de l'air, peut activer la fonte des neiges et faire perdre au bassin jusqu'à 25 % par évaporation, tandis que les précipitations diminuent sensiblement avec l'altitude à partir de 1 000 mètres, au point d'infléchissement de la

vallée vers l'Ouest [INGRAND, 1961]. Au-dessus de la zone des brouillards (1 800 - 2 000 m) cette diminution s'accroît nettement pendant l'été et les chiffres donnés par CASSAGNAU [1961] permettent d'évaluer le total des précipitations de juin à septembre 1959, à 437,7 mm pour Orédon (1 851 m), 389,9 mm pour le plateau d'Aumar (2 200 m) et à 321,1 mm pour le Soum de Monpelat (2 474 m). D'importantes variations annuelles peuvent s'observer et les apports en eau disponible furent par exemple de 29 millions de m³ en 1953 contre 45 millions en 1952 pour le Bassin de l'Oule [INGRAND 1961]. Février et juillet sont généralement les mois les plus secs, un maximum de précipitations se situant en mai-juin, un autre correspondant aux fréquents orages d'août - septembre. Les premières neiges, temporaires, peuvent apparaître sur les sommets exposés au Nord, dès le mois d'août. Les chutes les plus importantes se situent en novembre et surtout en décembre et janvier où on a pu observer des couches de plus de deux mètres d'épaisseur dans le Bassin de l'Oule. Toutes ces conditions amènent une baisse progressive du niveau des lacs pendant l'été, d'autant plus importante que les sources qui les alimentent sont moins nombreuses et qu'il n'existe aucun apport d'eau de fonte de glacier ou de fonte de neige à partir du mois de juillet. Entre juin et septembre, une baisse de niveau de 20 à 40 cm suivant les lacs, entraîne une diminution considérable du débit des déversoirs; certains peuvent s'assécher entièrement début août.

Les lacs commencent à geler dès la fin octobre, et leur surface est entièrement prise à la fin du mois suivant. Même à plus faible altitude, les petits lacs gèlent plus rapidement (1 cm de glace au Port-Bielh, 2 285 m; 8 cm au Gourg Nère Inférieur II, 2 201 m; le 20 novembre 1968) et ceci d'autant plus que leur alimentation et l'épaisseur de la couverture de neige sont minimes (40 cm de glace au Lac d'Anglade, 2 185 m et au Lac Inférieur, 2 120 m, 15 cm seulement au Lac Supérieur d'Estibère, 2 325 m, le 3 décembre 1965) [ANGELIER, Comm. verb.]. La période de gel dure en moyenne 7 mois pour les 9 lacs étudiés; il existe un décalage de 15 jours à trois semaines entre la disparition complète de la glace dans les lacs les plus bas (Lac Inférieur, Lac d'Anglade) et dans les plus élevés (Lac Supérieur, Lac de Port-Bielh). « Le dégel, tout comme le déneigement est très variable suivant les années et dépend à la fois de la quantité de neige tombée pendant l'hiver et de l'apparition plus ou moins précoce des conditions printanières » [CASSAGNAU, 1961]. Ces variations paraissent toutefois s'atténuer avec l'altitude puisqu'elles n'ont jamais dépassé 8 à 10 jours pendant nos quatre années d'observations : ainsi les dates de dégel du lac de Port-Bielh ont été le 2 juillet en 1965, le 24 juin en 1966 et le 3 juillet en 1967.

Du fait de ces conditions climatiques, toute la région du Massif

de Néouvielle présente des limites forestières élevées [CHOUARD 1926; GAUSSEN 1931]. A partir de 1 800 m la sapinière est progressivement remplacée par la forêt de pins sylvestre (*Pinus sylvestris*) et de pins à crochets (*Pinus uncinata*) qui disparaît au-dessus de 2 100 m dans le vallon de Port-Bielh et au-dessus de 2 200 m dans le vallon d'Estibère. Dans la zone supérieure de la forêt c'est la Rhodo-pineraie type : la lande à *Rhododendron ferrugineum* et à *Vaccinum myrtillus* alterne avec la prairie subalpine à *Festuca eskia* où peuvent encore persister des îlots de pins à crochets au sommet de mamelons rocheux.

III. — MORPHOMÉTRIE ET VÉGÉTATION DES LACS

1. Lacs du Vallon de Port-Bielh.

1.1. — LAC DE PORT-BIELH (2 285 m; fig. 1).

C'est un des plus importants lacs naturels du Massif de Néouvielle tant par sa superficie (16,4 ha) que par sa profondeur (19 m). Il est encadré au Nord, à l'Est et à l'Ouest par une ligne de crête qui culmine au Pic de Bastan (2 715 m). Ses pentes abruptes, couvertes de gros blocs granitiques, plongent dans le lac et forment une cuvette d'aspect aride. Il est ouvert au Sud sur le Vallon du même nom et retenu par un verrou glaciaire où alternent éboulis et touffes de Rhododendrons. Il est essentiellement alimenté par les eaux de fonte des neiges et, pendant l'été, par quelques sources froides de faible débit coulant dans sa partie orientale entre des coussinets d'Hypnacées et de Saxifrages.

La courbe hypsographique (fig. 2) révèle un bassin de forme régulière aux pentes accentuées. Un ressaut transversal de 10 à 12,50 m sépare deux fosses d'une profondeur maximum de 19 mètres (fig. 1). De gros blocs granitiques recouverts d'une mince couche de vase et sur lesquels se développent d'importantes colonies de *Nostoc* sp. confèrent au fond un aspect chaotique jusqu'à une profondeur de 7 à 8 mètres. Au-delà, la couche de vase s'épaissit très rapidement et recouvre le fond uniformément. Il s'y développe une dense prairie de *Nitella flexilis*³ qui disparaît au-delà de 16 mètres.

Pendant l'été, le lac n'étant plus que très faiblement alimenté, son niveau diminue de 20 à 30 cm mais n'assèche jamais entièrement son émissaire.

3. Nous remercions M. CORILLION d'Angers pour la détermination de cette algue.

FIG. 1. — Carte morphométrique du lac de Port-Bielh.

FIG. 2. — Courbe hypsographique du lac de Port-Bielh.

1.2. — LAC DU GOURGUET⁴ (2 219 m; fig. 3).

D'une superficie de 2,6 hectares et d'une profondeur maximum de 5 m, le Lac du Gourguet est, après celui de Port-Bielh, le plus important des lacs étudiés. Il occupe le fond d'une dépression perpendiculaire au Vallon de Port-Bielh, ouverte à l'Est, et où alternent éboulis, prairie sub-alpine et Rhododendrons. Quelques touffes de *Potamogeton praelongus* apparaissent dans la partie proche du déversoir entre 1 et 2 mètres.

Alimenté tout l'été par des ruisselets qui débouchent dans la partie occidentale de la dépression, ses variations de niveau ne sont pas supérieures à 20 centimètres.

Les GOURS NÈRES forment une série de lacs échelonnés entre 2 249 et 2 201 mètres. Les Gours Nères Supérieur, Moyen et Inférieur I sont reliés par leur déversoirs, le Gourg Nère Inférieur II est isolé des précédents.

1.3. — GOURG NÈRE MOYEN (2 211 m; fig. 4).

De faible superficie (6 830 m²) et profond de 3,60 mètres maximum ce lac est allongé dans le sens NW-SE. Il est alimenté sur sa rive occidentale par le déversoir du Gourg Nère Supérieur et, à

4. Nommé lac des Guits sur la carte de l'I.G.N.

5. La carte de l'I.G.N. réserve le nom de Gourg Nère au Gourg Nère Supérieur et nomme Laquets de Port-Bielh l'ensemble des 3 autres Gourg Nère.

FIG. hors-texte n° 1. — Le lac de Port-Bielh (2 285 m). On remarque le verrou glaciaire entaillé par l'émissaire du lac. (Photo Laville)

FIG. hors-texte n° 2. — Le lac Inférieur d'Estibère (2 100 m) dans la forêt de pins avec au premier plan la tourbière. (Photo Hirigoyen)

FIG. hors-texte n° 3. — Le Gourg Nère Inférieur II (2 200 m). La zone des brouillards (1 800-2 000 m) cache la partie basse du Bassin de l'Oule. (Photo Duguy)

FIG. hors-texte n° 4. — Le Gourg Nère Moyen (2 211 m), le Gourg Nère Inférieur I (2 198 m) et la partie occidentale du Gourg Nère Inférieur II. (Photo Duguy)

FIG. 3. — Gourguet et Gourg Nère Inférieur II : morphométrie et végétation.

FIG. 4. — Gourg Nère Moyen et Gourg Nère Inférieur I : morphométrie et végétation.

l'extrémité NW, par des sources qui s'écoulent parmi des Sphaignes et des Hypnacées. Le fond, d'où émergent ça et là quelques pieds de *Potamogeton praelongus* est recouvert d'une couche uniforme de vase.

Son niveau s'abaisse de 30 à 40 centimètres pendant l'été et son émissaire s'assèche totalement dès le mois d'août.

1.4. — GOURG NÈRE INFÉRIEUR I (2 198 m; fig. 4).

Le plus petit (4 100 m²) et le moins profond (2,60 m) de la série, il reçoit les eaux du Gourg Nère Moyen dont l'émissaire débouche dans sa pointe NW. Quelques *Potamogeton* mêlés à du *Chara fragilis* parsèment le fond de sa cuvette au-delà de 1 mètre. La baisse de niveau consécutive à l'assèchement de son affluent permet le développement de quelques plaques de *Carex vulgaris* et de *Ranunculus aquatilis* dans les zones qui émergent en été.

1.5. — GOURG NÈRE INFÉRIEUR II (2 201 m; fig. 3).

Séparé du précédent par un mamelon recouvert de Fétuques diverses et de Rhododendrons, ce lac circulaire, de faible superficie (6 340 m²), atteint 4,60 mètres de profondeur. Son déversoir, situé dans la partie Sud, s'assèche début juillet à la fin de la fonte des neiges. On note le développement d'une Typhacée, *Sparganium affine*, dans une anse de la rive Sud et de *Potamogeton praelongus* entre 1 et 2 mètres de profondeur.

2. — Lacs du Vallon d'Estibère.

Séparé du Vallon de Port-Bielh par une ligne de crête Est-Ouest culminant au Pic Plat (2 559 m), le Vallon d'Estibère constitue la plus grande partie de la Réserve Naturelle du Néouvielle créée en 1935 sous l'impulsion du Professeur P. CHOUARD. Il se subdivise en trois petits vallons parallèles où se répartissent 5 lacs. Le lac de l'Île, profond de 1 mètre n'est en fait qu'une nappe d'eau renouvelée par l'émissaire du Lac Supérieur et à peu près entièrement envahie par la végétation.

2.1. — LAC SUPÉRIEUR (2 328 m; fig. 5).

Le plus élevé de la série, ce lac, allongé dans le sens NW-SE, occupe la partie supérieure du petit vallon médian. A ses deux extrémités, il est alimenté sans arrêt par des sources froides et, malgré une baisse de niveau de 20 à 30 centimètres, son déversoir ne s'assèche jamais. Dans sa partie occidentale un névé persiste jusqu'à la mi-juillet et les sources coulant parmi des coussinets d'Hynacées et des Saxifrages déposent dans l'anse NW un humus

FIG. 5. — Lac Supérieur et lac Long d'Estibère : morphométrie et végétation.

de teinte noirâtre. *Carex vulgaris* pousse dans les zones émergées en été et *Potamogeton praelongus* se développe entre 1,50 et 3 mètres essentiellement dans la moitié occidentale de la cuvette.

2.2. — LAC LONG^e (2 238 m; fig. 5).

Cette nappe d'eau de forme oblongue occupe la partie moyenne d'une étroite dépression ouverte au S-E. Sur le flanc Sud se déve-

6. Nommé lac de l'Ours sur la carte de l'I.G.N.

FIG. 6. — Lac d'Anglade et lac Inférieur d'Estibère : morphométrie et végétation.

loppe une végétation assez dense de *Pinus uncinata* et de Rhododendrons. Un ruisseau affluent, formé par la réunion des ruissellements de nombreuses sources, entraîne dans sa zone d'émergence un humus brun-noir sur lequel se développe *Sparganium affine* jusqu'à une profondeur de 1 mètre. Dans les zones émergées en été, on retrouve *Carex vulgaris* associé à quelques pieds de *Carex rostrata*. *Potamogeton praelongus* colonise la même zone qu'au Lac Supérieur. Sur la rive Nord, quelques plaques de *Sparganium* se développent à l'arrivée de sources froides où les eaux, circulant au milieu d'Hypnacées et de Saxifrages, déposent des lits de sable et une vase argileuse très fine de couleur gris-clair.

2.3. — LAC D'ANGLADE (2 185 m; fig. 6).

Dominé au Sud par le Pic d'Anglade (2 511 m) dont les versants escarpés sont recouverts d'éboulis, les parties Nord et Est de la dépression sont le domaine de la forêt de Pins abritant une lande de Rhododendrons. La périphérie de ce lac est presque entièrement envahie par des Sphaignes et des Hypnacées. Une ceinture de *Carex vulgaris* et de *C. rostrata* se développe lors de la baisse de niveau estivale évaluée entre 30 et 40 centimètres. En avant de cette ceinture, *Sparganium affine* et *Isoetes lacustris* poussent jusqu'à une profondeur de 1 mètre. Quelques touffes de *Potamogeton* sont apparues en 1956 dans la partie occidentale en face du ruisseau d'alimentation qui traverse une tourbière [ANGELIER 1961].

2.4. — LAC INFÉRIEUR (2 120 m; fig. 6).

Située dans la forêt de pins, la cuvette primitive a été comblée sur sa moitié occidentale par une tourbière à Sphaignes où circulent de nombreuses ramifications du déversoir du lac d'Anglade et les eaux de ruissellement du flanc Nord du Monpelat. Ces eaux vont en grande partie vers le lac actuel qui reçoit également un apport non négligeable de sources froides, circulant sous la tourbière, dans la rive Sud. D'une superficie de 2,5 hectares et d'une profondeur maximum de 5 mètres, ce lac constitue le réservoir le plus important du Vallon d'Estibère.

Sa végétation, l'évolution des ceintures végétales et le processus de formation de sa tourbière ont fait l'objet d'études approfondies [PRAT et CHOUARD 1928; CHOUARD et PRAT 1929; CHOUARD 1931; ANGELIER 1961].

Une bordure d'Hypnacées assure la transition entre l'eau du lac et le milieu acide de la tourbière à Sphaignes (fig. 7). Au-delà apparaissent successivement :

— *Carex vulgaris* dans les zones émergées en été,

— *Carex rostrata* associé à *Comarum palustre* (Rosacée) et à *Menyanthes trifoliata* (Gentianée) sur une bande uniforme large de 2 à 3 mètres,

— *Sparganium affine*, dont les fines lanières n'occupent que la partie occidentale sur une largeur de 1 mètre environ,

— *Potamogeton praelongus* et *Chara fragilis* enfin sur les fonds de 1 à 2,50 mètres.

FIG. 7. — Coupe schématique de la tourbière du lac Inférieur d'Estibère (modifié de CHOUARD 1933) : P : *Potamogeton praelongus*; S : *Sparganium affine*; C : *Comarum palustre*; M : *Menyanthes trifoliata*; Cr : *Carex rostrata*; H : bourrelet protecteur d'Hypnacées; Sp : butte de Sphaignes; Ts : tourbe jeune, spongieuse; Ti : tourbe tassée impénétrable; V : vase.

IV. — RÉGIME THERMIQUE

Les températures ont été mesurées régulièrement aux différentes profondeurs au moyen d'une sonde thermo-électrique YSI reliée par un câble à l'appareil de lecture Modèle 51. Des enregistrements en continu ont également été réalisés au moyen de thermographes RICHARD aux profondeurs de 0 et 3 mètres au lac de Port-Bielh, au Gourguet, au Gourg Nère Inférieur II ainsi qu'aux lacs Long et d'Anglade dans le Vallon d'Estibère.

LAC DE PORT-BIELH.

Les courbes de températures (fig. 8) montrent un réchauffement assez rapide des eaux de surface dès la fin du dégel : nous avons pu constater une hausse de 12°5 C du 29 juin au 11 juillet 1967. Les températures maximales de surface ne dépassent qu'exceptionnellement 14° C et la plus forte température enregistrée au cours des trois années de mesures a été de 15° C le 25 août 1966. L'amplitude journalière est de 0,5° C à 3 m et de 1° C en surface.

Le lac présente deux périodes d'isothermie : à la longue période de stagnation hivernale fait suite une première circulation très brève dès que les eaux de surface atteignent $3,9^{\circ}\text{C}$, température de la couche profonde en hiver. Une stratification thermique peu marquée apparaît au cours de l'été avec des températures dépassant 4°C à tous les niveaux. Elle est surtout nette vers la mi-juillet et s'atténue progressivement en août, période durant laquelle le faible gradient thermique ne permet pas de reconnaître un thermocline au sens de BIRGE [1891]. La profondeur relativement faible et le brassage quasi-permanent des eaux de surface par le vent, entraînent une homogénéisation de toute la masse dans la première quinzaine de septembre. Une longue période d'isothermie s'installe alors et se prolonge jusqu'au gel qui, suivant les années, peut survenir entre le 10 et le 30 novembre. Une mince couche de 1 cm de glace recouvrait les trois-quarts de la superficie du lac le 20 novembre 1968. Nous donnons figure 9 la représentation schématique de la couverture hivernale (glace + neige) au mois de novembre 1968 ainsi qu'en janvier, mars et avril 1969.

Les valeurs de la *stabilité thermique* calculées pour 1968 d'après la méthode de ECKEL (1950) atteignent leur maximum en juillet (106 g-cm.cm^{-2} le 11; 128 g-cm.cm^{-2} le 25) diminuent progressivement en août ($55,6\text{ g-cm.cm}^{-2}$ le 8; $48,1\text{ g-cm.cm}^{-2}$ le 24) et en septembre ($7,5\text{ g-cm.cm}^{-2}$ le 19).

Lac *dimictique*, le lac de Port-Bielh se caractérise donc par une très brève isothermie de printemps à laquelle succède une stagnation estivale d'une durée de 2 mois au maximum. Dès la fin août, les faibles valeurs de stabilité thermique indiquent qu'un refroidissement atmosphérique temporaire pourra entraîner une circulation des eaux. Ces conditions correspondent à la définition des lacs de type *subpolaire* donnée par YOSHIMURA [1936 in HUTCHINSON, p. 437].

Le *Budget calorifique annuel* (H) ba est la somme de l'*Apport estival de chaleur* (H) bs et de l'*Apport hivernal* (H) bw [HUTCHINSON 1959, p. 493]. L'*Apport estival* (H) bs ou quantité de chaleur nécessaire pour élever à tous les niveaux la température des eaux d'un lac de 4°C à la température la plus chaude de l'été [DUSSART 1966, p. 163] a été évaluée à partir des relevés thermiques et morphométriques à :

- $8\,842\text{ cal.cm}^{-2}$ en 1966;
- $8\,177\text{ cal.cm}^{-2}$ en 1967;
- $7\,186\text{ cal.cm}^{-2}$ en 1968.

Pour le calcul de l'*Apport hivernal de chaleur* ou quantité de chaleur nécessaire pour élever la température du minimum hivernal aux conditions de circulation liées à l'homothermie à 4°C [DUSSART 1966, p. 164] il faut également tenir compte de la chaleur

Fig. 8. — Courbes de températures du lac de Port-Bielh.

latente de fusion de la glace que l'on peut estimer à $1\,000\text{ cal.cm}^{-2}$ pour une épaisseur de glace de $14,3\text{ cm}$ [HUTCHINSON 1959, p. 495].

Ainsi l'apport nécessaire à la fusion de la couche de glace observée en avril 69, a été évaluée à $5\,600\text{ cal.cm}^{-2}$, celui nécessaire à la fusion de la neige à $3\,650\text{ cal.cm}^{-2}$ si on considère que la densité de la neige sèche est égale à $0,3$ et celle de la neige mouillée voisine de $0,5$. L'Apport hivernal 68-69 calculé d'après nos relevés du 11 avril s'élève à $10\,340\text{ cal.cm}^{-2}$.

Fig. 9. — Représentation schématique de la couverture hivernale du lac de Port-Bielh pendant l'hiver 68-69.

Le *Budget calorifique annuel* peut être estimé à $17\,500\text{ cal.cm}^{-2}$ pour 1968/69, dont l'*Apport estival* ne représente en moyenne que 43 %.

Calculées à l'aide des formules de GORHAM [1964] établies d'après les paramètres morphométriques de 71 lacs de la zone tempérée, les valeurs du budget annuel (H) ba sont de :

$15\,042\text{ cal.cm}^{-2}$ en fonction de la profondeur moyenne (Z) ;

$10\,290\text{ cal.cm}^{-2}$ en fonction de la superficie (A) ;

$8\,940\text{ cal.cm}^{-2}$ en fonction du volume (V).

Les valeurs trouvées pour le lac de Port-Bielh sont donc plus élevées que les valeurs moyennes des lacs de la zone tempérée, par suite de l'importance de la couverture hivernale.

AUTRES LACS.

Du fait de leur faible profondeur ($< 5\text{ m}$) le régime thermique des 8 lacs est sensiblement identique et plus étroitement lié aux conditions météorologiques. Après une période de 7 mois de gel, ces lacs dégèlent, suivant l'altitude, entre début juin (Lac Inférieur

FIG. 10. — Courbes des températures relevées de juin à octobre à -1 m dans les lacs de faible profondeur.

2 120 m et Lac d'Anglade 2 185 m) et fin juin (Lac Supérieur 2 328 m) au fur et à mesure du déneigement. Leurs eaux se réchauffent alors rapidement et atteignent fréquemment leurs températures maxima en juillet (*fig. 10*). Une période de mauvais temps, accompagnée d'un net refroidissement, observée fin août 1965, moins accusée en 1966 et plus précoce en 1967 se traduit par une chute sensible des températures, le plus souvent suivie d'une nouvelle hausse pendant les belles journées ensoleillées de septembre. Les premières gelées nocturnes du début de l'automne amènent une baisse progressive des températures jusqu'au gel complet qui survient au cours du mois de novembre. Au Gourg Nère Inférieur II, la couche de glace atteignait 10 cm le 13 novembre 1966 mais seulement 5 cm le 20 novembre 1968. Il existe le plus souvent une corrélation entre les maxima de l'été et l'altitude : les températures des lacs les plus bas (L. Inférieur, L. d'Anglade, G. Nère Inférieur II) restent en général supérieures à 15° C en juillet et août, celles des lacs les plus hauts n'atteignent qu'exceptionnellement cette température durant la même période.

Toutefois, outre l'altitude, plusieurs facteurs semblent intervenir pour modifier le régime thermique de ces pièces d'eau notamment leur situation topographique, leur orientation, le régime des vents, leur morphométrie et leur alimentation. Ainsi, en dépit d'une situation altitudinale plus faible, le Gourguet (2 219 m) se réchauffe plus lentement et sa température reste presque toujours inférieure à celle du Lac Supérieur (2 328 m), d'un volume deux fois moindre. Le Gourg Nère Moyen (2 211 m) alimenté tout l'été par les eaux froides du Gourg Nère Supérieur (2 249 m) a des températures de deux à trois degrés inférieures à celles du Gourg Nère Inférieur II (2 201 m) dont la cuvette, d'un volume équivalent, est alimentée seulement par les précipitations atmosphériques. Sous l'action des vents, les eaux sont perpétuellement brassées et les différences de températures entre la surface et la zone profonde ne dépassent que rarement 1° C : ces lacs peuvent donc être considérés comme homothermes.

Le Lac Inférieur d'Estibère présente d'importantes variations thermiques suivant la profondeur (*fig. 17*). Son alimentation permanente par des sources froides, circulant en grande partie sous la tourbière, maintient tout l'été la zone de 4 à 5 mètres à une température de 6° C. En juillet et août l'écart moyen des températures entre la surface et le fond est de 9° C et ainsi, malgré sa faible profondeur, le Lac Inférieur présente tous les caractères d'un lac *dimictique* : après une brève période d'isothermie au dégel, s'installe une plus longue période de stratification estivale à laquelle fait suite en octobre une nouvelle période d'isothermie à 6° C. Nous verrons plus loin qu'à cette stratification thermique se juxtapose une stratification chimique.

V. — PROPRIÉTÉS OPTIQUES

Le fond des 8 lacs dont la profondeur n'excède pas 5 mètres est toujours visible excepté après de violents orages qui peuvent momentanément troubler la transparence de l'eau et lui conférer une couleur blanc laiteux.

La transparence du Lac de Port-Bielh a été évaluée à différentes périodes de l'été à l'aide d'un disque de SECCHI blanc de 30 centimètres de diamètre dont nous notions la limite de visibilité.

Avec des valeurs extrêmes de 9,50 m le 26 juillet 1967 et de 16,50 m le 19 septembre 1968, la transparence moyenne a été évaluée à 13,50 m pour les trois années d'observations, valeur tout à fait comparable à la moyenne des transparences de 13 lacs profonds des Pyrénées calculée d'après les données de NUSSBAUM [1934]. La transparence est en relation étroite avec le développement du phytoplancton et sa plus grande abondance en juillet correspond aux plus faibles valeurs observées. De plus, nous avons noté une transparence moyenne plus faible au cours de l'été 1967 (12,50 m) que pendant la période correspondante des années 1966 (14 m) et 1968 (13,80 m). Ces différences sont le reflet des variations annuelles que nous avons pu constater entre les trois années dans la quantité de phytoplancton qui se développe dans le lac.

Pour des transparences comprises entre 0,75 et 21 mètres, il existe d'après JONES et WILLS [1956] une corrélation entre le coefficient d'extinction η de l'eau et la profondeur Z de transparence :

$$\eta = \frac{2,06 \pm 0,035}{Z^{(1,04 \pm 0,02)}}$$

On peut ainsi évaluer à 87 % en moyenne la transmission caractéristique des eaux du lac de Port-Bielh.

VI. — ALCALINITÉ — DURETÉ — CONDUCTIVITÉ

1. — Méthodes.

L'alcalinité a été mesurée en titrant avec une solution d'acide sulfurique N/50 des échantillons de 100 ou 200 ml d'eau. Pour des alcalinités inférieures à 50 ppm, il est recommandé de ramener le pH de l'eau à la valeur de 5,1 [Standard Methods 1950]. Nous avons utilisé comme indicateur un mélange de Vert de Bromocresol et de Rouge de Méthyle dont le virage a pu être apprécié par comparaison avec une solution tampon de pH 5,1 colorée par 5 gouttes de cet indicateur.

Les ions Ca^{++} et Mg^{++} sont les causes principales de la *dureté* de l'eau; leur concentration exprimée en ppm de $\text{CO}_3 \text{ Ca}$ correspond à la dureté totale. (On sait que 10 ppm de $\text{CO}_3 \text{ Ca/l} = 1$ degré hydrotimétrique ou degré français = 0,2 mé de calcium par litre). Elle a été dosée par complexométrie avec du Complexon III [sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique] en utilisant un indicateur à base de Calmagite [acide 1-(1 hydroxy-4 méthyl-2 phenylazo) 2 naphthol — 4 sulfonique] — produit HACH Chemical Company — plus stable que le noir d'Eriochrome T. Pour le dosage de l'ion Ca^{++} l'indicateur est le purpurate d'ammonium ou murexide. La teneur en magnésium s'obtient par différence entre la dureté totale et la dureté calcique.

La *conductivité* a été mesurée à 18° C au moyen d'un conductivimètre TACUSSEL type C D6. Elle est exprimée en micromhos/cm/cm² [mho/cm/cm²] (microsiemens des auteurs allemands).

2. — Résultats.

LAC DE PORT-BIELH.

La conductivité électrique du lac de Port-Bielh est de 23 mhos/cm/cm² pendant l'été à toutes les profondeurs : ses eaux sont donc faiblement minéralisées. La minéralisation globale, calculée d'après la formule de DOROSCHEWSKI [RODIER 1966, p. 47] peut-être évaluée approximativement à 16 mg/litre. Les courbes d'hiver (fig. 11), par contre, font apparaître une augmentation de la conductivité qui est de l'ordre de 30 à 57 mhos au-delà de 15 m le 7 mars 1969.

FIG. 11. — Conductivité (K_{18}), alcalinité (Alc) et dureté ($\text{Ca} + \text{Mg}$) dans le lac de Port-Bielh en été et en hiver.

L'alcalinité moyenne de l'été est de 0,22 me/l (fig. 11). Elle croît fortement en hiver (0,30 me/l à 15 m; 0,51 me/l à 18 m le 7 mars 1969) parallèlement avec l'augmentation de la conductivité. La concentration des ions Ca^{++} et Mg^{++} (fig. 12) suit une évolution analogue et leur somme reste toujours égale ou très légèrement supérieure aux valeurs de l'alcalinité. La dureté totale représente la dureté carbonatée et varie dans les mêmes limites (0,20 à 0,26 me/l en été; 0,30 à 0,50 me/l en hiver) : la dureté permanente est donc pratiquement nulle. La teneur en SO_4 est faible, de l'ordre de 0,04 me/l.

RUTTNER [1952] et CZENSNY [1961] donnent la conductivité électrique de solutions de bicarbonates de calcium pour des concentrations variant entre 1 et 5 me/litre. Une courbe tracée d'après les valeurs de CZENSNY permet, par comparaison avec la conductivité totale, d'évaluer la proportion des carbonates par rapport aux sels totaux.

Le rapport : $\frac{\text{conductivité des carbonates}}{\text{conductivité totale}}$ varie entre 0,73 et 0,93,

les carbonates représentant en moyenne 83 % des sels dissous. OHLE [1940] donne des pourcentages du même ordre (85 %) pour plusieurs lacs de Laponie suédoise. Calculés pour 6 lacs du Massif de Néouvielle d'après les chiffres de DUSSART [1952 a] ces rapports sont de :

- 0,77 pour le lac d'Aubert (2 148 m);
- 0,73 pour le lac d'Aumar (2 192 m);
- 0,75 pour le lac Dets Coubous (2 026 m);
- 0,73 pour le lac Blanc Dets Coubous (2 177 m);
- 0,82 pour le lac Tracens (2 188 m);
- 0,83 pour le lac Espagnol (2 230 m).

Ces pourcentages de carbonates sont cependant élevés comparés à ceux que trouve PECHLANER [1960] pour trois lacs du Massif du Kühtai :

- 13 à 23 % pour le Hinterer Fintertaler See (2 256 m);
- 16 à 39 % pour le Vorderer Finterlater See (2 237 m);
- 28 à 58 % pour le Grossenköllen See (2 413 m).

Ce même auteur évalue ce rapport à 40 % dans les lacs d'altitude du Colorado d'après les résultats de PENNAK [1955].

L'hiver, l'alcalinité augmente sensiblement à partir de 15 m et atteint 25,5 mg/l le 7 mars 1969 à 18 m. Les teneurs en calcium varient pendant l'été de 3,5 à 4,4 mg/l mais peuvent atteindre pendant l'hiver jusqu'à 7,6 mg/l dans le fond. L'augmentation de l'alcalinité est donc liée à l'augmentation en ions Ca^{++} dont la solubilité s'accroît par suite de l'accumulation de CO_2 agressif.

TABLEAU I. — Paramètres morphométriques des 9 lacs étudiés.

	Lacs du Vallon de Port-Bielh					Lacs du Vallon d'Estibère			
	Lac de Port-Bielh	Gourguet	Gourg Nère Moyen	Gourg Nère Inf. I	Gourg Nère Inf. II	Lac Sup.	L. Long	Lac d'An-glade	Lac Inf.
Altitude (h) (m)	2285	2219	2211	2198	2201	2325	2238	2175	2100
Superficie (A) (m ²)	165 425	25 895	6 830	4 100	6 340	19 470	20 110	11 285	24 600
Volume (V) (m ³)	1 478 620	57 060	12 450	5 200	14 320	32 400	32 325	17 147	55 330
Longueur (L) (m)	705	275	160	110	126	285	343	177	228
Largeur (bx) (m)	325	144	52	50	94	105	85	98	169
Largeur moyenne (b)	235	94	43	37	50	68	59	64	108
Profondeur (Z _m) (m)	19	5	3,6	2,6	4,6	3,8	3,3	3,2	5
Profondeur moyenne (Z)	9	2,2	1,2	1,25	2,25	1,65	1,60	1,50	2,25
Périmètre (L) (m)	2090	730	390	290	365	725	790	550	680
Développement de la ligne de côte (DL)	1,449	1,280	1,331	1,277	1,294	1,464	1,573	1,458	1,223
Z/Z _m	0,473	0,440	0,333	0,480	0,489	0,434	0,484	0,468	0,450

Cependant, les dosages de l'oxygène révèlent des teneurs extrêmement faibles (0,40 mg/l à 19 m le 7 mars 1969). On sait que dans ces conditions pratiquement anaérobies ($< 0,5$ mg/l) et pour des $\text{pH} < 7,5$ le CO_2 peut se combiner avec le fer ferreux pour former des bicarbonates ferreux [EINSELE 1940]. Lorsque l'eau est re-oxygénée ces bicarbonates s'oxydent en hydroxyde ferrique insoluble formant une solution colloïdale qui peut donner aux eaux une coloration rougeâtre plus ou moins intense [FEUILLADE 1966]. Ainsi nous avons constaté que l'eau de 19 m prenait une coloration rouge orangée quelques heures après son prélèvement. Un dosage du fer de cette eau effectué sur le terrain le 17 avril 69 a révélé des teneurs de 1,5 mg/l.

Les teneurs en magnésium varient de 0,25 à 0,75 mg/l et sont en moyenne de 0,48 mg/l.

Le rapport $\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}$ est compris entre 0,07 et 0,17 et sa valeur moyenne est de 0,12.

AUTRES LACS.

La minéralisation globale des 8 autres lacs, calculée d'après les mesures de conductivité électrique, est en général plus élevée que celle des eaux du Port-Bielh et varie entre 20 et 35 mg/l selon les lacs et les dates de mesure. La conductivité est de 50 à 100 % plus élevée à la fin septembre qu'en juillet (TABLEAU II), les valeurs les plus faibles se situant au dégel lorsque les cuvettes sont encore alimentées par les eaux de fonte des neiges.

Nous avons pu constater une évolution parallèle de l'alcalinité de juin à octobre (fig. 12). Elle n'excède jamais 0,34 me/l pour les

FIG. 12. — Évolution de l'alcalinité de juin à octobre dans 7 lacs de faible profondeur.

lacs d'Anglade (0,14-0,27 me/l), Supérieur d'Estibère (0,15-0,34 me/l) et le Gourguet (0,20-0,34 me/l). Elle est plus élevée pour les Gourgs Nères, Moyen et Inférieur I ainsi que pour les lacs Long et Inférieur d'Estibère (0,22-0,53 me/l), le Gourg Nère Inférieur II restant toujours le plus alcalin (0,34-0,62 me/l).

La dureté totale subit également une hausse pendant l'été et reste toujours très légèrement supérieure à l'alcalinité. Les sulfates sont présents à des teneurs moyennes de 0,05-0,06 me/l.

Nous n'avons pas remarqué des différences notables dans l'alcalinité des diverses profondeurs de ces lacs si ce n'est au lac Inférieur d'Estibère. Une analyse du 20 juillet 1967 y a révélé par exemple une alcalinité de 0,34 me/l à 0 m et de 0,56 me/l à 4 m, écart pouvant s'expliquer, en partie, par l'apport des sources plus minéralisées circulant sous la tourbière.

TABLEAU II. — Conductivité électrique (mho/cm/cm² à 18° C) à trois époques de l'été 1967 dans les lacs de faible profondeur.

	5-11 Juillet	7-20 Août	20-30 Sept.
Lac Supérieur	14,6	23,8	29,2
Lac Long	23,7	39,6	46,9
Gourguet	29,4	30,3	43,9
Gourg Nère Moyen	23,8	39,6	46,5
Gourg Nère Inf. I	28,6	40,5	53,6
Gourg Nère Inf. II	52,6	53,2	54,9
Lac d'Anglade	16,8	22,3	28,8
Lac Inférieur	28,2	39,5	45,4

Les variations saisonnières peuvent être mises en relation avec le régime hydrique de ces lacs : les eaux de fonte de neige peu minéralisées renouvellent la masse d'eau de ces cuvettes d'un volume relativement faible (< 60 000 m³). L'alcalinité tendra ensuite à augmenter d'autant plus que l'alimentation sera faible et l'évaporation intense. Ainsi, le Gourg Nère Inférieur II atteint-il très tôt de fortes alcalinités par suite de son isolement précoce de tout apport autre que celui dû aux précipitations. Les Gourgs Nères Moyen et Inférieur I présentent de faibles teneurs en carbonates (0,25-0,30 me/l) tant qu'ils sont alimentés par les eaux du Gourg Nère Supérieur (0,22 me/l); à la diminution du débit des déversoirs correspond une augmentation sensible de l'alcalinité.

Le rapport $\frac{\text{Conductivité des carbonates}}{\text{Conductivité totale}}$ varie généralement entre 0,80 et 0,90 mais il est plus faible (0,65-0,75) pour le Gourguet.

Nous donnons dans le tableau II les valeurs extrêmes des teneurs

en ions Ca^{++} et Mg^{++} , ainsi que les valeurs moyennes du rapport $\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}$. On remarque que dans les lacs les plus pauvres en calcium, le rapport $\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}$ est légèrement plus élevé que dans les lacs plus riches en cet élément ce qui est en accord avec les observations de BIRGE, JUDAY et MELLOCHE [1938].

TABLEAU III. — Teneurs en Ca^{++} et Mg^{++} et valeur moyenne du rapport $\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}$ durant la saison chaude dans les lacs de faible profondeur.

	mg/l Mg^{++}	mg/l Ca^{++}	$\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}$
Lac Supérieur	0,35 — 0,8	1,2 — 5,4	0,18
Lac Long	0,5 — 0,7	4 — 8,2	0,10
Gourguet	0,25 — 0,95	2,2 — 6	0,14
Gourg Nère Moyen	0,35 — 0,95	2,8 — 8,8	0,11
Gourg Nère Inf. I	0,4 — 1,0	3,4 — 8,8	0,12
Gourg Nère Inf. II	0,3 — 1,2	5,4 — 10,5	0,09
Lac d'Anglade	0,5 — 0,85	2,4 — 4,4	0,19
Lac Inférieur	0,25 — 1,1	5 — 9,2	0,10

VII. — pH

1. — Méthodes.

Les méthodes colorimétriques ne sont pas utilisables sur les milieux étudiés car l'addition de quelques gouttes d'indicateur à un petit volume d'eau faiblement tamponnée en modifie le pH. Ainsi, les mesures électrométriques ont donné des résultats supérieurs de 0,5 à 0,9 unités pH à ceux obtenus par colorimétrie avec addition de Bleu de bromothymol et lecture au comparateur HACH. C'est pourquoi nous avons effectué nos mesures avec des pH-mètres à électrodes de verre (pH-mètres à piles TACUSSEL type 5 et PHOTO-VOLT 126 A).

Les pH de saturation (pHs) ont été calculés à l'aide du nomogramme de HOOVER établi à partir de la formule de LANGEIER [RODIER, 1966]. Ces valeurs permettent de déterminer l'indice d'agressivité de l'eau : $i = \text{pH} - \text{pHs}$. Cette agressivité dépend à la fois du pH et des teneurs en CO_2 et calcium dissous. Le pHs correspond à un équilibre de saturation de l'eau en CO_3Ca puisque le pH dépend du rapport $\frac{\text{CO}_2 \text{ des bicarbonates}}{\text{CO}_2 \text{ libre}}$ [RODIER, 1966].

Lorsque $i < 0$ l'eau est sous-saturée en CO_3Ca donc agressive.

FIG. 13. — pH : évolution annuelle dans le lac de Port-Bielh; évolution comparée à 0 m et à 13 m de juin à octobre.

2. — Résultats.

LAC DE PORT-BIELH.

Les eaux du lac de Port-Bielh ont, au dégel, un pH voisin de la neutralité. Au cours de l'été on assiste à une alcalinisation progressive surtout prononcée entre 10 et 15 m de profondeur (*fig. 13*) où les pH peuvent atteindre jusqu'à 9,5 au mois d'août. La figure 13 représente l'évolution verticale des pH de juin à octobre 1967 et 1968 ainsi que sous la glace en janvier et avril 1969. Au début de l'été, ces valeurs (7,1-7,6) sont pratiquement identiques de la surface jusqu'au fond. En août, l'alcalinisation très nette au-delà de 5 à 8 m, se traduit par des valeurs dépassant de 2 unités pH celles de juin alors que le pH des eaux de surface n'atteint qu'exceptionnellement 8,5 ; nous avons pu noter à cette époque plus d'une unité de différence entre le pH de la zone supérieure et celui de la zone profonde. L'isothermie de septembre amène l'égalisation des pH dans toute la colonne d'eau. En hiver, les pH légèrement plus élevés de 0,1 unités à 0,2 unités dans les dix premiers mètres, diminuent progressivement pour atteindre en avril et juin des valeurs proches de la neutralité (7,15-7,25).

Ces variations reflètent l'activité photosynthétique du phytoplancton et présentent une corrélation très étroite avec celles de la production primaire dont les valeurs maximales sont atteintes au mois d'août en profondeur. L'absorption du CO_2 par photosynthèse entraîne une modification de la teneur en ions H^+ , par dissociation de l'acide carbonique, et OH^- provenant de l'hydrolyse des carbonates acides; la conséquence est une augmentation du pH d'autant plus importante que la réserve alcaline est plus faible.

Les pH de saturation varient entre 9,8 et 10 pendant l'été, entre 9,45 et 10,45 pendant l'hiver. Du fait de leur faible teneur en ion Ca^{++} les eaux du Port-Bielh restent donc toujours agressives.

AUTRES LACS.

Nous récapitulons dans le tableau IV les amplitudes et les valeurs moyennes des pH mesurés de juin à octobre 1966 et 1967 ainsi que les amplitudes des pH de saturation.

A l'exception du Gourg Nère Inférieur II, au pH légèrement plus alcalin, les valeurs moyennes sont comprises pour les 7 autres lacs entre 7,7 et 8,2. Comme au lac de Port-Bielh, le pH augmente progressivement au mois de juillet pour atteindre ses valeurs maxima en août et diminuer ensuite durant l'automne. Une mesure effectuée le 3 mars 1969 au Gourg Nère Inférieur II sous un mètre de glace nous a permis de constater des pH plus faibles qu'en été : 7,35 immédiatement sous la glace et 7,15 à 4 m de profondeur. Le plus souvent identiques, les pH de surface et du fond ne diffèrent

jamais plus de 0,2 unités. Cependant, nous avons pu noter des différences plus importantes au Lac Inférieur d'Estibère.

	10 août 1967	30 août 1967	19 septembre 1967
0 m	8,2	8	8,1
4 m	8,9	8,7	8,15

Les pH de saturation sont toujours supérieurs aux pH mesurés ce qui indique une sous-saturation en CO_2Ca . Au Gourg Nère Inférieur II les pH maxima du mois d'août (9,1), atteignent les valeurs du pHs.

TABLEAU IV. — Amplitude et valeurs moyennes des pH mesurés de juin à octobre 1966 et 1967; valeur du pH de saturation (pHs) évalué d'après le nomogramme de Hoover-Langelier.

	pH 1966		pH 1967		pHs
	amplitude	moyenne	amplitude	moyenne	amplitude
Lac Supérieur	7,2 — 8	7,7	7,3 — 8,1	7,8	9,55 — 10,25
Lac Long	7,7 — 8,2	7,9	7,9 — 8,6	8,3	9,25 — 9,85
Gourguet	7,7 — 8,4	7,9	7,7 — 8,5	8	9,55 — 10,95
Gourg Nère Moyen	7,7 — 8,4	8	7,7 — 8,5	8,2	9,15 — 9,75
Gourg Nère Inf. I	7,7 — 8,4	8,1	7,8 — 8,5	8,1	9,15 — 9,75
Gourg Nère Inf. II	8,1 — 9,15	8,5	8,2 — 9,1	8,7	9,05 — 9,15
Lac d'Anglade	7,5 — 8	7,7	7,7 — 8	7,8	9,65 — 10,25
Lac Inférieur	7,7 — 8,3	8	7,8 — 8,2	8	9,05 — 9,65

VIII. — GAZ CARBONIQUE

1. — Méthodes.

Les équations d'équilibre chimique du système CO_2 -bicarbonates-carbonates [HUTCHINSON 1957, p. 654 et suivantes; BUCH 1960] et l'utilisation des tables de SARUHASHI [1953] permettent d'évaluer la quantité de CO_2 total d'une eau dont on connaît l'alcalinité, le pH et la température. Un tableau établi par SAUNDERS, TRAMA et BACHMANN [1962] permet d'obtenir directement, pour un pH et une température donnés, le facteur de conversion de l'alcalinité totale exprimée en ppm de CO_2Ca en milligrammes de carbone/litre.

Des erreurs dans l'évaluation du pH et de l'alcalinité peuvent entraîner une erreur dans l'expression du résultat final. Aussi avons-nous procédé à plusieurs reprises à des analyses directes de CO_2 total par la méthode de VAN SLYKE [RODIER, 1966 modifié BROUARDEL et RINCK comm. verb.] Sur 40 mesures effectuées l'écart moyen entre les valeurs obtenues par analyse et les valeurs calculées est de 6 %, les dosages avec l'appareil de VAN SLYKE nous

FIG. 14. — Le CO₂ total dans le lac de Port-Bielh : en blanc, CO₂ des bicarbonates; en noir, CO₂ libre.

donnant généralement des résultats plus élevés. Notons cependant qu'ils n'ont pu être effectués qu'au retour au laboratoire environ 24 heures après les prélèvements des échantillons d'eau.

2. — Résultats.

LAC DE PORT-BIELH.

Les variations annuelles du CO_2 total sont représentées sur la figure 14 pour cinq profondeurs (0, 5, 10, 15, 18 mètres) du lac. Une hausse de la quantité de CO_2 , liée à la diminution du pH et à l'augmentation de l'alcalinité s'observe durant l'hiver. Elle est particulièrement nette en profondeur (26 mg/l le 7 mars 1969 à 18 m) et s'accompagne d'une réduction notable de la quantité d'oxygène dissous (0,4 mg/l à 18 m à la même date). Au dégel, l'augmentation du pH traduit une baisse de la quantité de CO_2 due à la reprise de la photosynthèse. Les teneurs les plus faibles du mois d'août (8,9 mg/l par exemple le 21-8-68 à 15 m) correspondent à des sursaturations en oxygène.

Le CO_2 libre (CO_2 équilibrant et CO_2 agressif) représente en hiver 13 à 21 % du CO_2 total. De 2 à 4,5 mg/l sous la glace ces valeurs deviennent pratiquement nulles pendant l'été soit 0,01 à 0,05 mg/l; dans la zone 10-15 m on peut alors évaluer la part prise par le CO_3 entre 0,5 et 0,75 mg/l.

AUTRES LACS.

Dans les 8 autres lacs, le CO_2 total, presque entièrement sous forme de bicarbonates présente sa valeur minima au dégel et augmente progressivement au cours de l'été. Il n'y a pas de différences entre la surface et la profondeur excepté au lac Inférieur d'Estibère où le 20 juillet 1967 par exemple, la quantité de CO_2 total était 40 % plus forte à 4 m qu'en surface.

Les quantités de CO_2 libre sont faibles et comprises entre 0,15 et 1,05 mg/l pendant l'été. Une mesure du 7 mars 1969 au Gourg Nère Inférieur II révèle de fortes teneurs en CO_2 total (30,8 mg/l à 0 m; 35 mg/l à 4 m), et une augmentation du CO_2 libre (4,6 à 0 m; 7,4 à 4 m) qui se traduit par une baisse du pH par suite de la faible disponibilité en calcium.

IX. — OXYGÈNE

1. — Méthodes.

En même temps que les mesures de température, l'oxygène dissous a été mesuré à l'aide de l'appareil YSI modèle 51. Composé d'une sonde polarographique de CLARK reliée par un câble à l'appa-

reil de lecture directement gradué en ppm, il permet d'obtenir des mesures *in situ*. La précision de l'appareil a été vérifiée à diverses reprises par des dosages effectués selon la méthode chimique classique de WINKLER. Les résultats, obtenus en mg/l, ont été convertis en pourcentage des valeurs de saturation au moyen du nomogramme de MORTIMER [1956].

2. — Résultats.

LAC DE PORT-BIELH.

Pendant la belle saison les eaux du lac de Port-Bielh sont presque toujours saturées ou sursaturées en oxygène (*fig. 15*). La distribution verticale de l'oxygène dissous, de juin 1968 à avril 1969 est représentée par les graphiques de la figure 15. Une évolution comparable a pu être observée au cours des étés 1966 et 1967. Après la circulation de printemps, l'eau reste sous-saturée en O_2 durant la première moitié de juillet avec 7,1 mg/l à 5 m et 5,5 mg/l à 16 m soit 58 % à 75 % des teneurs de saturation. La lenteur du processus d'oxygénation par diffusion et l'activité photosynthétique relativement faible à basse température ne parviennent pas à combler, pendant la brève isothermie de printemps, le déficit consécutif à la longue période de stagnation hivernale. Selon les années, l'oxygénation peut-être plus ou moins précoce : nous avons noté par exemple des teneurs de 5,7 à 7,1 mg/l le 12 juillet 1966 soit 80 à 85 % de saturation et de 8,6 à 9,5 mg/l le 11 juillet 1967 soit 93 à 104 % de saturation. En 1967, malgré une période de circulation vernalle plus brève, consécutive à un dégel moins précoce et à un réchauffement plus rapide, les quantités d'oxygène sont donc nettement plus importantes : elles sont en rapport avec un développement plus intense du phytoplancton dont la biomasse a été deux fois plus élevée le 11 juillet 1967 que l'année précédente à la même date. Les taux d'oxygène les plus élevés (0,45 à 10,75 mg/l soit 120 à 130 % des teneurs à la saturation) observés fin juillet - fin août au-delà de 10 mètres reflètent l'intense photosynthèse du phytoplancton et des *Nitella*. A la même époque, la teneur en CO_2 atteint ses valeurs minima ce qui se traduit par une hausse importante du pH. Durant l'isothermie d'automne les différences entre la surface et les couches profondes s'atténuent, la circulation amenant un équilibre dans toute la colonne d'eau avec des valeurs proches de la saturation.

Les courbes d'hiver révèlent un déficit important en profondeur où nous avons relevé des quantités d' O_2 très faibles (1,5 mg/l le 30 janvier et 0,3 mg/l le 17 avril 1969 à 19 m) et, corrélativement, une augmentation notable du CO_2 total ainsi qu'une baisse du pH. Dans les cinq premiers mètres, les teneurs toujours élevées (10 à

FIG. 15. — Evolution de la teneur en oxygène dissous des eaux du lac de Port-Bielh. T° : température (tirets); O_2 : oxygène (traits pleins); 100 % : teneur à la saturation en mg/l (pointillés); sursaturations (hachuré).

11,2 mg/l soit 102 à 114 % des valeurs de saturation) doivent être interprétées comme résultant à la fois de phénomènes biologiques et de phénomènes physiques liés à la formation de la glace.

Les mesures du 17 avril 1969 révèlent d'autre part que la distribution de l'oxygène varie suivant les stations. Ainsi, le déficit en O_2 est sensiblement plus fort dans la périphérie du lac que dans la zone la plus profonde (fig. 16). Ces variations dans la distribution de l'oxygène peuvent, selon HUTCHINSON [1959, p. 631], être la conséquence de courants de densité provoqués par la pénétration du rayonnement solaire sous la glace ou par la chaleur accumulée dans la vase pendant l'été. Lorsque ces courants circulent dans la vase ils peuvent, à son contact, entraîner une perte en oxygène et par suite une diminution de la quantité d' O_2 dissous dans la zone périphérique.

FIG. 16. — Température et oxygène du lac de Port-Bielh le 17 avril 1969 :
 T° : température (tirets); 100 % : teneur à la saturation en mg/l (pointillés).
 A. : O_2 en mg/l mesuré au-dessus de la fosse de 19 m.
 B. : O_2 en mg/l mesuré au-dessus de la zone de 13 m dans la partie orientale du lac.

La différence entre les valeurs mesurées à toutes les profondeurs et les teneurs à la saturation mesure le *déficit actuel* [ALSTERBERG 1929]. Si l'on tient compte du fait que, sous la glace, les températures sont très voisines de 4° C de 3 m à 19 m l'évaluation du *déficit actuel* donne une bonne approximation du *déficit absolu* [ALSTERBERG, 1929] qui se rapporte à une eau à 4° C saturée (constante primaire). Une mesure effectuée le 6 novembre 1966 ($T^\circ = 6^\circ C$ de 0 à 18 m; $O_2 = 98$ à 100 % des valeurs à la saturation) permet

de supposer que lorsque le lac atteint 4° C à la fin de l'automne, la quantité d'oxygène dissous est toujours proche de la saturation. Le *déficit absolu* par rapport à la constante primaire (9,52 pour une altitude de 2 285 m) est donc sensiblement identique au *déficit absolu* sensu STRØM [1931] également nommé *déficit relatif* par HUTCHINSON [1957, p. 639] et DUSSART [1966, p. 216]. Pendant l'hiver 1969, le déficit actuel a été évalué à 0,56 g/m² le 30 janvier, à 6,98 g/m² le 7 mars (déficit absolu de 6,44 g/m²) et à 13,45 g/m² le 17 avril (déficit absolu de 10,95 g/m²). Après la brève période de circulation vernale qui succède au dégel et malgré une importante alimentation par les eaux de fonte des neiges, le déficit actuel était toujours élevé le 28 juin 1968 avec 18,8 g/m² et atteignait encore 2,8 g/m² le 11 juillet suivant.

AUTRES LACS.

Dans les autres lacs il n'y a pas de différence notable, au moins pendant la période estivale, entre les quantités d'oxygène dissous des eaux de surface et de la zone profonde excepté dans celles du lac Inférieur d'Estibère. Les résultats des amplitudes des pourcentages de saturation calculés d'après des mesures effectuées pendant l'été des années 1966 à 1968 sont résumés dans le tableau V. Les concentrations en O₂ sont rarement inférieures à 75 % et exceptionnellement supérieures à 100 % des teneurs à la saturation. Il n'apparaît pas d'évolution nette au cours de l'été et la quantité d'oxygène contenue dans l'eau de ces lacs de faible volume, sans cesse brassée par les vents, oscille autour des teneurs à la saturation. Dans les zones littorales riches en végétation des lacs d'Anglade, Inférieur et Long, les teneurs en O₂ atteignent généralement 110 à 120 %. Une mesure effectuée au Gourg Nère Inférieur II le 7 mars 1969 révèle immédiatement sous la glace des teneurs de l'ordre de 90 % et seulement de 61 % dans le fond. Ces fortes quantités d'O₂ au contact de la glace doivent s'expliquer, comme pour le lac de Port-Bielh, par les phénomènes physiques consécutifs à la formation de la glace. Par suite de la faible profondeur du lac, ils atteignent ici les couches les plus profondes, ce qui explique les quantités d'O₂ encore élevées rencontrées au niveau de la vase.

Dans le lac Inférieur, la distribution verticale de l'oxygène n'est pas homogène (fig. 17). La courbe de 0 à 2 m présente des saturations variant pendant l'été entre 86 et 102 %. Dans la couche la plus profonde, la quantité d'oxygène dissous s'accroît et atteint des sursaturations de 102 % à 127 %. Ces sursaturations s'accompagnent d'une diminution de la quantité de CO₂ libre comme l'indiquent les valeurs du pH en profondeur. Les teneurs en CO₂ total y sont cependant plus élevées qu'en surface.

TABLEAU V. — Oxygène dissous (en % de saturation) en surface et au fond des 7 lacs de faible profondeur.

	amplitude des % de saturation		moyenne des % de saturation
Lac Supérieur	0 m	85 — 112	101,5
	3,8 m	83,5 — 108	98,9
Lac Long	0 m	84 — 107	97,4
	3,3 m	85 — 104	97,8
Gourguet	0 m	93 — 106	99,9
	5 m	88,5 — 109	99,1
Gourg Nère Moyen	0 m	75 — 107	98,3
	3,6 m	75 — 106	97,5
Gourg Nère Inf. I	0 m	74 — 109	95,8
	2,6 m	72 — 106	93,4
Gourg Nère Inf. II	0 m	88 — 125	102
	4,6 m	88 — 124	100
Lac d'Anglade	0 m	73 — 100,5	90,7
	3,2 m	75,5 — 99,6	90,3

FIG. 17. — Température et oxygène du lac Inférieur d'Estibère pendant l'été 1968.

X. — NITRATES — SILICE — PHOSPHATES

1. — Méthodes.

1.1. — NITRATES.

L'azote des nitrates et des nitrites a été dosé par la méthode de réduction au cadmium avec de l'alpha naphtylamine et de l'acide sulfanilique comme réactifs (produits HACH) donnant une colora-

tion rouge mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 485 m μ .

1.2. — SILICE.

En présence de molybdate d'ammonium, l'anhydride silicique forme en milieu acide une coloration jaune due à l'acide silicomolybdique. L'addition d'acide oxalique détruit la part de la coloration due aux phosphates, la réduction par de l'acide aminonaphtol-sulfonique développe une coloration bleue dont l'intensité est mesurée au spectrophotomètre.

1.3. — PHOSPHATES.

Une méthode idéale pour la détermination des orthophosphates dans l'eau devrait être extrêmement sensible, précise ($\pm 0,01 \mu\text{g/l}$), spécifique aux orthophosphates, suivre la loi de BEER et être indépendante de la température et des sels dissous [OLSEN 1966]. Si on se limite aux dix dernières années on peut trouver dans la littérature limnologique près d'une centaine de variantes des différentes méthodes de dosage. Presque toutes ces méthodes, cependant, sont basées sur la détermination photométrique de la couleur bleue développée lors de la réduction d'un complexe phosphomolybdique formé en milieu acide [DENIGES 1920]. La sensibilité de la méthode est souvent accrue en extrayant la couleur bleue par un solvant. Malheureusement il n'y a, à notre connaissance, aucune méthode comparative des différentes variantes proposées qui permettent de connaître les conditions optimales pour le dosage des phosphates en eau douce.

Nous avons effectué les dosages au laboratoire 24 à 48 heures après les prélèvements d'échantillons. Le chlorure stanneux utilisé comme agent réducteur diminue les risques d'hydrolyse des composés phosphorés organique solubles [STRICKLAND et PARSONS 1960]. L'extraction de la coloration a été faite par de l'isobutanol après réduction [RODIER 1968] et la lecture effectuée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 690 m μ .

2. — Résultats

Dans tous les lacs étudiés les teneurs de ces trois éléments sont faibles et ne subissent pas d'importantes variations pendant l'été. Les résultats des dosages effectués essentiellement durant les mois de juin à octobre 1966-67-68 sont récapitulés dans le tableau VI.

TABLEAUX VI. — Azote des nitrates ($\mu\text{g/l}$), phosphore des phosphates ($\mu\text{g/l}$) et silice (mg/l) dans les 9 lacs pendant la saison chaude.

	Nitrates en $\mu\text{g NO}_3^- - \text{N/l}$		Phosphates en $\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P/l}$		Silice en $\text{mg SiO}_2/\text{l}$	
	Amplitude	Moyenne	Amplitude	Moyenne	Amplitude	Moyenne
Port-Bielh	0	71	1,9—5,2	3,6	0,8—2,1	1,5
	5	88	1,9—4,9	3,2	0,7—1,8	1,44
	10	81	0,9—5,2	3,6	0,75—1,37	1,33
	15	63	0,9—5,2	3,2	0,35—1,1	0,86
	18	65	0,9—4,5	2,8	0,3—1,15	0,79
Lac Supérieur	50—130	86	1,9—3,9	2,7	1,8—3,2	2,53
Lac Long	40—120	70	1,3—5,8	3,5	1,6—2,6	2,25
Gourguet	25—110	84	0,3—6,5	4,3	0,8—3,4	2,57
Gourg Nère Moyen	25—100	70	2,9—5,2	4,2	0,85—3,8	2,40
Gourg Nère Inf. II	25—120	80,5	0,6—5,5	3,1	0,9—4,2	2,92
Lac d'Anglade	40—110	57	0,9—7,1	4,1	1,2—2,8	1,80
Las Inférieur	60—110	86	0,9—4,9	2,5	1,7—4	2,4

2.1. — NITRATES.

Les teneurs en azote des nitrates de l'ordre de $75 \mu\text{g NO}_3\text{-N/l}$ en moyenne, se situent entre $20 \mu\text{g}$ et $210 \mu\text{g}$ pour l'ensemble des lacs. Dans les lacs de faible profondeur les différences entre la surface et le fond sont négligeables et les fluctuations observées au cours de l'été ne permettent pas d'y reconnaître une nette évolution. Au Port-Bielh, les teneurs moyennes diminuent au-delà de 10 mètres de profondeur où la quantité de $\text{NO}_3\text{-N}$ varie entre 10 et $70 \mu\text{g/l}$ au mois d'août. Aux sursaturations en O_2 et à l'alcalinisation, reflets d'une intense photosynthèse, correspond donc une plus faible quantité de nitrates.

2.2. — SILICE.

Les eaux du lac de Port-Bielh sont plus pauvres en silice ($0,8$ à $1,5 \text{ mg/l}$ de SiO_2 en moyenne) que celles des autres lacs étudiés ($1,8$ à $2,9 \text{ mg/l}$) (TABLEAU VI).

Dans les lacs peu profonds, il n'apparaît pas de cycle net de cet élément. Au Port-Bielh, les teneurs les plus élevées se rencontrent aussitôt après le dégel ($1,8$ à 2 mg/l le 6-7-67); la concentration reste stable pendant tout l'été dans les sept premiers mètres ($1,4$ à $2,1 \text{ mg/l}$; moyenne $1,6 \text{ mg/l}$). A partir de 10 mètres de profondeur on note une nette diminution de la teneur en silice ($0,8 \text{ mg/l}$ en moyenne) pendant toute la durée de la stratification thermique. Les valeurs les plus faibles ($0,3$ à $0,6 \text{ mg/l}$) rencontrées en août entre 12 et 18 mètres de profondeur correspondent aux fortes sursaturations en O_2 : selon MORTIMER [1941-42], cette diminution peut être attribuée à une précipitation des silicates sous forme de silicates ferriques insolubles. Signalons que cet appauvrissement en silice coïncide avec la période de développement maximum de Diatomées du genre *Cyclotella*; toutefois cette algue ne forme jamais de populations denses et son développement est très limité dans le temps. L'isothermie d'automne entraîne une uniformisation des teneurs dans toute la colonne d'eau et une remontée du taux de silice (moyenne de septembre et octobre : $1,45$ de 0 m à 10 m et $1,15$ de 10 m à 18 m). En hiver, la concentration en SiO_2 des eaux du fond, pauvres en O_2 , est nettement plus élevée qu'en surface (TABLEAU VII). Dans ces conditions pratiquement anaérobies cet enrichissement en silice peut être la conséquence d'une réduction des silicates ferriques au niveau de la vase.

TABLEAU VII. — Teneurs en silice (mg/l SiO_2) à 5 profondeurs du lac de Port-Bielh au cours de l'hiver 1969.

	0 m	5 m	10 m	15 m	18 m
30 Janvier	0,45	0,35	0,60	0,55	1,35
7 Mars	1,1	0,85	1,2	2,1	3,0
17 Avril	0,9	1	1,55	2,25	3,4

2.3. — PHOSPHATES.

Les concentrations en phosphates solubles varient entre 0,9 et 5,2 $\mu\text{g/l}$ de $\text{PO}_4\text{-P}$ dans le lac de Port-Bielh, entre 0,3 et 7,1 $\mu\text{g/l}$ dans les autres lacs avec des fluctuations négligeables aux différentes profondeurs. Les résultats se caractérisent par une assez grande irrégularité, phénomène fréquemment observé dans la littérature lorsque cet élément n'est présent qu'à de faibles teneurs, toute modification du milieu et toute perturbation dans le déroulement de l'analyse entraînant alors une erreur relative importante. Nous avons constaté toutefois une augmentation de la teneur en phosphates solubles dans la zone profonde du Port-Bielh en hiver avec 7-8 $\mu\text{g/l}$ le 7-3-69 entre 15 et 18 mètres ce qui, dans des conditions pratiquement anaérobies régnant en profondeur sous la glace, peut être dû à une libération par réduction au niveau des sédiments [HUTCHINSON 1957, p. 735].

DUSSART [1952 a] donne pour 7 lacs du Massif de Néouvielle des teneurs en phosphates comprises entre 7 et 23 $\mu\text{g/l}$ de $\text{PO}_4\text{-P}$ et pour le lac de Girotte [DUSSART 1952 b] situé dans les Alpes à 1 754 mètres, des valeurs sensiblement plus élevées de l'ordre de 12 à 35 $\mu\text{g/l}$ de $\text{PO}_4\text{-P}$.

Dans quelques lacs des Alpes autrichiennes [LEUTELT-KIPKE 1934; PECHLANER 1966] les concentrations en phosphates solubles varient entre 0,2 et 1,8 $\mu\text{g/l}$ de $\text{PO}_4\text{-P}$. Nos résultats se situent entre les deux et se rapprochent de ceux trouvés par PENNAK [1958] pour 12 lacs d'altitude du Colorado (1 à 9 $\mu\text{g/l}$ soit 2,9 $\mu\text{g/l}$ en moyenne). Mais il est difficile de comparer tous ces résultats par suite de la variabilité des méthodes de dosages employées. De plus, d'après RIGLER [1966], les déterminations chimiques des phosphates minéraux dans les eaux lacustres donneraient des valeurs beaucoup trop élevées; la réserve d'orthophosphates dans ces eaux serait donc beaucoup plus faible que ne le laissent supposer les résultats des analyses. Selon OLSEN [1964], ces faibles concentrations n'indiquent pas que cet élément soit obligatoirement un facteur limitant dans l'écologie des lacs puisque il existe un équilibre entre

l'eau et les sédiments qui, jouant le rôle de réservoirs, peuvent libérer des phosphates lorsque leur concentration dans l'eau diminue. Il nous paraît donc nécessaire de compléter l'étude de cet élément, généralement considéré comme facteur limitatif de la productivité, par des dosages du phosphore total dans l'eau et dans les sédiments.

RÉSUMÉ

Neuf lacs naturels du Massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées), étagés entre 2 100 m et 2 325 m d'altitude, sont décrits et les résultats de mesures physiques et chimiques, effectuées durant quatre années consécutives, sont donnés dans ce travail.

Dans le vallon d'Estibère, quatre lacs (1,1 à 2,4 hectares — 3,2 à 5 m de profondeur) s'échelonnent de 70 en 70 m d'altitude. Ils constituent un remarquable exemple de l'évolution des ceintures végétales et du comblement des cuvettes par formation de tourbières. Quatre petits lacs du Vallon de Port-Bielh ont également été étudiés. Beaucoup plus important, le lac de Port-Bielh (16,5 hectares — 19 m de profondeur) a fait l'objet d'une étude plus suivie.

Selon leur altitude, ces lacs sont gelés 6 à 7 mois par an. Par leurs caractéristiques morphométriques et physico-chimiques, le lac de Port-Bielh et le lac Inférieur d'Estibère se différencient des 7 autres lacs.

Le lac de Port-Bielh

Son régime thermique (fig. 8) permet de le classer dans les lacs de type dimictique subpolaire. La stabilité thermique maximum se situe à la mi-juillet (106 à 128 g-cm.cm²); elle décroît ensuite progressivement et devient nulle début septembre. L'apport estival de chaleur (7 186 à 8 842 cal.cm⁻²) représente 43 % seulement du budget calorifique annuel évalué à 17 500 cal. cm⁻² pour 1968/69.

La transparence est élevée et la profondeur de visibilité du disque de Secchi est de 13,5 m en moyenne.

En été, l'eau faiblement minéralisée, a une conductivité électrique à 18° C de l'ordre de 23 mhos. La conductivité augmente nettement en profondeur pendant l'hiver où elle peut atteindre 57 mhos (fig. 11). Les bicarbonates représentent 73 % à 93 % des sels totaux. La concentration en ions Ca⁺⁺ (3,5 à 4,4 mg/l) et Mg⁺⁺ (0,25 à 0,75 mg/l) augmente légèrement au niveau de la vase en hiver. Le fer est à l'état de traces pendant l'été; il atteint des teneurs de 1,5 mg/l au fond du lac en hiver.

Le pH (fig. 13), toujours basique, présente d'importantes variations (7,25 à 9,52). Il augmente progressivement au cours de l'été surtout au delà de 10 m de profondeur où les valeurs sont généralement supérieures à pH 9 en août. Cette alcalinisation est la conséquence d'une diminution de la quantité de CO₂ libre qui devient pratiquement nulle en été. La quasi totalité du CO₂ total se présente alors sous forme de bicarbonates (fig. 14).

Une forte concentration en oxygène dissous (fig. 15; 120 à 135 % des teneurs à la saturation) correspond aux valeurs élevées du pH en août. La circulation automnale ramène ces teneurs à une valeur proche de la saturation. Sous la glace, la consommation d'O₂ peut être évaluée

à 0,01 mg/l/jour et la quantité d'oxygène dissous devient pratiquement nulle dans le fond du lac au mois de mars. La brève isothermie de printemps ne parvient pas à combler le déficit de l'hiver et les quantités d'O₂ n'atteignent les teneurs de saturation que vers la mi-juillet.

Les phosphates, les nitrates et la silice sont présents à de faibles quantités dans les eaux du Port-Bielh (TABLEAU VI). Un appauvrissement en silice dans la zone profonde en août correspond aux sursaturations en O₂ et au développement d'une diatomée planctonique.

Le lac Inférieur d'Estibère

Malgré sa faible profondeur (5 m), le lac Inférieur d'Estibère présente deux périodes de stratification thermique (fig. 18). Les eaux de surface atteignent des températures supérieures à 16° C pendant l'été. La température des eaux du fond reste à 6° C par suite d'une alimentation par sources froides circulant sous la tourbière en bordure du lac. On peut donc le considérer comme un lac dimictique.

A cette stratification thermique se superpose une stratification chimique. L'alcalinité à 4 m est de 64 % supérieure à celle de surface. 80 % à 90 % des valeurs de la conductivité électrique sont dus aux bicarbonates.

Malgré la proximité d'une tourbière acide, le pH d'été varie entre 7,7 et 8,3 en surface alors que le pH du fond est plus alcalin de 0,5 à 0,7 unités pH. Les concentrations en oxygène dissous (fig. 18) correspondent aux valeurs du pH et on constate des sursaturations de 102 % à 127 % au-delà de 2 m de profondeur ainsi qu'une diminution de la quantité de CO₂ libre.

Les teneurs moyennes en nitrates, silice et phosphates sont comparables à celles des sept autres petits lacs (TABLEAU VI).

Les 7 autres lacs

Ces lacs, peu profonds (5 m) et de faible superficie, sont homothermes. La température des lacs les plus bas (L. d'Anglade et Gourg Nère Inf. II) reste le plus souvent supérieure à 15° C pendant l'été, celle des lacs les plus élevés de la série (Gourguet et L. Supérieur) ne dépassent qu'exceptionnellement cette température.

Leur minéralisation présente de légères différences. Cependant, on note pour tous, au cours de l'été, une augmentation de la conductivité (TABLEAU II) de 50 à 100 % qui traduit une hausse de l'alcalinité (fig. 12, les bicarbonates représentant 80 % à 90 % des sels dissous).

Les valeurs moyennes du pH (TABLEAU IV) varient de 7,7 à 8,7 et sont maximales en août. En été les concentrations en O₂ (TABLEAU V) sont rarement inférieures à 75 % et exceptionnellement supérieures à 110 % des teneurs à la saturation. En hiver, les phénomènes physiques consécutifs à la formation de la glace parviennent à maintenir de bonnes conditions d'oxygénation dans toute la masse d'eau (61 % près du fond au Gourg Nère Inf. II, le 7 mars 1969 sous 150 cm de glace + neige).

Les teneurs en nitrates, silice et phosphates sont faibles (TABLEAU VI) et leurs fluctuations au cours de l'été ne permettent pas d'y reconnaître une évolution nette.

MORPHOMETRICAL AND PHYSICO-CHEMICAL STUDY OF NINE LAKES OF THE MASSIF DE NÉOUVIELLE (HAUTES-PYRÉNÉES)

Nine natural lakes of the Massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées) ranging between 2 100 and 2 325 m in height were described and the results of the physical and chemical measurements, taken in the course of four consecutive years, were given in this paper.

In the valley of Estibère, four lakes (1,1 to 2,4 hectares — 3,2 to 5 m in depth) are spaced out each one 70 meters higher than the other. They constitute a remarkable example of evolution of belts of vegetation and of the encroachment of the basins by peat-bogs. Four small lakes of the valley of Port-Bielh were also studied. The most important of these, the lac de Port-Bielh (16,5 hectares — 19 m in depth) was the object of a more thorough study.

According to their altitude the lakes are frozen 6 to 7 months a year. The lac de Port-Bielh and the lac Inférieur d'Estibère differentiate from the seven other-lakes by their morphometric and physico-chemical characteristics.

The lac de Port-Bielh

Its thermal regime (*fig. 8*) permits us to class it among the lakes of the dimictic sub-polar type. The maximum stability is found in mid July (196 to 128 g-cm-cm⁻²); after this it decreases progressively and becomes zero at the beginning of september. The summer heat income (7 186 to 8 342 cal.cm-cm⁻²) represents only 43 % of the annual heat budget evaluated at 17 500 cal. cm⁻² for 1968/69.

The transparency was high and the depth of visibility of the Secchi disc was on average 13,5 m.

In summer the water, weakly mineralised, has a conductivity at 18° C about of 23 mhos. The conductivity shows a marked increase during the winter during which period it can reach 57 mhos (*fig. 11*). The bicarbonates represent from 73 % to 93 % of the dissolved salts. The concentration of the Ca⁺⁺ ions (3,5 to 4,4 mg/l) and the Mg⁺⁺ ions (0,25 to 0,75 mg/l) rises slightly at the bottom in winter.

The pH (*fig. 13*), always basic, has important variations (7,25 to 9,52). It increases progressively in the course of the summer especially beyond 10 m in depth where the values are usually greater than pH 8 in August. This alkalisation is the result of the diminution of the quantity of free CO₂ which becomes practically null in summer. The quasi totality of all the CO₂ is then present in the form of bicarbonates (*fig. 14*).

A strong concentration of dissolved oxygen (*fig. 15* — 120 to 135 % at saturation) corresponds with the high values of the pH in August. The autumn circulation brings the content to a value near to saturation point. Under ice, the consumption of O₂ can be evaluated at 0,01 mg/l/day and the quantity of dissolved oxygen becomes practically null at the bottom of the lake in March. The short isothermy of spring is not able to compensate the winter deficit and it is only around mid-July that the quantities of O₂ reach saturation point.

Phosphates, nitrates and silica are present in small amounts in the waters of Port-Bielh (Table VI). A lack of silica in the amounts in the lake in August corresponds to the over-saturation of O₂ and to the development of a planctonic diatom.

The Lac Inférieur d'Estibère

Despite its lack of depth (5 m), the Lac Inférieur d'Estibère offers two periods of thermal stratification (*fig. 18*). The surface waters reach temperatures higher than 16° C during the summer. The temperature of the water at the bottom stays at 6° C due to the cold sources circulating under the peat-bog around the edge of the lake. It can therefore be considered as a dimictic lake.

To this thermal stratification a chemical stratification is super-imposed. The alkalinity at 4 m is 64 % higher than at the surface. 80 % to 90 % of the values of the electric conductivity are due to bicarbonates.

Despite the proximity of an acidic peat-bog the summer pH varies between 7,7 and 8,3 at the surface while the pH at the bottom is more alkaline by 0,5 to 0,7 pH units. The concentrations of oxygen correspond to the values of the pH and one notes the over-saturations of 102 % to 127 % beyond a depth of 2 m as well as a reduction in the amount of free CO₂.

The average nitrate, silicon and phosphate contents are comparable with those of the seven other small lakes (Table VI).

The seven other lakes.

The lakes which are not very deep nor very wide are homothermal. The temperature of the deepest lakes (Lac d'Anglade and Gourg Nère Inférieur II) usually stays at above 15° C during the summer. The high lakes of the series (Gourguet and Lac Supérieur) only pass this temperature in exceptional cases.

Their mineralisation offers slight differences. However for all of the lakes one notes, during the summer an increase in the conductivity (TABLE II) from 50 % to 100 % which is caused by a rise in alkalinity, the bicarbonates representing 80 % to 90 % of the dissolved salts.

The average values of the pH (TABLE IV) vary from 7,7 to 8,7 and are at their peak in August. In summer, the oxygen concentration (TABLE V) are rarely lower than 75 % and exceptionally higher than 110 %. In winter the physical phenomena following upon the formation of ice result in good oxygenation conditions in the mass of water (61 % near the bottom of Gourg Nère Inf. II on the 7 March 1969 under 150 cm of ice and snow).

The nitrate, silicon and phosphate contents are weak (TABLE VI) and their fluctuations during the summer makes impossible to discover a distinct evolution.

**MORPHOMETRISCHE UND PHYSICO-CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN
VON NEUN SEEN DES MASSIF DE NÉOUVIELLE
(HAUTES-PYRÉNÉES)**

In dieser arbeit werden 9 natürliche Seen des Massifs de Néouvielle (Hautes-Pyrénées), die von 2 100 bis 2 325 m stufenweise ansteigen, beschrieben und die physikalischen und chemischen Messergebnisse aus 4-jährigen konsekutiven Beobachtungen dargelegt.

Im Vallon d'Estibère staffeln sich 4 Seen (1,1 bis 2,4 ha und 3,2 bis 5 m Tiefe) jeweils von 70 zu 70 m in die Höhe. Sie sind ein bemerk-

kenswertes Beispiel für die Entwicklung der Vegetationsgürtel und für die Zuschüttung von Becken durch Torfmoorbildung. Der sehr viel grössere See von Port-Bielh (16,5 ha und 19 m Tiefe) ist diesbezüglich ausgiebiger untersucht worden.

Je nach ihrer Höhlenlage sind diese Seen Jährlich 6-7 Monate lang zugefroren. Le lac de Port-Bielh und le lac Inférieur d'Estibère unterscheiden sich durch ihre morphometrischen und physico-chemischen Charakteristiken von den sieben anderen Seen.

Le lac de Port-Bielh

Sein thermisches Regime (Abb. 8) erlaubt es, ihn zu den Seen vom dimiktisch-subpolaren Typ zu stellen. Er erreicht seine maximale Wärmestabilität Mitte Juli (106-128 g-cm.cm⁻²) danach fällt sie kontinuierlich ab und wird zu Anfang September gleich Null. Der sommerliche Wärmehalt (7 186-8 842 cal.cm⁻²) bildet nur 43 % des Jahresbudgets, das für 1968-69 zu 17 500 cal.cm⁻² veranschlagt wurde.

Die Klarheit des Wassers ist bedeutend und die Secchi-scheibe ist im Mittel bis auf 13,5 m Tiefe sichtbar.

Das schwach mineralisierte Wasser hat in Sommer eine elektrische Leitfähigkeit in der Grössenordnung von 23 mhos bezogen auf 18° C. Im Winter nimmt die Leitfähigkeit mit der Tiefe sichtlich zu und kann bis zu 57 mhos steigen (Abb. 11). Die Bikarbonate sind mit 73 % bis 93 % an der Gesamtheit der gelösten Mineralstoffe beteiligt. Die Konzentration der Ca⁺⁺-Ionen (3,5-4,4 mg/l) und der Mg⁺⁺-Ionen (0,25-0,75 mg/l) nimmt im Winter in Schlammereich geringfügig zu. Eisen ist im Sommer nur in Form von Spuren vertreten erreicht im Winter jedoch Werte von 1,5 mg/l auf dem Grund des Sees.

Der pH-Wert (Abb. 13) bleibt immer im basischen Bereich und ist bedeutenden Schwankungen unterworfen (7,25 bis 9,52). Im Laufe des Sommers wächst er zusehends an, besonders unterhalb von 10 m Tiefe wo die Werte im Monat August im allgemeinen den pH 9 überschreiten. Diese Alkalinität ist die Folge einer Verarmung des Wassers an freier Kohlensäure, die im Sommer so gut wie Null wird. Der ganze CO₂-Gehalt liegt dann praktisch in Form von Bikarbonaten vor (Abb. 14).

Die hohen pH-Werte im August sind durch eine starke Konzentration des gelösten Sauerstoffs (Abb. 15) bedingt, der 120 % bis 135 % des Sättigungsgehaltes erreichen kann. Die Herbstzirkulation führt diese Werte wieder auf einen Gehalt nahe des Sättigungsgrades zurück. Der Sauerstoffverbrauch unter der Winterdecke kann zu 0,01 mg/l veranschlagt werden und die Menge des gelösten Sauerstoffs wird im März am Grunde des Sees so gut wie Null. Die kurze Frühjahrzirkulation kann dieses Defizit noch nicht auffüllen und so wird die O₂-Sättigung erst wieder gegen Mitte Juli erreicht.

Phosphate, Nitrate und Silizium sind in geringen Mengen im Wasser des Sees von Port-Bielh enthalten (TAFEL VI). Eine Verarmung an Kieselsäure der tieferen Bereiche im August kommt durch die Übersättigungen an O₂ und die Entwicklung einer planktonischen Diatomee zustande.

Le lac Inférieur d'Estibère

Trotz seiner geringen Tiefe (5 m) besitzt dieser See zwei Perioden thermischer Schichtung (Abb. 18). Die Oberflächenwässer erreichen im Sommer Temperaturen von über 16° C. Die Temperatur der Tie-

fenwässer dagegen bleibt bei 6° C infolge eines Zuflusses an kalten Quellen von unterhalb des Torfmoores am Rande des Sees. Man kann ihn somit als dimiktischen See ansprechen.

Diese thermische Schichtung wird von einer chemischen Schichtung überlagert. Die Alkalinität bei 4 m Tiefe ist um 64 % höher als an der Oberfläche. 80 % bis 90 % der elektrischen Leitfähigkeit rührt von den Bikarbonaten her.

Trotz der Nähe eines sauren Torfmoores schwankt der pH-Wert im Sommer an der Oberfläche zwischen 7,7 und 8,3, während er am Grunde noch um 0,5-0,7 pH-Einheiten alkalischer ist. Die Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff (Abb. 18) entsprechen den pH-Werten und man stellt unterhalb von 2 m Tiefe Übersättigung von 102 % bis 127 % sowie auch eine Verringerung der Gesamtmenge an freien CO₂ fest.

Die mittleren Gehalte an Nitraten, Phosphaten und Silizium sind denen der 7 anderen Seen vergleichbar (TAFEL VI).

Die sieben anderen Seen

Diese Seen von geringer Tiefe (5 m) und kleiner Oberfläche sind homotherm. Die Temperatur der am tiefsten gelegenen Seen (Lac d'Anglade und Gourg Nère Inférieur II) bleibt häufig über 15° C im Sommer; bei den am höchsten gelegenen Seen der Abfolge (Gourguet und Lac Supérieur d'Estibère) wird diese Temperatur nur in Ausnahmefällen überschritten.

Ihr Mineralgehalt weist geringe Unterschiede auf. Bei allen stellt man jedoch im Laufe des Sommers eine Erhöhung der Leitfähigkeit von 50 % bis 100 % fest (TAFEL II), die durch eine Zunahme der Alkalinität (Abb. 12) zustande kommt; 80 %-90 % der gelösten Salze sind durch Bikarbonate vertreten.

Die pH-Werte schwanken im Mittel von 7,7 bis 8,7 (TAFEL IV) und erreichen ihr Maximum im August. Die O₂-Konzentrationen (TAFEL V) sind im Sommer selten unter 75 % und ausnahmsweise höher als 110 % des Sättigungswertes. Die physikalischen Erscheinungen infolge der Bildung der Winterdecke lassen gute Durchlüftungsverhältnisse in der ganzen Wassermasse fortauern (61 % etwas oberhalb des Grundes am Gourg Nère Inférieur II, am 7. März 1969 unter 150 cm Eis und Schnee).

Die Nitrat-, Silizium- und Phosphatgehalte sind gering (TAFEL VI) und ihre Schwankungen im Laufe des Sommers lassen keine gerichtete Entwicklung erkennen.

TRAVAUX CITÉS

- ALSTERBERG (G.). 1929. — Über das aktuelle und absolute O₂-Deficit der Seen im Sommer. *Bot. Not.* 1929 : 374-376.
- ANGELIER (E.). 1961. — Les lacs de l'Estibère : remarques sur le peuplement des lacs de montagne. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 96 : 7-14.
- APHA. 1960. — Standard methods for the examination of water and wastewater including bottom sediments and sludges. 11^e édit., 626 p. New York.
- BELLOC (E.). 1895. — Les lacs du massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées). *Ass. Fr. avancement des Sciences, Congrès de Bordeaux*, 1895 : 1-14.

- BIRGE (E. A.). 1897. — Plankton studies on lake Mendota. II. The crustacea from the plankton from July, 1894, to December, 1896. *Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett.*, **11** : 274-448 in Hutchinson, 1957.
- BUCH (K.). 1960. — Dissoziation der Kohlensäure, Gleichgewichte und Puffersysteme. *Handbuch d. Pflanzenphysiologie* 5/1 : 1-11. Springer, Göttingen.
- CAMPARDOU (J.) et SECONDAT (M.). — Contribution à l'étude des milieux lacustres de la région du Néoubielhe. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, **76** : 172-179.
- CASSAGNAU (P.). 1961. — Ecologie du sol dans les Pyrénées centrales. Les biocénoses de Collemboles (*Hermann, Activ. Sc. ind. n° 1283*), 235 p. Paris.
- CHOUARD (P.). 1931. — Une région lacustre des Pyrénées centrales : Orédon et le Massif du Néouvielle. *Bull. Soc. ntn. Acclim. Fr.*, 1931 (2/3) : 1-34 + 5 pl.
- CHOUARD (P.). 1933. — Cycles d'évolution du tapis végétal et du relief du sol dans la haute montagne. *Annls Géogr.*, **43** : 449-477 + 4 pl.
- CHOUARD (P.). 1937a. — Recherches sur les variations caractéristiques de l'humidité atmosphérique dans les divers types de forêts du massif de Néouvielle. *Bull. Soc. ntn. Acclim. Fr.*, **84** : 34-40.
- CHOUARD (P.). 1937b. — Rayonnement solaire et humidité atmosphérique dans les climats de forêts de montagne aux Pyrénées. *Congrès Soc. Sav.* : 179-183.
- CHOUARD (P.). 1949. — Caractères généraux des Pyrénées centrales entre Gaves et Nestes. *Bull. Soc. ntn. Acclim.* **96** (10) : 7-15.
- CHOUARD (P.) et PRAT (H.). 1929. — Note sur les tourbières du Massif de Néouvielle. *Bull. Soc. bot. Fr.*, **76** : 113.
- CZSENSNY (R.). 1961. — Wasser-Abwasser-und Fischereichemie. 429 p. Leipzig.
- DÉCAMPS (H.). 1967. — Ecologie des Trichoptères de la vallée d'Aure (Hautes-Pyrénées). *Annls Limnol.*, **3** (3) : 399-577.
- DENIGÉS (G.). 1920. — Réaction de coloration extrêmement sensible des phosphates et des arseniates. Ses applications. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **171** : 802-804.
- DUSSART (B.). 1952a. — Contribution à la connaissance des lacs Pyrénéens. *Annls Stat. Cent. Hydrobiol. appl.*, **4** : 319-337.
- DUSSART (B.). 1952b. — Contribution à l'étude des lacs de Savoie. Le lac de Girotte. *Annls Stat. Cent. Hydrobiol. appl.*, **4** : 379-391.
- DUSSART (B.). 1966. — Limnologie : l'étude des eaux continentales. 678 p. Paris.
- ECKEL (O.). 1950. — Über die numerische und graphische Ermittlung der Stabilität von Gewässern nach W. Schmidt. *Schweiz. Z. Hydrol.*, **12** : 38-47.
- EINSELE (W.). 1940. — Versuch einer Theorie der Dynamik der Mangan und Eisenschichtung im eutrophen See. *Naturwissenschaften* **28** : 257-264 und 280-285.
- FEUILLADE (J.). 1966. — Contribution à l'étude d'un lac de barrage : le lac de Vézins (Manche). *Thèse Caen*, 176 p.
- GAURIER (L.). 1934. — Les lacs des Pyrénées françaises, 319 p. Paris.
- GAUSSEN (H.). 1931. — Les forêts de la vallée d'Aure. *Revue Géogr. Pyrénées S.-Ouest*, **2** : 241-250.
- GAUSSEN (H.). 1949. — Les conditions climatiques aux Pyrénées centrales et les étages de végétation. 76^e session extraordinaire. *Bull. Soc. bot. Fr.*, **96** : 16-20.

- GORHAM (E.). 1957. — The chemical composition of some natural waters in the Cairn Gorn-Strath Spey District of Scotland. *Limnol. Oceanogr.*, **2** : 143-154.
- GUTMANN (V.). 1962. — Der Mölsersee im Wattental in Tirol. *Veröff. Mus. Ferdinandeum Innsbr.*, **41** : 49-116.
- HUTCHINSON (G. E.). 1957. — A treatise on limnology, Bd 1 : 1-1015. Geography, Physics and Chemistry. *John Wiley and Sons, Inc. New York, Chapman and Hall, Ltd. London.*
- INGRAND (R.). 1961. — L'aménagement hydro-électrique de la vallée d'Aure et ses conséquences géographiques. *Revue géogr. Pyrénées S.-Ouest*, **32** : 35-62 + 1 pl.
- JONES (D.) et WILLS (M. S.). 1956. — The attenuation of light in sea and estuarine waters in relation to the concentration of suspended solid matter. *J. mar. biol. Ass. U. K.*, **35** : 431-441.
- JUDAY (C.), BIRGE (E. A.) and MELOCHE (V. W.). 1938. — Mineral content of the lake waters of northeastern Wisconsin. *Trans. Wis. Acad. Sci. Art Lett.*, **31** : 223-276.
- LEUTELT-KIPKE (S.). 1934. — Ein Beitrag zur Kenntnis der hydrographischen und hydrochemischen Verhältnisse einiger Tiroler Hoch- und Mittelgebirgsseen. *Arch. f. Hydrobiol.*, **27** : 286-352.
- LEUTELT-KIPKE (S.). 1936. — Hydrographische und hydrochemische Beobachtungen an Südtiroler Hochgebirgsseen. *Arch. f. Hydrobiol.*, **30** : 589-603.
- MALDURA (C. M.). 1936. — La chimica degli alti laghi alpini. *Suppl. Boll. Pesca piscic. Idrobiol.*, **B, 10** : 415-445.
- MALDURA (C. M.). 1947. — Secondo contributo allo studio della chimica degli alti laghi alpini (laghi del gruppo di Sella). *Boll. Pesca Piscic. Idrobiol.*, **23** : 236-246.
- MORANDINI (G.). 1949. — Ricerche limnologiche sugli alti laghi alpini della Venezia Tridentina (Sec. Contr.) Sella, Lagorai Val delle Pozze. *Boll. Pesca Piscic. Idrobiol.*, **25** : 16-60, 75-155.
- MORTIMER (C. H.). 1941-42. — The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J. Ecol.*, **29** : 280-329.
- MORTIMER (C. H.). 1956. — The oxygen content of air-saturated fresh waters and aids in calculating percentage saturation. *Mitt. int. Verein. theor. angew. Limnol.*, **6** : 1-20.
- NUSSBAUM (F.). 1934. — Die Seen der Pyrenäen, *Mitt. Bern. Naturf. Ges.* : 1-184 + 7 pl.
- OHLE (W.). 1940. — Chemische Gewässerkundung in Schwedisch-Lappland, *Arch. Hydrobiol.*, **36** : 337-358.
- OLSEN (S.). 1966. — Recent trends in the determination of orthophosphate in water, in chemical environment in the aquatic habitat, *Proceed. of I.B.P.-Symposium Amsterdam-Nieuwersluis*, Octobre 1966 : 63-105.
- PECHLANER (R.). 1966. — Die Finstertaler Seen (Kühtai, österreich) I. Morphometrie, Hydrographie, Limnophysik und Limnochemie. *Arch. Hydrobiol.*, **62** : 165-230.
- PENNAK (R. W.). 1955. — Comparative limnology of eight Colorado mountain lakes. *Univ. Colo. Stud. Ser. Biol.*, **2** : 1-75.
- PENNAK (R. W.). 1958. — Regional lake typology in northern Colorado U.S.A., *Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol.*, **13** : 264-383.
- PRAT (H.) et CHOUARD (P.). 1928. — Note sur les milieux aquatiques du Massif du Néouvielle. *Bull. Soc. bot. Fr.*, **75** : 986-997.

- RIGLER (F. H.). 1964. — The phosphorus fractions and turnover time of inorganic phosphorus in different types of lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **9** : 511-518.
- RODIER (J.). 1966. — L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau, 3^e éd. Dunod éd. Paris, 412 p.
- RUTTNER (F.). 1952. — Grundriss der Limnologie. Traduction anglaise, 242 p.
- SAUNDERS (G. W.), TRAMA (F. B.) and BACHMANN (R. W.). 1962. — Evaluation of a modified C_{14} technique for shipboard estimation of photosynthesis in large lakes. *Gt lakes Res. Div.*, **8** : 1-61.
- SARUHASHI (K.). 1955. — On the equilibrium concentration of carbonic acid substances dissolved in natural water. *Pap. Met. Geophys., Tokyo*, **6** : 39-55.
- STEINBÖCK (O.). 1938. — Zur Frage der Sprungschicht in Hochgebirgsseen. *Arch. Hydrobiol.*, **27** : 397-415.
- STEINBÖCK (O.). 1938. — Arbeiten über die Limnologie der Hochgebirgs-gewässer. *Int Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr.*, **37** : 467-504.
- SUCHLANDT (O.) et SCHMASSMANN (W.). 1935. — Limnologische Beobachtungen an acht Hochgebirgsseen der Landschaft Davos. *Z. Hydrol. Hydrogr. Hydrobiol.*, **7** : 1-201.
- STRICKLAND (J. D. H.) et PARSONS (T. R.) 1960. — A manual of sea water analysis. *Fish. Res. Bd. Can.*, **125** : 185 p.
- STRØM (K. M.). 1931. — A physiological and biological study of a mountain lake. *Arch. Hydrobiol.*, **22** : 491-536.
- TURNOWSKY (F.). 1946. — Die Seen der Schobergruppe in den Hohen Tauern. *Carinthia II*, **8** : 1-78.
- TURNOWSKY (F.). 1954. — Der Obstander See in der Karnischen Hauptkette. *Carinthia II*, **64** : 124-132.
- TURNOWSKY (F.). 1961. — Der Wolayasee in der Karnischen Hauptkette. *Carinthia II*, **71** : 102-126.
- WOLFF (H.). 1948. — Hydrobiologische Untersuchungen an dem hochalpinen Seen des San-Bernardino-Passes. *Z. Hydrol. Hydrogr. Hydrobiol.*, **10** : 101-244.
- YOSHIMURA (S.). 1936. — A contribution to the knowledge of deep water temperatures in Japanese lakes. Part I. Summer temperatures. *Jap. J. Astr. Geophys.*, **13** : 61-120 in Hutchinson, 1957.

*Laboratoire d'Hydrobiologie
de la Faculté des Sciences de Toulouse.
Equipe de Recherches associée au C.N.R.S.
118 Route de Narbonne, 31 - Toulouse*