

**Université de Neuchâtel
Faculté des Sciences**

**LE LAC DE NEUCHÂTEL
(Suisse)**

**Ses eaux, ses sédiments,
ses courants sous-lacustres**

**Thèse présentée à la Faculté des Sciences par
HENRY SOLLBERGER
chimiste diplômé
de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de
Docteur ès Sciences**

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Le lac de Neuchâtel (Suisse).....

Ses eaux, ses sédiments, ses courants.....

sous-lacustres.....

de M. Henri Sollberger

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

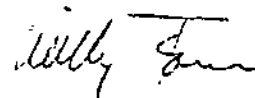
La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport de Messieurs les professeurs

E. Wegmann, J.P. Schaer et D. Aubert.

autorise l'impression de la présente thèse sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 18 avril 1974

Le doyen:



Prof. W. Form

A la mémoire de mes parents.

Le présent travail a été effectué d'avril 1957 à janvier 1965 au Laboratoire cantonal de Neuchâtel, sous la direction de Monsieur le professeur C.-E. Wegmann auquel nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance pour les conseils précieux qu'il n'a cessé de nous donner tout au long de nos recherches.

Nous tenons à remercier également Monsieur le professeur Ch.-G. Boissonnas pour l'intérêt qu'il a témoigné à notre travail.

Nous avons bénéficié de l'aide de nombreux collaborateurs et collaboratrices durant de nombreux mois, aussi bien en laboratoire qu'en toutes "circonstances météorologiques" sur le lac. Qu'ils veuillent trouver ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour le remarquable travail d'équipe qu'ils ont fourni.

INTRODUCTION

L'importance des nappes d'eau superficielles croît en même temps que les besoins en eau potable dus à l'essor démographique qui a suivi la deuxième guerre mondiale.

Mais en cherchant à s'y approvisionner en eau pure, l'humanité ne rencontre le plus souvent dans ces réservoirs naturels qu'un liquide dont la dégradation est plus ou moins avancée.

Placé dans une région habitée, le lac de Neuchâtel n'échappe pas à la menace qui pèse sur la qualité de son eau. Aussi est-ce pour établir un bilan de sa situation actuelle, comme aussi pour pouvoir suivre l'évolution polluative inquiétante de cette masse lacustre que nous avons entreprise le présent travail.

L'évolution d'un biotope de l'importance du lac de Neuchâtel est liée à celle d'un grand nombre de facteurs physiques, chimiques et biologiques.

Or, l'étude de ces divers facteurs ne peut se faire de manière indépendante, car tous agissent à la fois et à des degrés divers sur l'évolution lacustre. A leur action se superpose encore celle des facteurs météorologiques dont l'influence varie d'une année à l'autre, ce qui complique sérieusement le problème.

Pour pouvoir apprécier les changements qui se produisent dans un lac, il est nécessaire à la fois : 1) de posséder des points de comparaison anciens sûrs et en nombre suffisant; 2) de procéder à des observations durant une période assez longue pour pouvoir éliminer l'influence des écarts météorologiques annuels.

Dans le premier cas, les données anciennes à disposition s'étendent à la seconde moitié du 19^e siècle et au premier quart du 20^e, période durant laquelle la première correction des eaux du Jura est venue modifier encore la situation. Dans le second, il s'est avéré nécessaire de poursuivre les recherches pendant plusieurs années, d'où l'ampleur du présent travail qui couvre la période de 1957 à 1961.

Comme nous l'avons esquissé déjà dans une précédente publication (Sollberger, 1960), nous essayons de remplacer partiellement l'insuffisance des données anciennes par un examen plus approfondi de l'état actuel, en faisant appel au plus grand nombre possible de méthodes de la limnologie moderne.

Mais, simultanément, il se révèle nécessaire de reprendre certains aspects du problème déjà examinés au cours de la campagne 1943-1945 (Sollberger, 1946) pour pouvoir tenir compte des effets de la pollution grandissante de ces dernières années dans l'étude chimique et bactériologique, aussi bien qu'algologique du lac.

Il n'est donc plus question actuellement de procéder, de temps en temps et seulement par beau temps, à des mesures et prélève-

ments d'échantillons en un point ou deux du lac, pour étudier ce dernier. Il faut, au contraire, attaquer le problème de plusieurs côtés à la fois et, pour cela, opérer en de nombreux points simultanément et à des intervalles de temps aussi courts que possible, de même qu'en toutes saisons.

C'est la raison pour laquelle les recherches à la base du présent travail ont dû être développées au point de devenir parfois de véritables expéditions faisant appel au travail de plusieurs collaborateurs des laboratoires cantonaux de Neuchâtel et de Lausanne et dotées d'un important matériel.

*

*

*

Première partie

LE LAC DE NEUCHÂTEL

Chapitre premier : GENERALITES

1. Introduction.

Les divers travaux parus jusqu'ici sur le lac de Neuchâtel ont donné, avec plus ou moins de détails, des indications quant à ses dimensions, ses particularités, etc. Toutefois, les paramètres ainsi définis ne concordent pas toujours entre eux parce qu'ils n'ont pas été déterminés tous avec le même souci de précision, ni dans le même but; souvent aussi, leurs valeurs dépendent des moyens dont on disposait à l'époque à laquelle les mesures ont été faites.

Les principales indications géographiques et morphologiques issues des travaux du siècle passé sont rassemblées dans l'article "Lac de Neuchâtel" du Dictionnaire géographique de la Suisse : D.G.S. (1902-1910). A une époque plus récente, Quartier (1948 b) mentionne des données auxquelles il ajoute les résultats d'un certain nombre de calculs personnels destinés à "moderniser" les valeurs anciennes, spécialement en ce qui concerne les niveaux du lac.

Mais depuis Quartier, la carte de base (Atlas Siegfried) dont s'est servi cet auteur a été remplacée par la Carte nationale de la Suisse. Cette dernière, bien qu'à la même échelle que l'Atlas Siegfried, donne des renseignements plus exacts dûs tout spécialement au perfectionnement des procédés de levés cartographiques. Pour cette raison, mais aussi parce que quelques erreurs et oublis, inévitables, se sont révélés dans la monographie inachevée "Le Lac de Neuchâtel", nous avons été incité à reprendre la question, ce qui se justifie d'autant plus qu'il peut être intéressant, à la veille de la deuxième correction des eaux du Jura, de fixer de manière plus précise les notions géographiques et morphologiques actuelles de notre lac. Les premières données qui vont suivre sont donc une révision de celles déjà obtenues, auxquelles s'ajouteront de nouveaux renseignements destinés à jeter les bases d'appréciation du problème de la lutte contre la pollution des eaux.

Précisons encore que, pour tout notre travail, les vocables utilisés en tant qu'expressions locales correspondent aux définitions données par Pierrehumbert (1926) et par Quartier (1948 b). Ces vocables sont désignés dans le texte par (El).

2. Géographie.

Le document topographique auquel se réfère le présent travail est la Carte nationale suisse au 1:25000, édition 1956-1957 (en abrégé: CN.1957). Seules feront exception les figures se rapportant aux mesures de courants sous-lacustres et à nos propres levés détaillés qui se référeront à un montage cartographique des Plans d'ensemble de la mensuration cadastrale suisse au 1:5000.

2.1. Le lac proprement dit.

La situation du lac se résume brièvement ainsi : Creusé en grande partie dans la molasse et les dépôts morainiques du "Plateau suisse", situé avec ceux de Bienne et de Morat entièrement en territoire helvétique au pied de l'arc intérieur du Jura, le lac de Neuchâtel se trouve à la limite des calcaires jurassiens.

De forme grossièrement rectangulaire, le lac de Neuchâtel (fig.1) est plus grand que celui de Morat qui l'alimente et que celui de Bienne dans lequel il se déverse.

TABEAU I.

Coordonnées géographiques du lac de Neuchâtel

	Latitude N	Longitude E. ¹⁾
Centre de figure	46°54'23''	6°51'36''
Rectangle circonscrit (en amont	46°46'59''	6°38'06''
(en aval	47°00'26''	7°03'04''

L'extension géographique du lac est, par conséquent, de 13'27'' (ou 24,76 km) en latitude et de 24'58'' (ou 31,88 km) en longitude. Son altitude est fixée par la CN.1957 à 429 m au-dessus du niveau de la mer pour la surface du lac, la cote altimétrique étant exprimée sur la base suisse de la Pierre à Niton nouvelle valeur, soit 373,600. En valeur plus précise et pour tout notre travail, nous avons admis l'altitude 429,31 m comme niveau moyen de la surface; ce chiffre correspond à la moyenne de toutes les indications limnographiques que nous avons relevées de 1957 à 1961 d'une part, et au chiffre adopté par la Commission cantonale des eaux de Neuchâtel en 1947, d'autre part.

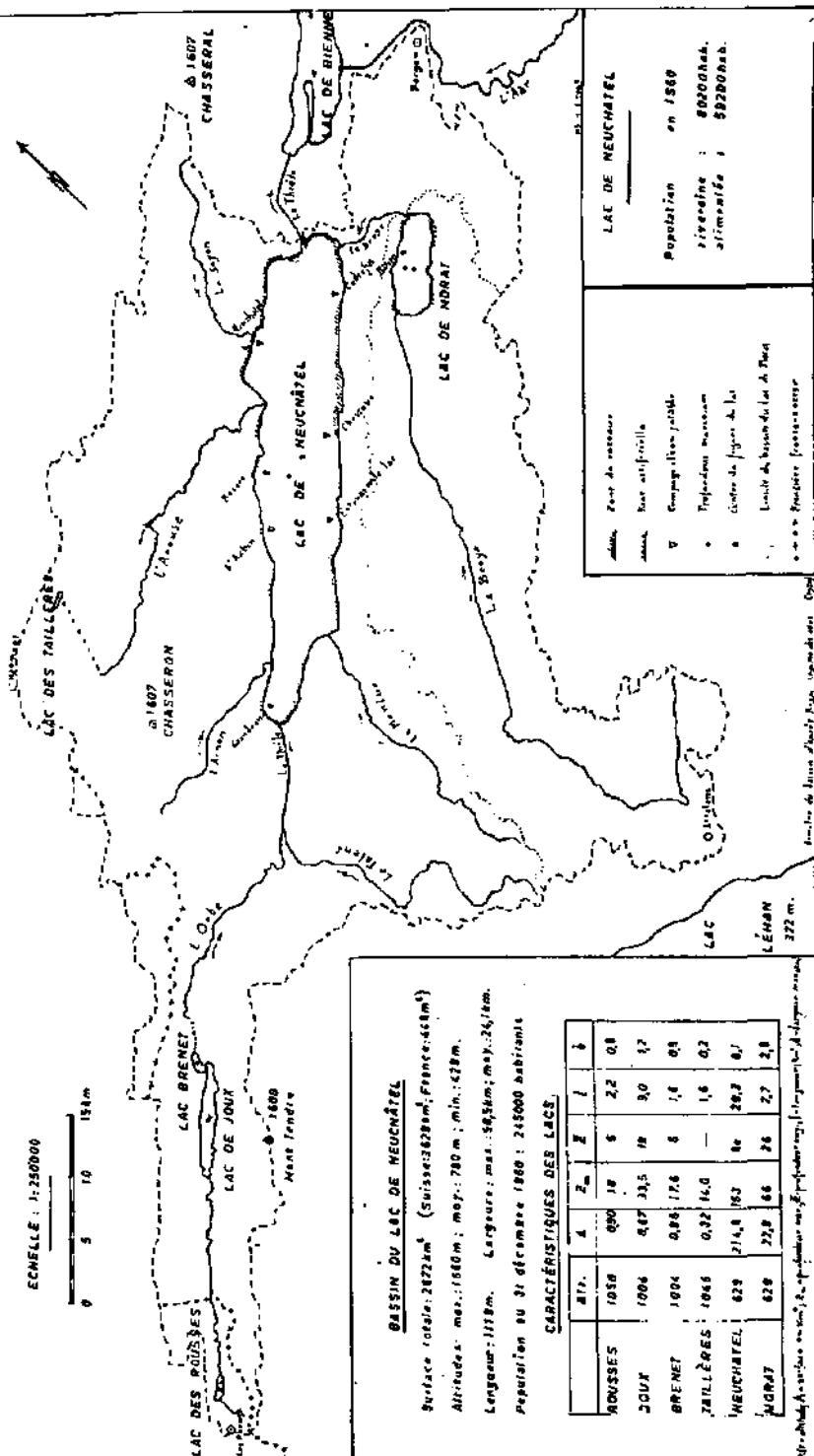
Du point de vue démographique, le lac de Neuchâtel baigne le territoire de 35 communes politiques des cantons de Neuchâtel, Vaud, Fribourg et Berne, avec un total de 80200 habitants à fin 1960.

Sur la carte nationale au 1:25000, le lac figure sur les coupures suivantes : No. 1144 Val-de-Ruz, 1145 Bielersee, 1163 Travers, 1164 Neuchâtel, 1165 Murten, 1183 Grandson, 1184 Payerne et 1203 Yverdon. Sur la carte géologique générale de la Suisse, au 1:200.000, le lac se trouve sur les feuilles: 1 Neuchâtel et 2 Basel-Bern.

Les coordonnées topographiques du centre de figure sont, sur la CN.1957 : 555830 / 195030.

1) Longitude de Greenwich. Les symboles adoptés dans tout notre travail pour les points cardinaux sont : N=nord; E=est; S=sud; W=ouest.

CARTE DU BASSIN DE RECEPTION DU LAC DE NEUCHÂTEL



2.2. Le bassin d'alimentation du lac.

Le bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel, partie intégrante du bassin de l'Aar elle-même tributaire du Rhin, s'étend au Jura et au Plateau suisse. Il comprend, outre le lac de Neuchâtel, ceux de Morat, de Joux, des Rousses, Brenete, des Taillères, ainsi que le Loclat de St-Blaise, (fig. 2).

TABLÉAU II.

Coordonnées géographiques du bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel.

	Latitude N.	Longitude E. ²⁾
Centre de figure	46°48'25"	6°43'40"
Nectangle circonscrit (en amont (en aval	46°28'	6°03'
	47°09'	7°18'

L'extension géographique du bassin d'alimentation est, par conséquent, de 0°41' (ou 74,8 km) en latitude et de 1°15' (ou 92,5 km) en longitude. Son altitude est comprise entre les cotes 1680 et 429 m au-dessus du niveau de la mer, ces chiffres étant exprimés sur la même base que pour le lac proprement dit.

Le bassin du lac de Neuchâtel constitue le 15,0 % de la superficie de celui de l'Aar, et, du point de vue démographique, englobe totalement ou partiellement les territoires de 401 communes politiques des cantons de Vaud, Fribourg, Neuchâtel et Berne, en Suisse, ainsi que des départements du Jura et du Doubs, en France, avec un total de 245000 habitants à fin 1960.

Sur la carte nationale au 1:25000, le bassin figure sur les 27 coupures suivantes : Nos. 1124 Les Bois, 1125 Chasseral, 1143 Le Locle, 1144 Val-de-Ruz, 1145 Bielersee, 1146 Igny, 1162 Les Verrières, 1163 Travers, 1164 Neuchâtel, 1165 Murten, 1182 Sainte-Croix, 1183 Grandson, 1184 Payerne, 1185 Fribourg, 1201 Month, 1202 Orbe, 1203 Yverdon, 1204 Romont, 1220 Saint-Laurent, 1221 Le Sentier, 1222 Cossonay, 1223 Bohalens, 1224 Moudon, 1240 Les Rousses, 1241 Marchsairuz, 1243 Lausanne et 1244 Châtel-Saint-Denis.

Mentionnons, pour mémoire, que la partie française du bassin figure sur les coupures ci-après de la carte de France au 1:20000: Mores-Bois d'Amont Nos. 4 et 8, Month Nos. 3, 4, 5 et 6.

2) Cf. note 1).

Sur la carte géologique générale de la Suisse, au 1:200000, le bassin figure sur les feuilles : 1 Neuchâtel, 2 Basel-Bern, 5 Genève-Lausanne et 6 Sion.

Les coordonnées topographiques du centre de figure sont, sur la CH.1957 :

545500 / 184000.

2.3. Comparaison avec d'autres lacs.

Il est toujours difficile de comparer des lacs entre eux, car il ne s'agit pas alors de comparer l'un à l'autre seulement des faits géographiques, mais des biotopes liés à des conditions physico-chimiques et biologiques déterminées.

C'est pourquoi nos tentatives de comparaison se limiteront (annexe I) presque toujours à un nombre restreint de lacs tous situés en Europe, soit, par ordre alphabétique: le Balaton (Hongrie), grand lac de steppe à forte teneur en humus et en sels solubles et dont une partie des côtes est calcaire; le Bodan/Obersee (Allemagne, Autriche et Suisse), grand lac molassique profond; le Chiemsee (Allemagne) grand lac à fond plat en terrain morainique calcaire avec un peu de molasse; le lac de Morat (Suisse) petit lac molassique très proche du nôtre à plusieurs points de vue; le Munsiedlersee ou Fertő (Autriche et Hongrie) grand lac de plaine extrêmement peu profond, creusé dans des matériaux calcaires et des alluvions, mais bordé aussi de régions marécageuses; l'Untersee (Allemagne et Suisse) lac peu profond, molassique. Nous y avons fait allusion déjà dans un précédent travail: Sollberger (1960).

Les auteurs qui nous ont précédé ont basé leurs comparaisons morphométriques sur l'ouvrage de Halbfax (1922). Ce dernier répertoire se trouve actuellement dépassé largement tant par le petit nombre que par l'insuffisance des renseignements qu'il donne. Aussi l'avons-nous abandonné pour ne garder que les deux listes suivantes, plus complètes et plus modernes :

Anonyme (1960), liste de 44 nappes d'eau naturelles de plus de 50 km² de superficie, parue dans Gaa- und Wasserfach, vol.101, et qui englobe le monde entier.

Sollberger (1963), liste de 28 nappes d'eau naturelles suisses de plus de 1 km² de superficie, en cours de publication.

2.4. Aperçu de géographie économique.

2.4.1. L'eau tirée du lac.

Pour alimenter une partie de la population riverains, de l'eau est pompée au lac, aussi bien pour l'alimentation humaine que pour l'arrosage, la pisciculture, etc.

Nous ne nous arrêterons qu'à la première catégorie d'eau qui est prélevée en permanence par 7 stations de pompage (4 sur la rive

gauche, 3 sur la rive droite) et rendue potable, en majeure partie, par traitement bactéricide. La seconde catégorie est moins importante (piéculture de la Saunerie, près d'Anvernier, par exemple) ou seulement temporaire (arrosage des vignes proches du lac, piscine publique de Red Fish, à Neuchâtel, par exemple).

TABLERAU III.

Pompage de l'eau potable dans le lac de Neuchâtel.

Station	Canton	Mise en service	Profondeur de la crépine	Distance à la rive	Alimentation	
					Réseau	Population
Champ Bougin	NE	1947	33 m	420 m	Neuchâtel*	34468**
Les Balises	NE	1922	42	600	Bevaix	1394
Saint-Aubin	NE	1904	33	480	St-Aubin-Sauges	1494
Grandson	VD	1945	32	480	Grandson	2091
					Yverdon	16338
Cudrefin	VD	1946	31	610	Cudrefin	584
Chevroux	VD	1937	25	1170	Chevroux	303
Estavayer	FR	1956	34	1440	Estavayer-Le-Lac	2583
Total au 31.12.1960 ;						59255

* y comprise la Côteière et les Geneveys s/C. susceptibles d'être alimentées temporairement.

** au 31 décembre 1960.

La quantité d'eau pompée varie d'une année à l'autre et dépend de la sécheresse dont les effets doivent être compensés par l'appoint que l'eau du lac fournit aux communes.

TABLERAU IV.

Eau de consommation publique pompée au lac de Neuchâtel de 1957 à 1961.

Quantités exprimées en m³.

	1957	1958	1959	1960	1961	Moyenne
Champ Bougin	240*000	162*400	1*641*280	429*563	992*079	693*064
Les Balises	129*640	128*540	155*690	109*794	169*734	138*680
Saint-Aubin	117*000	150*000	365*000	690*000	530*000	370*400
Grandson	1*613*310	1*716*700	1*884*190	2*044*140	2*515*140	1*954*702
Cudrefin	3*500	3*500	3*500	3*500	3*500	3*500
Chevroux	15*089	17*582	16*900	14*520	14*200	15*658
Estavayer	500*000	500*000	516*463	526*398	528*318	514*236
Total	2*618*539	2*678*722	4*583*023	3*817*915	4*753*001	3*690*240
Hauteur en cm	1,2	1,3	2,1	1,8	2,2	1,7

La quantité d'eau pompée annuellement, étalée uniformément à la surface du lac à son niveau normal, représenterait une couche dont la puissance est mentionnée au bas du tableau sous la rubrique : "Hauteur en cm".

2.4.2. La pêche dans le lac.

A l'aide des renseignements annuels fournis par l'inspection de la pêche (1961) du canton de Neuchâtel, on établit le tableau suivant pour l'ensemble du lac durant la période qui nous intéresse :

TABLEAU V.
(cf. page suivante)

TABLEAU V.

Rendement de la pêche, en kg de poisson, pour la période 1957-1961

	1957	1958	1959	1960	1961	1957 - 1961	
						Total	Moyenne
Palée	97'384	108'859	78'355	54'676	56'556	395'830	79'168
Bondelle	248'478	287'434	298'524	202'664	154'318	1'191'418	238'284
Truite	7'390	6'868	11'222	9'070	14'440	48'990	9'798
Ombre	381	367	699	58	1'531	3'036	607
Percha	65'542	99'722	90'455	107'138	59'974	422'831	84'566
Lotte	1'176	356	195	1'378	2'863	5'968	1'194
Brochet	8'823	5'836	7'209	4'303	8'496	34'667	6'933
Vengeron	43'193	40'575	46'953	55'142	58'967	244'830	48'966
Carpe	956	864	620	413	1'514	4'367	873
Brème, Platelle	12'033	4'855	6'184	7'286	9'947	40'305	8'061
Tanche, Notengle	1'048	449	410	416	550	2'873	575
Haas	21	18	47	57	3	146	29
Chevaline	13	3	61	0	11	88	18
Anguille	91	7	21	3	10	132	26
Ombre	0	2	0	0	25	27	5
Silure	71	185	55	37	117	465	93
Barbeau	13	3	4	0	1'355	1'375	275
Total	486'613	556'403	541'014	442'641	370'677	2'397'348	479'469

Les quantités pêchées de 1957 à 1961 et indiquées par années dans ce tableau sont tirées des publications de l'Inspection de la pêche du canton de Neuchâtel (1943-1961).

Classé par catégories de poissons, le rendement de la pêche annuelle donne alors le tableau VI.

TABLEAU VI.

Rendement de la pêche par catégories, pour la période 1957-1961

Catégories	1957	1958	1959	1960	1961	1957-1961
Corégones	71,0	71,2	69,7	58,1	56,9	66,2
Autres Salmonides	1,6	1,3	2,2	2,0	4,3	2,2
Bruchet	1,8	1,1	1,3	1,0	2,3	1,5
Perche	13,5	17,9	16,7	24,2	16,2	17,6
Gardons et appa- rentés	8,9	7,3	8,7	12,5	15,9	10,2
Divers	3,2	1,2	1,4	2,2	4,4	2,3
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Les rendements sont exprimés en pour-cent de la pêche totale.

Pour les commentaires piscicoles concernant cette période, nous prions le lecteur de consulter la publication qui vient d'être mentionnée. Nous aurons l'occasion de revenir ultérieurement au tableau VI et d'examiner la corrélation des chiffres qu'il contient avec les manifestations de la pollution du lac.

3. Morphologie.

En plus des mesures que nous effectuons sur le terrain, nous tirons la majorité des renseignements qui suivent de nos propres travaux de dépouillement des ouvrages suivants : Annuaire hydrographique de la Suisse (1957 à 1961), Bräm, Sartory et Rindliebacher (1920), Annales officielles des cantons de Neuchâtel, Vaud, Fribourg et Berne (1961), CN. (1957) au 1:25000, Carte de France, levés réguliers au 1:20000.

3.1. Le lac proprement dit.

Les caractéristiques morphométriques du lac sont rassemblées en un

TABLEAU VII
(cf. page suivante)

TABLÉAU VII. 3)

Morphométrie du lac de Neuchâtel

A	Superficie	214,6 km ²
	Altitude moyenne	429,31 m
L	Longueur	38,30 km
b	Largeur maximum	8,12 km
$\bar{b}$	Largeur moyenne	5,68 km
z_m	Profondeur maximum	153 m
$\bar{z}$	Profondeur moyenne	64,2 m
z_g	Profondeur au centre de figure	93 m
z_r	Profondeur relative	0,93 ‰
	Rapport profond. moy./profond.max.,. . . .	41,8 ‰
	Creux (selon Delebeque)	10,44
V	Volume	13,77 km ³
D_v	Développement du volume	1,25
L	Périmètre	96,6 km
D_L	Développement des rives	1,86
	Débit moyen de l'effluent	53,1 m ³ /s
	Séjour moyen de l'eau dans le lac	8 ans 82j.
	Insularité	0
	Déclinaison de l'axe	52 ° E
	Pente sous-lacustre maximum	600 o/oo
	Pente sous-lacustre minimum	1,80 o/oo
	Pente sous-lacustre moyenne à s_m	64 o/oo

$$z_r = 50 z_m \sqrt{A}^{-1}$$

$$D_L = \frac{L}{1,77 A}$$

auquel quelques précisions doivent être ajoutées cependant.

Superficie

Quartier (1948 b, p. 23) indique deux valeurs pour le niveau moyen : 217,2 et 215,78 km². La moyenne de nos trois planimétrages exécutés avec soin, sur la CH.1957 et au planimètre Aneler, nous a donné :

221,14 km² à la limite de la terre ferme et 214,57 km² pour l'eau libre.

3) Dans ce tableau, les symboles sont conformes à la "List of Symbols" parue dans Hutchinson (1957) et considérée comme norme internationale.

Les roseaux et terrains marécageux bordant le lac représentent les 6,57 km² de différence, soit le 3,06 % de la superficie d'eau libre. Nous laissons de côté, pour le présent travail, cette zone bordière qui constitue à elle seule un biotope suffisamment spécial pour pouvoir donner lieu à des recherches sortant du cadre des nôtres.

Par ses 214,6 km² que nous considérons dorénavant comme superficie du lac de Neuchâtel, celui-ci reste le plus grand des lacs entièrement suisses et se place entre le Bodan/Obersee (477,0 km²) et le Lago Maggiore (211,6 km²).

Longueur

Les 38,30 km sont mesurés entre l'embouchure du Muzon à Yverdon et la plage du Fanal au Tannenholz. Pour la longueur, Neuchâtel est situé entre Zurich (total) (39,5 km) et le Carasice (35 km).

Largeur maximum

Le plus près possible de la perpendiculaire à son grand axe, notre lac mesure 8,12 km entre Auvernier (Station d'essais viticoles) et Portolban (plage du "Canada"). Cela le place entre le Lago Maggiore (9,5 km) et l'Untersee (6,0 km).

Largeur moyenne

Quotient de la superficie par la longueur, elle classe le lac (5,68 km) entre le Bodan/Obersee (7,51 km) et l'Untersee (3,10 km).

Profondeur maximum

Elle est située à 2,3 km au S de la Pointe du Grain, dans une légère dépression de moins d'un km². Par une vingtaine de sondages, nous avons vérifié les données de la carte: 153 m à niveau moyen, ce qui rapproche Neuchâtel des lacs de Walenstadt (151 m), d'Orta (147 m) et du Bourget (145 m).

Profondeur moyenne

Notion introduite en 1928 par Thienemann (Ruttner, 1931), elle est le quotient du volume par la superficie et très importante pour la thermique du lac. Delebecque (1898) a montré en effet que la quantité totale de chaleur emmagasinée varie d'autant moins que la profondeur moyenne est plus grande. Avec 64,2 m, Neuchâtel se classe entre Poschiavo (56 m) et Orta (71 m).

Centre de figure

Ce point est situé sur le plateau prolongeant la Motta au SW, à 1,2 km à l'E. de la profondeur maximum.

Rapport profondeur moyenne : profondeur maximum

Plus la valeur de ce rapport est grande, plus la conicité du lac est parfaite. Cette notion, introduite par Naumann (1931), conduit à la valeur 0,418 pour Neuchâtel, ce qui le place entre Hallwil (0,426) et Zoug (0,415). Rappelons que les maxima suisses sont 0,682 pour Walenstadt

et 0,667 pour Brienz; toutefois, la formule est inapplicable aux formes tortueuses telles que celles du lac des 4 Cantons ou du Ceresio.

Dans le monde, la majorité des lacs présentent pour ce rapport, des valeurs comprises entre 0,33 et 0,50.

Creux du lac

Dans l'idée de Delebeoque (1898), "un lac est d'autant plus creux que sa profondeur maximum est plus grande par rapport à sa superficie" on encore : "que le rapport de la profondeur maximum à la racine carrée de sa superficie est plus grand". Avec 1:95,75, Neuchâtel est situé entre le Greifensee (1:88,72) et Morat (1:104,0).

Profondeur relative

Paramètre intéressant selon Hutchinson (1957), elle exprime la profondeur maximum en pour-cent du diamètre moyen ou, ce qui revient au même, du diamètre d'un cercle de même superficie que le lac⁴⁾; Neuchâtel, avec 0,93 % se situe alors entre le Greifensee (1,00 %) et Morat (0,85 %).

Volume

En débitant le lac en tranches horizontales de 10 m d'épaisseur (de 4 et 5 m entre les cotes 420 et 429), nos planimétrages des surfaces limitant ces tranches ont permis de calculer les volumes partiels dont le total atteint 13,771 km³, ce qui place Neuchâtel entre le Lago Maggiore (14,5 km³) et le lac de Thoun (6,5 km³).

Développement du volume

Aussi appelé "découpage du volume", c'est le rapport du volume du lac à celui d'un cône droit de base égale à la surface du lac et de hauteur égale à la profondeur maximum. La valeur obtenue pour Neuchâtel (1,25) est très proche de celles de Bienne (1,24) et de Hallwil (1,28).

Périmètre

Avec 96,6 km, notre lac se classe entre les Quatre Cantons (133 km) et Zurich (total) (93 km).

Quant à leur formation les rives se répartissent en : rives artificielles: 22 km (22,7%) et rives naturelles: 75 km (77,3%). La forêt arrive jusqu'au bord du lac pour 61,4% des rives naturelles, soit 47,4% du périmètre total. Le long des rives 51 km (52,6% du total) sont occupés par des roseaux, dont 29 km (29,9%) du périmètre du lac, bordés par la forêt.

Pour la répartition géologique des rives, nous renvoyons à notre travail précédent : Sollberger (1960).

Du point de vue politique démographique, le périmètre se répartit à raison de 40 km (41%) pour Vaud, 33 km (34%) pour Neuchâtel, 20 km (21%) pour Fribourg et 4 km (4%) pour Berne.

4) La formule relative à ce calcul se trouve au bas du tableau VII.

Développement des rives

Aussi appelé coefficient de découpage des côtes, ce rapport est celui du périmètre du lac à la circonférence d'un cercle de même superficie. Suivant Thienemann (1925)⁵⁾, on obtient le coefficient 1,86 pour Neuchâtel, soit une valeur comprise entre le Klöntalersee (1,83) et le Léman (1,95). Signalons qu'à ce point de vue le Chiemsee (1,89) est très semblable à Neuchâtel.

Débit moyen de l'effluent

De 26 ans d'observations, le Service Fédéral des eaux tire la moyenne de 53,1 m³ par sec. pour l'émissaire du lac de Neuchâtel (canal de la Thièle), ce qui rapproche ce dernier du canal de la Linth (émissaire de Walenstadt): 57,0 m³/sec et du débit moyen de la Alz (émissaire du Chiemsee): 47 m³/sec.

Séjour moyen de l'eau dans le lac

Déduits de la précédente, selon Delebesque (1898), cette valeur (quotient du volume par le débit moyen de l'émissaire) renseigne sur le temps théoriquement nécessaire au renouvellement complet de l'eau. Avec 8 ans et 82 jours pour Neuchâtel, on est placé entre le lac de Hallwil (6 ans) et le Léman (11 ans et 237 jours).

Déclinaison de l'axe du lac

C'est l'angle du grand axe, pris dans le sens d'écoulement du lac, avec le méridien du centre de figure. Avec 52° E, Neuchâtel peut être considéré comme parallèle aux lacs de Moret, Bienne, Joux et des Rousses.

3.2. Le bassin d'alimentation du lac.

Le Service fédéral des eaux, par le truchement de l'Annuaire hydrographique de la Suisse, a quelque peu modifié déjà les valeurs données par Bräm, Sartory et Rindlisbacher (1920) pour le bassin de réception du lac. Bien que Quartier (1948 b) ait consacré un chapitre à la description de ce bassin, et pour les raisons énumérées au paragraphe 1 ci-dessus, nous avons estimé nécessaire de grouper les caractéristiques morphométriques de ce bassin en un

TABLEAU VIII

en y ajoutant quelques commentaires que nous jugeons indispensables.

5) cf. note No. 4).

TABLEAU VIII

Morphométrie du bassin du lac de Neuchâtel

Superficie totale	2672	km ²
Altitude maximum	1680	m
Altitude minimum	429	m
Altitude moyenne	780	m
Ecart altitudinaire	1251	m
Distance horizontale entre les extrêmes	33	km
Glaciation	0	
Longueur	111	km
Largeur maximum	58,5	km
Largeur moyenne	24,1	km
Superficie du bassin sans le lac	2457	km ²
Rapport superficie du lac / superficie précédente .	8,7	%
Surfaces lacustres du bassin: lac des Rousses . . .	0,9	km ²
lac de Joux	8,7	km ²
lac Brézet	0,8	km ²
lac des Taillères	0,3	km ²
lac de Neuchâtel	214,6	km ²
lac de Morat	22,9	km ²
Total des 6 lacs	248,2	km ²
Population totale du bassin (31 déc.1960)	245000	hab.
Population riveraine du lac de Neuchâtel (31.12.60)	80200	hab.
Population alimentée en eau du lac de Neuchâtel . .	59200	hab.
Répartition des superficies du bassin total :		
lacs 248,2 km ²	9,2	%
rochers 9,7 km ²	0,4	%
forêts 774,9 km ²	29,0	%
autres terrains 1639 km ²	61,4	%

Surface totale: 2672 km². C'est la valeur la plus récente admise par le Service fédéral des eaux. Cette valeur, sensiblement égale à la moitié de celle du Balaton (5148 km²), place Neuchâtel entre le Lago Maggiore (6598 km²) et le lac de Thoune (2490 km²).

De cette surface, 9,2 % sont occupés par 6 lacs dont la superficie des bassins de réception représente 36,95 % de celle du bassin de Neuchâtel.

TABLEAU IX

Nappes d'eau situées dans le bassin de réception du lac de Neuchâtel.

Lac	Bassin de réception km ²	Proportion du bassin de Neuchâtel, en %	Référence se rapportant à la publication la plus récente.
des Rousses	20,32	0,76	Delebecque (1898)
de Jour	201,38	7,5	Bosset (1962)
Branet	210,53	7,8	Bosset (1962)
des Taillères	83,18	3,1	Perret (1925)
de Morat	695,52	26,0	Rivier (1936)
Loclat	1,28	0,05	Baer (1962)

Dimensions : la longueur maximum (111 km) se mesure du fort des Rousses à Bârgen; la largeur maximum (58,5 km) de l'Harmont à un point sis au S d'Attalens; la largeur moyenne, quotient de la surface par la longueur totale, est de 24,1 km, le périmètre de 380 km.

Altitudes : le point culminant, le Mont Tendre, 1680 m est séparé de la cote la plus basse, le lac de Neuchâtel 429 m, par un écart altitudinaire de 1251 m, ce qui place le bassin entre celui de Zoug (1383 m) et celui d'Aegeri (1073 m). La distance minimum pour cet écart est de 33 km pour Neuchâtel, comprise entre celle du bassin des Quatre Cantons (31 km) et celle de Thoune (27 km). L'écart entre l'altitude moyenne du bassin et celle du lac est pour nous de 351 m, valeur comprise entre Lugano (529 m) et Zoug (276 m).

Centre de figure : il se trouve sur la plage d'Yvonand, à 1,2 km à l'W de l'embouchure de la Mentus.

3.3. Le relief submergé du lac et la Motte.

Géographiquement, les trois lacs jurassiens présentent une analogie due : à l'île de St-Pierre dans le lac de Bienns, à la Motte dans celui de Neuchâtel et à la dorsale signalée par Quartier (1957 a) pour Morat. Toutefois, dans le lac relativement peu profond qu'est le nôtre, l'influence d'une colline telle que la Motte, bien que n'émergeant jamais mais culminant très près de la surface, est grande sur le biotope et les courants qui l'animent. Le lac de Neuchâtel est de ce fait, un cas spécial parmi les lacs suisses.

Rappelons que, selon la description faite par Quartier (1948 b), la Motte constitue un relèvement à l'extrémité NE du plateau incliné

bordant la rive droite du lac, entre Yvonand et Portalban. Topographiquement, ce relèvement ressemble beaucoup au Vully. Nous désignerons dorénavant par le terme "la Motte" la partie terminale de la colline seulement, telle qu'elle se détache au-dessus de la cote 370.

La base de la Motte, à 60 m de profondeur environ, mesure 6,9 km SW (au droit de la Pointe du Grain) au NE (au droit de Serrrières) selon un grand axe de décolinaison 45° E. Transversalement à ce dernier, la largeur est de 1,2 km au maximum, alors que le périmètre atteint 13,2 km.

Le sommet de la Motte, plateau sensiblement horizontal est situé à 9 m de profondeur moyenne en eaux normales. Allongé dans la même direction que la base, ses dimensions sont : superficie : 0,62 km², longueur : 1,9 km, largeur maximum : 0,5 km ; périmètre : 4,3 km. On considère comme sommet un point placé à 6,2 km au SSW du port de Neuchâtel, ou à 2,7 km à l'ESE de l'embouchure de l'Arense, à une profondeur qui peut varier de E à 11 m suivant le niveau du lac.

Protubérance allongée parallèlement à la vallée la plus profonde du lac, la Motte, dont le volume de 0,125 km³ (pris au-dessus de la cote 370) représente 0,91 % de celui du lac, ne divise pas, à proprement parler, ce lac en bassins aussi bien séparés les uns des autres que le ferait un isthme submergé véritable ou une presqu'île. Nous estimons cependant que la Motte constitue tout de même un obstacle important sur le trajet des courants sous-lacustres et, de ce fait, entrave aussi les échanges physico-chimiques de l'eau ; c'est pourquoi sa présence permet de subdiviser le relief immergé du lac en 4 parties correspondant à celles mentionnées déjà précédemment : Sollberger (1960).

Ces subdivisions que nous utiliserons au cours de nos recherches, sont :

- 1) le bassin de Neuchâtel (au NW, N et NE de la Motte), composé de 2 parties distinctes : le bas-lac, extrémité aval peu profonde, de 19 km², à l'E de la ligne Hauterive-Cudrefin, ne dépassant jamais 10 m de profondeur, la cuvette de Neuchâtel, inscrite dans le triangle Neuchâtel-Cudrefin-embouchure de l'Arense, à fonds de plus de 100 m.
- 2) la vallée nord (au NW, à l'W et au SW de la Motte), remontant le long de la rive gauche, de l'embouchure de l'Arense au droit d'Yvonand, avec 4 petites dépressions du thalweg dont celle qui correspond à la profondeur maximum du lac.
- 3) la région sud (au SE, S et SW de la Motte) composée d'une vallée remontant en pente douce : de la cuvette de Neuchâtel à Chevroux et d'un plateau s'étalant le long de la rive droite de Chevroux à Yvonand.
- 4) le haut-lac (ou petit lac ou encore lac d'Yverdon) partie rétrécie d'Yvonand à Yverdon.

Les pentcs submergées les plus caractéristiques et dont nous avons déterminé l'inclinaison au moyen de la CN.1957 et entre courbes de niveau, sont les suivantes :

devant Cortailled, à 575 m de la rive, entre les cotes 350 et 320 (80 à 100 m. de profondeur) : 600 o/oo (maximum),

devant la Bied (face E du delta de l'Areuse), à 60 m de la rive, entre 4 et 45 m de profondeur : 562 o/oo,

sur la face N de la Motte, entre 40 et 90 m de profondeur : 555 o/oo, à l'embouchure de l'Areuse et devant Corcelles près Concise : 400 o/oo

dans la baie d'Yvonand et à la Pointe de Marin : 3,6 o/oo en moyenne,

dans la baie de St-Blaise : 2,9 o/oo en moyenne,

au droit du Lindenhof (rive aval du lac), depuis la rive jusqu'à 3 km au large, soit de 0 à 4 m de profondeur : 1,8 o/oo en moyenne.

Signalons enfin que la pente moyenne est de 63,5 o/oo entre le point de profondeur maximum et le rivage le plus proche (la Pointe du Grain).

TABLEAU X

Pentes sous-lacustres des trois lacs jurassiens

Lac	Pente maximum			Pente moyenne					
				minimum			à la profondeur max.		
	I	II	III	I	IV	III	I	IV	III
Neuchâtel	600	575	80-100	1,8	3000	0-4	63,5	2410	153
Bienne	375	60	10- 40	5,0	800	0-4	80,5	920	74
Morat	115	70	4- 19	5,7	780	0-4	40,9	1100	45

I = pente en o/oo ; II = distance de la rive, en m ; III = profondeur, en m ;
IV = longueur, en m.

Il résulte de nos calculs et de ce tableau, que les valeurs extrêmes des pentes se trouvent dans le lac de Neuchâtel; par contre, la pente moyenne de ce dernier est comprise entre celles de Bienne et de Morat.

Partant de nos planimétrages sur la CN.1957, nous construisons la courbe hypsométrique de chacun des trois lacs jurassiens (fig.3), en même temps que celle du Chiemsee d'après les surfaces calculées par

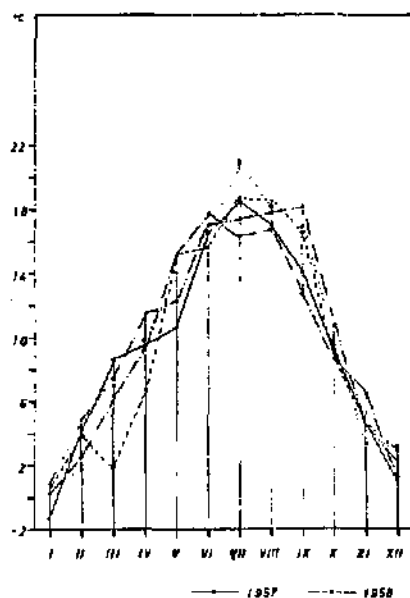
**COURBES HYPOMETRIQUES DES TROIS LACS JURAÏENS
ET DU CHIEMSEE**



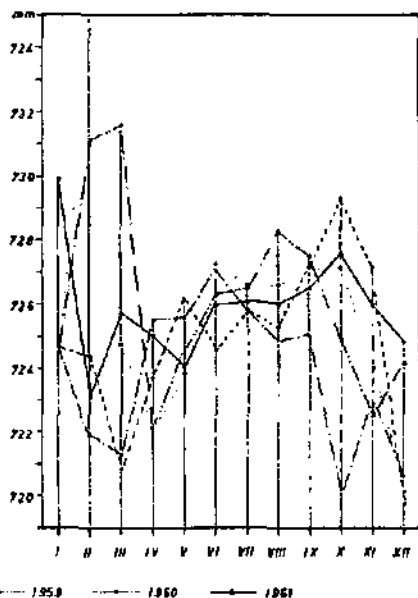
Fig. 4.

LAC DE NEUCHÂTEL MOYENNES METEOROLOGIQUES MENSUELLES PERIODE 1957-1961

TEMPERATURE DE L'AIR



PRESSION ATMOSPHERIQUE



© 1961 M. J. P. 1000

Wilhelm (1958, p. 36). La courbe obtenue pour Neuchâtel a la même allure générale que celle de Quartier (1948 b), mais les valeurs des surfaces entre courbes de niveau sont un peu différentes, même si l'on tient compte de la superficie totale du lac (221,4 km² avec les roseaux).

Nous en tirons le tableau suivant :

TABLERAU XI

Régions bathymétriques des trois lacs jurassiens et du Chiemsee.

Lac	R é g i o n s								
	littorale			des talus			profonde		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Neuchâtel	0-9	58,86	26,61	9-109	104,84	47,41	109-153	57,44	25,98
Bienne	0-4	8,73	21,98	4- 29	11,44	28,80	29- 75	19,55	49,22
Morat	0-4	3,60	15,83	4- 19	4,72	20,77	19- 46	14,39	63,40
Chiemsee	0-1	6,50	8,11	1- 13	14,97	18,69	13- 73	58,63	73,20

I = profondeur, en m ; II = superficie, en km² ; III = % de la superficie totale.

On voit, par ce tableau, que le lac de Neuchâtel est celui des quatre qui possède la plus grande zone littorale, s'écartant de 4 % seulement de celle de Bienne, alors que Morat et le Chiemsee sont très différents à ce point de vue. Neuchâtel a la plus grande proportion de talus en même temps que la plus faible de zone profonde et s'écarte alors très nettement des trois autres.

Chapitre deuxième : METEOROLOGIE. NIVEAU DU LAC. AFFLUENTS.

4. Météorologie.

4.1. Le climat.

Grâce à l'Observatoire de Neuchâtel, le climat de notre région est connu avec précision depuis de très nombreuses années.

Spinner (1933) l'a défini "climat pluvial subocéanique", montrant que les variations en sont dominées plus par la répartition des précipitations que par celle des vents.

Reprenant la question du point de vue thermique, Sandoz (1949) le caractérise comme climat tempéré subissant les influences alternantes du climat océanique et du climat continental, le lac tendant, toutefois, à égaliser l'effet de ces deux influences.

Si le lac subit les effets du climat, réciproquement il influence aussi celui-ci. On a voulu attribuer, dès lors, à la première correction des eaux du Jura, une influence prédominante sur des changements de climat consécutifs à ces travaux. En particulier, de Perrot (1929 a, 1930, 1931 et 1933) a prétendu voir, dans l'abaissement de 0,22 degrés de la moyenne des températures de l'air enregistrées à l'Observatoire depuis 1875, une conséquence de la première correction des eaux. Or, les recherches faites par Spinner, puis par Sandoz, citées ci-dessus, tendent à prouver le contraire, ce que confirme Jaquerod (1933) qui arrive à la conclusion que la différence de niveau des lacs jurassiens, consécutive à l'abaissement de 1875, constitue un facteur thermique absolument négligeable en comparaison des autres. Récemment encore, la question a été reprise par Guyot (1963) qui conclut au réchauffement du climat de Neuchâtel depuis 1864, surtout en hiver.

Après avoir rappelé ces considérations générales, et en nous gardant de rouvrir la discussion sur ce sujet, nous nous bornons, pour mieux définir le climat de Neuchâtel, à grouper dans le tableau VII, quelques moyennes caractéristiques extraites des données météorologiques publiées par l'Observatoire de Neuchâtel (Schuler, 1962).

Pour d'autres détails, nous nous permettons de renvoyer le lecteur aux travaux de Guyot parus en 1943 (a et b), 1944, 1949, 1951, 1954 et 1963.

TABLÉAU XII

Moyennes de quelques caractéristiques météorologiques de Neuchâtel

Période 1901 - 1960

Mois	Température de l'air en degrés	Pression atmosphérique en mm *	Humidité relative en %	Précipitations à Neuchâtel en mm	Insolexion en heures **
Janvier	0,0	726,2	86	77	39
Février	1,0	725,0	81	67	78
Mars	4,9	723,9	75	66	148
Avril	8,8	723,4	71	64	179
Mai	13,4	724,4	71	79	210
Juin	16,6	725,8	71	96	232
Juillet	18,6	726,2	70	89	251
Août	18,0	726,1	72	104	226
Septembre	14,7	726,7	78	89	162
Octobre	9,2	725,7	84	78	101
Novembre	4,3	725,0	86	87	44
Décembre	1,3	725,0	87	84	29
Année	9,2	725,3	78	981	1699

Ces valeurs sont tirées de tableaux établis par l'Observatoire cantonal de Neuchâtel (Schuler 1962).

* valeurs ramenées au niveau du lac (429 m), alors que les données originales se rapportent à l'altitude de l'Observatoire (487 m).

** Période 1931 à 1960.

4.2. Le gel du lac.

Le lac de Neuchâtel est considéré depuis Forel (1892) comme lac de type tempéré. D'après les renseignements obtenus jusqu'ici, sa température en profondeur ne descend jamais au-dessous de 4°. Aussi les années où ce lac gèle sont-elles tout à fait exceptionnelles, au point que ce phénomène constitue un événement d'histoire locale.

Nous avons estimé intéressant d'établir la liste des dates connues auxquelles le lac de Neuchâtel a gelé entièrement. Cette liste n'est autre que le tableau XIII ci-après, élaboré grâce aux travaux

publiées par Cornaz (1870), Kopp (1858, 1861 a et 1861 o) et le D.G.S. (1902-1910).

TABLERAU XIII

Dates auxquelles la surface du lac de Neuchâtel a gelé entièrement

Année	Observations
1033	-
1296	En février et mars
1364	Jusqu'en mai
1407	De novembre 1406 à février 1407
1420	En janvier
1439	-
1469	"Au cours d'un hiver très froid !"
1491	Idem
1514	De novembre 1513 au 25 janvier 1514
1551	De 10 au 21 février
1565	De la fin de 1564 au début de 1565
1571	-
1573	En janvier
1624	Le 1er février
1695	Du 25 janvier au 28 février
1830	-
1880	De décembre 1879 au 19 février 1880.

Dans ce tableau ne figurent donc pas les dates, plus fréquentes, auxquelles seul le bas-lac a gelé.

4.3. Les caractères météorologiques des années 1957 à 1961.

Pour donner une idée générale des conditions météorologiques des 5 ans que couvre notre travail, nous empruntons à Schuler (1958 à 1962) les considérations suivantes :

1957 : année, quoique pas très anormale en moyenne, qui a connu des saisons assez déséquilibrées, aussi bien du point de vue de la température que de l'insolation et des précipitations;

- 1958 : année sans variations trop brusques ni écarts trop marqués, plutôt chaude, mais peu ensoleillée;
- 1959 : année chaude, bien ensoleillée, avare de précipitations;
- 1960 : année caractérisée par son manque d'insolation, un été froid et très pluvieux, ainsi que par le mauvais temps de tout son second semestre;
- 1961 : une des années les plus chaudes de toute la statistique météorologique de l'Observatoire de Neuchâtel, grâce à un avant-printemps et un automne chauds et bien ensoleillés.

TABIEAU XIV

Moyennes de quelques caractéristiques météorologiques
pour la période de 1957 à 1961 à Neuchâtel

Mois	Température de l'air en degrés	Pression atmosphérique en mm.	Humidité relative en %	Précipitations à Neuchâtel en mm	Insolation en heures décimales
Janvier	0,2	725,7	85	82	39,7
Février	3,5	727,1	81	88	84,9
Mars	6,4	724,8	73	45	152,0
Avril	9,4	723,7	68	56	157,6
Mai	13,5	724,9	67	55	201,7
Juin	16,8	726,3	71	104	204,4
Juillet	18,4	726,2	69	91	232,2
Août	17,7	726,2	72	103	223,7
Septembre	15,7	726,7	75	71	160,4
Octobre	9,4	725,8	83	72	93,8
Novembre	4,7	724,5	85	50	27,0
Décembre	2,2	721,9	85	87	34,4
Année	9,8	725,3	76	905	1611,6

Nous avons calculé les moyennes de ce tableau à l'aide des données publiées par l'Observatoire cantonal de Neuchâtel. Toutefois, les valeurs de la pression atmosphérique ont été corrigées pour les ramener au niveau du lac (429 m). Soulignons que la température moyenne de l'air sur laquelle l'Observatoire base les tableaux que nous

avons consultée est celle de 3 lectures quotidiennes à 7 h.30, 13 h.30 et 21 h.30, cette dernière étant doublée selon la formule :

$$t_{\text{moy}} = 1/4 [(7h30) + (13h30) + 2(21h30)]$$

Comparant les tableaux XII et XIV entre eux, on voit que la moyenne annuelle de la température de l'air, de 1957 à 1961, est plus élevée (+0,6°) que celle des 60 premières années du siècle. Par contre, le total annuel des précipitations à Neuchâtel, ainsi que l'insolation, accusent un déficit marqué par rapport à la période 1901-1960.

Les fig. 4 et 5 illustrent la variation des moyennes mensuelles se rapportant aux données du tableau XIV.

Considérons aussi les variations saisonnières de ces mêmes données météorologiques (fig. 6). On constate, d'une année à l'autre, des écarts capables d'influencer l'évolution du biotope lacustre.

Ainsi, en désignant par "moyennes" celles de la période 1901-1960, on constate que :

la température de l'air au printemps 1958 est plus basse que celle des autres printemps; en été 1959, elle est plus élevée que celle des autres étés; en été 1960, par contre, elle est la plus basse; la plus haute température d'automne, nettement supérieure à la "moyenne" est celle de 1961;

la pression atmosphérique de l'hiver 1957 est supérieure à celles des autres hivers, ainsi qu'à la "moyenne"; par contre, les hivers 1958 et 1960 (ce dernier surtout) enregistrent des valeurs au-dessous de la "moyenne"; c'est inverse pour le printemps 1961; les étés 1959 et 1961 sont au-dessus de la "moyenne", mais l'été 1958 au-dessous;

l'humidité relative de l'hiver 1959, de l'été 1959 et de l'automne 1961 sont toutes trois inférieures à la "moyenne", mais, en même temps, les plus basses de chacune de ces saisons;

les précipitations de l'hiver 1958 sont les plus élevées et celles de 1959 les plus faibles de tous les hivers; du printemps 1957 au printemps 1960, toutes les précipitations sont inférieures à la moyenne, celles de 1957 étant les plus faibles; en été 1958, 1959 et 1961, quantités inférieures à la "moyenne", 1959 étant la plus basse, alors que l'été 1960 bat le record d'abondance; les automnes présentent une situation tout à fait analogue à celle des étés;

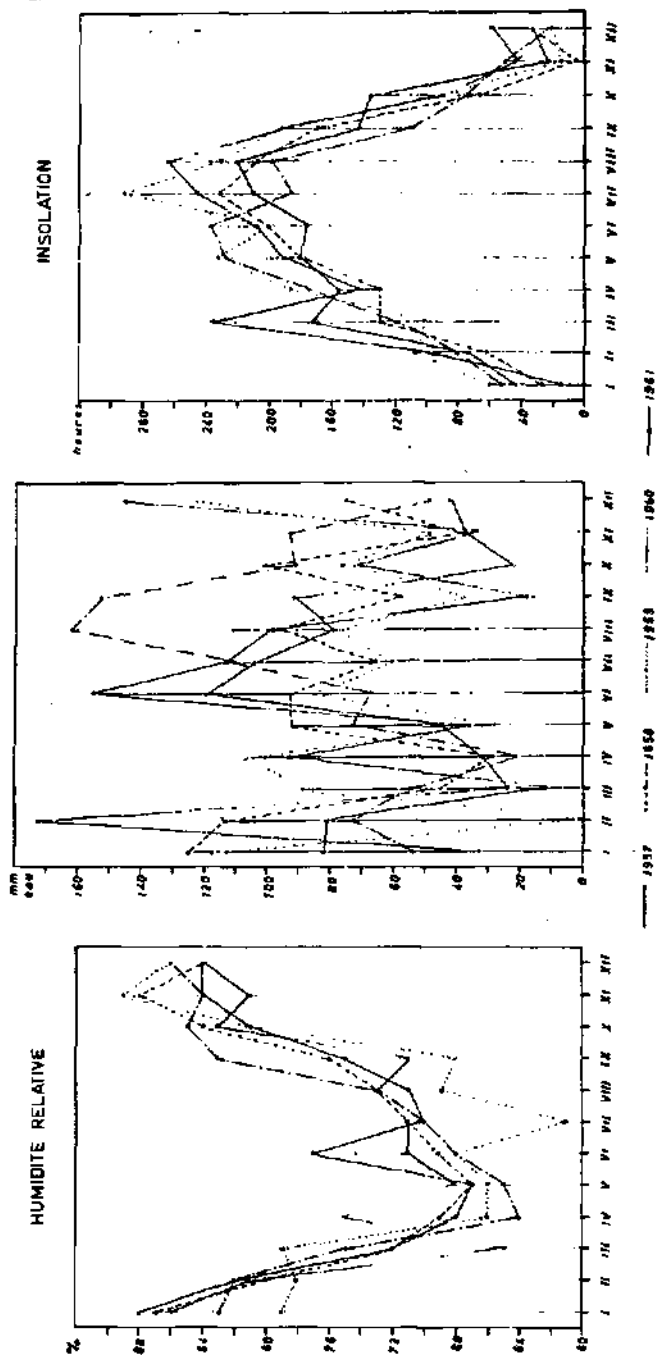
l'insolation du printemps 1958 est la plus faible des cinq; les étés 1957, 1958 et 1960 sont inférieurs à la "moyenne"; il en est de même des automnes 1958 et 1960.

Quartier (1948 b) a consacré la deuxième partie de son ouvrage à l'examen des précipitations du bassin du lac. Aux pages 62 et 63 de son travail, cet auteur arrive à la conclusion que les précipitations tombant sur le lac sont inférieures de 90 mm environ à celles enregistrées à Neuchâtel et que cette différence est plus ou moins constante

Fig 5

LAC DE NEUCHÂTEL MOYENNES MÉTÉOROLOGIQUES MENSUELLES PÉRIODE 1957-1961

PRÉCIPITATIONS À NEUCHÂTEL

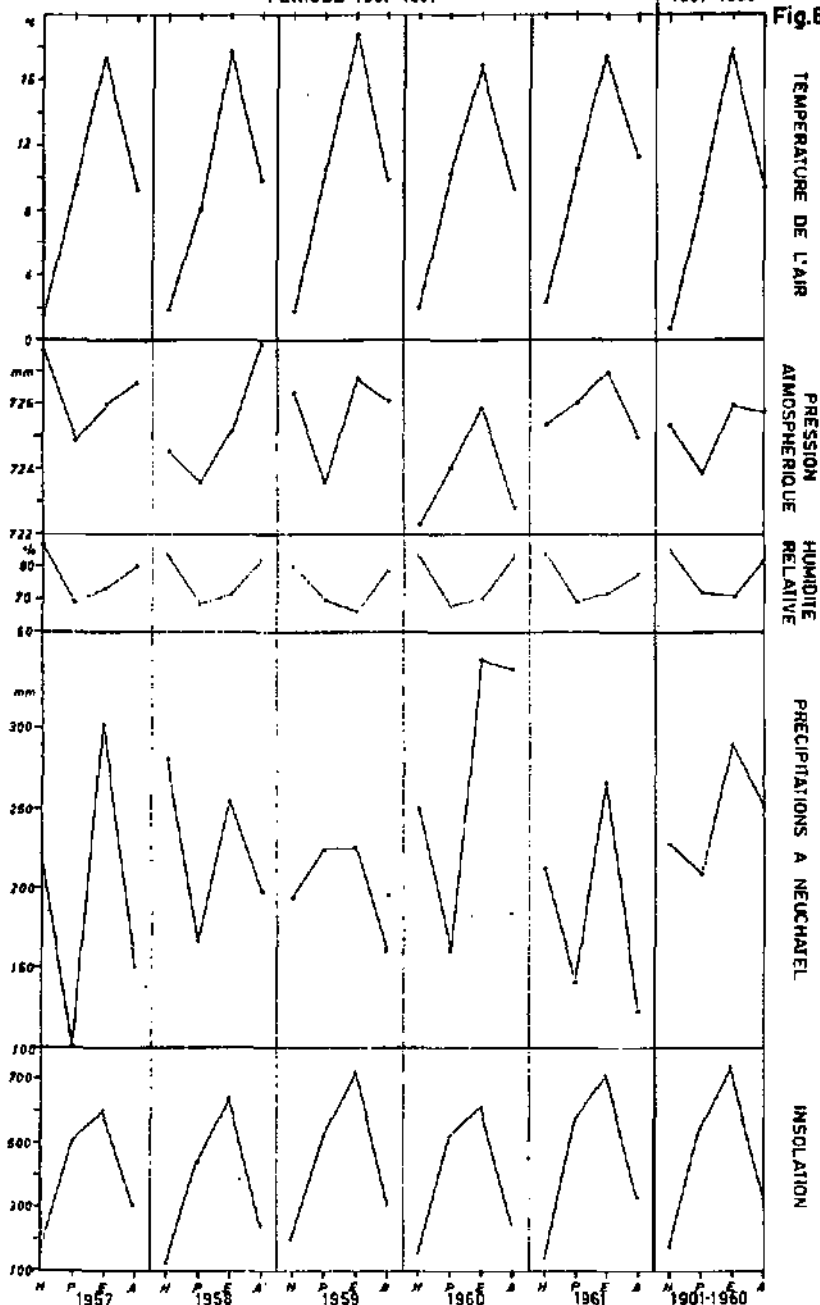


VARIATION SAISONNIERE DES MOYENNES METEOROLOGIQUES A NEUCHÂTEL

PERIODE 1957-1961

1901-1960

Fig.6



d'une année à l'autre. Dès lors, nous pouvons estimer les quantités d'eau tombées sur le lac à environ 710 mm pour 1957, 840 pour 1958, 760 pour 1959, 910 pour 1960 et 850 pour 1961, ce qui correspondrait à une moyenne de 815 pour la période de nos recherches, inférieure à celle (890 mm env.) de 1901 à 1960.

Nous admettons que les valeurs données par l'Observatoire de Neuchâtel pour la température moyenne de l'air, l'humidité relative et l'insolation sont valables pour le lac, étant donnée la proximité du site de cet observatoire.

Quant à la question du vent, nous l'examinerons dans la quatrième partie de notre travail.

5. Niveau du lac.

5.1. Les niveaux anciens.

Sans remonter aux âges géologiques ou à la période préhistorique, pour laquelle Ludi (1935) a donné un tableau des cotes atteintes par le lac de Neuchâtel, on constate qu'en plus des fluctuations dues tant à des phénomènes hydrauliques naturels que météorologiques, le niveau moyen a varié dans la période historique. Ce n'est cependant que depuis le début du 19^e siècle qu'on connaît avec exactitude les variations de niveau de cette nappe d'eau. Et encore a-t-il été difficile de raccorder ces données anciennes aux actuelles, du fait des erreurs découvertes dans le nivellement des bases de mesure. Quartier (1948 b) a exposé et discuté longuement ce problème dans la quatrième partie de son travail auquel nous renvoyons pour tout ce qui concerne la limnimétrie ancienne.

Dans le présent travail, toutes les cotes des niveaux sont rapportées à la même base altimétrique que la CN.1957, à savoir la Pierre du Niton à Genève, cote 373,609 (nouvelle valeur).

La première correction des eaux du Jura, de 1869 à 1888, a modifié considérablement le niveau moyen du lac, et nous admettrons que les niveaux anciens se rapportent à la période qui s'est terminée fin 1868.

Pour la période de 1817 à 1868, qui est celle au sujet de laquelle on possède des indications limnimétriques suivies, le niveau moyen a été de 432,07 m au-dessus de la mer, le maximum ayant été atteint à 433,35 m le 17 septembre 1831 (nous avons relevé le maximum absolu connu à 433,67 m le 8 janvier 1802) et le minimum à 431,06 m le 19 février 1858. Ces renseignements ont été tirés du travail de Chavaz (1953).

Quartier donne comme hausse maximum du lac en crue durant cette période : 24 cm par 24 heures.

Le régime naturel du lac avant la première correction correspondait à des hautes eaux au printemps (fonte des neiges) et à des basses

eaux en automne (cours d'eau à l'étiage). Cette correction a fait baisser le niveau moyen de 2,77 m (Neuchâtel a été plus touché par cette opération que ses voisins dont les abaisssements correspondants ont été de 2,10 m pour Morat et de 2,04 m pour Bienne).

5.2. Les limnigraphes actuels.

Pour mesurer le niveau du lac de Neuchâtel, le Service fédéral des eaux entretient actuellement deux limnigraphes distants l'un de l'autre de 30 km 250, placés tous deux sur la rive gauche, l'un au port de Neuchâtel depuis 1920 (son zéro est à la cote 419,995⁶) avec une échelle de 11,80 m) et l'autre sur le quai de Grandson depuis 1921 (zéro à 420,002⁶), échelle de 10,60 m). Chacun de ces instruments est bien protégé des vagues et celui de Neuchâtel, que nous avons observé tout particulièrement est insensible au va-et-vient des bateaux de tout tonnage dans le port.

Tout au long de nos travaux, nous avons relevé chaque jour à midi les indications du limnigraphe de Neuchâtel.

Désirant nous rendre compte des différences existant entre les enregistrements simultanés à Grandson et à Neuchâtel, nous en avons comparé 1104 résultats entre eux deux à deux, pour la période de mai 1957 à novembre 1958.

Les différences extrêmes de cette période sont : -4 cm les 26 mai 1957 et 12 avril 1958 d'une part, et +5 cm le 12 septembre 1957. Il s'agit toujours d'observations à midi (les mises à l'heure des tambours enregistreurs sont contrôlées) et le signe - indique que le niveau du lac est plus bas à Neuchâtel qu'à Grandson, le signe + marquant le phénomène inverse; le chiffre 0 désigne les jours où il n'y a aucune différence entre les deux limnimètres. Pour la période considérée, les différences entre Neuchâtel et Grandson ont été affectées du signe :

-	218 fois,	soit 39,4 % de la période
0	184 "	" 33,3 % "
+	151 "	" 27,3 % "

les maxima concernent décembre 1957 pour le signe - (90,3 % du mois), novembre 1958 pour le signe 0 (48,4 %) et mars 1958 pour le signe + (54,8 %).

Si l'on place, en regard de ces différences, les directions des vents dominants correspondant à chaque jour, on observe une corrélation remarquable entre les deux; c'est ainsi que lorsque le vent souffle du secteur NR à SE, les différences entre les limnigraphes sont affectées du signe -, tandis qu'elles le sont du signe + lorsque le vent souffle du secteur W à SW.

Comme il serait fastidieux de rapporter ici les observations de toute la période, nous en donnerons seulement les trois cas suivants :

6) valeurs de 1958, communiquées par le Service fédéral des eaux.

TABLEAU XV

Relations entre les différences de niveau régnant entre Neuchâtel et Grandson et la direction du vent dominant, en mai 1957.

Date	Diffé- rence cm	Vent	Date	Diffé- rence cm	Vent
1	-1	NE	16	0	Nul, puis fort du NW
2	-2	NE	17	+1	NW
3	-2	NE	18	-1	S à NW
4	-2	E	19	0	SW
5	-1	NW faible	20	0	NE faible
6	0	W faible	21	-1	S variable
7	-1	W à N, variable	22	-1	NE
8	-2	E	23	-1	S à SE
9	-2	SSE	24	-2	NE
10	-1	S à NW	25	-2	NE
11	0	SW se renforçant	26	-4	NE, maximum du mois
12	+2	SW	27	-3	NE
13	+1	SW	28	-3	NE
14	0	Nul	29	-2	NE
15	0	Nul	30	-1	N et orage
			31	-1	NNW faible et va- riable

Les indications concernant le vent proviennent des tableaux mensuels et des commentaires de l'Observatoire cantonal parus dans le Bull. Soc. neuch. sci. nat. (1958), ainsi que de nos observations personnelles.

On peut citer comme autre exemple les 7 jours entourant le maximum de la période suivante : septembre 1957 :

le 10	-1	vent faible et variable
11	+2	SW fort
12	+5	SW très fort, max. du mois
13	+2	SW
14	+3	W fort
15	+3	SW
16	+4	W

de même que les 7 jours ci-après :

avril 1958 :	le 11	-1	NE	le 15	-2	E
	12	-4	NE, maximum	16	-1	E
			du mois			
	13	-3	E	17	-1	N faible
	14	-2	E			

On voit par là que le vent, en poussant des masses d'eau vers les extrémités du lac crées, lorsqu'il souffle du secteur NE à SE, une montée des eaux à Grandson, et une descente à Neuchâtel, l'effet inverse lorsqu'il souffle du secteur W à SW. Le déséquilibre hydrostatique se manifeste quelques heures après le déclenchement du vent et se marque d'autant plus que le vent est plus fort et dure plus longtemps dans la même direction. La dénivellation a pu atteindre 5 cm par fort vent du SW; mais elle est la plus souvent de 1 cm, aussi bien dans un sens que dans l'autre, très fréquemment aussi de 2 cm. Dès que le vent tombe, l'équilibre normal tend à se rétablir. On va plus loin que des déséquilibres sont à l'origine de mouvements de l'eau, de seiches internes, de courants sous-lacustres, etc.

Il s'agit d'un phénomène analogue à celui signalé par Thomas (1949 b, 1950 a et 1951 a) au lac de Zurich, mais seulement après une tempête, avec, comme conséquence, un remue-ménage intense des couches profondes. Il semble bien, par contre, que dans le lac de Neuchâtel la dénivellation se marque toute l'année quand le vent souffle et qu'elle est de l'ordre de 1 à 2 cm pour une trentaine de km mesurés dans la longueur du lac.

5.3. Les niveaux actuels.

5.3.1. De 1889 à 1956.

Pour cette période, le maximum : 431,18 m a été atteint le 12 décembre 1944 et le minimum : 428,17 m le 10 novembre 1947; ces valeurs sont tirées de l'Annuaire hydrographique de la Suisse et l'écart absolu de cette période est donc de 3,01 m. Pour les années 1892 à 1951, Chavaz (1953) indique un niveau moyen de 429,31 m.

Rappelons qu'en règle générale, le régime depuis 1889 est devenu le suivant : hautes eaux en été, basses eaux en arrière-automne ou en hiver ou encore au début du printemps; mais de grandes crues peuvent avoir lieu en tout temps. N'oublions pas que ces fluctuations ne sont plus uniquement le fait d'un régime naturel, car, depuis 1889, le niveau des trois lacs jurassiens est tributaire en grande partie du barrage de Port, près de Nidau (sur le canal de l'Aar émissaire du lac de Bienne). En principe et en application de son règlement, ce barrage doit être complètement ouvert lorsque le lac de Neuchâtel dépasse la cote 429,64 m.

5.3.2. De 1957 à 1961.

Nos relevés indiquent que le maximum : 429,96 m a été atteint

LAC DE NEUCHÂTEL

1957

Fig. 7

NIVEAU DU LAC

Altitude en m.

429.00

428.50

428.00

427.50

427.00

426.50

426.00

425.50

425.00

424.50

424.00

423.50

423.00

422.50

422.00

421.50

421.00

420.50

420.00

419.50

419.00

418.50

418.00

417.50

417.00

416.50

416.00

415.50

415.00

414.50

414.00

413.50

413.00

412.50

412.00

411.50

411.00

410.50

410.00

409.50

409.00

408.50

408.00

407.50

407.00

406.50

406.00

405.50

405.00

404.50

404.00

403.50

403.00

402.50

402.00

401.50

401.00

400.50

400.00

399.50

399.00

398.50

398.00

397.50

397.00

396.50

396.00

395.50

395.00

394.50

394.00

393.50

393.00

392.50

392.00

391.50

391.00

390.50

390.00

389.50

389.00

388.50

388.00

387.50

387.00

386.50

386.00

385.50

385.00

384.50

384.00

383.50

383.00

382.50

382.00

381.50

381.00

380.50

380.00

379.50

379.00

378.50

378.00

377.50

377.00

376.50

376.00

375.50

375.00

374.50

374.00

373.50

373.00

372.50

372.00

371.50

371.00

370.50

370.00

369.50

369.00

368.50

368.00

367.50

367.00

366.50

366.00

365.50

365.00

364.50

364.00

363.50

363.00

362.50

362.00

361.50

361.00

360.50

360.00

359.50

359.00

358.50

358.00

357.50

357.00

356.50

356.00

355.50

355.00

354.50

354.00

353.50

353.00

352.50

352.00

351.50

351.00

350.50

350.00

349.50

349.00

348.50

348.00

347.50

347.00

346.50

346.00

345.50

345.00

344.50

344.00

343.50

343.00

342.50

342.00

341.50

341.00

340.50

340.00

339.50

339.00

338.50

338.00

337.50

337.00

336.50

336.00

335.50

335.00

334.50

334.00

333.50

333.00

332.50

332.00

331.50

331.00

330.50

330.00

329.50

329.00

328.50

328.00

327.50

327.00

326.50

326.00

325.50

325.00

324.50

324.00

323.50

323.00

322.50

322.00

321.50

321.00

320.50

320.00

319.50

319.00

318.50

318.00

317.50

317.00

316.50

316.00

315.50

315.00

314.50

314.00

313.50

313.00

312.50

312.00

311.50

311.00

310.50

310.00

309.50

309.00

308.50

308.00

307.50

307.00

306.50

306.00

305.50

305.00

304.50

304.00

303.50

303.00

302.50

302.00

301.50

301.00

300.50

300.00

299.50

299.00

298.50

298.00

297.50

297.00

296.50

296.00

295.50

295.00

294.50

294.00

293.50

293.00

292.50

292.00

291.50

291.00

290.50

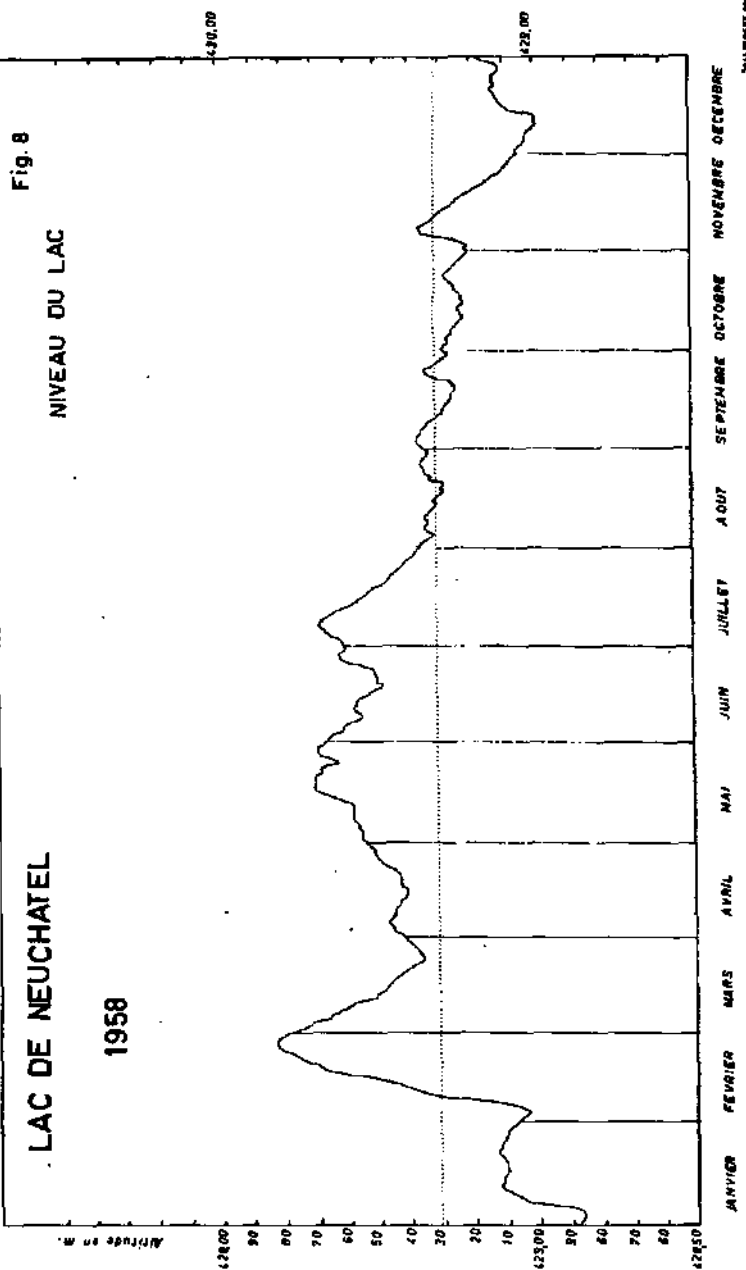
290.00

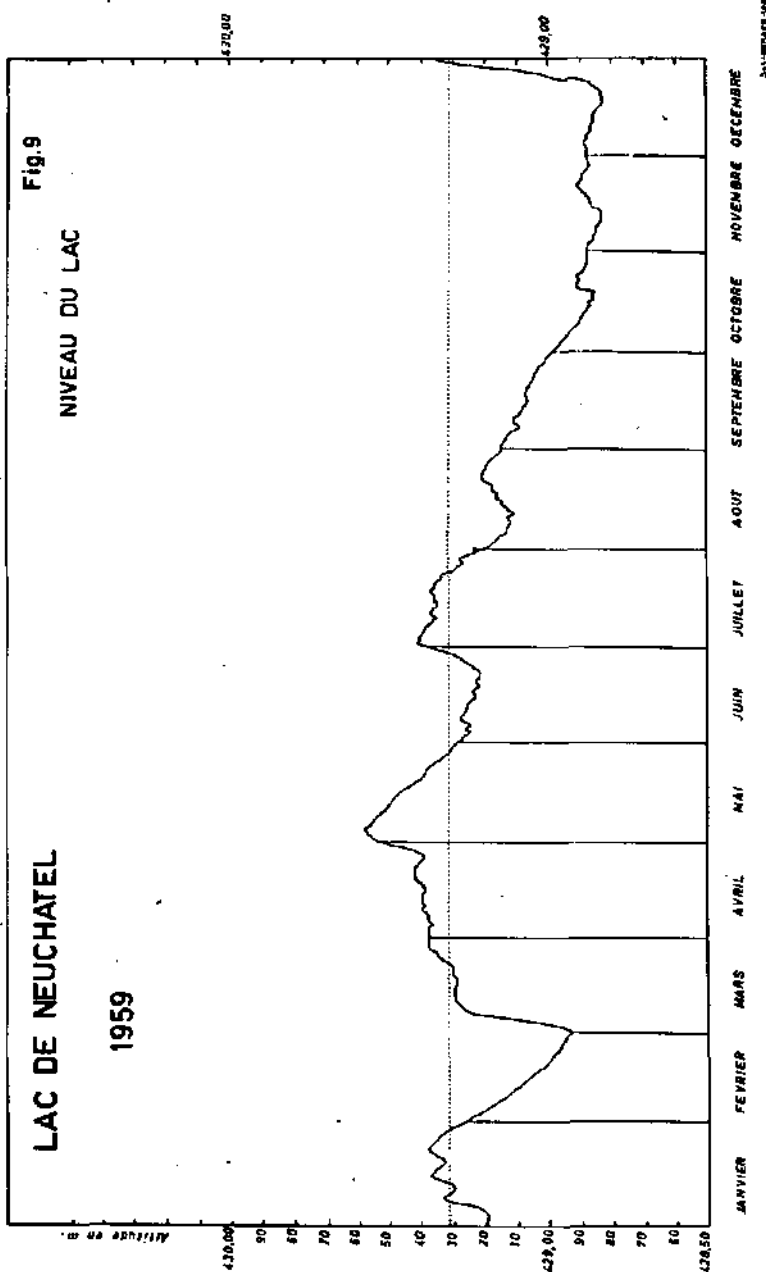
289.50

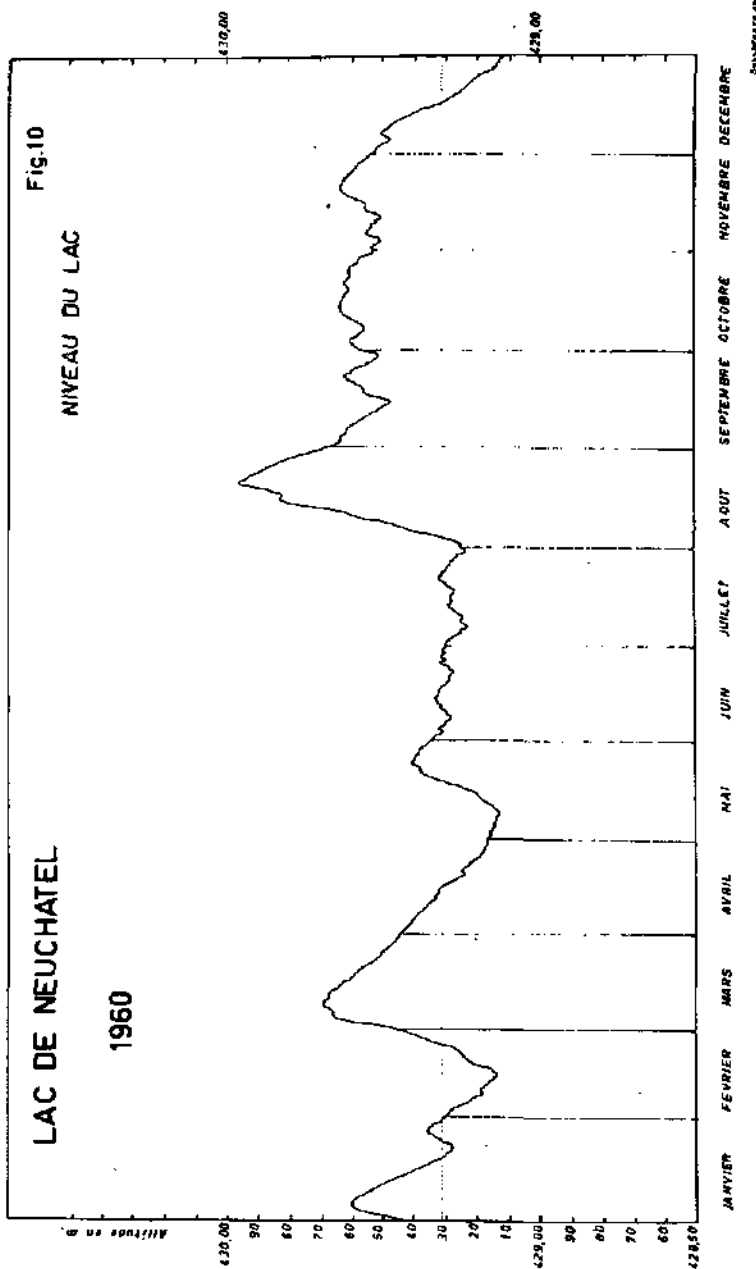
289.00

288.50

288.00







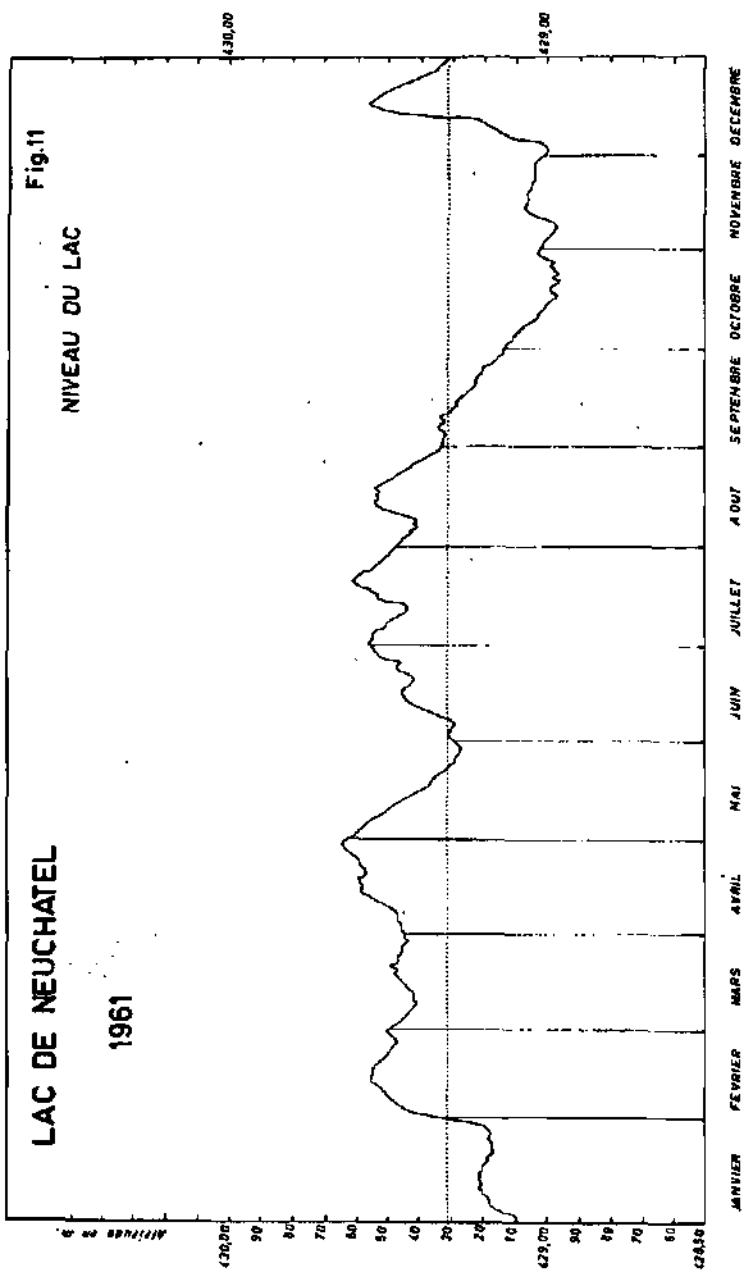
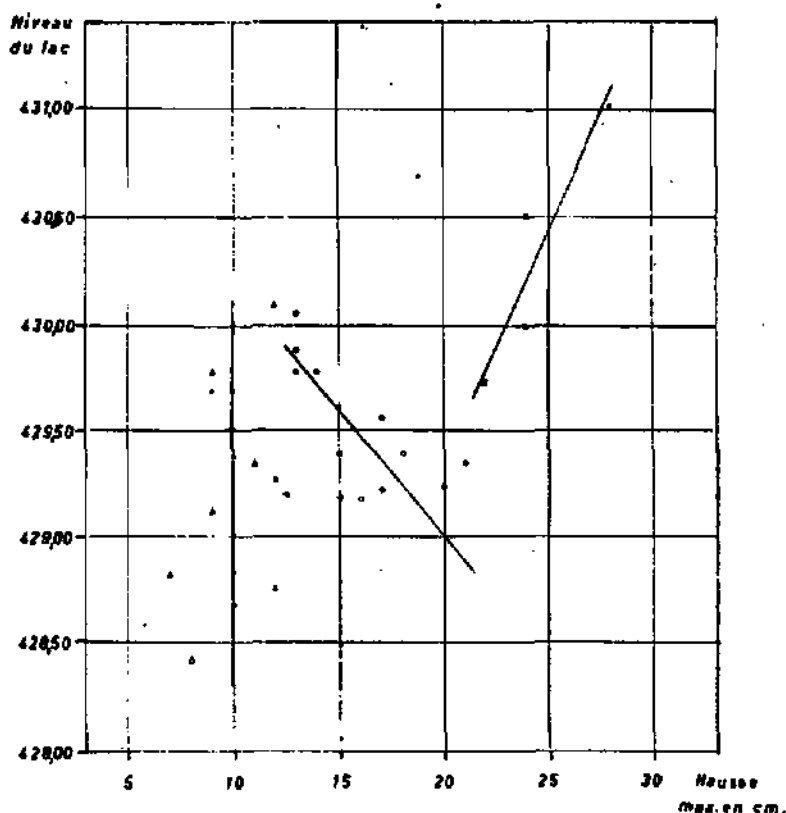


Fig.12

LAC DE NEUCHÂTEL CORRELATION ENTRE LES HAUSSES MAXIMA ANNUELLES ET LE NIVEAU DU LAC PERIODE 1930-1961



le 21 août 1960 (fig. 9) et le minimum : 428,83 m du 10 au 13 novembre ainsi que du 16 au 20 décembre 1959 (fig. 8). L'écart absolu de cette période est donc de 1,13 m. Nous avons calculé la moyenne de 1957 à 1961; elle est de 429,31 m, concordant de manière remarquable avec celle de 1892 à 1951. L'amplitude des écarts mensuels de niveau est de 25 mm en moyenne, avec des extrêmes de 7 cm en décembre 1957 et avril 1959, et de 97 mm en février 1957.

En faisant la statistique des niveaux atteints par le lac, nous avons classé les jours de chaque mois en trois catégories: ceux où le niveau est supérieur à la cote 429,31, ceux où il lui est égal et ceux où il est inférieur. C'est ainsi que nous avons constaté que, durant la période de 1957 à 1961, ce sont les mois d'octobre et de décembre qui ont, en moyenne, le plus grand nombre de jours où le niveau du lac est inférieur à 429,31; au contraire, mars et, en moyenne, le plus grand nombre de jours où ce niveau est supérieur à cette même cote.

On peut donc conclure de ces faits que la période 1957-1961 correspond à la règle générale du régime issu de la première correction des eaux du Jura en ce qui concerne les basses eaux, mais s'en écarte résolument en ce qui concerne les hautes eaux.

5.4. Les variations de niveau du lac.

Elles sont de deux sortes : celles de longue durée, relativement lentes et celles de courte durée, relativement rapides. Les premières sont dues essentiellement aux crues et décrues et s'inscrivent, sur le limnigraphe, sous forme de courbes régulières; les secondes, dues aux fluctuations de la pression atmosphérique, aux seiches, etc., s'inscrivent sous forme de courbes irrégulières et zigzagantes.

5.4.1. Crues et décrues.

En classant les jours de la période 1957-1961 en trois catégories; ceux durant lesquels le lac est en crue, ceux où il est stable et ceux correspondant à la décrue, nous constatons qu'en moyenne le niveau du lac a été : stable 7 jours par mois, en crue 8 et en décrue 15 jours par mois. Cette proportion de la crue par rapport à la décrue correspond à un étalement de ces dernières sur un plus grand nombre de jours que les premières, ce qui concorde avec l'aspect asymétrique des courbes de variation du niveau du lac (fig. 7 à 11). Le mois le plus stable à cet égard est celui de décembre 1957 avec 16 jours sans changement de niveau et le plus variable celui de février 1959 où tous les jours ont été en décrue.

Il nous a paru intéressant de voir avec quelle rapidité les crues se produisent chaque année. Pour cela, nous avons dressé le tableau suivant :

TABLÉAU XVI

Hausse maximum du niveau du lac en 24 heures. Période 1930-1961

Année	Date	Hausse (cm)	Cote de départ	Année	Date	Hausse (cm)	Cote de départ
1930	14-15.V	15	429,61	1946	6- 7.IX	22	429,73
1931	4- 5.II	17	429,22	1947	29.XII	15	429,18
1932	7- 8.I	10	428,68	1948	3- 4.I	10	429,69
1933	8- 9.V	10	428,82	1949	15-16.III	7	428,82
1934	18-19.I	8	428,42	1950	11-12.XI	20	429,24
1935	1- 2.XI	15	429,38	1951	18-19.III	11	429,34
1936	3- 4.I	13	429,78	1952	27-28.XI	13	430,05
1937	19-20.III	14	429,78	1953	10-11.VI	10	429,51
1938	13-14.VI	16	429,18	1954	21-22.VIII	18	429,38
1939	18-19.I	15	428,48	1955	14-15.I	24	429,99
1940	14-15.XI	17	429,55	1956	27-28.VIII	9	429,78
1941	13-14.VI	12	430,09	1957	24-25.II	21	429,34
1942	12-13.III	12	428,76	1958	8- 9.II	9	429,12
1943	25.IX	10	429,37	1959	6- 7.III	10	429,00
1944	24-25.XI	24	430,51	1960	13-14.VIII	9	429,68
1945	28-29.XII	13	429,88	1961	11-12.XII	12	429,27

En 1932 et 1952, la hausse s'est prolongée chaque fois la jour suivant, et avec la même rapidité. En 1951, une hausse très peu différente de celle de mars s'est produite du 16 au 17 juillet; il n'en a pas été tenu compte ici.

On constate, dans cette période de 32 ans, que deux fois un maximum a été atteint: 24 cm en 1944 et 1955, mais que le lac n'était pas à la même cote dans les deux cas (la différence est de 52 cm); le minimum: 7 cm a été enregistré en 1949, le lac étant bas (428,82 m). D'après notre tableau, la variation des hausses maxima paraît désordonnée, mais la moyenne atteint 13,6 cm. La répartition par mois indique que la hausse maximum de l'année s'est produite 6 fois en janvier, 5 fois en mars et novembre, 3 fois en février, juin, août et décembre, 2 fois en mai et septembre et jamais en avril, juillet ni octobre. La hausse la plus fréquente (6 fois) a été de 10 cm; on a enregistré 4 fois 15 cm, mais jamais 19 ni 23 cm.

Signalons que, dans la liste qu'il a établie pour la période 1896-1913, de Perrot (1914) indique deux hausses supérieures à celles de notre tableau: 28 cm du 20 au 21 janvier 1910 et 25 cm du 14 au 15

janvier 1899, ainsi qu'une hausse égale à notre maximum: 24 cm du 14 au 15 février 1900.

Ne pouvant déceler aucun cycle dans la succession des hausses maximales annuelles du niveau du lac, nous avons essayé d'établir une corrélation entre la valeur de ces hausses et le niveau du lac. (fig. 12). On peut dire alors qu'au-dessous de 12 cm, la hausse est pratiquement indépendante du niveau du lac. De 13 à 21 cm, la hausse est à l'autant plus marquée que la cote du lac est plus basse, ce qui se conçoit facilement si l'on tient compte du fait que plus le niveau s'élève, plus la surface devient grande; autrement dit, on s'étalant, le lac absorbe de plus en plus les crues. Au-dessus de 22 cm, la hausse maximum augmente au fur et à mesure que le lac est à une cote plus élevée.

Pour la période 1957-1961 plus particulièrement, le maximum de hausse (21 cm) est la conséquence du dégel subit de 1957 simultanément à une forte pluie, mais sans que l'émissaire refoule et pour une cote normale du lac. Par contre, en 1960, on a un des minima de cette période, comme suite à une légère crue des rivières, mais pendant que la Thièle-effluent refoule et alors que le lac a atteint une cote dépassant de 37 cm la normale.

Nous ne nous attarderons pas à l'examen des baisses de niveau du lac, celles-ci étant beaucoup plus écumées que les hausses à l'effet de la manœuvre des vannes du barrage de Port.

5.4.2. Autres causes de variation.

Nous laissons de côté la question des seiches, décrite par Forel (1895) pour le Léman et étudiée par DuPasquier (1893), puis par Sarasin et DuPasquier (1895) pour le lac de Neuchâtel. Cette étude, qu'il serait très intéressant de reprendre avec des moyens modernes, dépasse le cadre de notre travail.

Les limnigraphes actuels, tant à Neuchâtel qu'à Grandson, ne sont pas assez sensibles pour enregistrer le détail des seiches, ni celui des "vibrations du lac" au sens où Forel l'entendait. Par contre, ils marquent les dénivellations dues aux variations de la pression atmosphérique, alors que la surface du lac est calme apparemment et sans rides. Nous n'avons pas étudié ce phénomène de manière approfondie ni systématique, mais noté cependant l'existence de ces fluctuations que nous résumons ainsi:

Lorsque la pression atmosphérique baisse, alors que le lac paraît parfaitement calme, le limnigraphe de Neuchâtel marque une dénivellation généralement brusque qui se continue par une série d'oscillations amorties plus ou moins rapidement. La dénivellation est de 1 à 1,5 cm en général, lorsqu'il s'agit d'une dépression atmosphérique non orageuse à déplacement relativement lent. Par contre, à l'approche d'un orage, la dénivellation dépasse presque toujours 4 cm en se marquant d'autant plus que la chute de la pression atmosphérique correspondante est plus rapide.

C'est ainsi qu'on a constaté une dénivellation de 5 cm le 29.VII.1959 à 02 h.00, à l'arrivée d'un violent orage, de 6 cm (maximum pour la période 1957-1961) en 20 min. le 10.VIII.1959 à 14 h.30 quelques instants avant le début d'un orage très violent, de 5 cm le 28.VIII.1960 à l'approche d'un orage, etc.

Signalons cependant qu'une véritable soiche a été observée le 29 octobre 1960 dans le port de St.Blaise: à 06 h.56 une baisse brusque de 50 cm de niveau du lac a eu lieu: une partie du fond du port a découvert; puis l'eau est revenue en plusieurs balancements s'ectompant rapidement et qui se sont terminés à 06 h.59. Sur tout le lac, la surface avait l'aspect d'un miroir et la cote était de 429,57 m.

6. Affluents et effluent.

6.1. Les affluents.

Bien que Quartier (1948 b) n'en cite que 31 dans son ouvrage, les affluents du lac de Neuchâtel sont au nombre de 79 que nous énumérons dans le tableau XVII ci-dessous. Ils sont d'importances très diverses, tant par l'étendue de leur bassin de réception que par leur débit.

TABEAU XVII

(cf. page suivante)

TABLEAU XVII

Liste des affluents du lac de Neuchâtel

De la Thièle à St-Blaise

1. Ruissseau de Marin
2. Le Mousson
3. Ruissseau de St-Blaise

De St-Blaise à Auvernier

4. Ruissseau de Monruz
5. Le Seyon
6. La Serrière
7. Le Ruau

D'Auvernier à St-Aubin

- B. Ruz Chatru
9. Ruissseau des Vernes
10. L'Areuse
11. Ruissseau de la Poissine
12. Le Vivier
13. Ruissseau de la Fabrique
14. Ruissseau de la Tuilerie
15. Ruissseau du Moulin
16. Ruissseau des Tannes

De St-Aubin à Grandson

17. Ruissseau de St-Aubin
18. Ruissseau de Tivoli
19. Ruissseau des Chatelets
20. Ruissseau de la Vaux
21. La Baissée
22. Le Dia
23. Ruissseau de Concise
24. Ruissseau du Moulin
25. Ruissseau de Corcelles
26. Ruissseau de la Vernette
27. L'Arnon
28. Ruissseau du Repuis

De Grandson à Yverdon

29. Le Grandsonnet
30. Ruissseau nord des Mûriers
31. Ruissseau sud des Mûriers
32. Ruissseau des Tuilleries
33. Ruissseau de Fiez Pittet
34. La Brine
35. Le Bey
36. Le Muijon

D'Yverdon à Estavayer

37. La Thielle
38. Canal oriental

D'Yverdon à Estavayer (suite)

39. Le Buron
40. Le Châble Perroca
41. Ruissseau du Bois Clos
42. Ruissseau de l'Epina
43. Le Mantue
44. Ruissseau de Corbat
45. Ruissseau de la Croix
46. Ruissseau de Combodon
47. Ruissseau du Moulin
48. Ruissseau du Riez
49. Ruissseau de Coppet
50. Ruissseau de Montilly
51. Ruissseau des Vuaz
52. Ruissseau de Vers le Moulin

D'Estavayer à Cudrefin

53. Ruissseau de la Chapelle
54. Ruissseau de la Corbière
55. Ruissseau d'Antavaux
56. Ruissseau de la Tomba
57. Ruissseau du Rondet
58. Ruissseau de Chevroix
59. Ruissseau de la Bioleyre
60. Ruissseau de Robin
61. Ruissseau de Sur le Château
62. Ruissseau de la Fin de Gros Bois
63. Ruissseau du Lavacon
64. Ruissseau de Cantezenette
65. Ruissseau de la Condemine
66. Ruissseau ouest des Chavannes
67. Ruissseau est des Chavannes

De Cudrefin à la Thièle

68. Ruissseau de Cudrefin
69. Ruissseau de la Tuillière
70. Ruissseau des Longues Parties
71. Ruissseau de la Fra
72. Ruissseau du Chablais
73. Ruissseau des Grèves
74. Ruissseau de Fégrau
75. Canal de la Broye
76. Ruissseau du Lindenhof
77. Ruissseau du Tannenbof
78. Ruissseau du Seewald
79. Canal de Bothaus

Remarques: L'orthographe des noms ci-dessous est conforme aux signatures de la CN, 1957. Elle diffère légèrement de celle de la liste établie par Quartier (1948 b), qui indique, par ailleurs, le No. 8 sous le nom de Ruissseau d'Auvernier, le No. 9 sous Ruissseau de Colombier, le No. 15 sous Ruissseau de Bevaix, le No. 16 sous Ruissseau de Chee le Bart, le No. 20 sous Ruissseau de Vauxmarcus, le No. 29 sous Ruissseau de Grandson et le No. 36 sous le nom de Canal occidental.

Dans notre tableau ne sont pas compris les 17 collecteurs de drainage, très courts, partiellement obstrués et traversant les roseaux situés entre Cheyres et le Moulin (rive droite).

Laissons de côté provisoirement le canal de la Thièle qui peut fonctionner aussi comme affluent, quoique rarement, pour n'examiner que les principaux cours d'eau alimentant le lac.

TABEAU XVIII

Bassins de réception des principaux affluents du lac de Neuchâtel

Région	Nom	Bassin de réception (km ²)
Neuchâtel	Le Seyon	ensemble 117,70
Neuchâtel	La Serrière	
Rive gauche	L'Areuse	393,47
Rive gauche	L'Arnon	89,63
Haut-lac	La Thielle	488,39
Haut-lac	Le Buron	37,89
Rive droite	La Mentue	138,22
Bas-lac	Canal de la Broye	853,56

Les superficies mentionnées dans ce tableau sont extraites de l'ouvrage de Brém, Sartory et Rindlisbacher (1920).

De ces 8 cours d'eau, seuls trois ont leur débit jaugé en permanence par le Service fédéral des eaux; ce sont :

l'Areuse, à Champ du Moulin, à 11,5 km en amont de l'embouchure dans le lac, pour le 91,3 % du bassin de réception de ce cours d'eau;

la Broye, à Sugiez, à 7,1 km de l'embouchure du canal, pour le 81,8 % de son bassin de réception;

la Thielle, à Orbe, à 12 km en amont de l'embouchure, pour 68,8 % de son bassin.

Certes, on doit regretter que les stations de jaugeage de ces

Fig 13

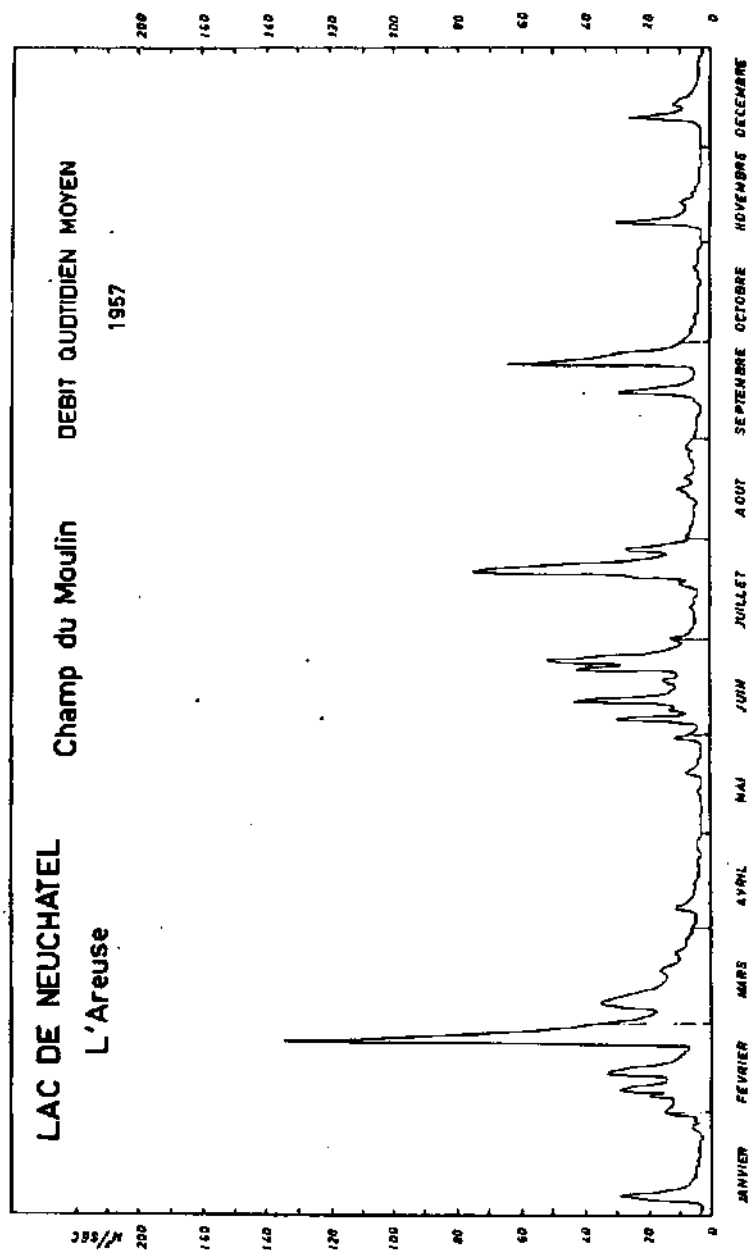


Fig.14

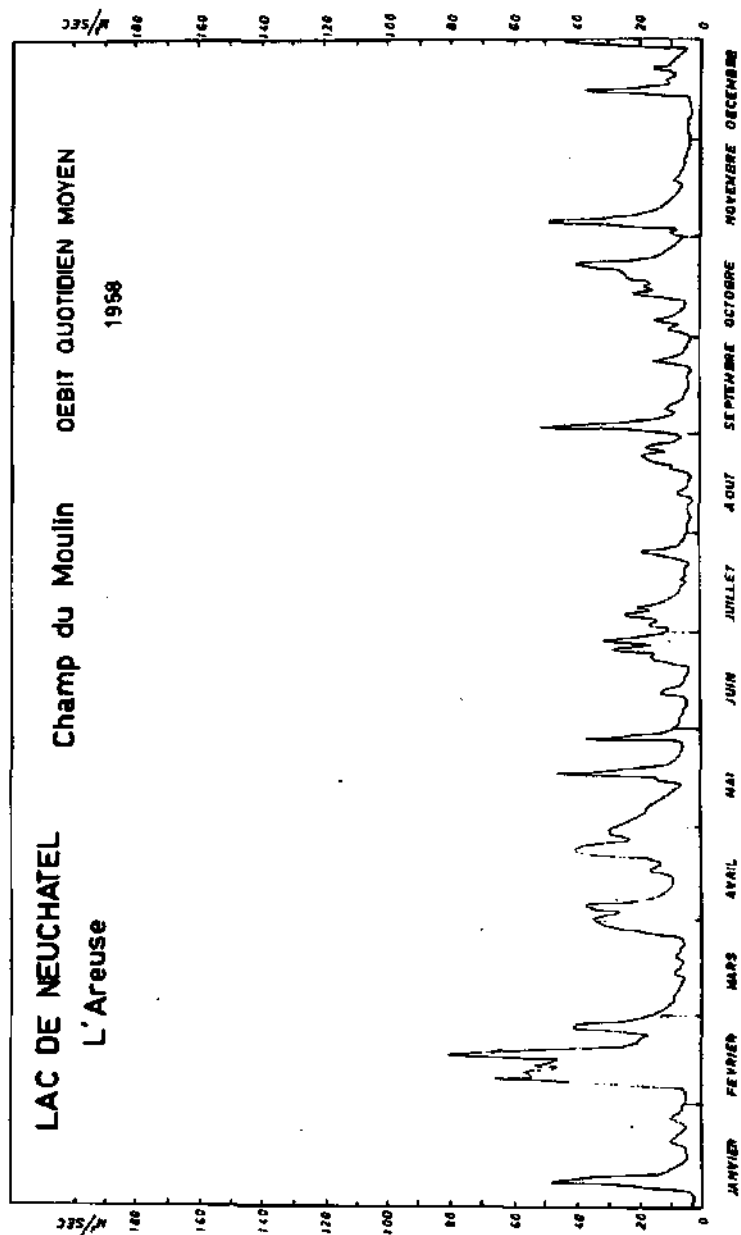


Fig.15

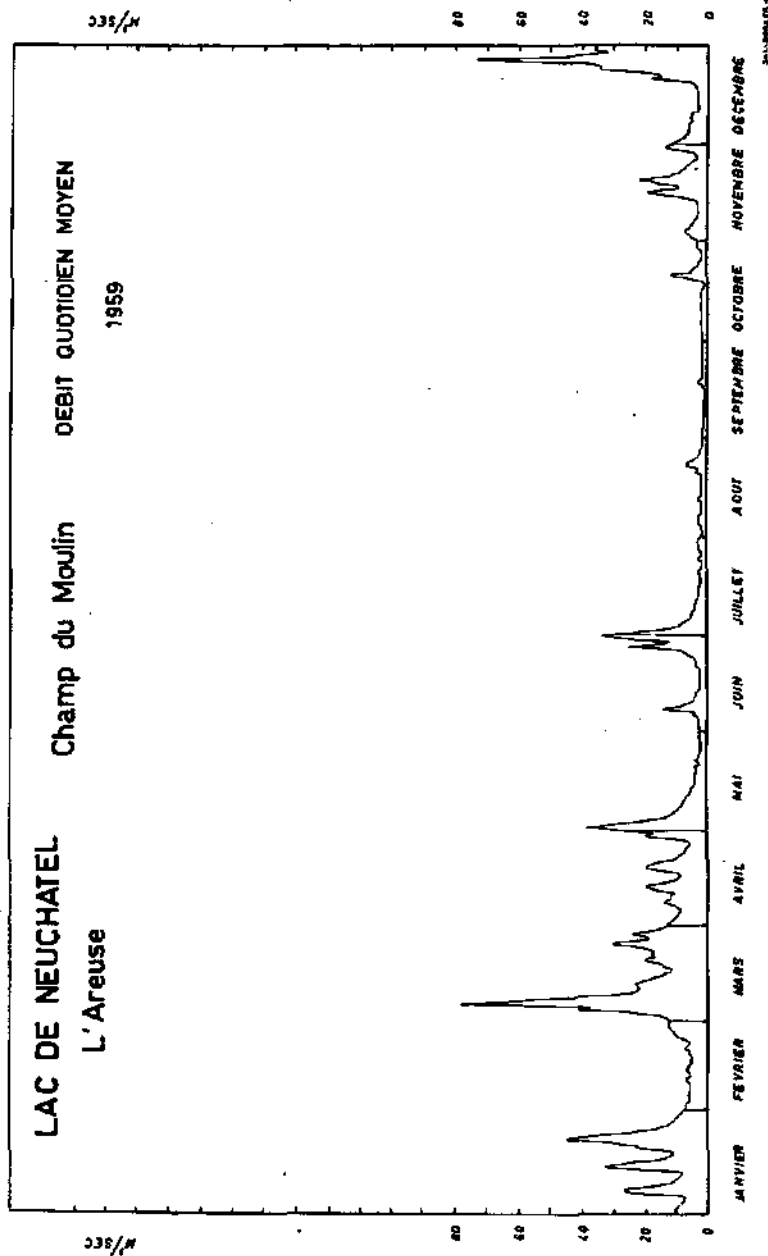


Fig.16

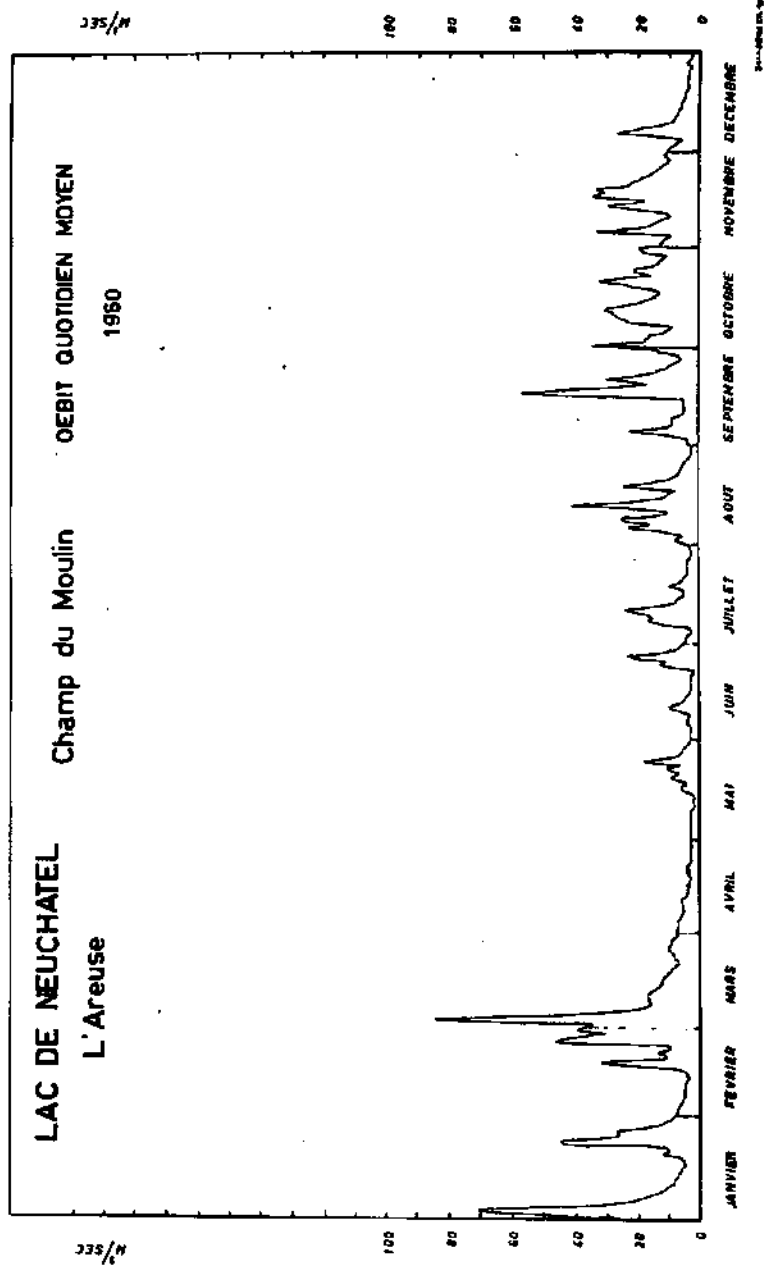


Fig. 17

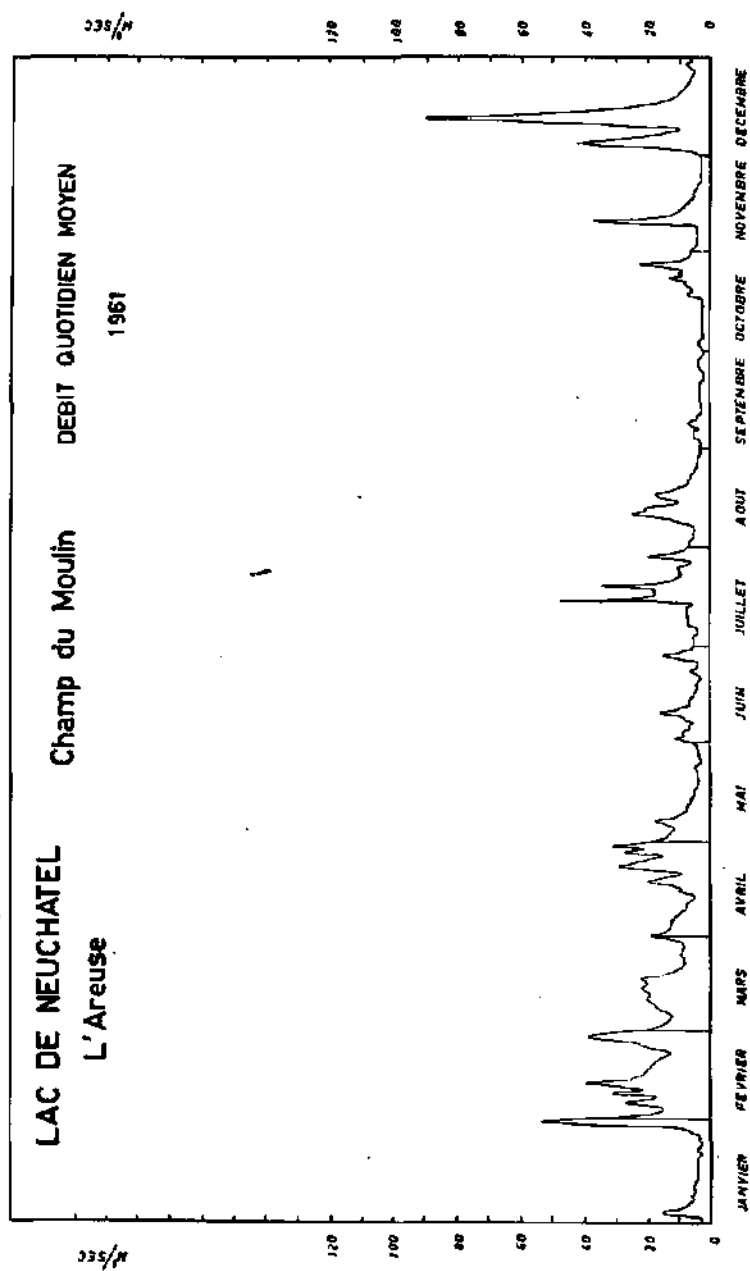


Fig. 18

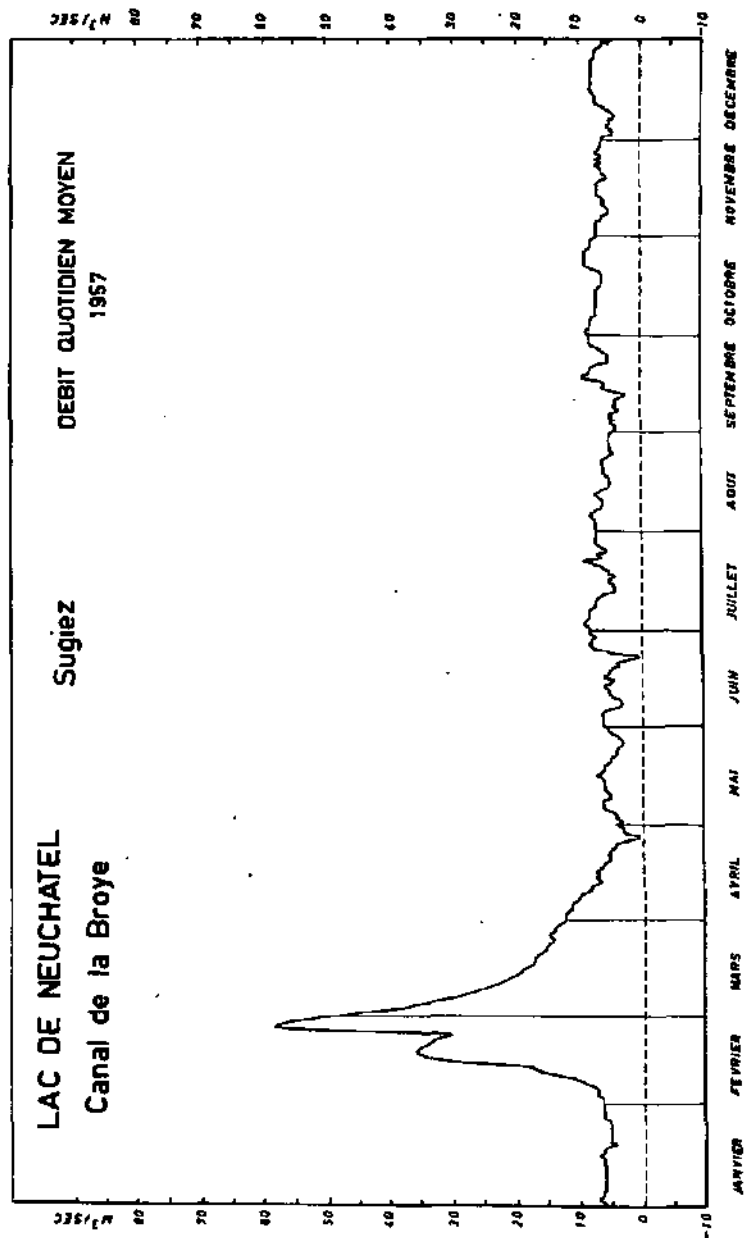


Fig.19

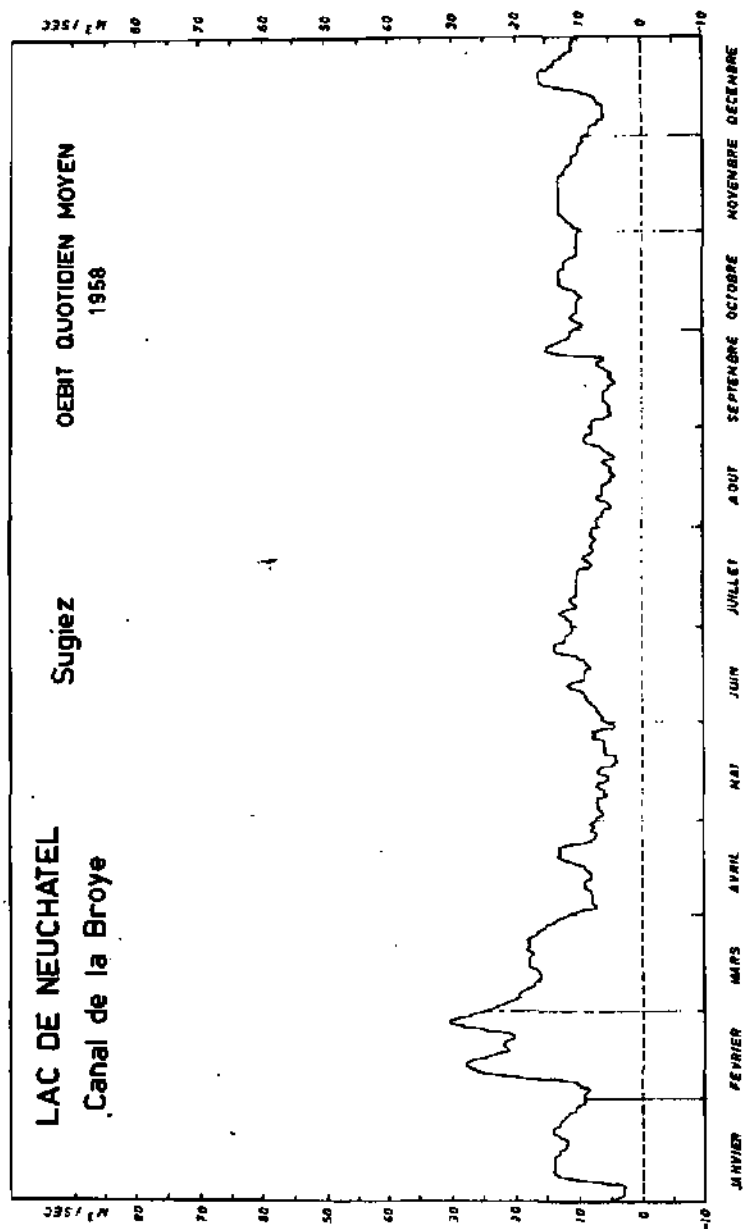


Fig.20

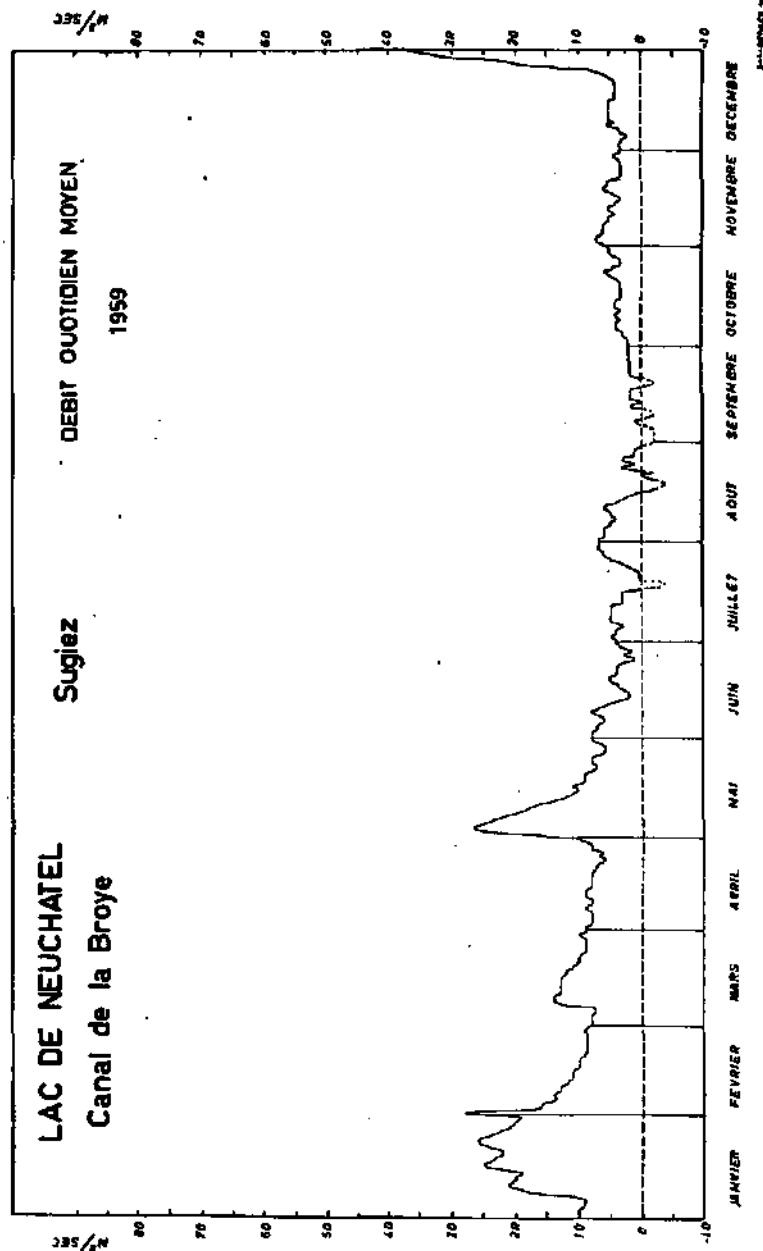


Fig. 21

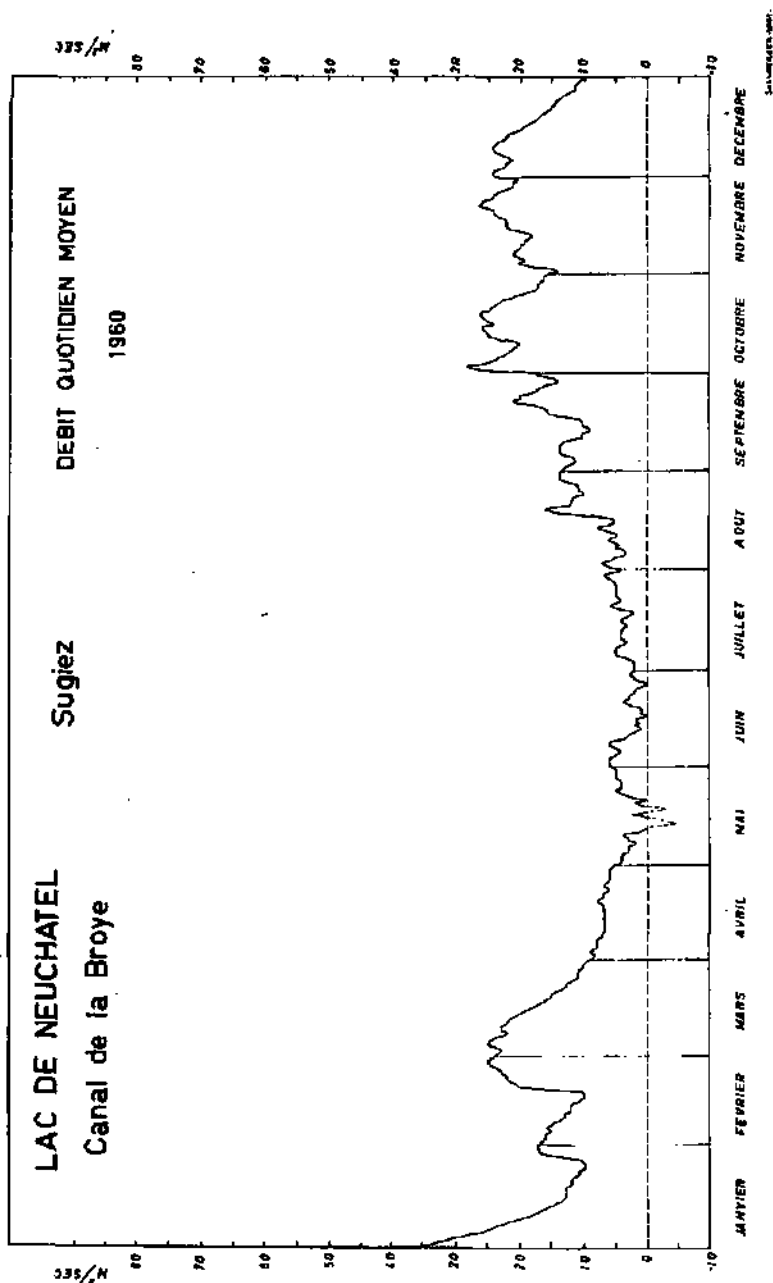


Fig.22

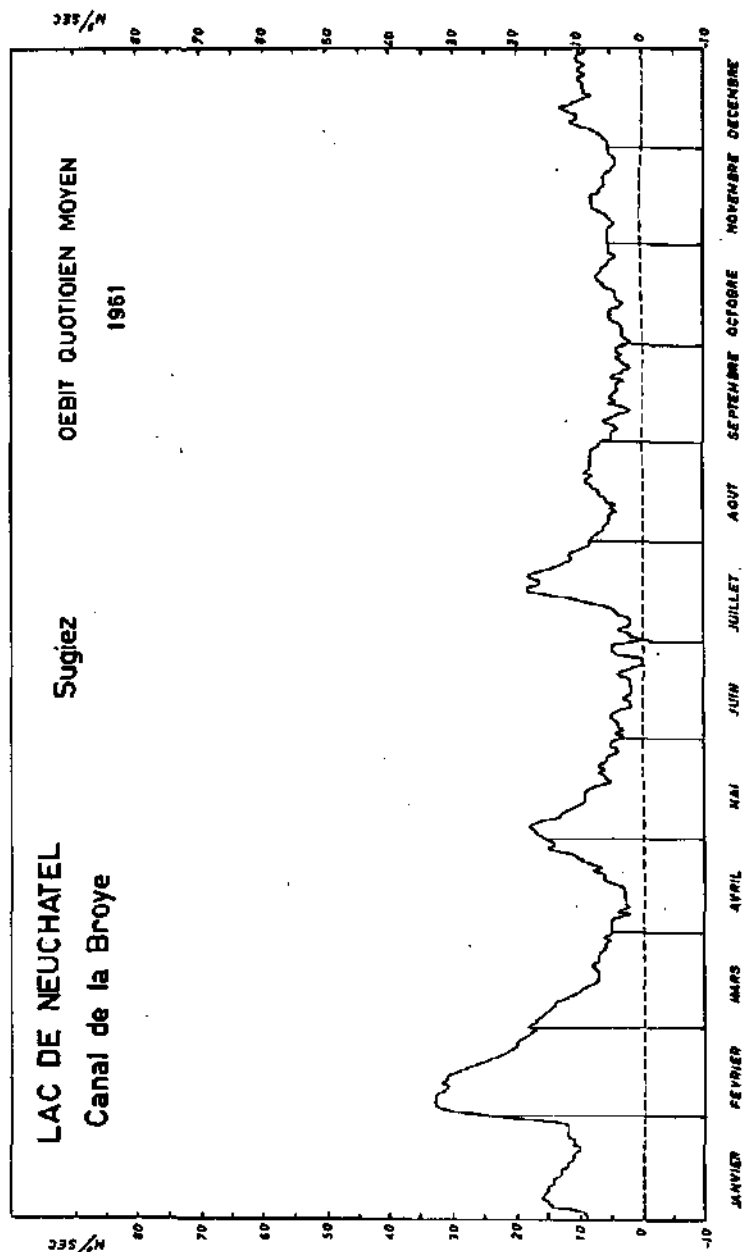


Fig.23

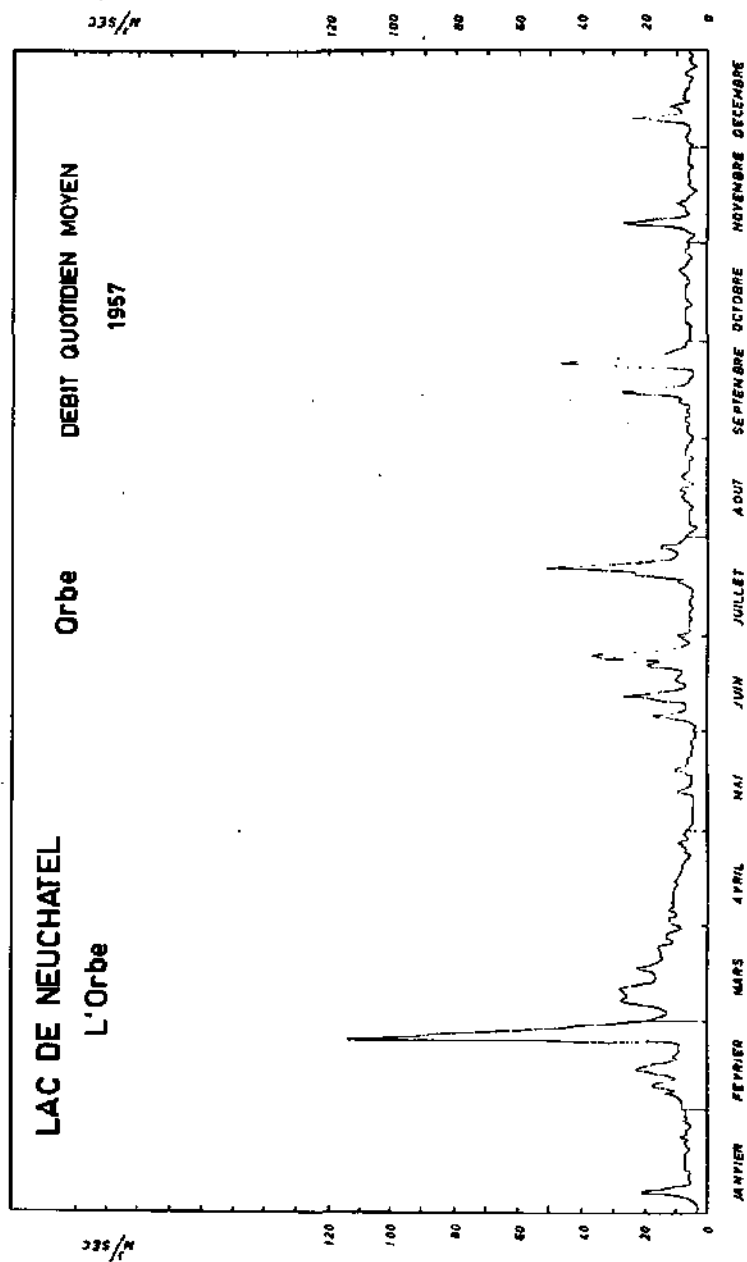


Fig. 24

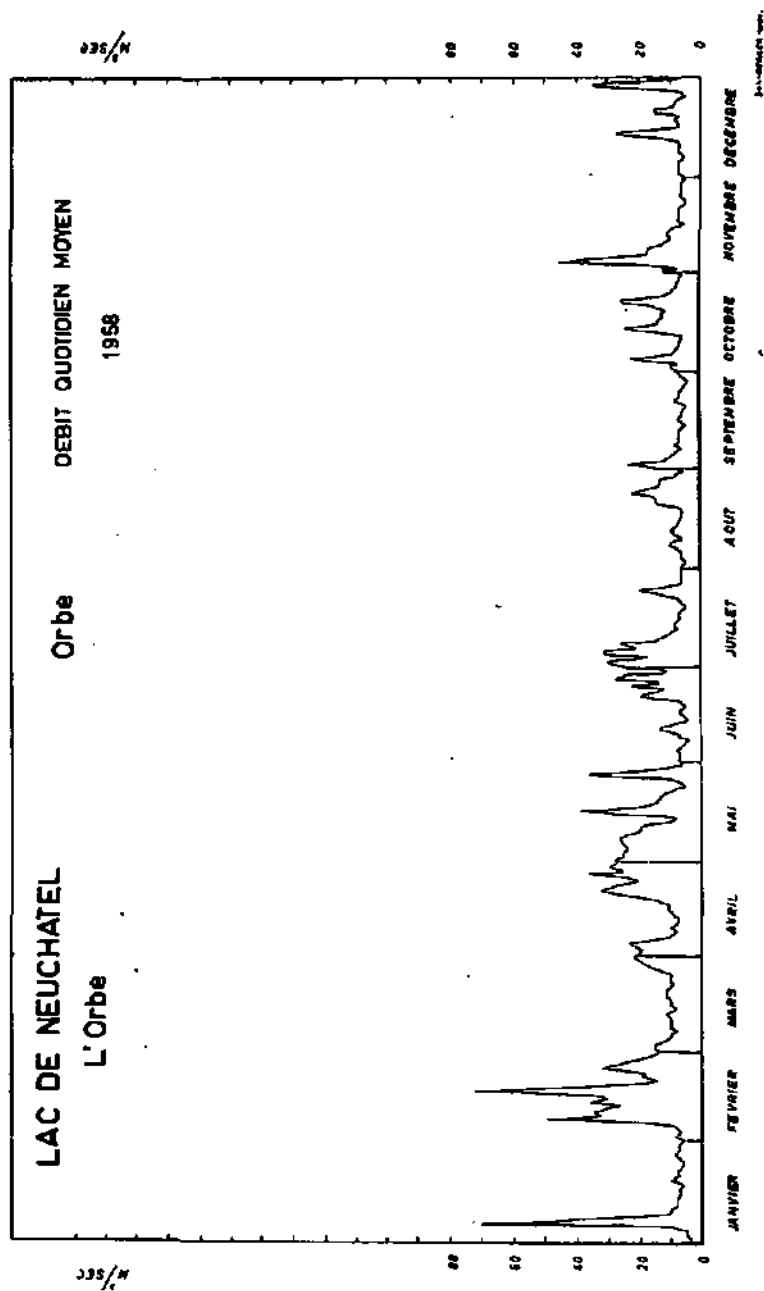


Fig. 25

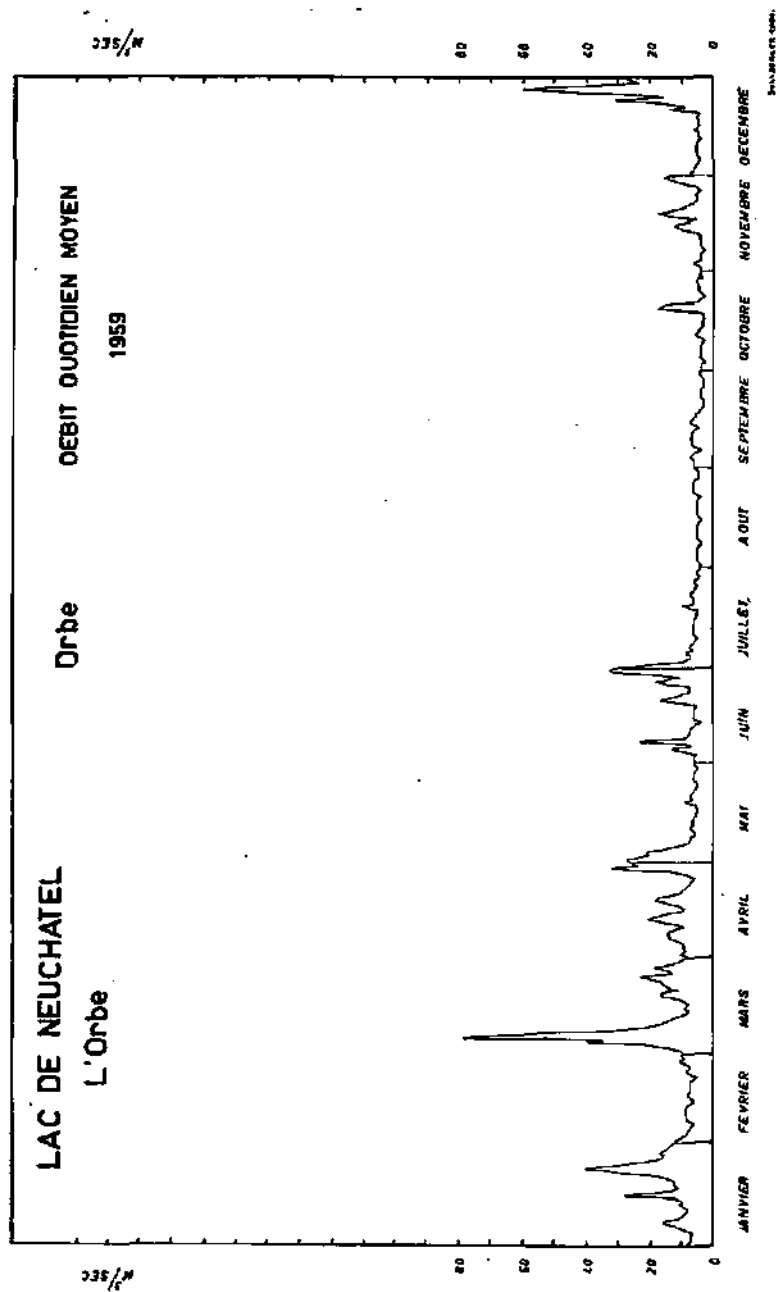
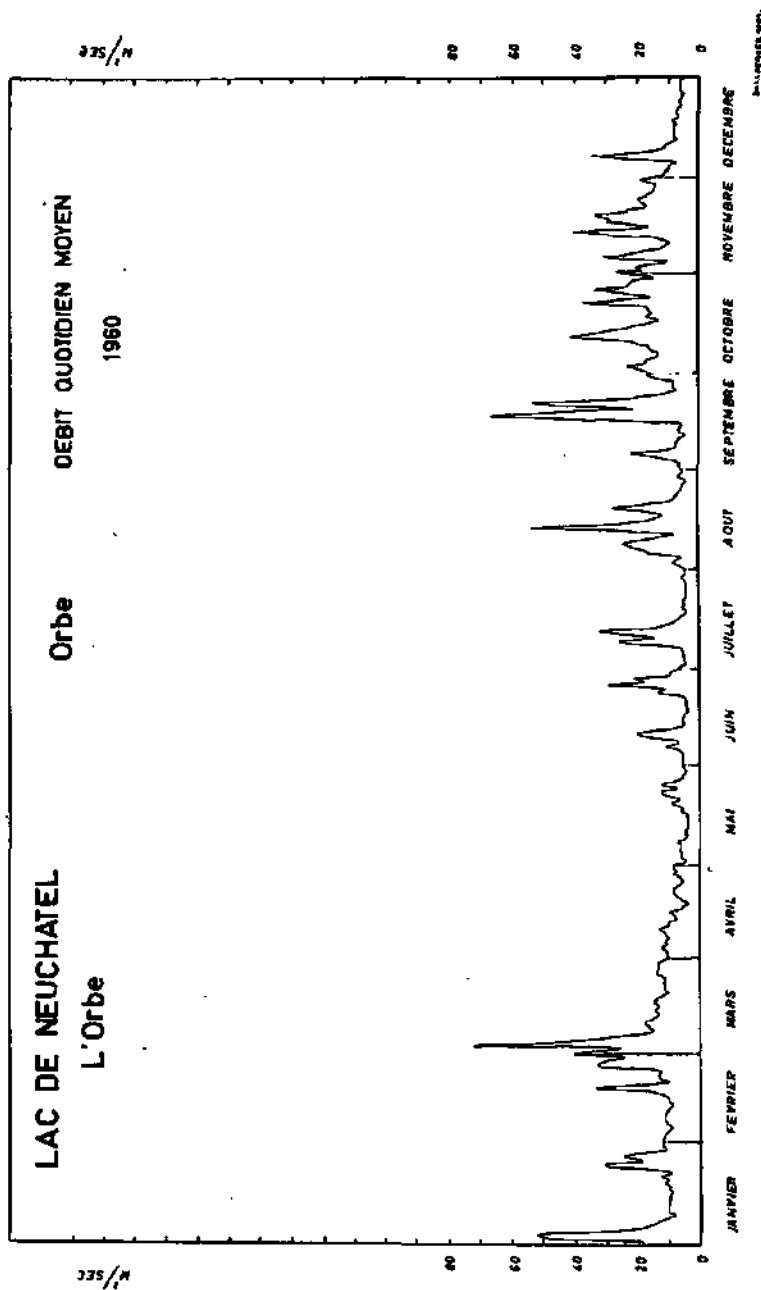


Fig.26



trois cours d'eau ne soient pas plus proches de leurs embouchures, car une quantité notable d'eau leur parvient encore en aval et cet apport est, pour la Broye (canal) et la Thielle plus pollué que le cours d'eau amont.

Pour la période qui nous concerne, nous calculons les moyennes des débits annuels moyens en les reportant, avec les valeurs extrêmes tirées de l'Annuaire hydrographique de la Suisse (1957-1961) dans le

TABLÉAU XIX

Débits de l'Areuse, du canal de la Broye et de l'Orbe, en m³/sec.
Période 1957-1961

Cours d'eau	Débits annuels moyens	Maxima	Minima
L'Areuse	11,3	150	1,50 a)
La Broye	9,8	58	-4 b)
L'Orbe	11,2	125	2,60 a)

Les maxima (tous en 1957) sont des débits de pointe; les minima des valeurs extrêmes: a) de la moyenne quotidienne, toutes situées en 1959; b) du minimum instantané, en 1959 et 1960. Le signe - indique que l'écoulement du canal de la Broye est inversé et a lieu du lac de Neuchâtel dans celui de Morat. Rappelons encore que l'Orbe change de nom et prend celui de Thielle à son passage à Yverdon.

Nous avons reporté les débits quotidiens moyens de ces trois cours d'eau dans les fig. 13 à 27.

Quant au Seyon et à la Serrière, ces deux cours d'eau ont été jaugeés par de Perrot (1896 et années suivantes); de ses données, nous extrayons les valeurs suivantes concernant les débits annuels extrêmes:

pour le Seyon : (période 1897-1925) :

maximum: 52,0 m³/sec les 13.I.1899 et 6.VI.1901; minimum: 0 (11 fois)

pour la Serrière (période 1894-1925) :

maximum: 11,1 m³/sec le 17.I.1899; minimum: 0,17 m³/sec le 27.X.1921.

Le canal de la Broye mérite une mention spéciale: d'une longueur de 8,2 km du lac de Morat à celui de Neuchâtel, il mesure 1,6 à 4,3 m de profondeur, 17 m de largeur maximum au plafond et possède un bassin de réception total de 853,6 km². En période normale, le canal joue le rôle d'émissaire du lac de Morat; mais, en hautes eaux ou en crue, le courant s'arrête et s'inverse même, de sorte qu'alors l'eau du lac de Neuchâtel reflue dans celui de Morat. (fig.18 à 22).

Ce canal reçoit plusieurs affluents issus d'un bassin de réception de 158 km² et dont les principaux débouchent sur sa rive droite :

la Bibera à 1,9 km, le Hauptkanal à 3,4 km, le Schwarzgraben à 3,5 km, et le Ziegeleikanal à 3,7 km. Ces affluents, drainages de la région des Grands Maraie ou Seeland, fonctionnent aussi comme collecteurs d'égoût de nombreuses localités.

Pour de plus amples détails géographiques relative aux affluents mentionnés dans le tableau XVIII ainsi qu'à leurs bassins de réception, nous renvoyons aux articles correspondants du Dictionnaire géographique de la Suisse (D.G.S., 1902-1910), ainsi qu'aux travaux de Wegmann (1958) et de Burger (1959) pour l'Aare, de même qu'à ceux de Bossert (1960 et 1962) pour l'Orbe-Thielle et son bassin.

6.2. L'émissaire du lac.

La Thièle-effluent (ou canal de la Thièle), en allemand Zühlkanal, relie artificiellement, depuis la première correction des eaux du Jura, notre lac à celui de Bienne. D'une longueur de 8,0 km, elle mesure, en largeur 48 à 52 m à la surface de l'eau et 30 m au plafond, ainsi que 5 m de profondeur en moyenne. Le canal est parcouru par de nombreux bateaux qui en brassent fréquemment l'eau, contribuant à empêcher les matériaux de s'y déposer.

Dans le bas-lac très peu profond, le canal de la Thièle est protégé contre l'ensablement dû à l'action des vagues par un sôle prolongeant de 450 m la berge droite dans le lac de Neuchâtel. Malgré cela, une "barre" due à un haut-fond de sable et de vase obstrue l'entrée du canal, au large de la baie de la Tène. La couche d'eau au-dessous de cette "barre" a une puissance assez faible pour qu'on puisse considérer que seule l'eau superficielle du lac s'engage dans le canal car dans ce dernier la vitesse de l'eau ne suffit pas à provoquer une aspiration capable de se faire sentir au-delà de la "barre" dans une région où d'ailleurs le fond ne s'abaisse pas à plus de 4 m sous la surface du lac sur une distance de 1,3 km. Le chenal, contournant la "barre" et dans lequel circulent les bateaux, est tracé en zigzag, mesure au maximum 2,5 m de profondeur et ne compense que fort peu la rétention d'eau imputable à la présence des hauts-fonds dont nous venons de parler. Nous tenions à insister sur ce fait particulier réglant l'écoulement du lac.

Le débit de la Thièle est mesuré par un limnigraphe placé sur la berge droite, à l'endroit dénommé Rothaus, à 1,32 km en aval de l'entrée du canal. Grâce à un abaque construit en fonction des niveaux respectifs des lacs de Neuchâtel et de Bienne, les indications de cette station permettent de calculer le débit de la Thièle, quel que soit le sens du courant.

En effet, lorsque le niveau du lac de Bienne se trouve supérieur à celui du lac de Neuchâtel, le courant s'inverse et l'eau reflue du premier dans le second; on dit que "la Thièle refoule" (EL)⁷⁾. Ce phénomène se produit en période de hautes eaux, mais aussi lors de crues subites et violentes. Lorsque la Thièle "refoule", le canal se transforme donc en affluent du lac de Neuchâtel et amène à celui-ci de l'eau

7) cf. paragraphe 1.

Fig. 27

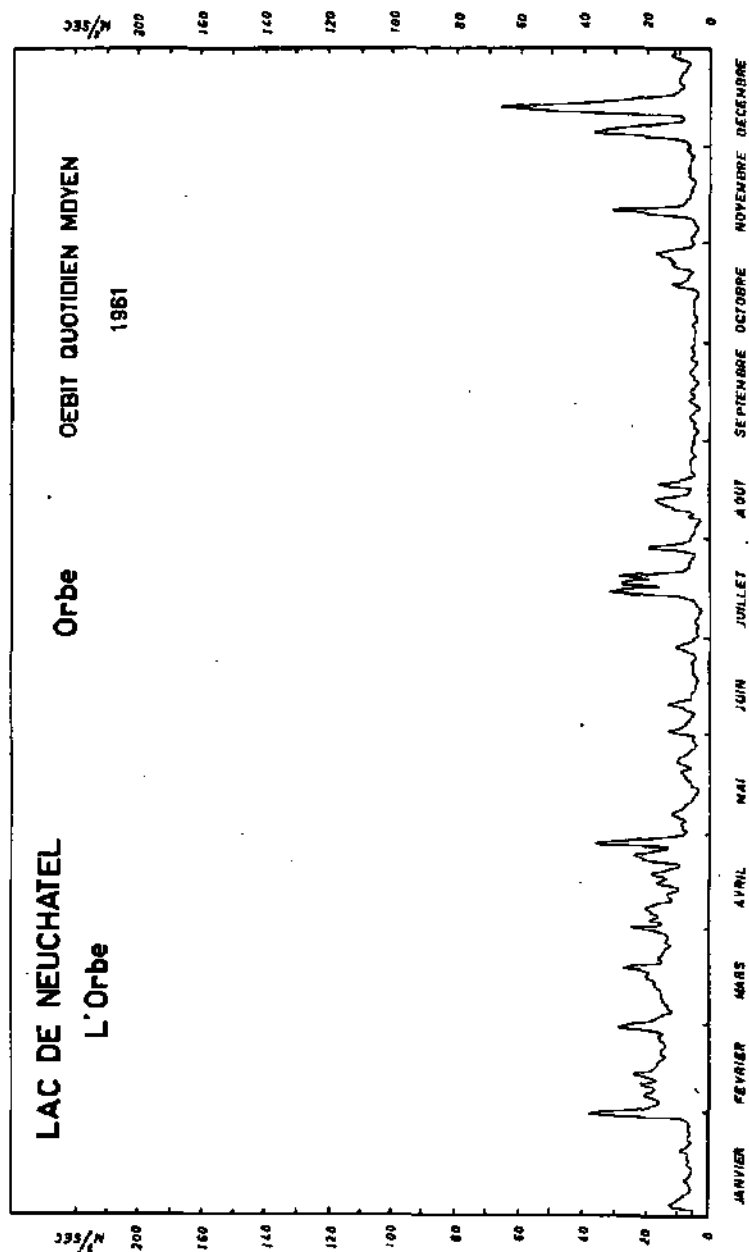


Fig.28

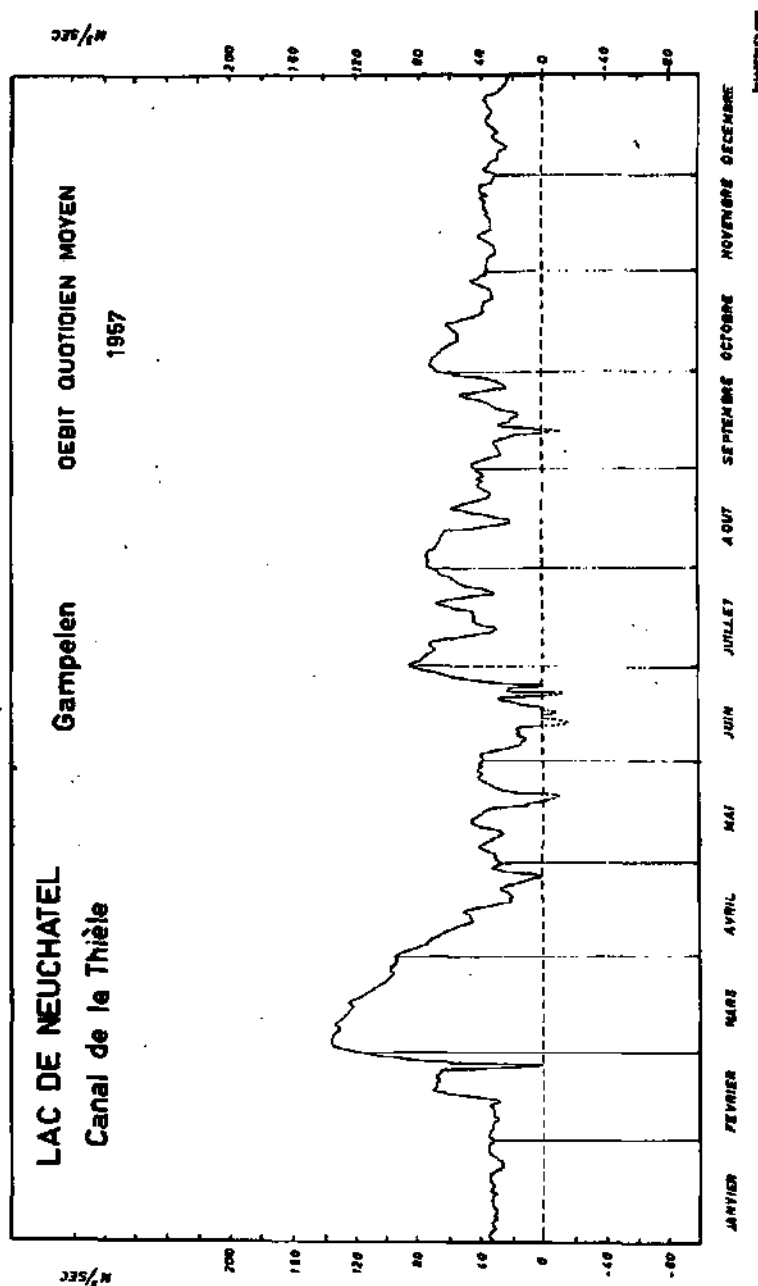


Fig.29

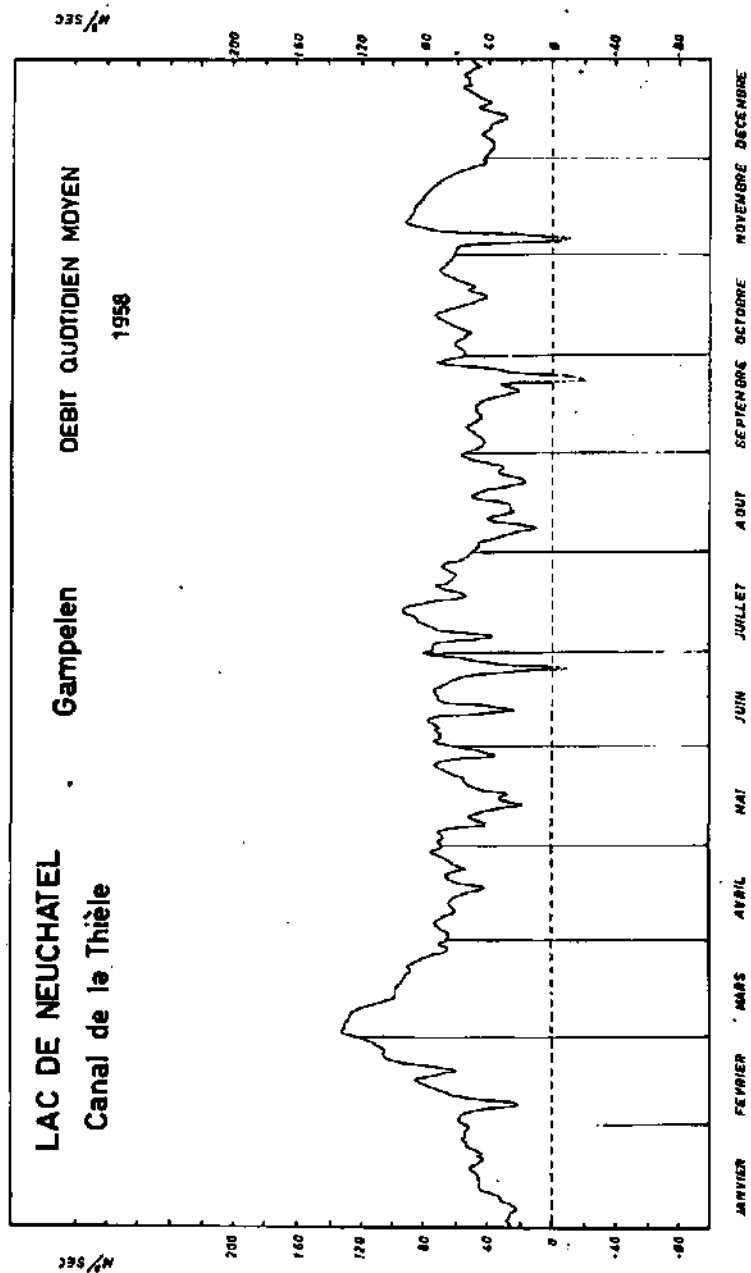


Fig.30

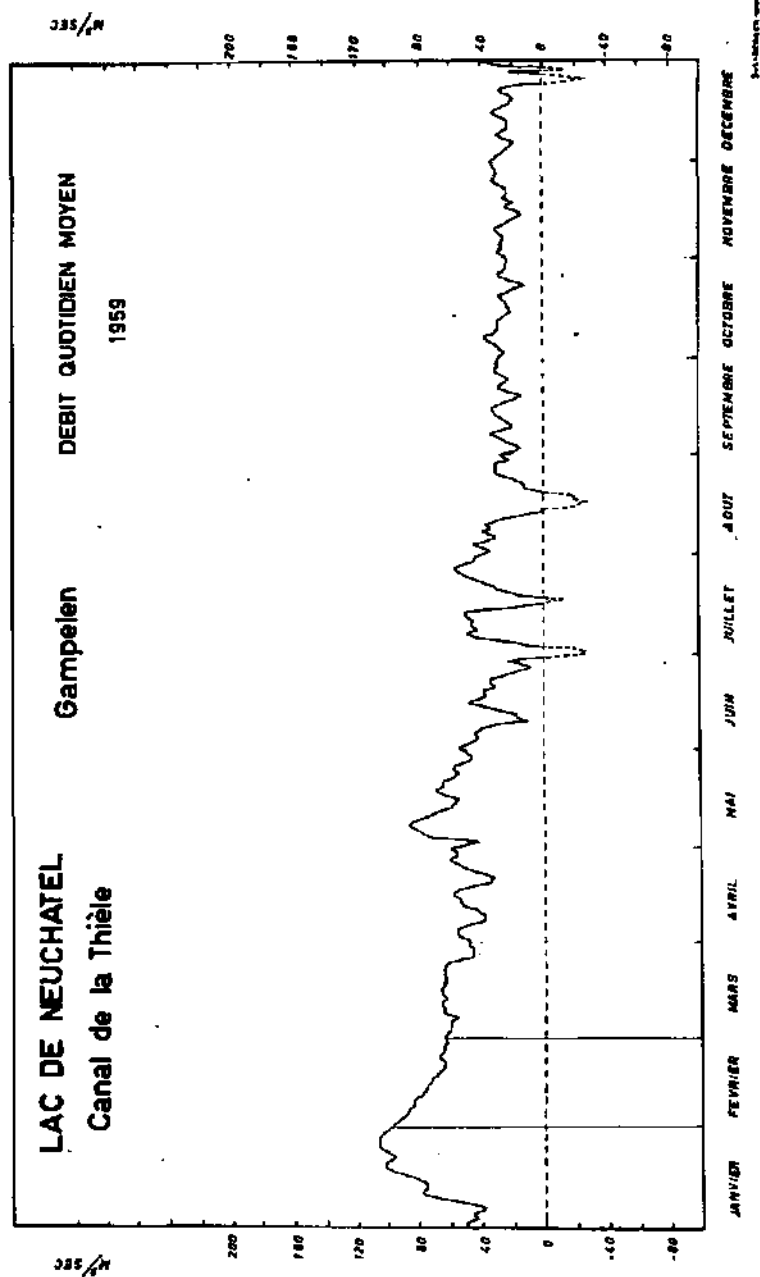


Fig.31

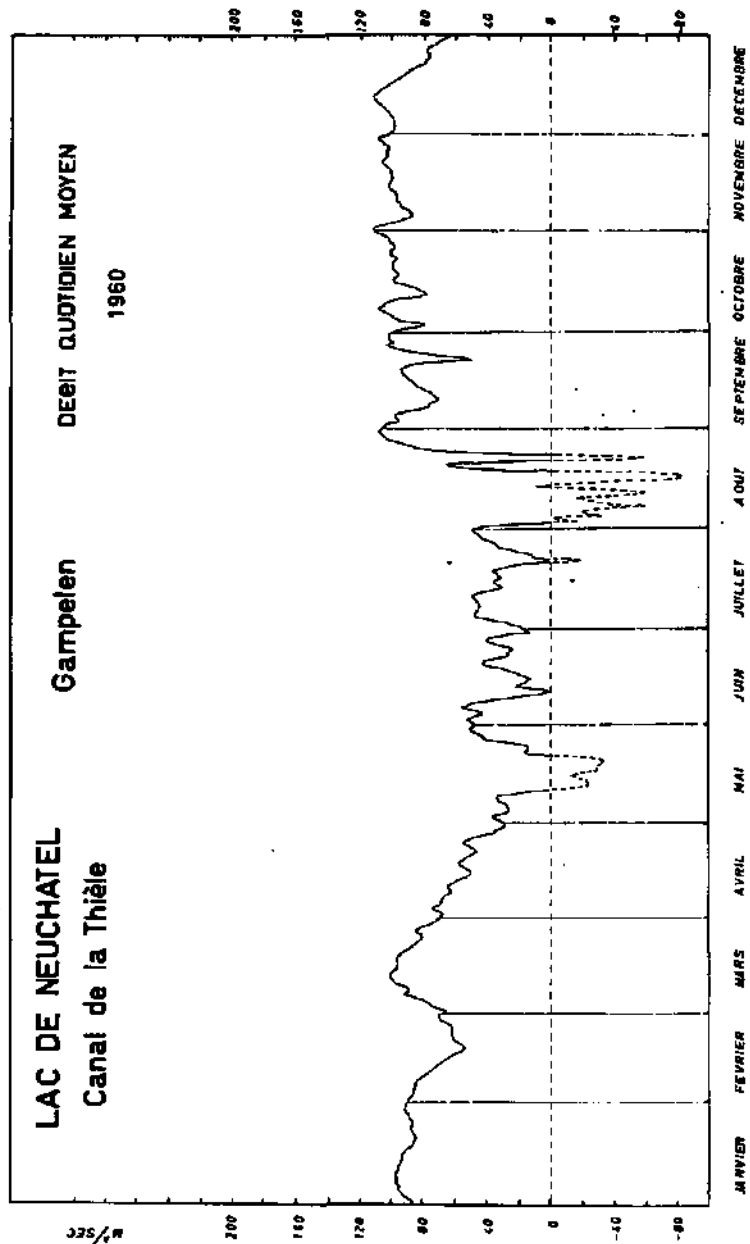
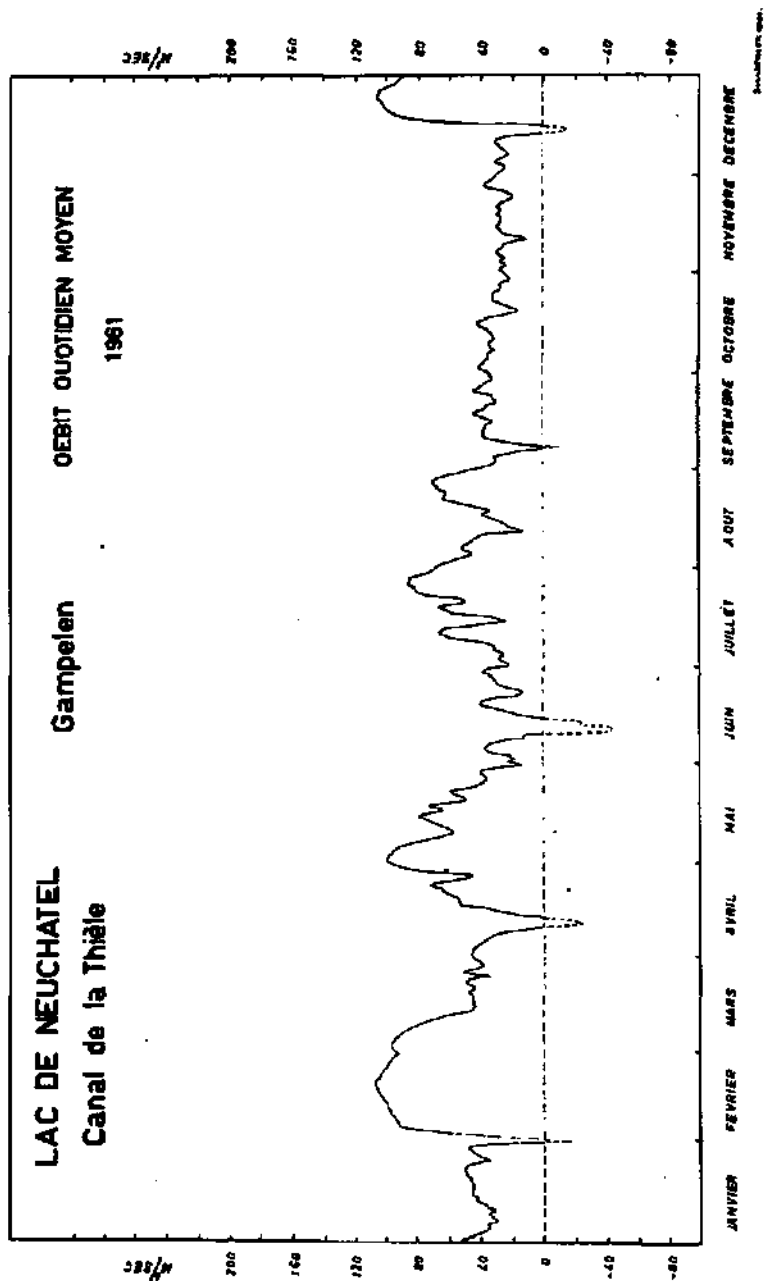


Fig.32



récoltée dans le bassin de réception du canal entre les deux lacs, soit 47,85 km², d'une part et dans celui du lac de Bièvre proprement dit, soit théoriquement 5586 km² de plus, d'autre part. L'eau de ce dernier bassin a, pratiquement, la composition de celle du lac de Bièvre, alors que celle du premier est polluée davantage par les collecteurs d'égout qui s'y déversent. (fig.28 à 32).

Rappelons que de Perrot (1930 et 1933) imputait au refoulement de la Thièle le refroidissement de l'eau du lac de Neuchâtel constaté parfois vers Serrières et qu'il attribuait à des remontées d'eau froide de provenance de l'Aar et se propageant à tout le bassin de Neuchâtel. Le fait que des haute-fonds existent à l'entrée de la Thièle à la Tène, depuis le siècle passé déjà, rend cette affirmation illusoire. En effet, la morphologie du fond à cet endroit rend impossible une arrivée massive d'eau remontant la Thièle avec une vitesse suffisante pour l'amener jusqu'à Neuchâtel. Au contraire, l'eau qui rentre dans le lac s'étale très rapidement en couche mince et se mélange relativement vite à celle du bas-lac.

En calculant le débit moyen annuel de la Thièle pour la période 1957-1961, nous obtenons : 51,1 m³/sec, valeur un peu inférieure à celle de la période 1935-1961: 52,9 m³/sec, mais légèrement supérieure à celle de la période 1920-1934: 50,5 m³/sec.

De l'Annuaire hydrographique de la Suisse, nous tirons les valeurs du

TAB. XX

Débits du canal de la Thièle pour la période 1957-1961, en m³/sec.

Année	Moyenne annuelle	E x t r ê m e s	
		minimum et date	maximum et date
1957	44,6	- 30 13.VI	135 4.III
1958	57,9	- 37 22.IX	135 3.III
1959	41,7	- 33 16.VIII	106 27/29.I
1960	64,4	- 94 14.VIII	112 31.X et 11.XII
1961	46,9	- 49 11.VI	107 19.II

Les minima sont des débits quotidiens moyens, mais les maxima des débits de pointe.

En comptant aussi le nombre de fois où la Thièle a "refoulé" durant la période 1957-1961, nous obtenons 7 refoulements en 1957, 4 en 1958, 12 en 1959, 27 en 1960 et 12 en 1961, soit 62 fois au total. Durant les mêmes années, le canal de la Broye, qui peut aussi fonctionner

comme émissaire du lac de Neuchâtel, ainsi qu'on l'a vu précédemment (cf. paragr. 6.1.), a refoulé 1 fois en 1957, 16 fois en 1959 et 4 fois en 1960, mais pas du tout durant les deux autres années.

Quant à la répartition par mois, la Thièle a refoulé 19 fois en août, 13 en mai, 12 en juin, 6 en décembre, 4 en juillet et septembre, 2 en avril et 1 en janvier, février et novembre, mais jamais au cours ni en octobre.

La Thièle peut donc fonctionner de manière analogue au canal de Savières, affluent du lac du Bourget, qui, selon Hubault (1947) a coulé du lac vers le Rhône durant 270 jours avec un débit moyen de 41 m³/sec durant la période 1926-1927 et en sens inverse durant 87 jours avec un débit moyen de 23 m³/sec.

De 1957 à 1961, le débit de la Thièle a été nul (moyennes quotidiennes) 7 fois en 1957, 4 en 1959, 1 en 1960 et 1961, jamais en 1958, alors que les valeurs correspondantes sont de 2 (1957), 0 (1958), 8 (1959), 5 (1960) et 4 (1961) pour la Broye. Le canal de Savières, lui, a eu un débit nul pendant 9 jours en 1926-1927.

Les refoulements de la Thièle et son écoulement nul empêchent la sortie de l'eau du lac de Neuchâtel, auquel, dans le premier cas, ils amènent de l'eau de composition différente. Il semble que l'effet de ce régime anormal de l'effluent se borne aux deux conséquences que nous venons d'énumérer car, comme nous l'avons fait voir au paragraphe 5.4.1 ci-dessus, les variations de niveau les plus importantes du lac peuvent être indépendantes du refoulement de la Thièle. Ceux-ci n'affectent donc, le plus souvent, pas fortement les changements de niveau du lac de Neuchâtel, contrairement à l'opinion exprimée par Quartier (1948 b, p. 102).

Avec un débit moyen de 53,1 m³/sec, déterminé pour une période de 26 ans par le Service fédéral des eaux, on arrive à calculer que la Thièle provoque un séjour de l'eau de 8 ans et 82 jours dans le lac de Neuchâtel.

Si bien que l'eau quittant notre lac par la Thièle soit superficielle, elle contient une quantité non négligeable de matières en suspension spécialement lorsque de fortes vagues soulèvent la vase et le sable des hauts-fonds du bas-lac. Pour tenter de déterminer l'ordre de grandeur de la quantité de matières en suspension dans l'eau de la Thièle à cette occasion, nous avons procédé à un filtrage de celle-ci le 26 octobre 1960 après-midi, alors que le vent du SW soulevait, depuis la nuit précédente, de fortes vagues à l'entrée du canal. Par pesée des particules retenues jusqu'à 30 µ, nous avons obtenu, en moyenne : 32,7 ag de matière sèche par litre d'eau, ce qui, pour un débit de 97,8 m³/sec, donne 11,5 tonnes de matières sèches en suspension emportées par heure par la Thièle en direction du lac de Bienne. La détermination a eu lieu à proximité du limnigraphe de Rothaus.

Chapitre troisième : HISTORIQUE DU LAC

Pour que le présent travail soit complet, nous estimons nécessaire de donner un aperçu de l'histoire de notre lac, ainsi que des travaux de nos prédécesseurs. Il ne peut s'agir, bien entendu, d'une restitution archéologique complète qui dépasserait largement le cadre de nos recherches.

Il est évident aussi que, parmi les travaux anciens touchant le lac de Neuchâtel, on ne peut accorder à tous la même valeur, car passablement d'entre eux aboutissent à des conclusions qui restent assez incertaines, alors que d'autres, par contre, donnent des renseignements plus précis et intéressants sur l'état de la nappe d'eau à une époque où sa pollution était, sinon inexistante, du moins susceptible d'être combattue par les phénomènes d'auto-épuration. Quoi qu'il en soit, la plupart de ces résultats ne sont utilisables qu'avec réserve, car ils sont issus, le plus souvent, de méthodes différentes de celles utilisées aujourd'hui, moins perfectionnées en général, et auxquelles on ne peut les comparer en toute sécurité.

7. Origine du lac.

Rappelons, tout d'abord (Sollberger, 1960) qu'au point de vue géologique, les rives du lac de Neuchâtel se répartissent en rives :

quaternaires récentes et glaciaires :	38,2 %
molassiques aquitaniennes et burdigaliennes :	41,6 %
urgoniennes :	20,2 %

Dans les grandes lignes, on peut dire que le Jura n'atteint le lac que de la Dîa à Treytel et d'Auvernier à St-Blaise, donc sur une partie de la rive gauche seulement. Partout ailleurs, on a de la molasse.

C'est dans la seconde moitié du 19^e siècle qu'on a commencé à discuter le problème de l'origine du lac : Desor (1860) affirmait qu'il s'agit soit d'un lac de combe, soit du résultat d'une érosion fluviale antérieure à la glaciation, comblé ensuite par les glaciers et creusé à nouveau ultérieurement. Studer (1864), puis Favre (1865) étaient persuadés que l'existence du lac était une conséquence directe des mouvements du sol consécutifs à la formation des montagnes suisses, tandis que Ritter (1889) supposait que le Plateau s'était soulevé au Pliocène, les excavations lacustres s'étant creusées ensuite par érosion fluviale. En 1898, Schardt a envisagé qu'un affaissement a formé le lac à la suite de l'avancement de la nappe de recouvrement des Préalpes sur le Plateau suisse; d'autre part, il voyait dans la dépression du lac de Bière la continuation des deux vallées du lac de Neuchâtel; pour lui, la Motte, l'île de St-Pierre et le Jolimont s'étaient formées ensemble. Mais alors que Fuhrmann (1905) admettait encore cette théorie, Schardt devait déjà modifier la sienne après avoir découvert la colline molassique de Marin-

Wavre, ce qui ne lui permettait plus d'homologuer les vallées des lacs de Neuchâtel et de Bienné comme faisant partie d'un tout; il a dû admettre aussi que la Thièle aurait dû passer alors par Anet pour rejoindre la Broye.

À l'encontre de ce qui précède, Penck et Brückner (1909) ont mis en évidence la formation de cuvettes par l'érosion glaciaire de langues du glacier du Rhône, théorie qui s'opposait à celle de Schardt obligé à faire une double hypothèse sur le cours des émissaires des trois lacs du pied du Jura.

Au siècle actuel, Monard (1919 a) n'a pas eu de difficultés à montrer que le lac de Neuchâtel obéit bien à la loi qu'il venait d'élaborer, à savoir que la profondeur de plusieurs lacs glaciaires échelonnés sur le cours d'un même glacier diminue en même temps que croît la distance qui les sépare du centre d'irradiation. Presque simultanément (1919 b), ce même auteur a démontré qu'un affaissement ne pouvait être envisagé pour expliquer la formation du lac; il n'existe pas de terrasses déformées, ni de fjorde dans les vallées affluentes, ni de failles sur la rive gauche du lac; il n'y a non plus aucune raison d'admettre que l'affaissement des Préalpes se serait limité aux trois lacs jurassiens au lieu de s'étendre à tout le périmètre du Plateau.

Argand (1916) avait largement confirmé cette hypothèse, Vouga (1943) l'a admise aussi. Wegmann (1950), tout en rappelant que, des quatre glaciations mentionnées dans l'avant-pays alpin par Penck et Brückner, deux seules d'importance majeure ont pu être identifiées, a mis en évidence la peu de valeur de l'hypothèse de Schardt sur la récurrence des glaciers du Jura.

Dans un travail consacré à l'étude pétrographique des dépôts glaciaires, Portmann (1955) a montré que la morphologie des moraines dans la région des lacs subjurassiens est difficile à établir à cause des complications dues aux interférences des glaciers du Rhône et de l'Aar. Au cours de ces recherches, des examens sur place ont eu lieu dans les formations marginales du lac, ainsi que dans sa dépression terminale.

Parmi les travaux qui ont permis de vérifier sur le terrain les théories émises précédemment, mentionnons ceux de Bessard (1858) sur la molasse à Montbois près Portalban, de Girardin (1929) sur la molasse horizontale recouverte de glaciaire au Vully, de Berset (1950) sur les affleurements aquitaniens recouverts de moraine à Chayres, de Quartier (1959 a) sur les 3m de glaciaire qu'il n'a pu perforer complètement sous 4 m de sédiments lacustres de la Motte et enfin ceux de Bosset (1961) sur les dépôts morainiques des grèves d'Onnens.

8. Principaux travaux antérieurs à 1957.

8.1. Niveau du lac.

Durant plus de 20 ans, Ch. Kopp (1855-1876)⁸⁾ a relevé les

8) Les dates indiquées pour chaque auteur concernent la période sur laquelle s'étendent les publications correspondantes.

variations de niveau de notre lac. Henri Ladame (1858-1886) a cherché à fixer la hauteur exacte du limnimètre de Neuchâtel, de même que Ad. Hirsch (1861-1895) qui a effectué de nombreuses mesures pour tenter de raccorder le zéro du limnimètre existant alors au repère situé sur l'ancien môle de Neuchâtel, disparu et qui, durant de très nombreuses années, avait servi de base pour contrôler les niveaux de la nappe d'eau. Les travaux de Kopp ont été poursuivis par Schneebeli (1876-1879), puis par R. Weber (1879-1882). Mais la plus longue série de mesures dans ce domaine, nous la devons à S. de Perrot (1897-1931). Après lui, Quartier (1948 b) a rassemblé et tenté de mettre en ordre toutes les données relatives au niveau du lac, en les ramenant à la base actuelle de nivellement de la Suisse.

8.2. Thermique du lac.

Le premier, Henri Ladame (1855-1861) a procédé à des mesures systématiques de la température du lac, en opérant pendant 8 ans en eau profonde et également par brouillard. Presque simultanément, Ch. Kopp (1855-1876) a enregistré une des plus longues séries de mesures qui soient parvenues jusqu'à nous. Cas particulier, R. Weber (1882) a noté les températures qu'il a observées dans le lac de Neuchâtel pendant le gel de 1879 à 1880. Quant à S. de Perrot (1928-1931), il a publié les indications qu'il a pu réunir pour la période de 1864 à 1928, ainsi que ses propres mesures sur le profil Neuchâtel-Portalban. Enfin, L'Inspection de la pêche du canton de Neuchâtel (1943-1958) a diffusé, sous forme de tableaux des mesures de températures effectuées à divers endroits du lac.

8.3. Examen chimique de l'eau.

On ne possède que peu de renseignements anciens sur le chimisme du lac de Neuchâtel. Après Conne (1904) dont les travaux se rapportent à des échantillons prélevés en 1903 à St-Aubin, J. Zander (1908) a effectué des analyses d'eau de 11 lacs suisses dont celui de Neuchâtel. Ses données jettent une lueur sur la composition de l'eau à cette époque, mais il faut déplorer que l'auteur se soit contenté de deux analyses fort espacées dans le temps pour conclure que "la composition de l'eau des grands lacs est constante!" Nous avons donné (Sollberger 1946) une série de résultats provenant de la campagne 1944-1945 au large de Champ Bougin, auxquels Portner (1951 a) a ajouté quelques analyses partielles réalisées au cours de ses recherches sur la sédimentation.

8.4. Plancton.

Si l'on se réfère au travail publié par J. Kùbler (1874), le lac de Neuchâtel aurait pu être qualifié de lac peu riche en Diatomées, à cette époque; toutefois, la manière dont l'auteur a effectué ses recherches laisse supposer que celles-ci sont trop fragmentaires et superficielles pour qu'on puisse les opposer utilement aux données actuelles. G. Burckhardt (1899) a comparé le plancton de notre lac à celui de 43 autres de Suisse ou des régions limitrophes et a établi une liste d'espèces existant à cette époque. Mais la première étude de détail du

plancton, nous la devons à G. Fuhrmann (1900-1916) qui a poussé les recherches jusqu'à 65 m de profondeur et a pu conclure que le lac de Neuchâtel était parmi ceux à plus forte productivité de Suisse.

Puis se sont succédés les travaux de : Th. Stingelin (1901) sur le plancton littoral et pélagique du Haut-lac, M. Thiébaud (1908-1911) sur les Entomostracés et les Rotateurs, Albert Monard (1918-1922) sur la faune profonde du lac et celle de la Motte, Henri Robert (1920-1931) sur le zooplancton, G. Mauvais (1927) sur l'ensemble de la faune littorale.

Enfin, A. Quartier (1948-1951) a examiné le problème de *Tabelaria fenestrata* et de quelques Cladocères planctoniques, tandis que Marg. Wüthrich (1948) publiait les résultats de ses recherches sur les Nauplii de *Diaptomus*.

8.5. Macrofaune.

G. Fuhrmann (1902-1909) a étudié les maladies et les parasites pouvant affecter les Poissons et P. Godet (1907) a publié un catalogue général des Mollusques de notre lac. Après E. Piguet (1911) qui s'est occupé des Oligochètes, J. Piaget (1912-1914) a exécuté des recherches sur les Mollusques profonds et Albert Monard (1918-1922) sur la faune profonde du lac en général. M. Vouga (1922-1933) a consacré de nombreuses années à la question des Corégones, tandis que G. Mauvais (1927) examinait la faune littorale dans son ensemble. D'autres auteurs ont orienté leurs recherches vers des cas plus particuliers, tels : G. Dubois (1928-1929) qui a étudié les Cercaires et J. Favre (1941) les Pisidium. A. Quartier (1945-1956) a repris l'examen des Corégones, ainsi que d'autres poissons, en collaboration avec Dottrens (E. Dottrens et A. Quartier 1949). Enfin, J.-L. Perret (1952) a étudié les Hirudiniées et Marg. Wüthrich (1955) les oeufs ainsi que les alevins de Palée.

8.6. Sédiment lacustre.

En examinant les Pisidium ramassés dans le fond, S. Clessin (1877) a signalé ce qu'il appelle une "preuve de l'existence des courants dans le fond", du fait de la présence de dépôts de limon aggloméré sur la partie postérieure des coquilles de ces mollusques. A la même époque, E. Rialer et Walther (1877) ont publié des tableaux de l'analyse chimique du limon du fond de quelques lacs suisses parmi lesquels figure le nôtre. Puis G. Ritter (1889) a donné les résultats de sondages effectués en avant du Crêt à Neuchâtel et G. Steiner (1919), dans une étude des Nématodes ramenés du fond par Monard, cite les analyses faites auparavant par Hofmänner et Menzel pour le limon, ainsi que celles de Daday (1911) sur le même objet; toutefois, l'auteur a supprimé, dans son travail, la liste des références "à cause des restrictions de papier", de sorte que les deux derniers travaux cités ne peuvent plus être retrouvés actuellement.

Par contre, A. Monard (1920), à propos des Rotateurs observés sur des Cladocères provenant de dragages de la Motte, décrit le limon du

lac : "formé d'alluvions glaciaires remaniés, fluviatiles et lacustres et de carbonate de calcium précipité chimique, imprégné de Rhizopodes et de Diatomées, et qui se rattache, minéralogiquement, très étroitement à celui de l'Untersee". Enfin, C. Portner (1951 a et b) a consacré sa thèse à la formation du sédiment calcaire du lac.

9. La première correction des eaux du Jura.

Afin de ne pas dépasser le cadre de notre travail, nous nous permettons de renvoyer le lecteur que cette question intéresse, à la publication de Peter (1922) citée par Quartier (1948 b), ainsi qu'à celle de Chavaz (1953).

* * *

Deuxième partie

L'ORGANISATION DE LA CAMPAGNE

Si nous paraissions accorder passablement d'importance à cette question, c'est que les résultats de nos travaux dépendent fortement de la bonne élaboration du plan des opérations, de la parfaite mise au point du matériel utilisé sur le lac et aux affluents, ainsi que du choix judicieux des méthodes appliquées aux recherches "in situ". Cette remarque est valable, d'ailleurs, aussi bien pour l'eau que pour les sédiments et le plancton étudiés

Par contre, la question des méthodes de travail en laboratoire sera traitée au début des 3^{me} et 5^{eme} parties.

Chapitre quatrième : GENERALITES SUR L'ETUDE DU LAC.

10. Les buts à atteindre.

Nous avons esquissé, dans une publication précédente (Sollberger, 1960, p. 88) les problèmes actuels posés par le lac de Neuchâtel.

D'une manière générale, il nous semble que, le plan d'étude d'un grand lac peut s'élaborer en trois points :

- 1) répartir un nombre aussi élevé que possible de stations sur l'ensemble du lac,
- 2) à chacune de ces stations, découper la colonne d'eau en segments suffisamment nombreux à examiner chacun pour soi,
- 3) durant une période de quelques années au moins, étudier l'évolution de ces divers segments à des intervalles de temps aussi courts que possible.

L'application d'un tel plan implique la mobilisation d'un personnel et la mise en œuvre d'un matériel en quantités telles qu'on ne peut le concevoir que pour un très grand institut limnologique bien spécialisé. Cela dépasse donc les possibilités de n'importe lequel des laboratoires cantonaux de notre pays.

C'est pourquoi, tout en restant dans la limite des moyens mis à notre disposition, mais en nous efforçant de nous rapprocher le plus possible du plan ci-dessus, nous avons cherché à atteindre les deux buts suivants :

- a) obtenir une image aussi complète que possible de la situation actuelle du lac, aussi bien dans le temps que dans l'espace et cela en proportionnant le nombre des mesures et analyses simultanées au nombre des facteurs écologiques susceptibles d'influencer les résultats à interpréter;
- b) éviter des erreurs d'interprétation dues à des observations de trop courte durée, en prolongeant les recherches de manière à ce que les moyennes des résultats obtenues soient le moins possible entachées d'erreurs inhérentes aux conditions météorologiques du moment.

11. Densité de la répartition des stations.

Nous estimons que le choix de cette densité est d'autant plus important que la morphologie sous-lacustre s'écarte davantage de celle d'une cuvette de forme simple et régulière. On conçoit facilement, en effet, qu'il y a d'autant plus de chances d'avoir affaire à des masses d'eau hétérogènes que le relief sous-lacustre présente des bassins mieux marqués et plus fermés. Dans le cas de notre lac, la présence de la

Motte crée précisément une complication de ce relief.

Tenant compte de cette particularité, la répartition des stations, telle qu'elle sera exposée au chapitre cinquième, correspond à une densité variant d'une station pour 18 km² (stations principales) à une pour 5 km² (autres stations).

Signalons, à titre comparatif, que l'EAWAG (1955) avait choisi la densité d'une station pour 8 km² dans le lac de Morat et Nydegger (1957) dans les 7 lacs suisses qu'il a examinés, une station pour 16 à 90 km² suivant la nappe d'eau considérée.

12. Découpage du temps.

Il s'agit de la question primordiale, pour l'étude moderne d'un lac, car, ainsi que le montrera la suite de ce travail, les changements dans le biotope lacustre sont beaucoup plus rapides qu'on se l'était imaginé jusqu'ici et cela paraît être tout particulièrement le cas lorsque la pollution a atteint une certaine ampleur.

Sans rien vouloir enlever à la valeur des travaux de nos prédécesseurs, nous sommes persuadés, néanmoins, que beaucoup d'observations intéressantes ont échappé à leur perspicacité parce que les travaux de cette époque ont été exécutés à des intervalles trop longs, en même temps que durant des périodes trop courtes. Il était courant, en effet, et c'était le cas encore dans la première moitié de ce siècle, de n'opérer qu'à des intervalles ne descendant que rarement au-dessous d'un mois.

Dans la conception moderne des problèmes à résoudre, l'idéal serait de pouvoir procéder à des déterminations ou à des mesures heure par heure durant de très longues périodes ou, mieux encore, de manière continue durant plusieurs années grâce à des appareils enregistreurs placés "in situ".

Faute de pouvoir réaliser des opérations quotidiennes sur le lac, nous nous sommes contentés de travaux hebdomadaires à une station. Cependant, durant la même période, des opérations de plus grande envergure ont eu lieu simultanément à plusieurs endroits, mais à des intervalles qui n'ont pu être ramenés à moins d'un mois.

13. Durée des recherches.

Lors des travaux effectués avant 1944, avec peu de stations et de longs intervalles, les opérations n'ont pas duré chaque fois plus de deux ans, en général. Aussi faut-il n'accueillir les moyennes issues de ces recherches que comme valeurs se rapportant à des conditions météorologiques bien définies et caractérisées essentiellement de la période à laquelle elles se rapportent.

C'est pourquoi, désirant obtenir des moyennes plus proches de la réalité et plus générales que dans les cas précédents, nous avons basé nos calculs sur une période de quatre ans et demi s'étendant de juin 1957 à décembre 1961.

Précisons, toutefois, que nos travaux se poursuivent au-delà de janvier 1962, mais qu'à quelques exceptions près, il n'en sera pas fait état dans la présente rédaction.

Chapitre cinquième : LES EMPLACEMENTS DE TRAVAIL.

14. Les stations du lac.

14.1. Les stations principales.

Le lac a été divisé en deux secteurs attribués chacun à un laboratoire cantonal :

un secteur dit "vaudois", au SW d'une ligne joignant St.Aubin à Estavayer-le-lac (partie amont);

un secteur dit "neuchâtelois", au NE de cette même ligne (partie aval).

Dans chacun de ces secteurs, l'emplacement des stations de recherches a été choisi en fonction de la topographie sous-lacustre et en raison aussi d'influences telles que la proximité d'affluents, l'existence présumée de courants sous-lacustres etc., mais en tenant compte également des facilités d'accès depuis les bases de départ des expéditions, soit le port de Neuchâtel pour le secteur neuchâtelois et la Poissine à l'embouchure de l'Arnon pour le secteur vaudois.

14.1.1. Grandes expéditions.

Douze stations portent le nom de la région dans laquelle elles se trouvent et sont désignées par une lettre de l'alphabet dans le tableau XXI.

TABLEAU XXI

(cf. page suivante)

TABEAU XXI

Stations des grandes expéditions

Station	Symbole	Distance	Profondeur	Caractéristiques
Treytel	A	2,300	153	Profondeur maximum du lac et de la vallée nord
Gletterens	B	2,500	100	Vallée sud
Gletterens	B'	1,000	45	Rampe de la rive droite
Grand Verger	C	0,180	43	Talus du delta de l'Areuse
Champ Bougin	D	0,480	45	Point de comparaison avec la campagne 1944-45
Neuchâtel	B	0,150	16	Beins (EL) ⁹⁾ à proximité de l'égout principal de Neuchâtel
Bas-lac	F	3,000	23	Bord de la très grande beins près de l'embouchure de la Broye
Yverdon	K	1,000	11	Beins à l'embouchure de l'Orbe-Thièle
Yvonand	L	1,000	11	Beins à l'embouchure de la Mentue
Concise	M	0,400	31	Talus (EL) de la rive gauche
Naut lac	N	1,150	82	Zone profonde de la vallée unique du haut lac.
Grandson	P'	0,480	36	Point de comparaison avec une étude antérieure relative à la station de pompage d'eau potable d'Yverdon.

Par "distance" il faut entendre l'éloignement (en km) de la station à la rive la plus proche. La "profondeur" est exprimée en mètres par rapport au niveau moyen du lac.

A chacune de ces stations, des mesures de température, de pH et de conductibilité électrique sont exécutées mètre par mètre jusqu'au fond. Par contre, les prélèvements d'échantillons d'eau sont récoltés à la surface, puis à 10, 20, 30, 40, 80, 100 et 140 mètres pour autant que la profondeur le permette, ainsi qu'à des niveaux intermédiaires correspondant aux sauts thermiques, de même qu'à 1 m au-dessus du fond et dans la micro-couche de l'interface eau-sédiments.

9) Cf. paragraphe 1.

Le plancton se pêche : du fond à 100 m., de 100 à 50 m. et de 50 m. à la surface. Simultanément le sédiment lacustre est prélevé par bennage ou carottage.

14.1.2. Petites expéditions.

Ne pouvant exécuter des recherches à chacune des stations A à P¹ à intervalles de moins d'un mois, nous avons choisi, dans le secteur neuchâtelois, une station de référence répondant aux conditions indispensables suivantes : point éloigné des principales agglomérations polluantes, suffisamment distant des rives, en zone aussi ouverte que possible mais à un endroit dont le fond soit situé au-dessous de la limite d'action des vagues, facilement accessible par n'importe quel temps et pas trop éloigné de la base de départ. Dans ces conditions, notre choix s'est porté sur la baie d'Auverrier (station Z) à 1120 m. au SE de l'embarcadere du même nom pour une profondeur de 115 m. à cet endroit (fig. 1).

On y mesure la température de l'eau mètre par mètre de la surface à 50 m. de profondeur, puis tous les 5 m. jusqu'au fond; on y prélève des échantillons d'eau comme aux stations A à P¹, mais, en plus, à 15, 25 et 30 m.

Les pêches de plancton se limitent à la zone comprise entre 30 m. de profondeur et la surface.

14.2. Les stations secondaires.

14.2.1. Profils transversaux.

Les problèmes thermiques nécessitent un examen approfondi du lac, aussi bien dans le temps que dans l'espace. C'est pourquoi nous avons réparti des sondages thermométriques en profils transversaux, choisis de manière à toucher le même jour et toujours dans le même ordre, le maximum d'endroits intéressants, ce qui est indispensable à une bonne comparaison des résultats entre eux.

Les stations sont échelonnées de km en km sur chacun des profils, à partir de la rive gauche du lac. Elles sont numérotées de l'E à l'W et du N au S de 11 à 82 et le premier chiffre de chaque nombre désigne le profil, le second le kilométrage.

Les fig. 1 et 33, ainsi que le tableau XXII se rapportent aux trente-neuf stations des profils et en donnent les caractéristiques.

TABEAU XXII

Caractéristiques des profils transversaux du lac

No	Nom	Caractéristiques
10	Hauterive-Cudrefin	Haute fonde du bas-lac jusqu'au bord supérieur du talus du bassin de Neuchâtel; partie supérieure de la vallée de Cudrefin.
20	Champ-Bougin-Montbec	Traversée centrale du bassin de Neuchâtel.
30	Grand Verger-Portalban	Ravins E du delta de l'Areuse; embouchure de la vallée nord dans le bassin de Neuchâtel; sommet de la Motte; partie aval de la vallée sud; beine de la rive droite du lac.
40	Pointe du Grain-Chevroux	Zone la plus profonde du lac; dorsale occidentale abaissée de la Motte; partie amont de la vallée sud; beine de la rive droite.
50	St.Aubin-Estavayer-le-Lac	Vallée nord; plateau incliné faillant suite à la vallée sud; beine de la rive droite.
60	La Dia-Cheyres	Amont de la vallée nord; pentes de l'extrémité méridionale du Grand lac.
70	L'Arnon-L'Epena	Zone aval du Petit lac.
80	Grandson-Cheseaux	Haute fonde amont du Petit lac.

Les extrémités des profils sont repérées sur les rives et par sondages. Par brouillard à faible visibilité, le repérage sur les rives est remplacé par la marche à vitesse connue sur des angles de cap donnés.

A chaque station, on mesure la température comme à 2.

14.2.2. Stations diverses.

A côté des sédiments prélevés aussi aux stations des profils transversaux, des carottages et des bennages du fond ont été exécutés à 37 endroits du bassin de Neuchâtel et à un sur la Motte, ainsi qu'à

LAC DE NEUCHÂTEL

SEDIMENTS LACUSTRES

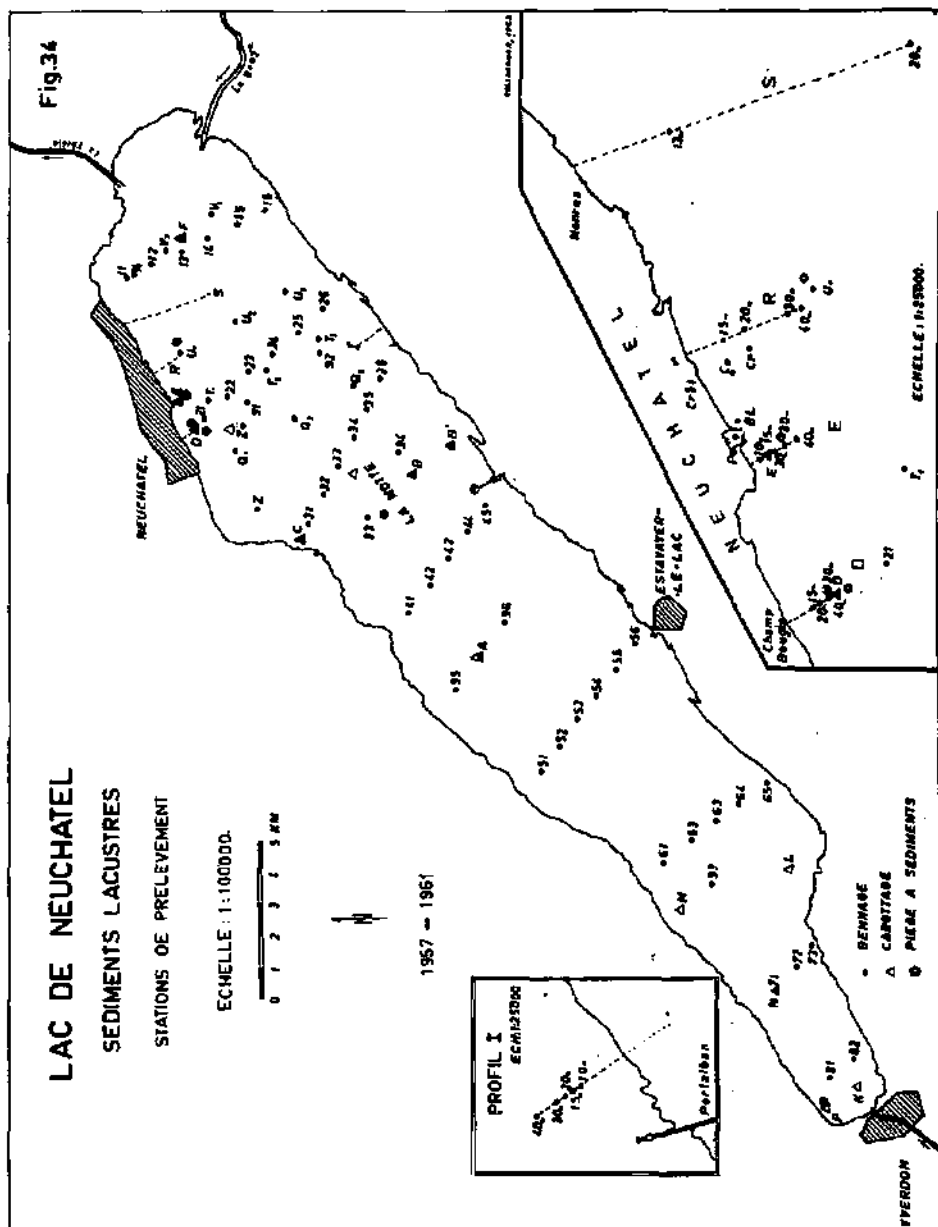
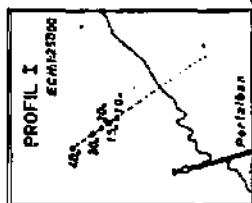
STATIONS DE PRELEVEMENT

ECHELLE : 1:100000.

0 1 2 3 4 5 KM



1957 - 1961



7 stations isobathes (nos 91 à 97) réparties sur l'ensemble du fond du lac. Cinq emplacements ont reçu des pièges à sédiments pour étudier la sédimentation actuelle.

De plus amples détails, sur ces emplacements seront donnés plus loin par la fig. 34.

15. Les régions d'étude des courants sous-lacustres.

Loin d'être une masse immobile, l'eau du lac, au contraire, est le siège de nombreux mouvements dont les plus importants constituent les courants sous-lacustres.

Pour étudier ces derniers, 7 régions ont été réparties selon le tableau XXIII auquel se rattache la fig. 35.

TABLEAU XXIII

Régions dans lesquelles les courants sous-lacustres ont été étudiés.

No	Désignation	S.	Caractéristiques
1	Baie d'Auvernier	6	Région entourant Z et comprenant toute la baie, de Serrières à l'embouchure de l'Areuse.
2	Embouchure de la Broys	6	Hauts fonds de l'extrémité orientale du lac, de part d'autre de l'embouchure du canal, jusqu'à la vallée de Cudrefin.
3	Champ Bougin	3	Littoral gauche du lac comprenant la station D.
4	Chevroux-Portalban	20	Beine (EL) et talus (EL) de la rive droite entre Chevroux et Portalban.
5	Nid du Crô	8	Zone peu profonde du littoral urbain de Neuchâtel et comprenant l'emplacement futur de rejet des eaux épurées de la ville.
6	Treytel	13	Région la plus profonde du lac et partie médiane de la vallée nord.
7	La Motte	30	Zone traversant le lac entre la Pointe du Grain et l'embouchure de l'Areuse, d'une part, et Chevroux d'autre part, englobant le sommet de la Motte ainsi qu'un secteur important de chacune des vallées au nord et au sud.

S = surface en km².

Pour observer le déplacement des dragues à courants, 44 repères ont été marqués sur le terrain, à des endroits convenables et numérotés dont la liste est déposée au Laboratoire cantonal de Neuchâtel.

Les mesures des courants sous-lacustres ne peuvent avoir lieu que par temps clair.

16. Les stations sur les affluents.

L'eau arrive au lac par : la pluie qui tombe à sa surface, les égouts urbains déversant les eaux usées et les affluents naturels du lac (cours d'eau superficiels, éventuellement sources sous-lacustres).

Pour les affluents superficiels, un programme de recherches portant sur un certain nombre d'entre eux a été élaboré, compte tenu des possibilités d'analyse par les deux laboratoires cantonaux de Neuchâtel et de Lausanne.

Parmi les 79 affluents mentionnés au tableau XVII, nous avons choisi les 15 suivants: (fig.36).

- a) en secteur vaudois : la Brine, le Bey, le Mujon, le Canal oriental, le Buron et la Mentue en terrain molassique;
la Thielle-effluent, coulant en terrains jurassique et molassique
l'Arnon, en terrain jurassique essentiellement.
- b) en secteur neuchâtelois :
la Broye en terrain molassique
le ruisseau de St.Blaise, le Seyon, la Serrière, l'Areuse, la Raisse, et la Dia, en terrain jurassique.

Parmi ceux laissés de côté citons :

le Mouson, à régime artificiel et qui sera étudié dans un autre travail avec le Loclat de St-Blaise dont il est l'effluent;

le canal de la Thiels lorsqu'il fonctionne comme affluent, ce qui est rare.

Lorsque le canal de la Broye fonctionne comme affluent, ce qui est presque toujours le cas, il n'amène pas seulement de l'eau du lac de Morat, mais aussi des eaux superficielles et usées, drainées dans les Grands Marais. L'étude détaillée du canal et de ses affluents constitue la matière de recherches qui seront publiées ultérieurement et dans le présent travail, nous ne prendrons en considération que les résultats obtenus à la station de la Sauge pour l'eau du canal peu avant son entrée dans le lac de Neuchâtel.

LAC DE NEUCHÂTEL COURANTS LACUSTRES

ZONES ETUDIÉES.

ECHELLE : 1:100000



1957-1962



1:100000

ZONES ETUDIÉES

1	BAYE D'AUVERNIER
2	LA BROÛE
3	CHAMP BOUGIN
4	CHEVROUX-PORTALBAN
5	NID DU CRO
6	TRÉTEL
7	LA MOTTE

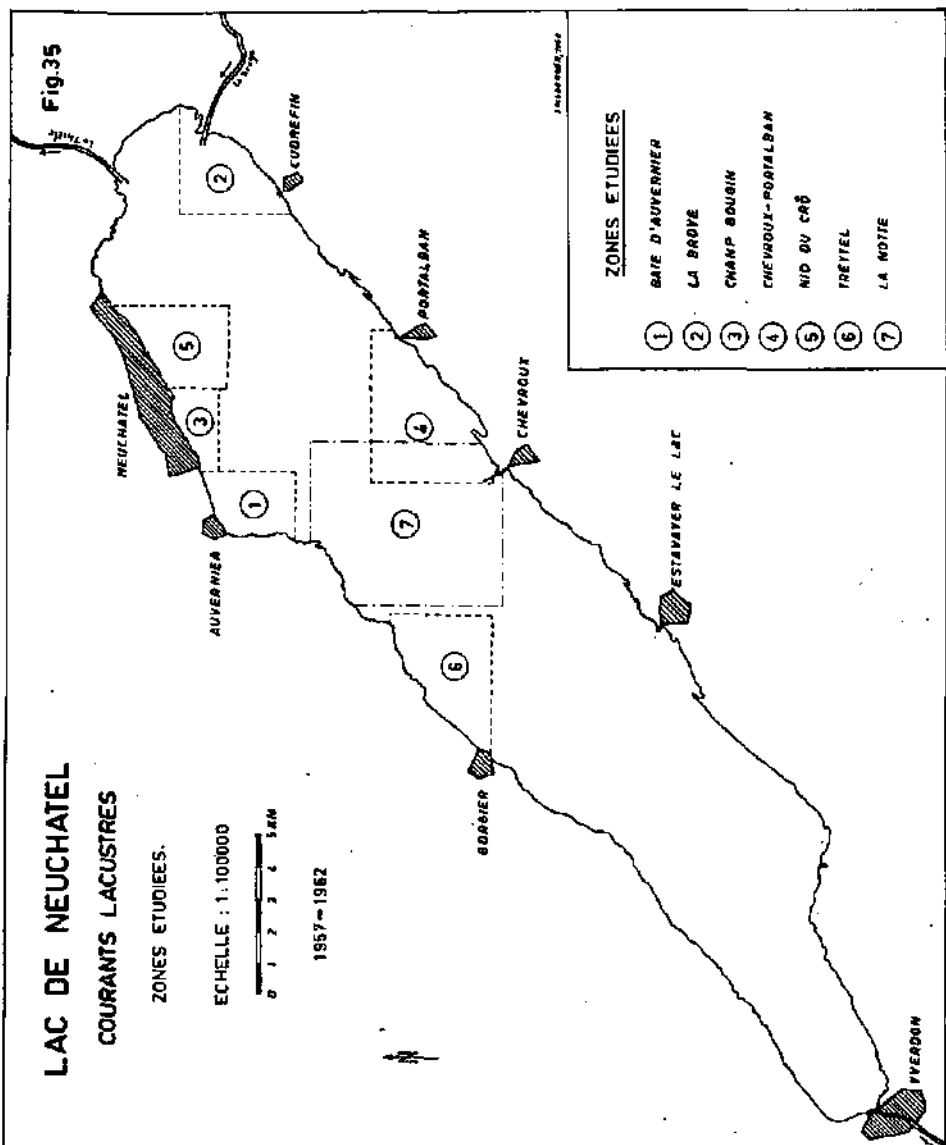


Fig.35

17. Les stations de comparaison des autres lacs.

Pour comparer la situation du lac de Neuchâtel à celle de ses voisins de Bienns et Morat, quelques prélèvements et mesures ont été exécutés, le même jour chaque fois, dans les 3 lacs à des profondeurs correspondantes.

Pour le lac de Morat, la station de comparaison est à 1,7 km de la rive S, sur la ligne Pointe de Greng-débarcadère de Môtier, profondeur 44 m et pour le lac de Bienns, au large de Gléresse, à 0,6 km de Bipecthal, sur la ligne Bipecthal-Nez de l'Ile de St-Pierre, profondeur 43 m.

Chapitre sixième : LES DATES DES OPERATIONS

18. Chronologie des recherches.

Le présent travail couvre la période de juin 1957 à décembre 1961. Cependant, quelques opérations ne s'étendent pas à toute la période ou la dépassent; il en sera fait mention ultérieurement.

Dix-huit "grandes expéditions" ont eu lieu aux dates suivantes :

1957 : 25 juin, 27 août, 29 octobre et 26 décembre.

1958 : 27 février, 29 avril, 24 juin, 26 août, 30 septembre et 28 octobre.

1959 : 28 avril, 25 août, 29 septembre et 27 octobre.

1960 : 26 avril, 30 août, 27 septembre et 25 octobre.

"Les petites expéditions" à la station Z, ont débuté en mai 1958, une fois par semaine, à l'exception de décembre 1958, janvier et février 1959 où, faute de disposer d'un bateau équipé pour le travail en hiver, les opérations ont été suspendues.

Depuis mai 1959, les "profile transversaux" ont été parcourus chaque mois, d'avril à octobre habituellement. Le nombre de ces expéditions s'élève à 18 de 1959 à 1961, soit 5 en 1959, 6 en 1960 et 7 en 1961; elles continuent actuellement.

Les stations diverses, mentionnées au paragraphe 14.2.2 ont été examinées en 1957, 1958 et 1961, mais les pièges à sédiments n'ont fonctionné qu'en 1960 et 1961.

L'étude des courants sous-lacustres a débuté le 16 avril 1959 et s'est poursuivie, sauf en hiver, à des intervalles variant avec les circonstances météorologiques. A fin 1961, 16 opérations avaient été réalisées, soit 8 en 1959, 6 en 1960 et 2 en 1961; les recherches se poursuivent encore.

Les canaux de la Thièle-effluent et de la Broys ont été étudiés de 1957 à 1960, le lendemain de chacune des 18 "grandes expéditions". Des opérations supplémentaires ont eu lieu à la Saugé, en :

1958 : le 4 décembre,

1959 : les 21 mai, 8 juillet et 2 novembre,

1960, les 23 mars, 18 mai, 20 juillet, 14 septembre et 27 octobre.

Dans le "secteur vaudois" du lac, par contre, huit affluents ont été examinés une fois par mois chacun, de mars à décembre 1960.

Chapitre septième : LE MATERIEL UTILISE

19. Moyens de transport.

19.1. Sur le lac.

Quatre bateaux ont été utilisés, dont deux à motogodille (a et b) et deux à moteurs fixes (c et d). Ces derniers ont les caractéristiques suivantes :

	<u>c.</u>	<u>d.</u>	
Longueur hors tout	12,0	34,0	mètres
Largeur hors tout	3,0	5,6	mètres
Déplacement à lège	8	74	tonnes
Tirant d'eau	1,0	1,3	mètres
Vitesse maximum	30	13,5	nœuds
Puissance des moteurs	2 x 285	220	HP

Tous deux, munis de cabines, sont utilisables en hiver et par mauvais temps, ce qui permet d'obtenir des séries de mesures aussi complètes que possible. Le bateau c se déplace suffisamment rapidement pour pouvoir parcourir tous les profils transversaux en un seul jour.

On utilise les bateaux :

- a) pour le secteur vaudois (parcours 22 km);
- b) pour mesurer les courants sous-lacustres;
- c) pour les petites expéditions hebdomadaires (9 km) et les profils 10 à 80 (112 km) ainsi que pour les déplacements sur les trois lacs (79 km);
- d) pour les grandes expéditions (43 km).

Le Club de sports subaquatiques de Neuchâtel utilise son propre bateau pour la pose et la relève des pièges à sédiments.

19.2. A terre.

Pour transporter le matériel, chaque équipe utilise une voiture ou une jeep.

20. Matériel de mesure et de prélèvement.

Nous le décrirons brièvement, du fait que beaucoup des appareils utilisés sont du type classique en limnologie. Nous n'insisterons que sur les modifications apportées nous-mêmes à cet appareillage, ainsi que sur les nouveaux engins mis en service au cours de notre étude.

20.1. Câbles et treuils.

Tous nos treuils, à manivelles¹⁰⁾, sont équipés de 170 m de câble d'acier de 2 mm de diamètre. Chacun possède sur un bras mobile une poulie de renvoi solidaire d'un compteur indiquant la longueur de câble déroulée. Tous les compteurs ont été vérifiés.

Par temps calme, la profondeur à laquelle fonctionnent les appareils immergés, est connue à 1 dm près. Par mauvais temps, la dérive du bateau incline le câble et l'écart Δ_z entre la profondeur lue au compteur et la profondeur réellement atteinte est fonction de l'inclinaison du câble. En désignant par a la longueur de câble filé, par b la profondeur atteinte réellement par l'engin immergé et par β l'angle du câble avec la verticale, l'erreur de profondeur imputable à la dérive est :

$$\Delta_z = a - b = a(1 - \cos \beta)$$

En posant $\Delta_z = 1\text{m}$, on tire: $\cos \beta = 1 - \frac{1}{a}$ ce qui permet de calculer les angles β pour lesquels l'erreur est de 1 m à diverses profondeurs; on obtient ainsi :

pour $\Delta_z = 1\text{m}$, $\beta = 11^\circ 30'$	pour $a = 50\text{ m}$
8°	" 100 m
6° 40'	" 150 m

En réalité, le câble oblique n'est rectiligne que dans les couches supérieures et par très fort vent; plus bas, ou lorsque le vent est faible, le câble acquiert une courbure due à l'action des courants sous-lacustres et qui est d'autant plus marquée que la densité de l'appareil immergé est plus faible. Cette courbure ne permet pas de déterminer exactement la profondeur réellement atteinte et l'action des courants se manifeste par une vibration du câble d'autant plus perceptible que le courant est plus fort.

Pour remédier à ces inconvénients, tout en continuant à opérer mètre par mètre si c'est nécessaire, on alourdit l'appareil immergé en lui suspendant un ou plusieurs plombs de sonde (5 kg et plus) et en veillant à ne pas atteindre les angles β mentionnés pour $\Delta_z = 1\text{m}$. Lorsque ces angles sont dépassés, force est de renoncer aux opérations mètre par mètre.

10) Typs Friedinger, Lucerne; fournisseur actuel : maison Hans Büchi, optique, Berne.

20.2. Mesure de la profondeur.

A l'exception des grandes expéditions, les sondages sont exécutés au fil, à l'aide d'un plomb de sonde de 5 kg. Pour les levés détaillés du fond du lac, ainsi que pour les "grandes expéditions", nous utilisons un échosondeur à ultra-sons¹¹⁾ du type Echolot, à enregistrement graphique, que Rouch (1943, p. 78) et Barnes (1959, p. 72) décrivent dans leurs publications. Il s'agit de l'appareil utilisé par Quartier (1956 a) pour essayer de révéler la morphologie de notre lac. L'erreur d'enregistrement ne dépasse par ± 10 cm pour des sondages de moins de 14 m; $\pm 1\%$ au-delà.

20.3. Mesure de la température.

20.3.1. Température de l'air.

Au lieu du thermomètre-fronde décrit par Rouch (1931), nous utilisons un thermomètre à moulinet (dit aussi thermomètre-crécelle), à mercure permettant d'apprécier le demi-degré et dont la précision est égale à celle préconisée par Darbre (1943). Les mesures ont lieu toutes les demi-heures, à 2 m au-dessus du lac, et les résultats sont notés au demi-degré.

20.3.2. Température de l'eau en surface.

Par surface, il faut entendre, dorénavant, la couche d'eau directement en contact avec l'air surmontant le lac et d'une puissance ne dépassant pas 20 cm.

La température se mesure chaque demi-heure, au dixième de degré, à l'aide d'un thermomètre à mercure, protégé par une gaine métallique, plongeant dans la couche de surface, à 1 m au moins de la coque du bateau et dans l'ombre de celui-ci.

20.3.3. Température de l'eau au-dessous de la surface.

Comme Robert (1921) pour le lac de Neuchâtel et Rivier (1936) pour celui de Morat, nous avons mesuré les températures profondes, lors de nos travaux précédents (Sollberger, 1946) et encore au début des recherches actuelles, au moyen d'un thermomètre à renversement du type Negretti et Zembra protégé contre la pression et tel qu'il est décrit par Barnes (1959). Quoique d'un emploi classique, aussi bien en océanographie (Rouch, 1946, p. 74) qu'en limnologie, ce thermomètre, utilisé seul ou accouplé à une bouteille à prélèvements, nécessite, pour chaque mesure une descente avec stationnement à la profondeur voulue, l'envoi d'un messageur de déclenchement, puis une remontée suivie de la lecture, ce qui occasionne de nombreuses manœuvres et une perte de temps vite prohibitives lorsque l'opération doit être répétée à nombre de niveaux différents. De Perrot (1932) en avait fait l'expérience lors de ses

11) de la Atlas-Werke G.m.b.H., à Brême (Rép.féd.d'Allemagne).

sondages en profil de Serrières à Portalan et c'est ce qui l'avait incité à multiplier le nombre des thermomètres qu'il déclenchait tous simultanément en secouant la ligne de sonde. Cette modification du procédé lui a causé malgré tout énormément de déboires.

Afin d'obtenir des mesures mètre par mètre à chaque station, nous employons une sonde à thermistor¹², alimentée par une pile de 1,5 volt telle que l'ont décrite, de manière très détaillée, Mortimer et Moore (1953), puis Dussart (1954). Les variations de résistance électrique du semi-conducteur constituant le thermistor sont mesurées par un galvanomètre et converties en degrés de température. Les 170 m de câble de notre sonde sont bobinés sur un cabestan fixe et déroulés à la main lors de chaque sondage. Ce procédé limite à un seul contact fixe la liaison électrique entre le thermistor et le galvanomètre, ce qui ne serait pas le cas si le câble était enroulé sur un tambour mobile. C'est en évitant ainsi tout contact mobile ou supplémentaire que nous avons pu conserver, plusieurs mois durant, l'étalonnage auquel nous avons procédé primitivement, en évitant également les difficultés rencontrées et décrites par Rouch (1959, p. 114). Grâce à cet appareil, les températures se mesurent à 0,05 degrés près.

Signalons qu'à la même époque que nous, mais pour l'Untersee, Auerbach et Rottengatter (1960) ont remplacé le thermomètre à renversement du type Richter et Wiese utilisé jusqu'alors par un thermomètre électrique.

20.4. Mesure de la transparence.

Imitant la plupart des limnologues et océanographes, nous conservons pour cette mesure le vieux mais simple procédé imaginé il y a plus d'un siècle par le Père Secchi, en déterminant la profondeur à laquelle un disque blanc, de 30 cm de diamètre, immergé horizontalement, cesse d'être visible à l'œil nu. Les mesures exécutées ainsi ont l'avantage, en ce qui concerne beaucoup de lacs suisses et Neuchâtel en particulier, d'être les seules à avoir été faites antérieurement déjà et sans modification du procédé, donc dans des conditions tout à fait comparables à celles d'aujourd'hui. Grâce à un entraînement facilement acquis, à condition que les mesures soient exécutées autant que possible toujours par la même personne, les transparences peuvent être mesurées à 5 cm près en prenant la moyenne des profondeurs auxquelles le disque disparaît et réapparaît. Lorsque la surface du lac est agitée, le disque est observé à la lunette de calfat afin d'éliminer le scintillement de la surface de l'eau.

20.5. Mesure de l'absorption de la lumière.

La lumière solaire, pénétrant dans l'eau du lac, y subit une absorption importante qui augmente avec la puissance de la couche traversée et qui conditionne la photosynthèse chlorophyllienne. Mesurée

12) type 50 de la Compagnie générale de métrologie Metrix, Annecy, Haute Savoie (France).

dans le sens horizontal par contre, et à une distance constante de la source de lumière, l'absorption par l'eau dépend essentiellement du trouble provoqué par les matières en suspension, et cela surtout lorsqu'on s'éloigne de la surface du lac. C'est pourquoi, nous procédons à des mesures de l'absorption lumineuse aussi bien dans le sens vertical que dans la sens horizontal.

20.5.1. Méthode sensitométrique.

Cette méthode, déjà ancienne, est basée sur l'emploi du photomètre de Eder-Hecht. Elle consiste à impressionner un papier photographique par la lumière arrivant verticalement de la surface et passant à travers une échelle sensitométrique de gradation connue. Le papier est dans un appareillage étanche décrit par Suchlandt et Schmassmann (1935) lors de leurs recherches sur les lacs alpins de la région de Davos. Suchlandt (1937) en fait une critique très détaillée.

Essayant d'obtenir ainsi des résultats qui auraient pu être comparés, dans une certaine mesure, à ceux de Suchlandt et de Schmassmann, nous avons utilisé cette méthode en employant simultanément deux cassettes actinométriques:¹³⁾ l'une immergée à des profondeurs déterminées, l'autre fonctionnant à l'air et servant de base de comparaison. Chaque cassette a été chargée de papier autositif Kodak, exposée 20 min. au moins et le seuil de noircissement mesuré après développement photographique. Cette méthode ne nous a pas donné satisfaction, car elle s'est révélée lente, compliquée et trop peu sensible. Nous l'avons abandonnée au profit de la suivante.

20.5.2. Mesure directe.

On descend dans le lac une cellule photoélectrique¹⁴⁾ placée dans une chambre étanche à fenêtre et reliée à un luxmètre de Schiffmann, étalonné. La cellule étant placée horizontalement, la lumière est mesurée tout d'abord immédiatement au-dessus de la surface de l'eau, puis mètre après mètre jusqu'à 20 m. Le nombre de lux mesuré à chaque profondeur, est comparé à celui mesuré à l'air, ce qui permet de calculer la proportion de lumière absorbée par une épaisseur croissante d'eau. La rapidité des opérations dispense de mesurer les variations de la lumière incidente durant la descente de l'appareil. On évite toujours de faire des mesures lorsque les nuages se déplacent trop rapidement ainsi que dans l'ombre du bateau, de même que lorsque le soleil est trop près de l'horizon. Nous n'avons pas exécuté de mesures en lumière monochromatique. Les limites d'étanchéité et de résistance à l'éclatement de la fenêtre ainsi que des joints d'entrées des câbles électriques dans la chambre renfermant la cellule, ne nous permettant pas de mesurer l'absorption de la lumière au-delà de 20 m de profondeur.

Pour la mesure dans le sens horizontal, on fixe la chambre à

13) de la maison Friedinger, de Lucerne.

14) Photron-Element, Typ 25, diamètre 55 mm.

l'extrémité d'un support métallique portant, à l'opposé, une ampoule électrique dans un globe transparent et étanche. La cellule photoélectrique se trouve placée alors verticalement et à 1,0 m du filament de l'ampoule¹⁵⁾ rendu incandescent par du courant continu à 110 ± 1 volt dont la tension est contrôlée constamment¹⁶⁾.

20.6. Mesura du pH.

Au début de la campagne, on s'est contenté de mesurer le pH de l'eau : à bord et à la température de l'échantillon, par colorimétrie au moyen des disques de Hellige; au laboratoire et sur l'échantillon ramené à la température de 20°, au moyen du pH-mètre électronique.

Parmi les travaux pour lesquels le pH a été déterminé uniquement en laboratoire, il faut citer ceux de Worthington (1930) pour les lacs Victoria et Albert, de Pearsall (1930) pour un grand nombre de lacs anglais, de Ruttner (1931) pour les lacs de Sumatra, Java et Bali, d'Elster et Einsle (1938) pour l'Untersee, d'Einsle et Vetter (1938) pour le Schleinsee, de Nygaard (1938) pour des lacs danois, de Kusnetzov (1939) pour plusieurs lacs russes, de Doby et Jaczo (1939) pour le Balaton, de Ström (1939) pour les lacs de Norvège et enfin de Monod (1960) pour le Léman.

Afin d'éviter tout changement de composition de l'eau dû à la différence de température, à la décompression et au transport des échantillons, nous avons désiré mesurer le pH "in situ", ce qu'ont fait aussi (nous l'avons appris au cours de nos recherches) Allgeier, Hafford et Juday (1941) pour 11 lacs du Wisconsin (USA), en descendant jusqu'à 70 m de profondeur, puis Distèche et Dubuisson (1960) pour la Méditerranée où on a atteint 2300 m.

Pour nos travaux, nous utilisons l'appareillage suivant¹⁷⁾: un pH-mètre électronique¹⁸⁾ permettant d'apprécier le 1/100 de pH et équipé de deux électrodes distinctes : une électrode de mesure (en verre) blindée, à l'extrémité d'un câble étanche de 170 m de longueur et une électrode de référence au calomel¹⁹⁾, à l'extrémité d'un câble étanche de 5 m. Le câble de mesure est bobiné sur un cabestan fixe et utilisé comme celui de la sonde à thermistor (paragraphe 20.3.3.); le câble de référence maintient l'électrode correspondante à 1 m de profondeur, dans une cage de protection. La pression exercée par l'eau sur l'électrode de référence est compensée par celle de la solution de ClK remplissant la conduite reliant l'électrode à un réservoir ad hoc.

15) de 60 Watts, dépolia; ce courant a été choisi parce qu'il est très constant et moins dangereux que le courant alternatif à 220 volts lorsque les appareils sont retirés de l'eau.

16) au moyen d'un voltmètre Trüb, Tübar et Cie, type 900, à miroir.

17) construit par Hydrochimie S.A. Zurich, avec l'appui de la maison André Maier de Lausanne.

18) type 42 B, de Polymetron S.A., Zurich.

19) de la maison Ingold, Waagstr. 7, Zurich 1.

L'électrode de mesure est descendue dans l'eau simultanément avec la sonde à thermistor et la sonde à conductivité électrique (paragraphe 20.7 ci-après), les trois instruments étant fixés à un même support croché au câble d'acier servant à leur manœuvre.

Le pH-mètre est alimenté en courant alternatif à 220 V/50 Hz et fonctionne avec compensateur de température. On étalonne l'appareil lors de chaque expédition, à l'aide de solutions ayant un pH connu.

20.7. Mesure de la conductivité électrique.

Depuis de nombreuses années, cette mesure est utilisée en limnologie pour vérifier systématiquement la composition ionique de l'eau, entre autres par Ruttner (1930) pour le Lunzer Untersee, Ludany (1930) ainsi qu'Entz et Sebestyén (1946) pour le Balaton, Ruttner (1931) pour plusieurs lacs tropicaux, Auerbach et Schmalz (1932) pour l'Untersee-Bodensee, Juday et Birge (1933) pour 530 lacs du Wisconsin (USA), Nümann (1938) ainsi qu'Auerbach et Ritzi (1938) pour l'Obersee-Bodensee, Ström (1939) pour de nombreux lacs de Norvège, Vollenweider et Frei (1953) pour le Rotsee (Suisse) et enfin Ruttner (1955) pour le Lunzer Mittersee.

Mais si, dès le début de notre campagne, nous avons mesuré systématiquement la conductivité électrique de chaque échantillon ramené au laboratoire, nous avons désiré aussi effectuer cette mesure "in situ", à l'instar de ce que nous faisons pour le pH, et en utilisant le matériel suivant¹⁷⁾: un conductibilomètre²⁰⁾ équipé d'une sonde à électrodes en platine platiné, à l'extrémité d'un câble étanche de 170 m de longueur bobiné sur un caoutchouc fixe. Le conductibilomètre est alimenté en courant alternatif à 220 V/50 Hz et les mesures sont exécutées à la température de l'eau qui est connue simultanément par la sonde à thermistor²¹⁾.

Au cours de nos travaux, nous avons appris qu'Edmonson (1956) avait procédé à des mesures semblables, mais seulement jusqu'à une profondeur de 30 m environ, dans quatre lacs méromictiques de l'Etat de Washington; il a utilisé un conductibilomètre de sa fabrication, muni d'électrodes en nickel doré et platiné. Ambühl (1958 et 1960), dans les lacs de Hallwil et de Baldeg, a mesuré "in situ" la conductivité électrique simultanément avec les teneurs en oxygène dissous. Il n'en reste pas moins que nos mesures sont les premières effectuées mètre par mètre et jusqu'à une profondeur de 150 m.

17) construit par Hydrochimie S.A., Zurich, avec l'appui de la maison André Maier de Lausanne.

20) Philips, type GM.4249/01.

21) cf. paragraphe 20.3.3.

20.8. Prélèvement des échantillons d'eau.

20.8.1. Echantillons pour l'analyse chimique.

Les "bouteilles à eau" utilisées en limnologie sont copiées, le plus souvent, sur les modèles océanographiques; elles consistent en un récipient cylindrique, descendu ouvert et qu'un mécanisme, actionné par un messageur, ferme à la profondeur voulue en emprisonnant un certain volume d'eau. Les unes sont à renversement, soit du type Knudsen mentionné par Barnes (1959, p. 117), soit du type Richard ou du type Ekman/Nansen décrit par Rouch (1946, p. 119-122); ce dernier type a été utilisé par Corbella, Della Croce et Ravera (1956) pour le Lago Maggiore ainsi que par Auerbach et Rottengatter (1960) pour l'Untersee-Bodensee. Les autres bouteilles (type Ruttner ou type Pettersson-Nansen) se ferment sans renversement et, par conséquent dans un espace plus restreint que les premières, ce qui est important pour prélever un échantillon dans une couche de faible puissance, au voisinage des sauts thermiques par exemple. Aussi est-ce une bouteille non renversible que nous avons choisi.

Pour nos travaux, nous utilisons une bouteille de Friedinger^{10), 22)} de deux litres, semblable à celles employées par Rivier (1936) pour le lac de Morat et par Hubault (1947) pour les lacs des Vosges; cette bouteille remplace celle d'un litre qui a servi à nos recherches précédentes (Sollberger, 1946). Pour ramener une quantité d'eau suffisante, la bouteille est descendue deux fois à la même profondeur si c'est nécessaire; pour prélever de l'eau à 1 m du fond, elle est munie d'un étrier renversé et de longueur adéquate pour permettre d'arrêter la descente de la bouteille lorsque le plomb de sonde touche la vase.

Une fois la bouteille remontée à bord, toutes les précautions sont prises pour transvaser l'eau sans barbotage d'air ni pertes de gaz dissous.

20.8.2. Echantillons pour l'analyse bactériologique.

A l'inverse de la "bouteille à eau", l'appareil que nous utilisons, dû à Jeanprêtre (1910) et décrit par lui, ouvre un ballon stérile à la profondeur voulue et sous l'action d'un messageur. Lors de la remontée, la diminution de la pression ambiante, jointe à l'étroitesse du conduit de remplissage du ballon de verre, empêchent l'entrée de l'eau des couches traversées et garantissent l'asepsie du prélèvement. Une fois scellé à bord, le ballon est conservé en glacière jusqu'à son transfert au laboratoire.

A la même époque que nous, mais pour le Lago Maggiore, Corberi et Solaini (1960) ont utilisé un appareil analogue, construit par Tonolli et inspiré de la bouteille marine de ZoBell telle qu'elle est représentée dans l'ouvrage de Barnes (1959, p. 17).

22) No. 3011 du catalogue.

20.8.3. Echantillons de la microcouche d'eau de fond.

Depuis qu'Alsterberg (1927) a découvert, dans une vingtaine de lacs, une "microstratification respiratoire" dans la couche d'eau au contact des sédiments lacustres, divers chercheurs ont essayé de mettre au point des appareils permettant les prélèvements d'eau aussi près que possible du fond. C'est le cas pour Ohle (1932) qui a réussi à adapter aussi bien la bouteille de Friedinger que celle de Ruttner à ce travail et à s'approcher jusqu'à 50 cm du sédiment, tandis que Züllig (communication personnelle) arrive à peine plus près du fond avec une même bouteille, mais ne réussit pas à éviter, de temps en temps, de remuer la vase sur laquelle l'engin s'appuie.

Par contre Elster (1955 et communication personnelle) a imaginé un appareil permettant de descendre à quelques cm du fond, alors que Brouardel et Vernet (1958) expérimentaient, en Méditerranée, un carotteur spécial recueillant l'eau jusqu'au ras du sédiment.

Nous utilisons un modèle mis au point à l'Institut fédéral autrichien d'hydrobiologie²³⁾ et connu sous le nom de son constructeur (Lispolt, 1960). Après avoir lesté l'appareil d'origine, modifié la fixation des tuyaux d'aspiration, transformé et fixé de manière rigide la valve de verre utilisée pour laisser échapper l'air lors des prélèvements, nous réussissons à prendre des échantillons à 3, 6 et 9 cm au-dessus du fond, en dehors du remous que l'appareil provoque au moment où il se pose dans la vase. Quoique l'appareil de Lispolt entre en action spontanément lorsqu'il touche le fond, son maniement est délicat et doit être réservé aux temps calmes.

20.9. Prélèvement des échantillons de plancton.

20.9.1. Prélèvements au filet.

Dans la série de travaux se rapportant à l'étude du plancton du lac de Neuchâtel et inaugurés par Fuhrmann (1900 a et b), les prélèvements ont presque tous été exécutés au filet; seuls font exception, à notre connaissance, les pompages pratiqués à bord du bateau lors de la campagne 1944-1945 (Sollberger, 1946). Bien qu'une critique des diverses méthodes de pêche (au filet et à la pompe) ait été faite par Robert (1922), on constate que la plupart des auteurs ayant effectué des recherches sur le plancton se sont fort peu préoccupés de normaliser les méthodes de travail en choisissant des filets à mailles standard. C'est ainsi qu'en ne citant que quelques-uns des travaux parmi les plus connus, on constate que Robert (1921) pour le lac de Neuchâtel utilisait des filets Apstein et Nansen comptant 49 et 69 fils au cm, tandis que Worthington (1930) pour les lacs Victoria et Albert, employait des filets de mêmes types, mais à 16 et 73 fils au cm. Par contre, Rivier (1936) a pêché dans le lac de Morat avec des engins ayant 58½ fils au cm. Il faut déplorer ce manque de coordination dans les travaux anciens car les recherches actuelles devraient se faire avec les mêmes grosseurs

23) Bundesanstalt für Wasserbiologie und Abwasserforschung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Wien 39/XXII, Kaisermühlen.

de mailles pour pouvoir en comparer les résultats à ceux des travaux antérieurs.

Nous utilisons, pour nos pêches de phytoplancton un filet Nansen en soie à bluter²⁴⁾ comptant $77\frac{1}{2}$ fils au cm, ce qui correspond à une maille de 0,12 mm de côté, ou 0,16 mm de diagonale, ou encore 0,01 mm² de surface. Le filet, conique, a une ouverture circulaire de 30 cm de diamètre et se termine par un entonnoir métallique à robinet. Accroché à un "chalame" (HL) (corde de chanvre) étalonné, le filet descend avec ses parois accolées l'une à l'autre; en remontant, il s'ouvre en balayant un cylindre d'eau dont le volume est de 2,12 m³ pour 30 m de hauteur et de 3,53 m³ pour 50 m. Le plancton contenu dans l'eau ainsi filtrée est ensuite transvasé de l'entonnoir métallique dans lequel il s'est rassemblé, dans des flacons où on le fixe au formol.

Pour les pêches n'aboutissant pas à la surface, le filet est accroché à un déclencheur automatique²⁵⁾ d'une part et au chalame d'autre part. Ce dernier décrit autour de la partie supérieure du filet une boucle accrochée également au déclencheur automatique. Le filet est descendu comme nous l'avons dit déjà, mais lorsqu'il atteint le niveau auquel doit se terminer la pêche, le déclencheur commandé par un message, libère la boucle du chalame. Cette dernière étrangle alors le filet qui reste fermé durant sa remontée jusqu'à la surface. De cette manière, la pêche se limite à une couche de puissance déterminée.

Les pêches successives à un même endroit ne donnent des résultats reproductibles et concordants que si la remontée du filet est très régulière et de l'ordre du mètre à la seconde.

20.9.2. Prélèvements au moyen de la "bouteille à eau".

Pour examiner le plancton se trouvant à des niveaux bien déterminés ou dans des couches de faible puissance, on ne peut utiliser le filet. C'est ainsi que Kaiser et Scheffelt (1925) avaient fait leurs premiers essais au Chiemesee en débouchant à la profondeur voulue et au moyen d'une corde, une bouteille de leur fabrication.

En 1961, nous avons essayé de déterminer les quantités de plancton se trouvant aux divers niveaux auxquels l'eau est prélevée pour l'analyse chimique et bactériologique. Pour cela, nous utilisons l'accessoire dit "filtre de Zurich"²⁶⁾ monté sur la bouteille de Friedinger en vidange. Le contenu de celle-ci traverse alors un morceau de soie à bluter tendu dans le filtre en déposant sur la soie le plancton contenu dans le volume d'eau filtrée. Par un jet d'eau fin et violent, on décolle le plancton en le transvasant dans un tube de verre avant de l'examiner au microscope.

24) No. 25 de la Société suisse de tissage de soies à bluter S.A. Zurich

25) No. 2004 du catalogue Friedinger.

26) No. 3013 du catalogue Friedinger.

20.10. Prélèvement des échantillons de sédiment.

20.10.1. Bennes.

Le procédé le plus simple pour ramasser le sédiment consiste à descendre au fond du lac un engin analogue à une benne preneuse. De nombreux modèles sont utilisés, aussi bien en océanographie qu'en limnologie et se ramènent à deux types suivant que les mâchoires se referment automatiquement après avoir touché le fond ou bien seulement après l'envoi d'un messageur.

Nous avons utilisé, au début de nos travaux, une benne du premier type, en fonte²⁷⁾ et semblable à la drague Petersen (Barnes, 1959, p. 50). Les mâchoires interceptent 300 cm² de la surface du sédiment. Cette benne est sujette à la fermeture intempestive de ses mâchoires lors de la descente et l'épaisseur du sédiment ramassé varie suivant l'angle avec lequel l'engin touche le fond.

Nous avons remplacé cette benne par un engin du second type: une benne Ekman à ressorts²⁸⁾ très semblable à celle décrite par Wassmund (1932). C'est une boîte cubique en tôle, dont la face inférieure est remplacée par deux mâchoires semi-circulaires et la face supérieure par deux volets à charnières pour permettre à l'eau de traverser l'engin à la descente. Grâce à un cercle métallique lesté, la benne se pose toujours perpendiculairement à la surface du sédiment dans lequel ses mâchoires découpent un carré de 10 cm de côté et d'épaisseur réglable. Lors de la remontée, les volets empêchent le "lavage" du sédiment ramené et dont la stratification est presque toujours conservée intacte.

20.10.2. Carottages.

Pour mieux conserver la stratification et obtenir un échantillon prélevé sur une plus grande épaisseur, on procède à un carottage des sédiments.

²⁹⁾ Au début de notre campagne, nous avons employé un tube de Naumann en plexiglas, très semblable à celui de Brown (1956) ainsi qu'au tube d'Ekman, mentionné par Rouch (1943, p. 102). Il a fallu l'abandonner car la vase ou le sable grossier étaient trop fluides pour un tube de ce diamètre sans fermeture inférieure et qui se vidait spontanément à la remontée.

Nous utilisons actuellement un carottier métallique long de 1,75 m à section carrée (25 x 25 mm), s'ouvrant latéralement et dans lequel se loge un chéneau métallique destiné à recueillir la carotte et à l'extraire intacte. Une fois l'engin planté dans le fond, un messageur libère un poids placé à la partie supérieure et qui, par le jeu d'une tringle, ferme l'orifice inférieur du carottier par un rideau métallique. On obtient ainsi couramment des carottes de 30 à 50 cm de

27) No. 2014 du catalogue Friedinger.

28) No. 11 de Liebl et Ritzinger G.m.b.H., München.

29) No. 2013 du catalogue Friedinger.

longueur, maintenues rigides par les chéneaux qu'on retire de l'appareil en même temps qu'elles et qu'on conserve en sacs de cellophane jusqu'à l'analyse.

Signalons qu'en octobre 1958, un long carottier³⁰⁾, a été essayé au large de Neuchâtel, par plus de 100 m de fond; une fois fiché au fond, le tube est enfoncé progressivement par un mouton métallique. Une carotte de 3,2 m de longueur a pu être retirée ainsi, mais la manipulation de l'engin est délicate, ainsi que l'a montré Wleckowski (1961) et comme nous l'avons constaté nous-mêmes.

Enfin, Quartier (1959 a) a fait exécuter un carottage long de 7 m et d'un diamètre de 6 cm sur la Motte, en mai 1958.

20.10.3. Pièges à sédiments.

Pour étudier la productivité biologique du lac de Zurich, Thomas (1950) place sur le fond de celui-ci, des pièges à sédiments (Sedimentspfanne), sortes de marmites à couvercle, suspendues chacune à cardan à un bâti en tubes métalliques descendu à 24 m de profondeur depuis un bateau. Pendant la récolte du sédiment, le couvercle est maintenu vertical; il se ferme au moyen d'un messageur libérant un contrepoids au moment de la remontée de l'engin. Quoiqu'original, ce procédé présente plusieurs défauts, car, étant donné qu'il s'agit de recueillir des particules très légères et souvent floconneuses, il faut éviter le plus possible de troubler la sédimentation naturelle. Or, les courants, créent des tourbillons au-dessus et autour de la marmite par la présence du bâti et surtout du couvercle agissant comme déflecteur vertical. D'autre part, en se rabattant brusquement sous la commande d'un messageur, le couvercle provoque un remous qui expulse une partie du contenu léger hors de la "marmite". En reliant de manière durable cette dernière à sa bouée de repérage, le câble crée un obstacle permanent aux lignes et filets des pêcheurs qui peuvent arracher ou renverser le piège à sédiments.

Nous préférons utiliser des engins plus simples, mais plus³¹⁾ efficaces à notre avis, placés et retirés par des plongeurs autonomes. Nous employons comme piège un récipient cylindrique en tôle galvanisée vernie blanche et rouge, de 362 mm de diamètre et de 145 mm de hauteur, supporté par trois pieds à points. Le couvercle, indépendant, se fixe par trois vis à ailettes; un treillis, à l'ouverture du piège, empêche les poissons de pénétrer dans la "marmite" et des rondelles métalliques évitent aux pieds de trop s'enfoncer dans la vase, ce qui permet en tout temps à l'eau de circuler librement entre l'engin et le sol. De plus, toutes les précautions sont prises par les plongeurs pour fixer le couvercle sans provoquer de remous avant la remontée du piège. Aucun câble n'est fixé à la "marmite" elle-même. Par contre, un fil en nylon coloré, partant d'un point connu près de la rive et reposant sur le fond, conduit le plongeur à un bloc de béton sis à 3 m du piège à sédiment. En décrivant un cercle centré sur ce bloc, on retrouve facilement le piège dans l'obscurité du fond.

30) de la maison H. Züllig, Rheineck (SG).

31) du Club de sports subaquatiques de Neuchâtel.

20.11. Mesure des courants lacustres.

Nous ne nous occupons que des courants de translation, autrement dit de ceux dont la composante horizontale est primordiale. Nous laissons de côté ceux de convection à composante verticale prédominants, ainsi que les seiches.

Parmi les premières méthodes employées pour étudier les mouvements de l'eau, citons l'observation de la dérive des filets de pêche; c'est ce qu'ont fait Kindle (1915) au lac Ontario (Canada et USA), Wasmund (1928) au Bodan, Kreitmänn (1931) au Léman et Quartier (1959 b) au lac de Neuchâtel. Très imprécise et entachée d'erreurs considérables, cette méthode peut être remplacée avantageusement par d'autres. Ainsi, pour suivre le parcours sous-lacustre d'affluents, par exemple, on mesure la température de l'eau (Dussart, 1954, pour le Rhône dans le Léman), sa conductivité électrique (Auerbach et Ritz, 1938 ainsi que Hümann, 1938 pour le Rhin dans le Bodan, de même que Dussart, 1954, pour le Rhône dans le Léman) ou encore sa dureté carbonatée (Auerbach et Ritz, loc.cit., de même que Fehlmann, 1948, pour le Rhin dans le Bodan et l'Untersee et pour la Linth dans le lac de Zurich). Signalons que ces mesures et dosages ne peuvent s'appliquer à l'identification d'eaux étrangères au lac, donc au parcours sous-lacustre des affluents, qu'à la condition que ces derniers arrivent avec une vitesse et un volume suffisants pour éviter une dispersion trop rapide dans la masse lacustre proprement dite. C'est précisément ces conditions qui ne sont pas réalisées dans le cas des affluents principaux du lac de Neuchâtel et ce qui ne nous a pas permis de faire appel à ces mesures et dosages pour étudier les courants en dehors de l'embouchure proprement dite.

Des mesures plus précises se font à l'aide de courantomètres ou de courantographes qui, en principe, enregistrent (sur papier ou en compteur) la vitesse de rotation d'une hélice actionnée par le courant. Simultanément, l'appareil est orienté dans le sens du courant et sa position est enregistrée par rapport à un compas.

Parmi les mesures connues effectuées par ce moyen, citons les travaux de Idrac (1931) dans le Déroit de Gibraltar, la Manche et la mer des Caraïbes, de Bétant et Perrenoud (1932) dans la partie SW du Léman, de Fehlmann (1948) pour le Bodan (Obersee et Untersee) et le lac de Zurich, de Carruthers (1951) dans la Manche et l'Atlantique ainsi que d'Auerbach et Rottengatter (1960) dans l'Untersee. Si les mesures effectuées par ce procédé sont très précises, elles ne se rapportent généralement qu'à un seul point et à un seul niveau à la fois. Or, pour étudier les courants sous-lacustres, il est indispensable d'examiner leur action dans une zone relativement étendue, en plusieurs endroits et à divers niveaux simultanément. Pour atteindre ce but, il est nécessaire de disposer de toute une batterie de ces appareils fort coûteux.

Les bouteilles dérivantes, lestées ou non (Barnes, 1959, p. 129-134) donnent de bonnes indications globales sur l'ensemble du parcours des courants dans lesquels elles ont dérivé. Ce système a été

utilisé, entre autres, par Kindle (1915) pour le lac Ontario (Canada-USA), par Nouch (1954) pour l'Atlantique, par Duboul-Razavet (1958) pour la Méditerranée, ainsi que par Ayers (1962) pour les Grands Lacs américains.

Mais, ^{pour} l'étude instantanée des courants de translation en plusieurs endroits et à plusieurs niveaux, c'est la drague à courants qui convient le mieux car, facile à construire, elle peut s'utiliser à un grand nombre d'exemplaires, ce qui permet de contrôler les mouvements de l'eau en une seule fois dans une zone relativement étendue. Kreitmann (1931) avait utilisé déjà ce procédé pour le Léman, de même que Bétant et Perrenoud (1932) pour la partie SW du même lac, Staedler (1934) pour celui de Zurich, Fehlmann (1948) pour le Bodan et Zurich, ainsi que Barthelme (1963) pour le Gr. Müggelsee près de Berlin. C'est ce procédé que nous avons adopté pour nos recherches.

Signalons encore qu'une méthode très moderne et élégante fait appel à l'emploi de traceurs radioactifs dont la dispersion permet de suivre les mouvements de l'eau dans les trois dimensions à la fois. Mais comme l'ont montré les travaux de Rigler (1956), puis ceux de Likens et Hasler (1960), il y a tellement de facteurs qui interviennent dans les mesures de la radioactivité provoquée de l'eau, qu'il est nécessaire de procéder à une étude préalable et approfondie du lac avant d'en déterminer les courants par ce moyen. Nous estimons que le lac de Neuchâtel n'est pas encore assez connu pour pouvoir lui appliquer d'emblée les procédés de détermination des courants par traceurs radioactifs et nous renvoyons à des travaux ultérieurs l'application au grand lac qu'est le nôtre, de cette méthode délicate.

Nous choisissons donc la méthode des dragues à courants; ces engins dont la dénomination est due aux ingénieurs hydrauliciens, consistent en une dérive ou voilure suspendue à un flotteur, le tout se déplaçant avec le courant. La dérive est constituée par deux carrés de tôle galvanisée, de 1 m de côté, soudés l'un sur l'autre de manière à former quatre volets à angles droits autour d'un axe vertical. Contrairement à Staedler (1934) qui utilisait une plaque mince de liège surmontée d'un fanion, nous avons employé, pour le flotteur qui doit présenter le minimum de résistance au vent, tout en étant suffisamment visible, un ballon sphérique en matière plastique de 28 cm de diamètre, gonflé d'air, dépourvu de drapeau et enveloppé d'un filet auquel la dérive est accrochée par un fil de nylon de 1,2 mm de diamètre et de longueur réglable. Le ballon, immergé aux deux tiers de son volume environ, n'offre qu'une prise insignifiante au vent, alors que nous avons constaté une action de celui-ci 12 fois plus forte environ sur un fanion en soie tenu à une hampe de bambou fixée à un flotteur dont le volume est le même au-dessus de l'eau. La traînée du ballon dans l'eau de surface ne dépasse pas 3% lorsque le courant y est de sens contraire à celui dans lequel se trouve la dérive. De couleur orange ou peint en jaune, le ballon porte un indicatif alphabétique dessiné en noir. Habituellement, ces dragues servent à mesurer les courants sous-lacustres dans des couches adjacentes espacées de 3 m au maximum et c'est le milieu de la hauteur de la dérive qui est placé à la profondeur voulue par réglage préalable de la longueur du fil de nylon. A l'état

mouillé et sous une charge égale à celle de la dérive immergée, l'allongement de ce fil s'est révélé de 11 % par rapport au fil sec juste tendu. Les dragues-témoins ont la dérive fixée directement sous le flotteur; elles servent à mesurer les courants de surface.

Par groupes de 10, mais chacune à une profondeur différente, les dragues sont mises à l'eau depuis un bateau, en même temps que l'endroit de lancement est repéré par deux théodolites³²⁾ placés à des endroits déterminés sur la rive, et auxquels le bateau transmet par radio³³⁾ l'indicatif du flotteur. Deux dragues-témoins sont lâchées à proximité du groupe précédent et la température de l'eau mesurée mètre par mètre jusqu'au fond.

D'heure en heure, le bateau parcourt la zone d'opération et, en transmettant les indicatifs des flotteurs qu'il rencontre, permet de déterminer exactement la position de ces derniers au moyen des mesures d'angles faites depuis la base à terre. Par temps clair, et lac calme, les flotteurs sont visibles au théodolite jusqu'à 4 km au large; par temps de brume, ou lorsqu'il y a des vagues, ils disparaissent à la vue; les visées se font alors sur un signal rouge et blanc fixé au bateau, celui-ci se plaçant immédiatement derrière le ballon par rapport au théodolite en liaison avec lui. Le bateau mû par une godille à moteur, ne perturbe pratiquement pas la dérive des dragues, même en passant très près de leur flotteur.

Les mesures n'ont lieu que de jour. A une distance de la base comprise entre 0,5 et 5 km, la position du flotteur s'obtient avec une précision de 0,6 à 5 m selon une parallèle et de 2 à 20 m selon une perpendiculaire à la base.

On reporte sur un plan au 1:5000 et à la minute d'arc près, les angles mesurés lors des déplacements des flotteurs. Cela permet de déterminer le parcours effectué par les dragues et de calculer, heure par heure, la vitesse de leur déplacement, donc celle des courants.

* * * *

32) de la maison Wild S.A., à Heerbrugg (SG)

33) à ondes courtes, de la maison Autophone S.A., à Soleurs.

Troisième partie

L'EAU DU LAC

Chapitre huitième : METHODES D'ANALYSES

La majorité de ces méthodes relève de la semi-microchimie, car les quantités de matière en dissolution ou en suspension dans l'eau sont très faibles généralement. Il existe une série d'ouvrages considérés comme classiques dans l'analyse de l'eau et, parmi eux, nous citerons : la quatrième édition du Manuel suisse des denrées alimentaires (1939), désignée dorénavant par le sigle "MSDA", les Normes suisses (1948), les Normes françaises (1950), l'Encyclopédie des eaux de consommation (Sirjean, 1951), les Normes américaines (Sierp, 1951), les Normes allemandes (Deutsche Einheitsverfahren..., 1954), ainsi que le Livre de l'Eau (1957), les Normes internationales (Organisation mondiale de la santé, 1958) et l'ouvrage de Rodier (1960).

Pour certains dosages, il existe parfois plusieurs méthodes utilisables avec plus ou moins de succès, mais presque toujours avec des précisions différentes. Pour éviter ces inconvénients et obtenir des résultats qui soient comparables entre eux, quel que puisse être l'endroit où l'eau est prélevée et analysée, nous avons adopté, d'entente avec le Laboratoire cantonal vaudois, une liste de méthodes appliquées systématiquement à tous les échantillons d'eau et que nous exposons dans les paragraphes suivants.

Presque tous nos résultats sont exprimés en mg par litre d'eau, selon la coutume instaurée dans les recherches limnologiques. Rappelons que cette notation correspond à celle en ppm (parts per million) employée habituellement dans les pays anglo-saxons.

Relevons encore que, lorsque cela s'est révélé nécessaire, la précision des méthodes utilisées a été vérifiée chaque fois sur une vingtaine de dosages simultanés.

21. Déterminations physico-chimiques.

A. Mesure du pH.

A côté de la mesure effectuée "in situ" et dont nous avons parlé déjà au paragraphe 20.6, le pH est déterminé à bord par colorimétrie. On utilise un comparateur à disques³⁴⁾ et du rouge de phénol comme indicateur. La couleur observée varie de jaune à pourpre, dans un intervalle de pH de 6,8 à 8,4. La mesure a lieu à la température ambiante et à 0,1 unité près.

Un autre échantillon d'eau est conservé à 20°C jusqu'au lendemain et son pH mesuré alors électriquement à 0,01 unité près.

B. Conductivité électrique.

Elle est mesurée au laboratoire à 1.10^{-6} mho/cm près (soit

34) type Hellige.

0,5%) sur les échantillons maintenus à la température de 20°C.

Pour ramener à la température de 20°C les mesures faites "in situ" à d'autres températures, nous utilisons la formule :

$$K_{20} = K_t [1 - 0,023(20-t)]$$

où t est la température de l'eau au moment de la mesure. Cette formule est celle donnée par le Livre de l'Eau (tome 1, p. 262) et le facteur 0,023 celui adopté pour les eaux continentales européennes.

C. Couleur.

Laissant de côté l'ancienne méthode de Forel-Ule, cause de nombreuses difficultés rencontrées par Ruttner (1931), nous avons adopté la méthode dite du Geological Survey of America procédant par colorimétrie. La solution-type de comparaison est constituée par un mélange de solutions de chloroplatinate de potassium et de chlorure de cobalt. On utilise un colorimètre à disques²⁵, et des cuves de Nessler de 250 mm de longueur. Les résultats s'expriment en mg de platine par litre d'eau, à l'unité près entre 0 et 30, ainsi qu'à 2 unités près entre 30 et 50.

22. Analyse chimique.

D. Résidu sec.

Exprimant la teneur de l'eau en substances dissoutes et en suspension, le résidu sec est déterminé selon les prescriptions du MSDA, p. 204: 200 ml d'eau sont évaporés dans une capsule tarée, en platine, en terminant l'évaporation à l'étuve à 103°C, température que nous estimons bien préférable à celle de 110°C utilisée par Rawson (1951) dans ses travaux sur les lacs du Canada occidental. Avec les précautions d'usage lors du refroidissement de la capsule en dessiccateur et au moment de la pesée, on arrive à une précision de $\pm 0,3$ %.

E. Résidu calciné.

Nous procédons comme l'indique le MSDA, p. 204: le résidu sec est chauffé au rouge sombre dans la capsule de platine, repris par une solution diluée de carbonate d'ammonium, séché à 103°C à l'étuve et pesé à nouveau. Le résultat est exprimé avec une précision de $\pm 0,3$ %.

F. Dureté totale.

Bien que le MSDA préconise encore l'emploi du palmitate pour le dosage de la dureté totale, nous préférons la méthode complexométrique de Schwarzenbach et Flaeschka (1954) utilisée déjà par Monod

(1956) pour le Léman, par Wieser (1956) pour le Bodan et par Löffler (1959) pour le Neusiedlersee.

Au moyen d'une solution 0,05 M de Complexone III (sel disodique de l'acide éthylènediaminotétracétique), on titre 100 ml d'eau tamponnée par un complexe de magnésium alcoolique, en présence d'indicateur. Pour ce dernier, nous adoptons avec succès le mélange noir d'ériochrome T et de Jaune de diméthyle en solution dans la diéthylamine préconisée par Monod (1956). Le virage a lieu du rose au gris, mais est déjà dépassé lorsqu'on arrive au vert. Le nombre de ml de complexone, multiplié par 5 donne la dureté totale en degrés français; ces derniers sont convertibles en mg CO_3Ca /litre en multipliant encore par 10 le résultat précédent. Avec un peu d'entraînement et une burette très fine (graduée au 1/100 de ml), on arrive à exprimer la dureté en mg CO_3Ca /litre avec une précision de $\pm 0,25$ %.

G. Dureté temporaire.

L'alcalinité à la phénolphthaleïne ou titre alcalimétrique (T.A.) des Normes françaises est pratiquement toujours nulle pour le lac de Neuchâtel, ce qui atteste l'absence d'hydroxydes ou de carbonates en quantités appréciables dans l'eau.

Par contre, on détermine l'alcalinité au méthylorange sur 100 ml d'eau, par titrage à l'acide chlorhydrique 0,1 N. Le résultat est exprimé en mg CO_3Ca /litre, bien que ce dosage concerne les bicarbonates. Avec une burette fine et en comparant le dosage à des échantillons-types colorés partiellement virés, on obtient une précision de 0,5 % environ.

Ainsi, nous opérons de la même manière que Yoshimura (1932) pour les lacs japonais, Loub (1955) pour le Neusiedlersee et Monod (1956) pour le Léman, tandis que pour le Lago Maggiore, Corbella, Della Croce et Ravera (1956) ont utilisé ClH 0,01 N et le pourpre de méthyle comme indicateur.

H. Dureté permanente.

Elle se calcule par différence entre la dureté totale et la dureté temporaire.

I. Ammoniaque libre.

Le dosage s'opère sur 50 ml d'eau, par colorimétrie selon la méthode de Nessler décrite dans le MSDA, p. 206-208 et en ajoutant du sel de Seignette pour maintenir limpide l'eau à analyser.

Loub (1955) pour le Neusiedlersee et Wieser (1956) pour le Bodan, ont utilisé la même méthode.

Pour les faibles teneurs en ammoniaque libre, l'écart dans les déterminations s'est révélé proche de 0,01 mg NH_3 /litre; aussi

avons-nous considéré $0,02 \text{ mg NH}_3/\text{litre}$ comme limite inférieure de dosage et toutes les valeurs lues au-dessous de cette limite comme nulles en les représentant par 0.

J. Azotites.

La méthode de Griess-Iloevay à l'acide sulfanilique et à l' α -naphtylamine (MSDA, p. 209) est utilisée pour tous les travaux limnologiques et, de ce fait, est suffisamment connue pour que nous nous dispensions de la décrire. Dans notre région, après Rivier (1936) pour le lac de Morat, nous l'avons déjà appliquée à nos travaux précédents (Sollberger, 1946) pour le lac de Neuchâtel.

En opérant au photocolorimètre et en partant de 20 ml d'eau, on admet $0,0025 \text{ mg NO}_2'/\text{litre}$ comme limite inférieure dosable, avec un écart ne dépassant pas $0,0005$. Nous avons pu adopter $0,003 \text{ mg NO}_2'/\text{litre}$ comme minimum dosable, tout en convenant de désigner par zéro tout résultat inférieur à cette limite.

K. Azotates.

Parmi les nombreuses méthodes préconisées pour ce dosage, nous choisissons celle de Grandval-Lajoux à l'acide phénoldisulfonique, dans la version donnée par Kuisel (Helv.Chim.Acta, 18. (1934), p.195). Partant de 25 ml d'eau, on compare la coloration jaune que prend le réactif en présence d'ions NO_3 à celles de types colorées préparées au moyen d'une solution-mère d'azotate de potassium. L'exactitude de la méthode est de $\pm 0,02 \text{ mg NO}_3'/\text{litre}$, soit de $\pm 1\%$, valeur nettement plus basse que la limite mentionnée par Thomas (1955 a) dans ses travaux sur les lacs de Zurich et de Walenstadt. Wieser (1956) a utilisé la même méthode pour le Bodan et le Rhin, après Pennington (1942) dans l'étude de cultures d'algues en étang et Hubault (1947) pour les lacs de l'est de la France.

L. Oxygène dissous.

Extrêmement importants en limnologie, la détermination chimique de la teneur en oxygène dissous (MSDA p. 217-218) se fait dans le monde entier à l'aide de la méthode de Winkler (Z.anal.Chem., 53. (1914), p. 666). Elle consiste à fixer l'oxygène dissous sur un sel de manganèse en milieu alcalin, puis à le doser par iodométrie; la modification d'Alsterberg généralement appliquée aussi, consiste à éliminer les azotites éventuellement présents par une adjonction d'azoture de sodium. Les résultats sont exprimés en $\text{mg O}_2/\text{litre}$.

En employant des flacons jaugés très exactement et en effectuant le titrage iodométrique avec le maximum de précautions, on aboutit à un écart de $\pm 0,01 \text{ mg/litre}$ dans le dosage, donc dix fois plus faible que celui mentionné par les Normes suisses ($\pm 0,096 \text{ mg/litre}$).

M. Saturation et déficit en oxygène.

Afin de comparer entre elles les teneurs en oxygène d'échantillons provenant d'endroits et de profondeurs divers et, par conséquent, prélevés à des températures différentes les unes des autres, il est nécessaire de rapporter la quantité d'oxygène dissoute dosée à la quantité théorique de ce même gaz saturant l'eau à la même température et sous la même pression atmosphérique que l'échantillon examiné.

Pour cela, nous utilisons la méthode de calcul décrite dans le travail de Mortimer (1956) auquel nous nous permettons de renvoyer le lecteur. Les calculs eux-mêmes sont simplifiés par l'emploi du calculateur circulaire de Burkard (Mortimer (1956), p. 16).

N. Demande biochimique en oxygène ou D.B.O.

La teneur en oxygène d'un échantillon d'eau diminue au fur et à mesure que le temps s'écoule, car les organismes aérobies qu'il contient utilisent une partie de ce gaz pour oxyder les matières organiques qui se trouvent dans l'eau. La différence entre la teneur de l'eau en oxygène dissous au moment de la prise d'échantillon et la teneur restant après 5 jours n'est autre que la D.B.O.5 (ou demande biochimique en oxygène en 5 jours). Elle s'exprime en mg O_2 /litre.

Pour l'examen des eaux usées, il est nécessaire de diluer l'eau à examiner à l'aide d'une eau propre et à D.B.O. connue selon la méthode du Livre de l'Eau (1954-1957, tome 4, p. 292). Pour les lacs en général et celui de Neuchâtel en particulier, la détermination se fait sans dilution, la D.B.O. étant encore faible. L'échantillon d'eau est conservé, en flacon totalement rempli et bien bouché, pendant 5 jours à l'obscurité et à 20°C. L'oxygène restant est alors dosé et la D.B.O.5 calculée comme nous venons de l'indiquer. La précision de la méthode est la même que celle mentionnée pour le dosage de l'oxygène dissous.

Afin d'obtenir des résultats plus comparatifs que les sont les teneurs en oxygène et la D.B.O. prises séparément, on exprime la D.B.O. en % de la teneur initiale de l'eau en oxygène.

O. Calcium.

A l'usage de celui qui concerne la dureté totale, le dosage du calcium fait appel à une méthode complexométrique en milieu alcalin, due à Patton et Reeder (Anal. Chemistry, 28. (1956), p. 1026-1028). En utilisant l'acide calconecarbonique comme indicateur, le virage, extrêmement net a lieu du rouge lie-de-vin au bleu intense. Pour le dosage, on part de 100 ml d'eau qu'on alcalinise au minimum à pH 12, pour "bloquer" le magnésium, puis on titre à l'aide d'une solution de Complexone III 0,1 M, en brassant énergiquement au moyen d'un agitateur électromagnétique. En utilisant une burette graduée au 1/100 ml, les écarts dans la détermination ne dépassent pas 0,05 mg Ca/litre.

Loub (1955) et Loeffler (1959) au Neusiedlersee, ainsi que

Monod (1956) au Léman, avaient utilisé la même méthode, mais avec la murexide comme indicateur, selon les prescriptions de Heron et Mackereth (1955). Telle que nous l'appliquons, cette méthode permet d'atteindre très facilement avec l'acide calcionecarbonique comme indicateur, une plus grande précision qu'avec la murexide.

P. Magnésium.

A partir de la différence entre les duretés totale et calcique, déterminées toutes deux par complexométrie, on obtient très facilement la teneur en magnésium avec la même précision que celle indiquée par Monod (1956).

Pour mieux mettre en évidence les variations de la teneur de l'eau en magnésium, on rapporte cette dernière à celle du calcium, en exprimant ce rapport en %.

Q. Phosphore total.

Nous ne dosons pas les phosphates solubles dans l'eau, nous contentant de la détermination du phosphore total dont la teneur est généralement faible dans le lac de Neuchâtel.

La méthode colorimétrique de Denigès repose sur la formation d'un complexe phosphomolybdique qui, par réduction donne du bleu de molybdène. Nous utilisons cette méthode telle qu'elle a été modifiée par Czerny (Titrationsskolorimetrische Bestimmungen geringer Phosphatmengen in natürlichen Gewässern. Grigore Antipa, Bukarest, 1938), puis par Schneebeli (non publiée, Laboratoire cantonal, Zurich, 1945). Cette modification consiste à neutraliser la solution avant la formation du complexe, puis à opérer la réduction au moyen de chlorure stanneux. La coloration bleue obtenue est fugitive (stabilité 15 min au maximum) et on la compare alors à des types colorés préparés au moment du dosage.

Sous cette forme, appliquée aussi par Thomas (1948) au Türlensee, cette méthode permet d'atteindre, en partant de 200 ml d'eau évaporés à sec et calcinés, une précision de $\pm 0,0005 \text{ mg PO}_4^{3-}$ par litre, égale à celle que Monod (1956) a obtenue pour le Léman.

R. Silice.

Jusqu'en 1959, la plupart des chercheurs ont dosé la silice par la méthode colorimétrique de Diénert et Wandenbulcke (1923), au molybdate d'ammonium en milieu sulfurique dilué; toutefois, la coloration jaune obtenue ne permet pas d'atteindre une précision acceptable et la présence des phosphates gêne la réaction.

C'est pourquoi nous lui substituons la méthode Urbaoh (Mikrochemie, 11. (1932), p. 189-218), modifiée par Zimmermann (Z. angew. Chemie, 55. (1942), p.28) selon les directives de la V.G.B.

(V.G.B.-Richtlinien für die Aufbereitung von Kesselspeisewasser, 4.Aufl., (1950), Vulkanverlag Essen RZ.471). La silice en solution forme, avec le molybdate d'ammonium, un complexe silicomolybdique jaune qui est réduit ensuite en bleu de molybdène par l'hydroquinone en milieu alcalin. En présence de phosphates, un complexe phosphomolybdique pourrait se former au début de la réaction; il est détruit systématiquement par de l'acide oxalique qui "bloque" le phosphore pour la suite des opérations.

La coloration bleue obtenue en présence de silice est stable après 15 min; au photocolorimètre, elle est comparée à un essai à blanc en utilisant un filtre de 720 mμ. La méthode est très sensible, aussi est-il indispensable de n'examiner que des échantillons d'eau prélevés en récipients de polyéthylène et de n'utiliser, pour toutes les opérations, ainsi que pour la préparation des réactifs, que de l'eau bidistillée obtenue par condensation dans un réfrigérant en argent et conservée dans des flacons en polyéthylène. En respectant ces précautions, la précision de la méthode est de $\pm 0,0005$ mg Si/litre.

S. Sulfates.

Les quantités contenues dans l'eau du lac de Neuchâtel sont trop faibles pour que le dosage gravimétrique direct conduise à une précision suffisante; de plus, il est long et délicat. Aussi utilisons-nous la méthode complexométrique de Sijderius (Anal.chim.Acta, 11, (1954), p.28), modifiée par W. Stumm (non publiée, E.A.W.A.G., Zurich). Dans ce cas, l'eau est débarrassée, au préalable, de ses cations par le procédé de Mackereth (1955).

Partant de 200 ml d'eau qu'on fait passer à travers un échangeur de cations (Dowex 50), on précipite à chaud, dans 100 ml du filtrat, les ions SO_4^{2-} au moyen d'une solution 0,02 M de chlorure de baryum. Après repos prolongé, l'excès de Cl_2Ba est titré en retour par une solution de Complexone III 0,02 M, en présence d'une solution-tampon de pH 10,1 (solution aqueuse de complexonats de magnésium et de chlorure d'ammonium) ainsi que d'un indicateur composé de Solochrom Black WDFA (Edw. Gurr, Ltd., London) et de chlorhydrate d'hydroxylamine dans l'éthanol à 95%. Le virage, très net, a lieu du rouge au bleu pur.

Sans concentrer ni diluer l'eau à examiner, on obtient une précision de $\pm 0,05$ mg SO_4^{2-} /litre.

T. Chlorures.

A la méthode de Mohr préconisée par le MSDA, p. 211, nous préférons celle, colorimétrique, des U.S. Standards (Standard Methods for the Examination of Water, Sewage and Industrial Wastes, (1955), 2nd.Edit.) modifiée par l'E.A.W.A.G., plus sensible et plus précise.

Après avoir acidifié 100 ml d'eau par de l'acide azotique en présence de bleu de bromophénol jusqu'à virage au jaune, on titre les chlorures à l'aide d'une solution étalonée d'azotate mercurique en

présence d'une solution éthanolique de diphenylcarbazonne comme indicateur et jusqu'à virage du jaune au violet. La précision maximum de $\pm 0,05$ mg Cl^- /litre est atteinte lorsque la teinte violette obtenue correspond à celle d'un témoin préparé de la même manière que le dosage.

U. Fer total.

Le résidu de calcination de 200 ml d'eau est repris par ClH dil. et les sels ferriques réduits par l'acide ascorbique. Après avoir amené le pH de la solution entre 4 et 5, on ajoute une solution chlorhydrique d' α , α' -dipyridyle qui développe, en présence de sels ferreux, une couleur rouge stable; celle-ci est mesurée au photocolrimètre à l'aide d'un filtre de 490 m μ . Au moyen d'une table d'étalonnage, on calcule la teneur en fer avec une précision de $\pm 0,02$ mg Fe /litre.

V. Oxydabilité.

Thomas (1948) pour le Türlensee, Wieser (1956) pour le Bodan, Corbella, Della Croce et Ravera (1956) pour le Lago Maggiore, ainsi que Monod (1956) pour le Léman, de même que la plupart des auteurs d'autres recherches limnologiques, dosent les matières oxydables dans l'eau par le permanganate de potassium et le plus souvent à chaud. Suivant les prescriptions du MSDA, p. 205, nous utilisons le procédé de Kubel en milieu acide.

Partant de 100 ml d'eau à analyser, acidifiées par 5 ml d'acide sulfurique (1+4) et amenées à l'ébullition, on oxyde les matières contenues dans l'eau à l'aide de 10 ml de permanganate de potassium 0,01n, ramène à l'ébullition et la maintenant effective durant 10 min, après quoi l'excès de permanganate est titré en retour.

L'oxydation des matières contenues dans l'eau dépend très fortement de la rapidité avec laquelle l'ébullition reprend après avoir ajouté le permanganate; aussi ne peut-on obtenir des résultats comparables entre eux que si l'on s'astreint à opérer dans des conditions rigoureusement semblables chaque fois. Malgré cela, la précision de la méthode oscille entre $\pm 3\%$ et $\pm 5\%$.

Rappelons que l'on se borne à exprimer la teneur d'une eau en matières oxydables, en mg MnO_4K /litre ou en mg O_2 /litre, car la trop grande diversité de composition des matières organiques contenues dans l'eau ne permet pas de calculer un facteur de conversion sûr pour les exprimer autrement.

W. Gaz carbonique libre.

La méthode indiquée par le MSDA, p. 213 est malheureusement peu précise, quoique nous ayons essayé de l'utiliser durant toute la campagne 1957-1961. Consistant à doser CO_2 directement dans l'eau au moyen d'hydroxyde de sodium 0,05n en présence de phénolphthaleïne comme indicateur, sa précision est voisine de 10% seulement, ainsi que

Monod (1956) l'avait déjà signalé.

Depuis 1961, nous avons substitué à cette méthode celle des Normes françaises (NF.T.90-011, p.5 et 6) qui consiste à verser avec précaution l'échantillon d'eau à analyser dans une quantité connue de NaOH 0,05n additionnée de phénolphthaléine. Après 1 min de contact, l'excès de NaOH est titré en retour par ClH 0,05n. Ainsi la précision du dosage peut être ramenée à $\pm 1\%$.

X. Matières en suspension.

Portner (1951 a), p.43) a déterminé par centrifugation les quantités de matières en suspension dans l'eau. Si ce procédé convient à la séparation du CO_2/Ca , il devient aléatoire lorsqu'on a affaire à des matières en suspension composées en majorité de plancton: celui-ci se décante particulièrement mal lorsqu'il est composé de filaments très légers comme ceux d'*Oscillatoria rubescens*. C'est pourquoi nous avons adopté pour ce dosage une méthode très semblable à celle de Buffle (1940): en filtrant 500 ml d'eau dans un creuset en verre poreux G3 on arrive à retenir toutes les particules d'un diamètre supérieur à $10\ \mu$, bien que les plus petites pores du verre aient un diamètre de $15\ \mu$. En effet, les filaments planctoniques étant entraînés les premiers lorsqu'on verse le liquide sur le filtre, forment très rapidement à la surface de ce dernier un feutrage qui retient des particules de plus en plus fines. En opérant soigneusement et toujours de la même manière, on obtient des résultats parfaitement reproductibles.

Cette méthode permet de déterminer facilement l'oxydabilité des matières retenues: il suffit alors de procéder à un dosage des matières oxydables exactement comme on vient de le voir à la lettre V ci-dessus, en plaçant le filtre poreux, contenant les matières en suspension, bien lavées, dans le bécher où a lieu l'oxydation par le permanganate.

En retranchant la valeur obtenue ainsi de l'oxydabilité de l'eau brute, on obtient celle due aux matières dissoutes.

Y. Sodium et potassium.

Ces deux ions ont été dosés trois fois seulement et uniquement pour vérifier l'ordre de grandeur de leur teneur dans l'eau. Ne disposant pas d'un photomètre à flamme, nous avons demandé au Laboratoire cantonal de bactériologie de Neuchâtel d'exécuter ces déterminations.

23. Analyse bactériologique.

Nous référant aux prescriptions du MSDA p. 219-222, nous nous sommes attachés à compter le total des germes contenus dans l'eau, ainsi qu'à rechercher et identifier le colibacille.

Za. Numération des germes.

Pour chaque échantillon, on ensemence à double 1 ml d'eau dans 10 ml de gélatine nutritive. La culture a lieu en boîte de Petrouschki, à 20°C, pendant 5 jours. Simultanément, on ensemence, à double aussi, 0,5 ml d'eau dans 10 ml de gélose nutritive qui est cultivée ensuite en boîte de Pétri, à 20°C pendant 10 jours. Cette deuxième culture permet, dans une certaine mesure, de confirmer les résultats de la première et de s'y substituer lorsque des colonies liquéfiantes détruisent prématurément la gélatine. Le nombre moyen de colonies comptées à la loupe à la fin du temps d'incubation, ramené au ml d'eau à analyser exprime le nombre de microorganismes que contenait l'échantillon.

Zb. Recherche et identification du colibacille.

En même temps que les ensemencements précédents, on met de l'eau en culture pour rechercher et identifier *Escherichia Coli* d'origine fécale.

Pour chaque échantillon, on mélange aseptiquement 1, 5 et 20 ml d'eau à du bouillon mannité d'une part et à du bouillon lactosé d'autre part. Après 24 h. d'incubation, à 43°C dans le premier cas et à 37°C dans le second, l'apparition d'une fermentation indique la présence de coliformes plus ou moins typiques.

Simultanément, en ensemencant 0,1 ml d'eau sur milieu d'Endo (à l'agar-fuchsine), on observe l'apparition de colonies typiques d'*E. Coli* après 5 jours de culture à 37°C. On considère le nombre de colonies typiques rouges à aspect mordoré métallique, pouvant être comptées à la loupe et rapportées au ml d'eau ensemencée, comme représentant le nombre d'*E. Coli* que contenait l'échantillon. Ce nombre est réparti, le plus souvent, en trois groupes correspondant aux formes S, R et M.

Rappelons à cet effet que, d'après Gaetinel (1957) il s'agit des trois formes mutantes des bactéries : type S à colonies luisantes, humides, rondes, convexes, lisses et homogènes, type R à colonies mates, plissées, ridées, granuleuses, dentelées, aplatie, à bord anguleux et type M à aspect mucoside mais se rapprochant tantôt de S ou de R. Les types S et R diffèrent par la spécificité de leurs antigènes et on admet, généralement, que lors de la mutation de S en R, la virulence se perd presque complètement. Nous essayons de tenir compte de ce phénomène dans la différenciation de nos résultats en types S, R et M.

A titre de vérification supplémentaire, les colonies d'*E. Coli* apparues sur milieu d'Endo sont prélevées au fil de Pt et examinées en frottis à l'aide de la réaction de Gram.

Faute de temps et pour ne pas trop alourdir nos travaux, nous nous sommes limités aux recherches ci-dessus touchant le genre *Escherichia*, laissant totalement de côté l'examen des autres *Enterobacteriaceae*.

Chapitre neuvième : LA THERMIQUE DU LAC.

24. Introduction.

Nous avons rappelé, dans le préambule de ce travail, que notre lac était le moins connu des grands lacs suisses. Si cela reste exact pour l'ensemble du biotope et surtout du point de vue chimique aussi bien que biologique, il importe toutefois de rappeler que parmi les recherches antérieures aux nôtres, celles qui se rapportent à la thermique ont été relativement bien développées, quoiqu'elles aient porté sur trop peu de stations et à des intervalles souvent trop grands. En outre, elles n'ont pas duré un nombre d'années suffisant pour conduire à des valeurs utilisables.

Par contre, les moyennes obtenues lors de ces recherches anciennes sont acceptables le plus souvent et nous les utilisons pour les comparer aux nôtres, à la fois en tant que documents historiques précédant ou suivant la première correction des eaux du Jura et aussi comme valeurs se rapportant à des stations supplémentaires dans l'étude du lac.

Plusieurs débats scientifiques ont été engagés déjà sur les modifications possibles du climat régional dues à des changements de température du lac à la suite de la première correction des eaux du Jura. L'effet de ces travaux a été reconnu insignifiant et nous nous abstiendrons d'y revenir.

Topographiquement, vu sa faible profondeur par rapport à sa superficie, le lac de Neuchâtel est un accident peu important. Mais, par sa masse, l'eau du lac est tout de même le siège de phénomènes suffisamment importants pour qu'ils soient étudiés en détail. Du point de vue thermique, par exemple, il est remarquable que le lac de Neuchâtel gèle avec autant de difficulté, alors que Bienne et Morat, ses voisins immédiats, se couvrent régulièrement de glace. On peut s'attendre aussi à une hétérogénéité thermique du fait du relief sous-lacustre particulier de notre lac : la présence de la Motte contrecarre l'uniformisation de la température de l'eau sous l'action des courants.

A propos du gel, nous avons mentionné déjà au paragraphe 4.2 et dans le tableau XIII les années exceptionnelles où le lac de Neuchâtel a gelé entièrement. On trouve d'ailleurs de nombreux détails sur la température de l'eau et l'épaisseur de la glace en divers endroits du lac dans Kopp (1861 c) pour l'hiver 1695 et dans Weber (1882 a) pour l'hiver 1880. Nous n'y reviendrons pas, sinon pour ajouter que chaque hiver, toutefois, des couches de glace plus ou moins étendues envahissent les ports et quelques petites baies abritées, ainsi que trois zones plus grandes situées en eau peu profonde : dans le Bas-lac (baies de la Tène et de Witzwil, souvent sur plusieurs km²), près d'Yvonand et à l'extrémité du Haut-lac (près d'Yverdon). Mais l'aire gelée est alors trop petite par rapport à la superficie lacustre totale pour qu'il vaille la peine de différencier, dans l'étude thermique, une période de gel de celle où le lac est libre de glace.

Etant donné les incidences de la thermique sur les autres phénomènes lacustres tant chimiques que biologiques, il est nécessaire d'examiner les variations de température de l'eau d'une manière approfondie, en rappelant encore que parmi les propriétés physiques de ce liquide, deux sont particulièrement importantes par leurs effets sur le lac : 1^o) la conductibilité thermique très faible de l'eau à cause de laquelle la chaleur solaire diffuse difficilement vers la profondeur et 2^o) l'existence d'un maximum de densité vers 4°C. Mentionnons à ce propos que l'eau liquide pure accuse une densité de : 0,999868 à 0°, 1,000 à 4°, 0,999727 à 10°, 0,998230 à 20° et qu'en se basant sur de nombreux travaux, la Livre de l'Eau (1954-1957) tome I, p.176) signale un maximum de densité compris entre 3,68 et 4,08 C.

25. L'eau de surface.

25.1. L'eau de surface dans la zone littorale.

Au cours de nos propres recherches, nous n'avons effectué aucune mesure systématique de la température de surface sur le littoral. Aussi nous contentons-nous de commenter brièvement et pour elles-mêmes, les données dispersées de trois auteurs que nous mentionnerons ci-après, sans tenter d'extrapoler ces résultats à l'ensemble de la surface lacustre car, ainsi que Rouch (1957, p.88) l'indique pour la mer, les thermiques littorale et pélagique sont différentes. En effet, l'amplitude des variations de la température de l'eau superficielle est plus grande au voisinage de la rive qu'au large; autrement dit, pour ce qui concerne la surface, l'eau littorale a une température plus basse en hiver et plus haute en été que l'eau au large.

Nous rassemblons, pour la période précédant nos recherches, trois séries de mesures : les travaux de Ladame (1858 a) pour la période de 1841 à 1850, ceux de Kopp (1855 b et 1858 c) pour la période de 1852 à 1854 et l'année 1856 ainsi que ceux de de Perrot (1914) se rapportant aux années 1906 à 1913. Les deux premières séries précèdent la première correction des eaux du Jura; la troisième est postérieure à cet événement.

Ladame et Kopp ont mesuré la température d'un échantillon pris entre 0 et 1 m de profondeur chaque jour à la même heure en avant du môle du quai du Gymnase (actuellement quai Ostervald) à Neuchâtel et de Perrot en a fait de même à l'embarcadere de Sarrières. Ces trois auteurs ont publié leurs résultats en tableaux de moyennes mensuelles pour chacune des années sus-mentionnées. Mais pour élaborer notre tableau XXIV, nous calculons les moyennes des séries entières correspondant à chacune de ces publications, soit 8 ans pour Ladame et de Perrot et 4 ans pour Kopp. Signalons tout de même qu'il existe deux lacunes dans ces périodes : d'avril 1848 à décembre 1849 d'une part et de janvier à décembre 1855 d'autre part.

TABLEAU XXIV

Moyennes mensuelles et annuelles de la température de la surface sur le littoral gauche du lac de Neuchâtel durant diverses périodes.

	1841 - 1850	1852 - 1856	1906 - 1913
Janvier	3,2	5,19	5,49
Février	3,0	4,83	4,55
Mars	3,90	5,17	5,07
Avril	6,1	7,52	6,52
Mai	10,8	10,93	11,22
Juin	15,7	16,51	16,17
Juillet	18,3	19,28	18,31
Août	18,3	20,47	19,74
Septembre	16,5	17,04	17,09
Octobre	12,2	13,50	13,58
Novembre	8,3	9,59	9,77
Décembre	5,5	6,46	6,88
Année	10,2	11,41	11,20

Les minima mensuels suivants ont été observés : 1,6 en février 1845 et janvier 1848, 3,92 en février 1854; quant aux maxima mensuels, on a eu: 21,2 en août 1846 et 22,13 en août 1856.

Entre ces séries de moyennes, on peut grouper encore quelques indications relatives aux températures extrêmes de la période de 1855 à 1863 :

TABLEAU XXV.

(cf. page suivante)

TABLEAU XXV

Températures extrêmes instantanées observées dans l'eau à surface sur le littoral gauche du lac de Neuchâtel de 1855 à 1863.

Année	Minimum		Maximum		Référence
	Température	Date	Température	Date	
1855	2,0	29.I;17.II	23,0	24-29.VIII	Rapport.....(1858)
1856	3,0	14-15.I.	25,0	5.VIII.	Kopp (1858 c)
1857	1,5	5.II.	25,0	3-5.VIII.	Kopp (1858 d)
1858	1,5	29.I.	24,0	16.VI.	Kopp (1861 a)
1859	3,0	14-18.I.	26,0	8.VIII.	Kopp (1861 c)
1860	1,2	15.II.	24,5	18.VII.	Kopp (1861 d)
1861	1,5	18.I.	25,5	13.VIII.	Kopp (1864 a)
1862	1,5	10-11.II.	22,5	30.VII.	Kopp (1864 c)
1863	3,5	16.II.	25,0	10.VIII.	Kopp (1864 c)

Du tableau XXIV, il ressort que si la concordance est bonne entre les moyennes manuelles des séries 1852-1856 et 1906-1913, la série 1841-1850, par contre, est discordante et donne des valeurs plus basses que les autres.

Nous avons cherché tout d'abord la cause de cette discordance. L'Observatoire de Neuchâtel ne possédant pas d'archives remontant à cette époque, c'est à l'amabilité de l'Observatoire de Genève que nous devons d'avoir pu nous documenter et nous relevons d'emblée que nous nous sentons autorisés à appliquer l'appréciation du climat de Genève à cette époque à la région de Neuchâtel malgré la distance séparant ces deux localités, car il ne s'agit, en fait, que de comparer entre elles des moyennes climatiques et leurs variations respectives pour diverses époques.

la période de 1841 à 1850 a été particulièrement froide, comportant notamment 5 hivers sur 10 avec une moyenne inférieure à 0°, ce qui est rare. Toutes les saisons de cette période présentent à Genève un déficit des moyennes saisonnières de température par rapport au demi-siècle 1826-1875, déficit qui vaut : 0,52 pour l'hiver, 1,16 pour le printemps, 0,97 pour l'été et 0,20 pour l'automne. Il n'est pas surprenant alors que les moyennes de l'eau de surface présentent toutes un déficit de température par rapport aux périodes 1852-1856 et 1906-1913, montrant ainsi qu'il existe une relation globale directe entre la température de l'eau de surface littorale et la température de l'air,

Même avec le décalage qui vient d'être mentionné, c'est février qui est toujours le mois le plus froid en moyenne et août le plus chaud.

Dans les températures instantanées, les minima sont compris entre 1,0 et 3,5; ils oscillent donc autour de 2,1 et se présentent entre le 14 janvier et le 20 février. Quant aux maxima, compris entre 22,5 et 26,0, ils oscillent autour de 24,5 et se placent entre le 18 juillet et le 29 août, n'apparaissant que tout à fait exceptionnellement au milieu de juin, en 1858.

25.2. L'eau de surface dans la zone pélagique.

25.2.1. Résultats antérieurs à nos recherches.

Ladame (1861 b) a mesuré la température de la surface à 800 m puis à 1 km au S du port de Neuchâtel, par 80 et 90 m de fond, mais nous écartons ses résultats parce qu'ils sont trop espacés dans le temps.

Nous rassemblons, par contre, ceux de Guyot (1939) et de Quartier (Inspection cantonale de la pêche, 1943-1961) dont les stations ont les caractéristiques suivantes :

	<u>Guyot</u>	<u>Quartier</u>
<u>Mesures</u>	1938	VII.1943 - III.1946
Fréquence	hebdomadaires	hebdomadaires
Distance du port de Neuchâtel		
(km) :	1,6	3,0
en direction :	S	SSE
Fond à (m) :	100	120
Notre station la plus voisine		
(No) :	22	23 et 24

et nous joignons à leurs données, dans le tableau XXVI ci-dessous, une série de moyennes mensuelles calculées sur 24 ans par de Perrot et que Quartier rapporte dans la publication No. 17 du 5 avril 1945 de l'Inspection de la pêche, sans indiquer malheureusement à quelle station ni à quelles années ces chiffres se rapportent, bien que nous ayions tout lieu de croire qu'il s'agit de mesures effectuées entre Neuchâtel et Portailban.

TABLEAU XXVI

(cf. page suivante)

TABLÉAU XXVI

Températures de l'eau de surface dans la zone pélagique et de l'air à l'Observatoire de Neuchâtel (alt. 487 m). Moyennes mensuelles.

	Guyot		Quartier								de Perrot
	1938		1943		1944		1945		1946		24 ans
	eau	air	eau	air	eau	air	eau	air	eau	air	eau
Janvier	4,80	1,6	-	0,4	5,6	1,6	4,2	-4,4	4,8	-1,4	5,3
Février	4,40	0,2	-	2,9	4,7	-1,4	3,8	3,6	4,6	3,9	4,6
Mars	6,08	7,5	-	7,0	4,3	2,8	5,6	6,8	5,7	6,4	5,0
Avril	6,70	6,9	-	10,5	8,4	11,2	9,7	11,5	-	12,0	6,5
Mai	10,36	11,8	-	14,5	10,9	13,9	15,4	15,4	-	14,1	11,4
Juin	17,92	17,6	-	16,1	16,7	15,8	20,1	19,3	-	15,5	16,2
Juillet	20,42	17,5	19,9	19,2	20,0	18,5	21,7	20,8	-	19,5	18,7
Août	20,22	17,6	22,6	20,3	22,4	21,9	20,3	17,7	-	18,0	19,7
Septembre	17,25	14,9	19,8	15,4	18,9	14,0	19,0	15,8	-	14,8	16,9
Octobre	16,70	9,6	15,6	11,8	13,3	8,5	13,3	9,5	-	8,4	13,6
Novembre	10,27	6,5	10,7	3,8	8,9	4,3	10,0	3,3	-	4,3	9,3
Décembre	6,90	-1,1	6,8	1,5	6,5	0,3	7,1	1,3	-	-0,5	6,6
Hiver *	5,09	0,2	-	1,6	4,9	0,2	4,5	0,1	5,0	0,7	
Printemps	11,66	8,7	-	10,7	12,0	9,3	15,1	11,2	-	10,8	
Eté	19,30	17,6	20,8	18,5	20,4	18,7	20,3	19,3	-	17,7	
Automne	11,29	10,3	11,0	10,3	9,6	8,9	10,1	9,5	-	9,2	
Années	11,83	9,22	-	10,3	11,6	9,3	12,5	10,0	-	9,6	11,1

*Pour les saisons, les moyennes qui se rapportent à l'air sont calculées, à l'Observatoire de Neuchâtel de la manière suivante: Hiver = décembre, janvier, février; printemps = mars, avril, mai ; et ainsi de suite. Par contre, nous adoptons pour l'eau : Hiver = janvier, février, mars; printemps = avril, mai, juin; et ainsi de suite. Nous estimons que cette différence entre l'air et l'eau se justifie car, en ce qui concerne cette dernière, les solstices et équinoxes se trouvent suffisamment près du début du mois suivant pour qu'on puisse faire débiter chacune des saisons aux périodes que nous venons d'indiquer, étant donné que les manifestations thermiques dans l'eau sont en retard par rapport à ce qui se passe dans l'air (fig.37).

25.2.2. La campagne 1957-1961.

Nos propres mesures concernent la station Z dans la baie d'Auvernier (fig. 1), par 115 m de fond et elles couvrent la période de juin 1958 à décembre 1961. Nous les groupons en moyennes mensuelles dans le

TABEAU XXVII

(cf. page suivante)

TABLÉAU XXVII

Températures de l'eau de surface à la station Z et de l'air à l'Observatoire de Neuchâtel (alt. 487 m). Moyennes mensuelles de 1958 à 1961.

	1958		1959		1960		1961	
	Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air
Janvier	-	0,5	-	0,6	5,89	0,3	5,42	0,9
Février	-	3,9	-	1,9	5,11	2,6	5,04	4,9
Mars	-	1,9	6,46	7,4	5,67	6,4	6,16	7,6
Avril	-	6,7	8,20	9,9	8,01	9,4	10,03	11,5
Mai	-	15,2	12,63	14,3	12,58	15,0	11,10	12,3
Juin	16,64	15,6	16,35	17,1	18,75	17,7	16,77	17,2
Juillet	18,88	18,7	21,40	21,1	18,65	16,3	18,26	17,4
Août	20,40	18,5	20,29	18,3	18,94	16,8	18,73	17,7
Septembre	20,11	16,6	17,48	16,9	17,10	12,8	19,45	18,2
Octobre	15,14	8,8	14,80	9,5	13,33	8,7	15,52	10,9
Novembre	9,95	4,4	10,53	3,4	9,77	6,5	10,12	4,7
Décembre	-	3,0	7,60	3,2	6,99	1,2	7,85	2,3
Hiver *	-	1,8	-	1,8	5,56	2,0	5,54	2,3
Printemps	-	7,9	12,39	10,5	13,11	10,3	12,63	10,5
Été	19,80	17,6	19,72	18,8	18,22	16,9	18,81	17,4
Automne	-	9,9	10,98	9,9	10,33	9,3	11,16	11,3
Année	-	9,5	-	10,3	11,74	9,5	12,04	10,5

* Cf. note au bas du tableau XXVI.

Les moyennes mensuelles de la température de l'air à l'Observatoire de Neuchâtel dans les tableaux XXVI et XXVII sont extraites des "Observations météorologiques" annexées chaque année au Bulletin

de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles (Edmond Guyot jusqu'à 1954, Walter Schuler dès 1955).

Nous rassemblons dans le tableau XXVIII les extrêmes annuels de la température de surface instantanée en regard de ceux de l'air à l'Observatoire.

TABEAU XXVIII

Extrêmes annuels des températures de l'eau en surface à la station Z et de l'air à l'Observatoire de Neuchâtel.

	1958		1959		1960		1961		Moyennes *	
	Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air
Minima	-	-8,2	5,1	-7,4	4,9	-12,8	4,9	-9,7	4,97	-9,52
Dates	-	25.I	28.I	18.I	16.II	14.I	21.II	18.III		
Maxima	22,2	30,3	23,0	32,1	19,9	28,6	20,3	29,3	21,35	30,08
Dates	19.VIII	1.VIII	14.VII	11.VII	28.VI	18.VI	27.VI	1-2.VII		
Amplitudes annuelles	-	38,5	17,9	39,5	15,0	41,4	15,4	39,0		

* pour 1959-1961 seulement.

Durant cette période, le minimum tombe entre le 28 janvier et le 21 février pour l'eau de surface, entre le 18 décembre et le 25 février pour l'air. L'eau atteint son maximum de température entre le 27 juin et le 19 août, tandis que l'air est le plus chaud entre le 18 juin et le 1er août.

L'amplitude annuelle des variations thermiques oscille alors entre 15,0 et 17,9 pour l'eau, mais entre 38,5 et 41,4 pour l'air suivant l'année considérée. Les extrêmes se manifestent plus tard dans l'eau que dans l'air, mais le décalage est nettement moins marqué à la fin qu'au début de la période durant laquelle on les rencontre.

Il est bien entendu que pour mieux définir les limites entre lesquelles se placent les extrêmes, il est nécessaire de prolonger davantage la durée des observations, afin de disposer d'au moins 10 à 15 ans de mesures. C'est à quoi tend la suite de nos recherches actuelles, simultanément avec l'extension des mesures hebdomadaires à une station différente de Z, afin d'éliminer l'effet des facteurs propres à cette dernière.

Pour voir comment la température de surface pélagique varie d'un endroit du lac à l'autre le même jour, il suffit de recourir aux 13 séries de profils thermiques que nous avons levé de 1959 à 1961,

chaque série donnant 39 mesures de température réparties sur tout le lac comme l'indique le paragraphe 14.2.1 ci-dessus.

L'idéal consisterait à mesurer les températures de l'eau et de l'air au même instant à ces 39 stations. Nous avons dû nous contenter de mesures successives, mais pour pallier les inconvénients dus aux différences d'heure entre les mesures, nous nous efforçons d'opérer autant que possible chaque fois à la même heure à la même station.

TABEAU XXIX

Températures de l'eau de surface et de l'air observées le même jour sur l'ensemble du lac. Extrêmes et moyennes. Période 1959 - 1961.

Date	Eau de surface						A i r						Amplitude		Moyenne	
	Minimum			Maximum			Minimum			Maximum			Eau	Air	Eau de surface	
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III				
1959																
6.V	10,3	25	10	13,7	34	14	10,0	12	8	18,5	32	13	3,4	8,5	12,01	
16.VII	20,0	13	7	22,8	51	8	15,5	11	6	23,0	45	14	2,8	7,5	21,44	
10.II	17,6	21	9	19,6	35	14	12,0	51	7	22,2	11	17	2,0	10,2	18,59	
1960																
6.IV	7,3	51	9	10,8	72	15	4,0	11	7	17,2	81	16	3,5	13,2	9,08	
4.V	6,0	11	7	11,8	73	15	6,0	26	7	17,0	43	16	5,8	11,0	10,05	
2.VI	13,9	11	7	18,1	45	15	12,0	11	7	23,0	43	16	4,2	11,0	16,41	
5.VII	18,6	11	7	21,7	81	16	14,0	16	7	23,1	81	16	3,1	9,1	19,38	
17.VIII	15,0	51	9	19,5	71	15	12,0	11	6	22,0	41	17	4,5	10,0	18,36	
1961																
11.IV	7,0	21	6	11,7	82	17	10,5	11	6	15,0	45	11	4,7	4,5	10,31	
20.VI	15,7	11	6	20,8	82	18	17,5	11	6	25,5	54	15	5,1	8,0	18,71	
25.VII	16,1	14	7	20,3	52	15	12,0	26	7	25,0	53	15	4,2	13,0	18,61	
16.VIII	15,2	82	19	19,3	36	12	13,5	11	6	19,5	73	18	4,1	6,0	18,69	
31.X	11,9	65	17	12,9	12	7	6,0	11	7	10,0	51	16	1,0	4,0	12,46	

Dans ce tableau : I = température mesurée; II = station du profil; III = heure de l'observation. Les températures de l'air sont mesurées à 2 m au-dessus de l'eau. L'amplitude est l'écart maximum pour l'ensemble du lac le même jour.

D'après le tableau XXIX, on peut observer, d'avril à novembre, et le même jour des différences jusqu'à 6° d'un endroit du lac à l'autre. L'amplitude est maximum en mai (1959 et 1960) et en juin (1961), mais s'amenuise à l'approche de l'automne (septembre 1959, octobre 1961). Les écarts de température de l'air accusent, par contre, des variations désordonnées.

Pour l'eau de surface, les minima de température sont fréquents dans le Bas-lac (6 fois sur 13) et dans le profil 20 (3 fois sur 13); les maxima se trouvent 6 fois sur 13 dans le Haut-lac (profils 70 et 80).

A première vue, les minima se rencontrent dans le Bas-lac qui est la région parcourue aux premières heures du jour et les maxima surtout dans le Haut-lac où les mesures se font l'après-midi. Or, Guyot (1939) a signalé déjà que la variation diurne de la température de surface n'est pas nulle, tandis que Quartier (Inspection de la pêche, 1943-1961, No. 1, p. 2) a montré que le 15 juillet 1943, la température de l'eau de surface pélagique a atteint son minimum à 7 h. et son maximum à 16 h. Bien que cette dernière constatation n'ait été faite qu'une seule fois, il est aisé d'en déduire que, par temps calme et en été, l'eau de surface au large est généralement plus froide au début de la matinée et plus chaude au milieu de l'après-midi. Notre tableau XXIX confirme ce qui vient d'être dit puisqu'au total, 11 fois sur 13 un minimum s'observe tôt le matin, contre 2 fois tard l'après-midi, tandis que 11 fois sur 13 aussi, le maximum tombe l'après-midi contre 2 fois seulement le matin (et dans ces derniers cas, la température de l'air était en baisse).

Pour l'air, dans notre tableau, le minimum de température apparaît 9 fois sur 13 dans le Bas-lac, aux premières heures de la matinée, concordant bien avec le minimum de température de l'eau de surface. Cette dernière suit donc assez bien les variations de la température de l'air, tout particulièrement dans la région peu profonde du Bas-lac.

Afin d'examiner l'effet simultané de l'agitation du lac et de la température de l'air sur la répartition des extrêmes de température de l'eau de surface pélagique, nous portons dans le tableau XXX, en regard des deux premières données, la liste des stations auxquelles ces extrêmes ont été rencontrés. L'agitation du lac et la variation de température de l'air tiennent compte, chaque fois, de la situation le jour de l'observation, ainsi que les trois jours précédents.

TABEAU XXX

(cf. page suivante)

TABLEAU XXX

Répartition des extrêmes de température de la surface dans la zone pélagique en fonction de l'agitation du lac et de la variation de la température de l'air.

Date	Etat du lac	Température de l'air	Station à température de surface	
			minimum	maximum
6.V.59	calme	en hausse	25	34
6.IV.60	"	"	51	72
20.VI.61	"	"	11	82
10.IX.59	calme	en baisse	21	35
11.IV.61	"	"	21	82
31.X. 61	"	"	65	12
4.V. 60	agité d'E	en hausse	11 - 16	73
2.VI.60	"	"	11	44 - 45
25.VII.61	"	"	14	52
16.VII.59	agité du SW	en baisse	13	51
16.VIII.61	"	"	82	36
5.VII.60	variable	variable	11 - 12	81
17.VIII.60	"	"	51	71

Par temps calme, les extrêmes se rencontrent n'importe où sur le lac, quelle qu'ait été la variation de température de l'air. Par vent d'E (bise), alors que la température de l'air est en hausse, les minima se trouvent tous dans le Bas-lac et les maxima tous dans la moitié supérieure du lac; un changement se produit-il dans les températures : le vent d'E déplace vers le Haut-lac l'eau de surface réchauffée par beau temps, en même temps qu'il refroidit la région du Bas-lac à laquelle il s'attaque en premier. Par vent du SW (vent) et bien que la température de l'air soit en baisse, la répartition des extrêmes apparaît désordonnée. Par vents variables mais relativement faibles, avec température variable de l'air, les minima se répartissent à des stations quelconques, alors que les maxima se groupent dans le Haut-lac.

De ce qui précède, on peut déduire que pour la période d'avril à octobre, l'influence de l'heure de la mesure semble prédominante lors de la détermination de la température de l'eau superficielle pélagique. Mais les extrêmes peuvent se répartir parfois sans ordre apparent sur tout le lac, que celui-ci soit calme ou agité du SW et que la température de l'air soit en hausse ou en baisse. Par contre, par beau temps, le vent d'E augmente encore l'influence de l'heure de la mesure sur la position des extrêmes de température, pour autant que les profils soient levés dans l'ordre utilisé jusqu'ici. Les vents variables n'exercent le même effet que sur les maxima seulement.

Il reste, bien entendu, à examiner comment varie la température superficielle pélagique de novembre à mars, alors que la stratification thermique est à peu près inexistante, alors que l'agitation du lac est relativement faible et que l'écart des températures moyennes de l'eau et de l'air est le plus grand. Une telle série de mesures figure dans notre programme de recherches ultérieures.

25.2.3. Comparaison avec les résultats antérieurs.

Au sujet des moyennes mensuelles, nous remarquons dans les tableaux XXVI et XXVII que les minima pour l'eau se trouvent en février et décalés par rapport à ceux de l'air qui se rencontrent en janvier normalement. Toutefois, 1938 et 1944 font exception: le minimum de l'air en 1938 s'est donné en décembre car c'est durant ce mois qu'a eu lieu la plus longue période de froid de l'année (à l'Observatoire, le thermomètre est resté 11 jours au-dessous de 0°); en 1944, une longue période de basses températures de l'air durant la seconde moitié de février a provoqué un fort refroidissement de l'eau du lac qui, par suite du décalage entre les deux phénomènes, inhérent aux propriétés calorifiques de l'eau, ne s'est manifesté qu'en mars dans la moyenne mensuelle.

On constate une bonne concordance entre l'eau et l'air dans la répartition des maxima au cours de l'année; ceux-ci se situent entre juillet et août, à l'exception de 1961 où les deux n'apparaissent qu'en septembre. Ce retard ne surprend guère car, après le manque d'insolation et l'été froid de 1960 (les valeurs des maxima de 1960 sont inférieures à toutes les autres des tableaux XXVI et XXVII), le rattrapage des températures n'a pu se faire en 1961 qu'avec davantage de temps et tardivement, toutefois, grâce à un automne particulièrement chaud.

Laissant de côté celles de de Perrot, nous calculons les températures moyennes de l'eau de surface pélagique à partir des 9 ans de mesures hebdomadaires qui ont servi à établir les tableaux XXVI et XXVII. Le tableau XXXI place ces moyennes calculées en regard de celles de l'air pour la période correspondante.

TABLEAU XXXI

(cf. page suivante)

TABEAU XXI

Températures moyennes de l'eau de surface de la zone pélagique et de l'air à l'Observatoire de Neuchâtel, calculées à partir de 9 ans d'observations hebdomadaires.

	Eau	Air		Eau	Air
Janvier	5,12	0,0	Juillet	19,90	18,8
Février	4,61	2,5	Août	20,49	18,5
Mars	5,71	6,0	Septembre	18,64	16,2
Avril	8,51	10,0	Octobre	14,71	9,5
Mai	12,16	14,1	Novembre	10,03	4,6
Juin	17,60	16,9	Décembre	7,11	1,2
Hiver	5,18	1,2	Eté	18,92	18,1
Printemps	13,01	10,0	Automne	10,77	9,8
Année : eau: 12,53 ; air: 9,8					

On pourrait reprocher à ce tableau d'être établi sur des données émanant exclusivement du tiers inférieur du lac, autrement dit provenant de la cuvette de Neuchâtel (cf. paragraphe 3.3) seulement. Mais nous estimons que les moyennes calculées ainsi représentent suffisamment bien la variation annuelle de la température de l'eau de surface pélagique, car si nous avons eu l'occasion, plus haut, d'examiner les différences instantanées qui peuvent se manifester dans l'ensemble du lac le même jour, on peut voir aussi que ces différences s'amenuisent considérablement lors du calcul des moyennes.

25.2.4. Comparaison avec d'autres lacs.

A. Variations mensuelles de la température.

Avant de comparer (fig. 36) les moyennes mensuelles de la température de surface pélagique de notre lac à celles de l'Ueberlingersee, il faut rappeler que ce dernier est peu influencé par son rattachement à la partie principale du Bodan, car le seuil sous-lacustre d'Unteruhldingen-Litzelstetten s'oppose fortement et surtout en profondeur à l'échange d'eau avec le Bodan. De ce seuil à son extrémité NW, l'Ueberlingersee possède une superficie de 55 km² et une profondeur maximum de 160 m environ, avec une altitude inférieure de 34 m seulement à celle de Neuchâtel; il est cependant orienté différemment du nôtre par rapport aux vents dominants dont il est assez bien protégé par l'escarpement de ses rives.

VARIATION MENSUELLE DE LA TEMPERATURE MOYENNE . 1958 - 1961

— EAU DE SURFACE STATION Z - - - - - AIR OBSERVATOIRE

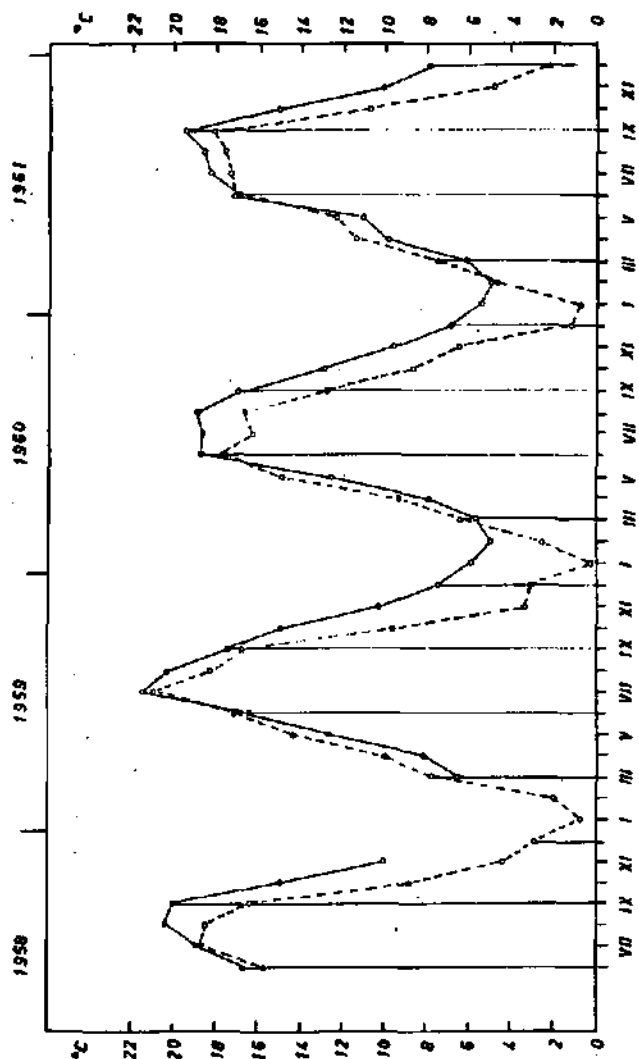


Fig. 37.

VARIATION MENSUELLE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU. 1958-1961.

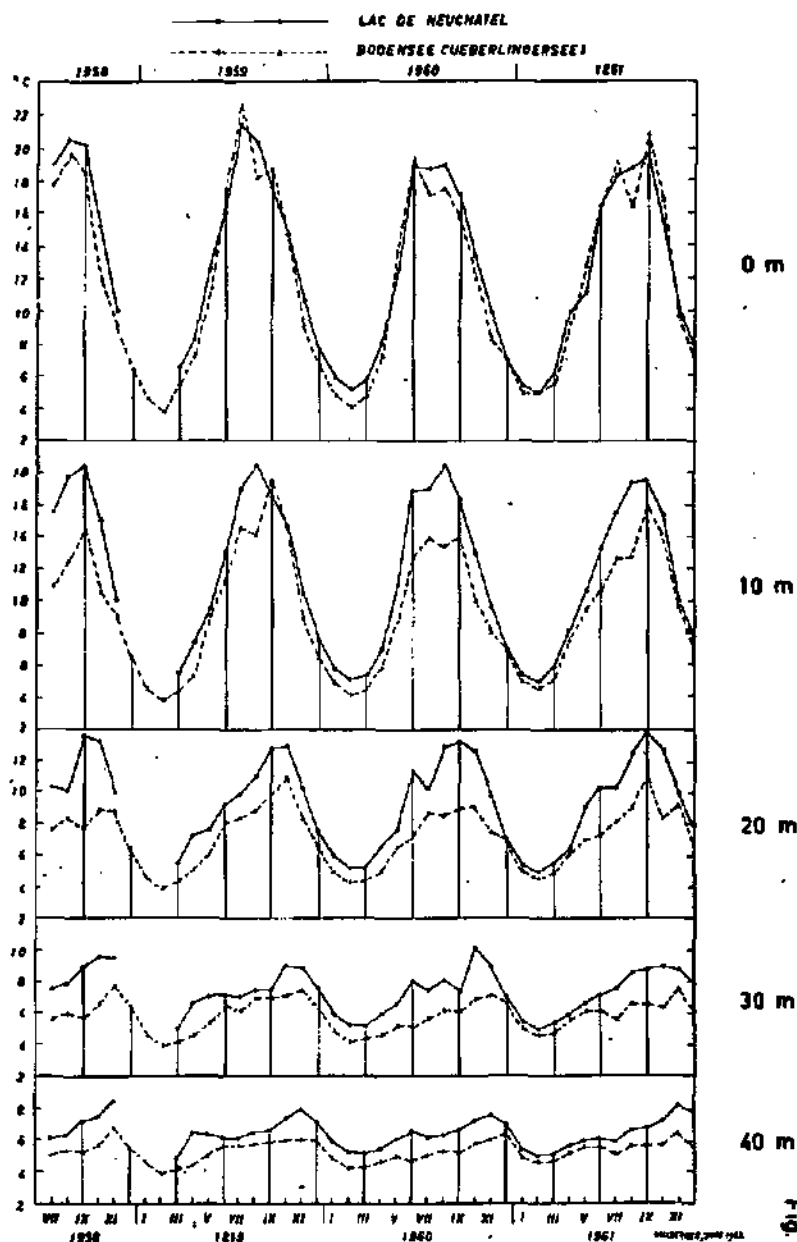


Fig. 38.

Les variations de température de la surface sont semblables, à époques correspondantes, pour les deux lacs. Cependant, les extrêmes d'hiver et d'été sont un peu plus marqués dans l'Ueberlingersee que dans le lac de Neuchâtel. La différence de latitude entre les deux est trop faible pour expliquer cette différence des extrêmes; quant à la différence d'altitude, elle aurait un effet inverse. Selon Quartier (1947), un lac exposé aux effets du vent est, en général, plus chaud qu'un lac soustrait à ces mêmes effets. Dans notre comparaison, c'est le contraire qui se produit et nous pensons que c'est davantage à ses plus faibles dimensions que l'Ueberlingersee doit des extrêmes de température plus marqués en surface que le lac de Neuchâtel. L'effet correcteur du vent ne se fait pas sentir sur le premier à cause de la configuration de ses rives.

B. Extrêmes thermiques en surface.

L'EAWAG (1960) indique les extrêmes suivants pour la température de surface pélagique du lac de Morat, de décembre 1954 à novembre 1955, alors que la température de l'air est normale :

- le 15 mars 1955 : $3^{\circ}3$ à deux stations et $3^{\circ}7$ à une troisième station
- le 2 août 1955 : $22^{\circ}0$ à une station
- le 30 août 1955 : $21^{\circ}5$ à une station et $21^{\circ}0$ à une autre.

En comparant ces résultats aux nôtres pour la période 1959-1961 dans le lac de Neuchâtel, on constate que les extrêmes étant : $4^{\circ}9$ et $23^{\circ}0$ pour Neuchâtel et $3^{\circ}3$ et $22^{\circ}0$ pour Morat, l'amplitude annuelle de la variation de température est très voisine pour les deux lacs, soit $18^{\circ}1$ pour Neuchâtel et $18^{\circ}7$ pour Morat pour l'eau de surface pélagique.

Par contre, Rivier (1936) avait obtenu les extrêmes absolus suivants en surface: $1^{\circ}8$ en 1934 et $25^{\circ}7$ en 1935 ce qui, pour la période 1934/1935 porte l'amplitude à $23^{\circ}9$. Bien que 1935 ait été une année thermiquement normale, il faut relever cependant que la basse température de décembre 1933 et le caractère très chaud de l'année 1934 ne sont peut-être pas étrangers à cette augmentation de l'amplitude thermique de l'eau de surface pélagique du lac de Morat.

Pour le grand lac qu'est le Léman, Dussart (1954 a) affirme que la température de surface pélagique est plus élevée en été que la température littorale, sauf dans la zone bordière des rives. Cette affirmation est donc en contradiction avec celle de Rouch (1957) dont nous avons déjà parlé. Pour le lac de Neuchâtel, grand lui aussi, nous ne pouvons pas être aussi affirmatif que Dussart, car nous avons constaté qu'en été, le plus souvent, les minima et les maxima sont répartis, le même jour, sans ordre apparent en zone pélagique aussi bien qu'en zone littorale et cela pratiquement à la même heure (le tableau XXIX le montre clairement en juin, juillet et août). Nous nous en tiendrons donc, momentanément, à nos propres constatations, sans exprimer de règle au sujet de la répartition des températures à la surface du lac entre le littoral et le large, jusqu'à ce que des mesures systématiques serrées et simultanées dans ces deux régions aient pu être faites durant plu-

sieurs années.

A propos du maximum de 6° que nous avons observé comme écart de température instantanée entre deux points du lac de Neuchâtel, nous relevons à titre comparatif et d'après Collet (1925), que sur le Léman, Forêt avait observé un écart de 10,2 en juillet 1879 entre Ouchy et Evian et Delebecque un de 11,1 en août 1895 entre Genève et Vevey.

C. Ecart thermique eau-air.

Notre tableau XXXI donne les valeurs moyennes des températures de la surface et de l'air durant l'année. Mais il est intéressant aussi de voir comment évolue la différence entre ces deux moyennes pendant l'année et comparativement à ce qui se passe pour d'autres lacs. L'écart thermique en question s'obtient en soustrayant la température mensuelle de l'air de celle de l'eau. A titre de comparaison, nous choisissons les lacs suivants de l'hémisphère boréal :

Lac	Aire (km ²)	Altitude (m)	Profondeur max. (m).
Morat	23	429	46
Léman	581	372	310
Ontario	19440	75	237
Michigan	57900	177	282

Bien que de superficies très différentes, ils sont approximativement situés à la même latitude, les deux derniers étant cependant tributaires d'un climat plus continental que les deux premiers,

TABLEAU XXXII

Ecart thermique eau de surface-air de divers lacs.

Lac:	Neuchâtel			Morat	Léman	Michigan	Ontario
Période:	1938	1944/45	1958/61	1934/35	1951/52	-	-
Auteur:	Guyot	Quartier	Solberger	Rivier (1936)	Dussart (1954a)	Ayers (1962)	Ayers (1962)
Janvier	3,2	6,3	5,0	5,5	4,9	7,2	4,4
Février	4,2	3,2	1,3	1,0	2,9	7,8	3,9
Mars	- 1,3	0,2	- 1,0	- 0,3	0,5	5,0	1,7
Avril	- 0,2	- 2,3	- 1,5	- 1,2	- 1,5	- 0,3	- 2,2
Mai	- 1,4	- 1,5	- 1,8	1,0	- 1,3	- 4,2	- 5,6
Juin	0,3	0,9	0,3	1,7	0	- 4,4	- 6,1
Juillet	2,9	1,2	0,7	3,9	- 0,6	- 1,7	- 1,9
Août	2,6	1,6	1,8	6,9	0,8	0,6	- 1,1
Septembre	2,4	4,1	2,4	4,5	1,7	1,1	1,7
Octobre	7,1	4,3	5,2	5,8	3,8	2,2	2,2
Novembre	3,8	5,7	5,4	5,9	3,6	5,0	2,5
Décembre	8,0	6,0	5,3	1,9	4,1	6,7	3,3

D'après ce tableau, le lac de Neuchâtel est plus chaud que l'air ambiant de juin à février et l'écart est maximum entre novembre et janvier; de mars à mai, il est plus froid que l'air, avec écart maximum en avril et mai. Son voisin immédiat, le lac de Morat suit approximativement les mêmes alternances thermiques, mais c'est en août déjà qu'il est le plus chaud par rapport à l'air. Il y a beaucoup d'analogie également entre Neuchâtel et le Léman. Pour les deux lacs américains, par contre, si les écarts extrêmes se présentent à peu près aux mêmes époques, la valeur de ces écarts y est nettement plus grande du fait du climat plus continental dont ils dépendent.

26. L'eau en profondeur.

Jusqu'ici nous avons examiné les variations de la température de l'eau en surface seulement. Voyons maintenant les variations à des niveaux différents les uns des autres, à diverses stations et saisons et en fonction des mouvements de l'eau.

Sous nos latitudes, l'eau d'un lac n'est homotherme que durant une courte période de l'année si l'altitude de la nappe d'eau n'est pas trop grande; ce phénomène se produit en hiver et dans une partie de l'automne. En dehors de cette période, la température varie suivant la profondeur: en diminuant de la surface au fond en saison chaude, mais pouvant présenter parfois une répartition inversée à la suite de grands froids.

26.1. Résultats antérieurs à nos recherches.

Comme pour l'eau de surface et par analogie, nous tiendrons compte de quelques résultats acquis antérieurement à 1958, aussi bien à titre comparatif que purement historique.

Ladame (1861b) nous a laissé des observations faites à 1 km au large de Neuchâtel, par 90 m de fond et à intervalles verticaux d'une toise (1,94 m). Ces mesures sont malheureusement très espacées dans le temps et nous n'en gardons que les six valeurs suivantes :

le 21 juin 1839 à 16 h	:	23 ⁰ ,5 en surface et 5 ⁰ ,0 à 29 m
le 22 février 1842 à 15 h.	:	2 ⁰ ,6 en surface et 3 ⁰ ,65 à 58 m
le 14 avril 1842 à 15 h	:	8 ⁰ ,0 en surface et 4 ⁰ ,0 à 90 m

parmi lesquelles le sondage du 22 février 1842 est la première mention connue d'une inversion thermique dans notre lac.

Mauvais (1929) a obtenu de de Perrot les températures moyennes de la région pélagique par 100 m de fond entre Neuchâtel et Portalban durant la période de décembre 1927 à octobre 1929. Il est regrettable toutefois, que dans son travail, Mauvais donne uniquement les valeurs obtenues à 30, 40, 60, 80 et 100 m de profondeur d'une part et que 1928 soit la seule année complète d'autre part.

Le travail de Guyot (1939) concerne la station mentionnée au début de notre paragraphe 25.2.1 et uniquement l'année 1938. Quant aux mesures exécutées sous la direction de Quartier (Inspection de la pêche 1943-1961) de juillet 1943 à mars 1946, elles se rapportent à la station décrite en même temps que la précédente. Il faut déplorer, cependant, que les résultats de Quartier entre 0 et 20 m soient calculés à la fois à partir de mesures hebdomadaires à 3 km au large et à partir de mesures quotidiennes à 200 m en avant du port de Neuchâtel. Ce mélange de deux séries basées sur des intervalles différents influence défavorablement les moyennes mensuelles de 0 à 20 m, alors qu'au-delà (de 30 à 100 m) ces moyennes sont davantage comparables à celles des autres auteurs.

Le tableau XXXIII rassemble les extrêmes et l'amplitude annuelle de la variation des moyennes mensuelles de la température, tirée des résultats données par les auteurs que nous venons de citer, mais en ne choisissant que les profondeurs communes à tous les trois et pour des années complètes seulement. Nous ne transcrivons pas les valeurs moyennes pour chaque mois, laissant au lecteur le soin de consulter les travaux originaux à cet effet.

TABLEAU XXXIII

(cf. page suivante)

TABLEAU XXXIII

Variation des moyennes mensuelles et de l'amplitude annuelle de la température pélagique entre 30 et 100 m de profondeur.

Année	Profondeur	Minima	Mois	Maxima	Mois	Amplitude annuelle	Auteur
1928	30	5,4	II	14,0	VIII	8,6	Mauvais
	40	5,4	II	11,0	VIII	5,6	
	60	5,4	II	9,0	VIII	3,6	
	80	5,4	II	8,0	VIII	2,6	
	100	5,4	II	7,0	VIII	1,6	
1929	30	3,5	III	11,0	IX	7,5	Mauvais
	40	3,5	III	9,0	VII	5,5	
	60	3,6	III	7,0	VII	3,4	
	80	3,7	III	5,3	IX	1,6	
	100	3,7	III	4,9	VIII	1,2	
1938	30	4,3	II	9,2	X	4,9	Guyot
	40	4,3	II	8,0	X	3,7	
	60	4,2	II	6,8	X	2,6	
	80	4,1	II	6,5	X	2,4	
	100	4,1	II	6,1	X	2,0	
1944	30	4,0	III	9,3	X	5,3	Quartier
	40	4,0	III	7,4	XI	3,4	
	60	4,0	III	6,0	XII	2,3	
	80	4,0	III	6,0	XII	2,0	
	100	4,0	III	5,4	XII	1,4	
1945	30	3,7	II	9,4	X	5,7	Quartier
	40	3,7	II	7,6	XI	3,9	
	60	3,7	II	6,0	XII	2,3	
	80	3,7	II	5,8	XII	2,1	
	100	3,7	II	5,4	XII	1,7	

Les mesures les plus profondes faites par Guyot concernent la zone au-delà de 90 m, mais proches de 100 m, profondeur sous laquelle nous les faisons figurer dans notre tableau.

Les minima mensuels de 1929 sont parmi les plus bas de ces cinq ans. Cela tient à l'hiver exceptionnel de 1929 qui a été remarquablement froid du 1^{er} janvier au 17 février sans discontinuer, ce qui a permis à l'air d'atteindre -19,9 le 13 février, température la plus basse jamais enregistrée à l'Observatoire de Neuchâtel. Pour 1945 et bien qu'il s'agisse d'une année excessivement chaude, les minima sont très marqués aussi car le mois de janvier a été excessivement froid. Par contre, les minima de 1928 sont les moins accentués, car le froid a été excessivement peu marqué et peu durable fin 1927 et dans les premiers mois de 1928.

On peut donc dire que le climat influence les minima mensuels de la température des couches profondes et cela en tenant compte du décalage dû à l'inertie calorifique de l'eau. Les hivers rigoureux abaissent donc les minima mensuels de température au-dessous de 4° en février-mars jusque dans la zone comprise entre 30 et 100 m de profondeur.

Les maxima mensuels de 1928 sont les plus élevés de la période quinquennale et ils se sont tous produits en août; cela tient à l'été 1928 qui est un des plus chauds enregistrés depuis le début des observations, sa moyenne de température n'ayant été dépassée que par l'été 1911 et encore très faiblement. Tout comme 1928, l'année 1929 accuse une inévation largement au-dessus de la moyenne, sans toutefois que son été soit excessivement chaud. Pour cette dernière raison, le réchauffement de l'eau n'a pas suffi à faire disparaître jusqu'au fond du lac les séquelles du grand refroidissement de l'hiver 1929. Aussi ne faut-il pas s'étonner que seuls les maxima mensuels des niveaux 30, 40 et 60 de 1929 soient supérieurs à ceux des trois années postérieures qui, par ailleurs, sont très semblables entre eux, alors que les maxima de 1929 à 80 et 100 m sont nettement au-dessous des valeurs correspondantes de 1938, 1944 et 1945.

TABLÉAU XXXIV

Variation quinquennale de la température pélagique mensuelle devant Neuchâtel.

Profondeur	Minima			Maxima			Amplitude	
	Mois	Extrêmes	Moyenne	Mois	Extrêmes	Moyenne	Extrême	Moyenne
30 m.	II-III	3,5-5,4	4,18	VIII-X	9,2-14,0	10,58	10,5	6,40
40 m.	II-III	3,5-5,4	4,18	VII-XI	7,4-11,0	8,60	7,5	4,42
60 m.	II-III	3,6-5,4	4,18	VII-XII	6,0-9,0	7,02	5,4	2,84
80 m.	II-III	3,7-5,4	4,18	VIII-XII	5,3-8,0	6,32	4,3	2,14
100 m.	II-III	3,7-5,4	4,18	VIII-XII	4,9-7,0	5,76	3,3	1,58

D'après ce tableau qui rapporte les valeurs du tableau XXXIII à chaque profondeur considérée, les minima se situent autour de 4,18 quelle que soit la profondeur. Quant aux maxima, leur valeur moyenne absolue décroît lorsque la profondeur augmente, passant de 10,58 pour 30 m à 5,76 pour 100 m. L'amplitude des températures moyennes, autrement dit l'écart entre les extrêmes des températures mensuelles, diminue lorsque la profondeur augmente, passant entre 30 et 100 m de 6,40 à 1,58.

La présence d'une année exceptionnellement chaude dans la période quinquennale dont nous venons de tirer les moyennes mensuelles de température a certainement influencé légèrement ces dernières par rapport

à ce qu'on aurait obtenu exclusivement avec des années normales. Pour obtenir des moyennes mensuelles sur lesquelles l'effet d'années extraordinaires sera fortement atténué, il faudra baser cette statistique sur plusieurs décennies. D'ici là, nous admettons momentanément que les valeurs des tableaux XXXIII et XXXIV correspondent à la température moyenne mensuelle de cinq niveaux profonds de la cuvette de Neuchâtel, mesurées entre 1928 et 1945. La statistique ultérieure à laquelle nous venons de faire allusion pourra seule permettre de constater si les extrêmes mentionnés plus haut peuvent être dépassés.

26.2. La campagne 1957-1961.

26.2.1. Température moyenne mensuelle par station et comparaison avec les résultats antérieurs.

Considérons maintenant la température moyenne du lac à la station Z, autrement dit la moyenne des températures mesurées à la surface, puis à 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 80 et 100 m de profondeur simultanément. La moyenne arithmétique de ces températures correspond, du point de vue pratique, à la température moyenne d'un cylindre d'eau de hauteur égale à la profondeur du lac à l'endroit considéré et d'un diamètre de quelques dizaines de mètres au maximum, autrement dit insuffisant pour pouvoir constater à un niveau quelconque des écarts de température dans le sens horizontal.

Dans le tableau qui suit, nous reportons à titre comparatif et à côté des résultats obtenus à Z, ceux qu'on calcule à partir des données de Guyot et de Quartier figurant dans les tableaux originaux de ces auteurs.

TABLEAU XXXV

(cf. page suivante)

TABLEAU XXXV

Températures moyennes mensuelles et annuelles de l'eau, de la surface au fond pour une profondeur de 100 mètres.

	Sollberger				Guyot	Quartier	
	1958	1959	1960	1961	1938	1944	1945
Janvier	-	-	5,9	5,4	4,54	5,6	4,1
Février	-	-	5,2	4,9	4,23	4,6	3,7
Mars	-	5,3	5,3	5,5	4,48	4,0	4,1
Avril	-	6,7	6,3	6,9	5,65	5,0	5,6
Mai	-	8,0	8,3	8,2	6,65	6,3	7,0
Juin	9,3	9,6	11,3	9,9	7,10	8,3	8,2
Juillet	10,8	11,2	11,0	10,7	6,96	9,0	8,8
Août	11,4	11,7	12,0	11,8	7,45	9,5	9,1
Septembre	12,5	18,1	11,3	12,2	8,13	9,2	9,2
Octobre	11,3	10,8	10,5	11,0	8,85	8,4	8,4
Novembre	8,9	8,9	8,5	8,8	7,59	7,2	7,4
Décembre	-	7,2	6,8	7,4	6,59	6,1	6,4
Année	-	-	8,53	8,56	6,52	6,92	6,83

Nous renonçons à calculer des moyennes septennales à partir de ce tableau, car les groupes de colonnes qui correspondent à chacun des trois travaux ne sont pas établis en tenant compte d'un même nombre de profondeurs dans chaque cas; c'est ainsi que Guyot utilise les niveaux 1, 2, 50, 60 et 70 en plus des nôtres, mais pas 15, ni 25, tandis que Quartier ajoute 50, 60, 70, 90, 110 et parfois 120 m. Les résultats correspondant à ces niveaux supplémentaires ont une influence sur les valeurs mensuelles et annuelles de chaque station, de sorte que les chiffres obtenus ne sont plus comparables entre eux.

Selon le tableau XXXV, le minimum mensuel se rencontre en février aussi bien à 2 qu'aux autres stations de la cuvette de Neuchâtel. Quant aux maxima, trois fois sur quatre ils se trouvent en septembre et une fois en août. Ce dernier cas, qui correspond aussi au maximum le plus faible des quatre ans, est la conséquence de l'été froid et pluvieux, de même que du mauvais temps de tout le second semestre de 1960; au lieu de continuer à augmenter au-delà du mois d'août, la température moyenne de la colonne d'eau à 2 a baissé par suite du mauvais temps et, tout naturellement, août a enregistré la température relative la plus élevée de l'année.

Compte tenu des réserves qui viennent d'être faites, la concordance des mois dans lesquels apparaissent les extrêmes est bonne entre nos recherches et celles de Guyot et de Quartier. Par contre, si les valeurs annuelles de 1960 et de 1961 concordent bien entre elles, de même que celles de 1944 et de 1945 entre elles, la température moyenne annuelle à Z diffère de celles aux stations étudiées par Guyot et par Quartier. Cette différence provient de ce que, dans les calculs se rapportant à ces deux dernières stations, il entre davantage de résultats provenant d'eaux profondes, autrement dit d'eaux à basses températures, ce qui contribue à abaisser les moyennes correspondantes.

Dans le tableau XXXVI, nous mettons en évidence l'amplitude des écarts de température existant entre l'eau de surface et celle du fond à chacune des trois stations étudiées déjà.

TABEAU XXXVI

Amplitude thermique mensuelle de la surface au fond.

	Sollberger				Guyot	Quartier	
	1958	1959	1960	1961	1938	1944	1945
Janvier	-	-	0,1	0	0,1	0,1	0,1
Février	-	-	0,1	0,1	0,27	0,2	0,1
Mars	-	2,0	0,8	1,3	1,74	0,3	1,8
Avril	-	3,6	2,9	5,0	1,75	4,0	5,4
Mai	-	7,7	7,5	6,2	4,86	6,6	11,1
Juin	11,6	11,4	13,7	11,9	12,35	12,1	15,6
Juillet	13,9	16,4	13,6	13,4	14,67	15,5	17,3
Août	15,5	15,4	13,9	13,7	14,22	17,5	15,7
Septembre	14,6	12,6	12,0	14,4	11,60	14,3	14,4
Octobre	9,8	9,6	8,1	10,2	10,55	8,7	8,5
Novembre	4,7	5,1	4,6	4,6	4,22	3,9	5,1
Décembre	-	1,9	0,9	1,7	1,05	1,1	1,7
Année	-	-	6,52	6,88	7,03	7,03	8,07

En janvier et février, il y a homothermie aussi bien à la station Z qu'à celle étudiée par Quartier, car un écart de 0,1 sur 100 m de hauteur d'eau peut être considéré comme insignifiant. L'écart mensuel maximum, qui est de 14 à 16 degrés pour la station Z, y apparaît en été, de juillet à septembre suivant les conditions météorologiques qui ont régné avant son apparition. Pour les stations étudiées par Guyot et

Quartier, l'ordre de grandeur des maxima est le même qu'à Z mais cet extrême affecte les mois de juillet et d'août seulement.

26.2.2. Température moyenne instantanée par station.

De 1958 à 1961, nous avons calculé 173 fois la moyenne arithmétique et l'écart de la température de la surface au fond, à la station Z, en utilisant les chiffres obtenus aux 10 niveaux mentionnés déjà. Nous reportons dans le tableau XXXVII les extrêmes et les moyennes annuelles tirés de ces résultats.

TABEAU XXXVII

Extrêmes instantanés et moyenne annuelle, pour une profondeur de 100 m: a) de la température moyenne de la surface au fond; b) de l'écart thermique entre la surface et le fond. Station Z (Erie d'Auvergnier) 1959/61.

	1959		1960		1961	
	Tempér. (a)	Ecart (b)	Tempér. (a)	Ecart (b)	Tempér. (a)	Ecart (b)
Minimum Date	4,7 3.III	0 28.I	4,9 16.II	0 5.I	4,9 7.II	0 21.II
Maximum Date	12,3 11.VIII	18,1 14.VII	12,6 26.VII	14,7 21.VI	12,8 6.IX	15,3 27.VI
Moyenne annuelle	-	-	8,53	6,52	8,56	6,88

En valeurs instantanées et pour l'ensemble des profondeurs 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 80 et 100 m, la température moyenne de l'eau du lac à la station Z oscille entre 4,7 et 12,8 pour la période 1959-1961, avec des minima échelonnés entre le 7 février et le 3 mars et des maxima entre le 26 juillet et le 6 septembre. Les écarts de température entre la surface et le fond oscillent entre 0° et 18,1 avec des minima répartis entre le 5 janvier et le 21 février, ainsi que des maxima entre le 21 juin et le 14 juillet. Autrement dit, le lac peut être homotherme à Z durant la presque totalité des deux premiers mois de l'année; il peut être le plus fortement hétérotherme durant les 3 semaines qui suivent le solstice d'été, c'est-à-dire durant la période de l'année où le réchauffement diurne est le plus long.

Dans le présent chapitre, les températures en profondeur n'ont été examinées jusqu'ici qu'à 4 stations seulement. Nous nous occupons maintenant des écarts thermiques instantanés existant entre la surface et le fond dans les 12 stations des grandes expéditions décrites au paragraphe 14.1.1. Mais nous ne groupons, dans le tableau XXXVIII que les

extrêmes de ces écarts; on ne pourrait, en effet, comparer entre elles les moyennes de ces écarts, les profondeurs aux stations correspondantes étant trop différentes les unes des autres.

TABLEAU XXXVIII

Extrêmes instantanés de l'écart thermique entre la surface et le fond aux stations A à P' pour la période 1957-1960.

Station	Profondeur	Minimum		Maximum	
		Ecart	Date	Ecart	Date
A	153	0,4	27.II.1958	14,4	25.VIII.1959
B	100	-	-	15,15	26.VIII.1958
B'	45	0	27.II.1958	13,75	25.VIII.1959
C	43	0	27.II.1958	15,0	25.VIII.1959
D	45	0	27.II.1958	14,9	25.VIII.1959
E	12	0	27.II.1958	6,4	25.VIII.1959
F	23	0	27.II.1958	10,7	25.VIII.1959
K *	11	-	-	4,0	25.VI.1957
L **	11	-	-	6,0	27.VIII.1957
M **	31	-	-	11,1	26.VIII.1958
N *	82	0,2	27.II.1958	14,1	25.VIII.1959
P'	36	-	-	11,4	29.IX.1959

* = 1957 à 1959 ; ** = 1957 à 1958 seulement.

Si aucun minimum n'est mentionné aux stations B, K, L, M et P', c'est qu'aucune mesure de température n'a pu avoir lieu à ces endroits en février 1958.

Il ressort du tableau XXXVIII que l'écart thermique surface-fond est minimum à toutes les stations explorées le 27 février 1958. A cinq stations, le lac est homotherme (écart nul), tandis qu'à A et N une légère différence de température est enregistrée, attestant qu'à cette date, et à ces endroits, l'homothermie n'est pas encore réalisée jusqu'au fond du fait que la profondeur y est plus grande qu'aux autres stations. Autrement dit, l'hiver n'a pas encore atteint son point culminant à ces profondeurs à fin février et il en est d'autant plus éloigné que la profondeur est plus grande (l'écart est plus grand encore à ce moment-là à 153 m qu'à 82 m).

A l'exception de K et P', toutes les stations atteignent l'écart maximum en août, avec une valeur proportionnelle à la profondeur de la station.

26.2.3. Variation isothermique de la température à la station Z.

Pour les 173 expéditions à Z, de 1958 à 1961, nous représentons les variations de la température de l'eau en fonction du temps au moyen de courbes isothermes. Toutefois, sur les fig. 39 à 42, ces dernières ne sont dessinées que pour des degrés entiers.

D'une manière générale, les isothermes inférieures à 20° tendent à descendre de plus en plus profondément au fur et à mesure que l'année avance. Cette descente est perturbée par des mouvements de l'eau qui, tantôt ramènent à Z l'eau plus froide et font remonter alors les isothermes, tantôt véhiculent de l'eau plus chaude en chassant les isothermes vers le bas. Ces irrégularités se produisent en toutes saisons, atteignent facilement 10 à 20 m d'écart et peuvent même arriver à 50 m à la fin de l'automne. Nous les attribuons à l'action des vents plus qu'à celles de seiches, rejoignant par là l'opinion émise par Birge (1910b).

En 1959, on observe plus particulièrement les phénomènes suivants : vers la mi-juin, une semaine de mauvais temps avec baisse de la température et fortes vagues de bise, fait remonter les isothermes supérieures à 13°, mais descendre simultanément celles de 12° et des températures inférieures; ainsi, l'eau des couches superficielles s'est refroidie jusqu'à 15 m de profondeur par rapport à la semaine antérieure. Simultanément, de l'eau de surface plus chaude a envahi la zone placée au-dessous de la précédente, en faisant sentir ses effets jusqu'au fond que l'isotherme de 5° atteint pour la première fois depuis le mois de mars. Etant donné la configuration de la baie d'Auvernier, il est vraisemblable que la bise pousse l'eau superficielle vers le rivage W dont l'orientation de la pente impose le retour de cette eau en profondeur en direction de Z. Début septembre, une brève tempête de bise pendant que le refroidissement nocturne augmente, provoque un faible refroidissement en surface, mais une remontée nette des isothermes à partir de 16 m de profondeur; l'eau revenant alors vers Z à une profondeur plus grande, est plus froide à ce moment-là que celle qui s'y trouvait précédemment. En septembre, comme en juin, la situation thermique normale se rétablit d'ailleurs en quelques jours. Fin octobre, des vents faibles et variables brassent fortement l'eau à Z jusqu'au-delà de 70 m de profondeur; la température de l'air ne varie pas beaucoup, mais les isothermes s'abaissent en se rapprochant très fortement les uns des autres; le lac tend déjà vers l'homothermie dans les couches supérieures; c'est le début de l'"overturn" d'automne.

En 1960, à l'époque du solstice d'été, un temps pluvieux, couvert, à température relativement basse, permet au vent d'W de refroidir l'eau assez profondément à Z et la remontée des isothermes se fait sentir jusqu'au-delà de 50 m de profondeur. Fin août, le vent d'W qui soufflé jusqu'au début de septembre provoque, malgré une intensité variable, un phénomène très semblable au précédent. Début octobre, le vent du SW soufflant de manière très irrégulière, provoque une brève tendance à l'uniformisation thermique du lac, moins marquée toutefois qu'à fin octobre 1959.

En 1961, une longue période de beau temps dans la première

Fig. 39.

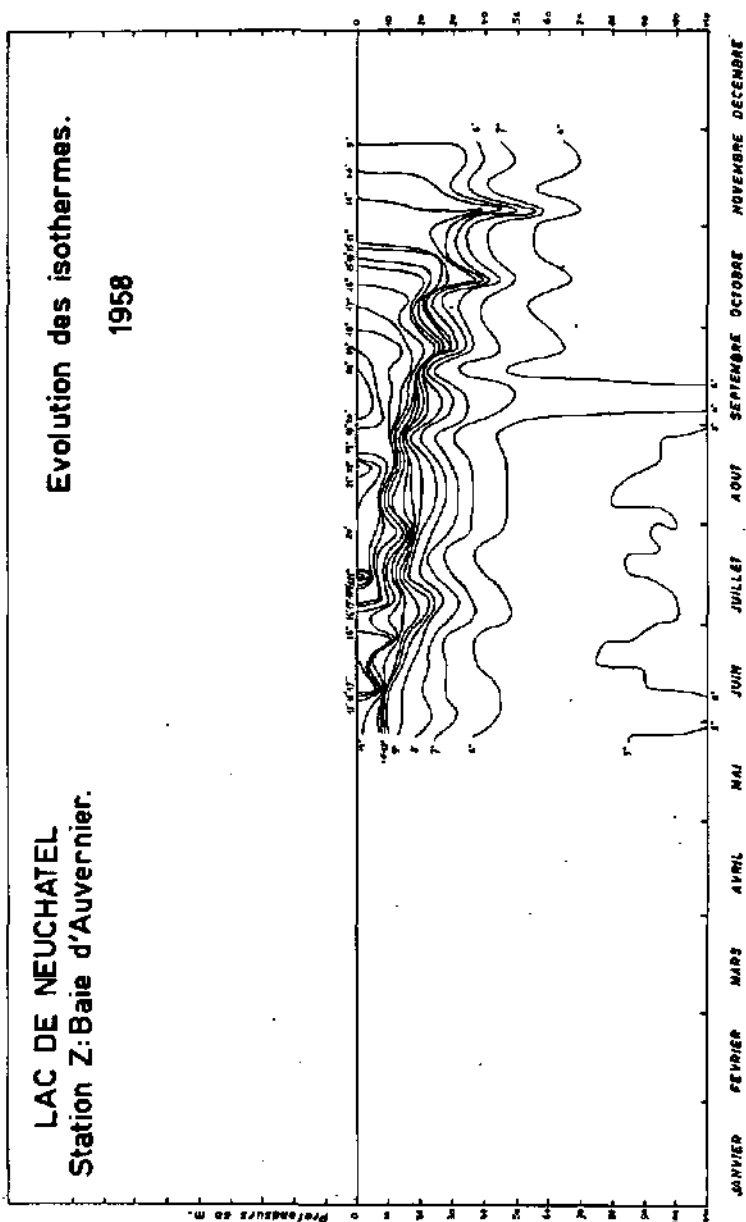


Fig. 40.

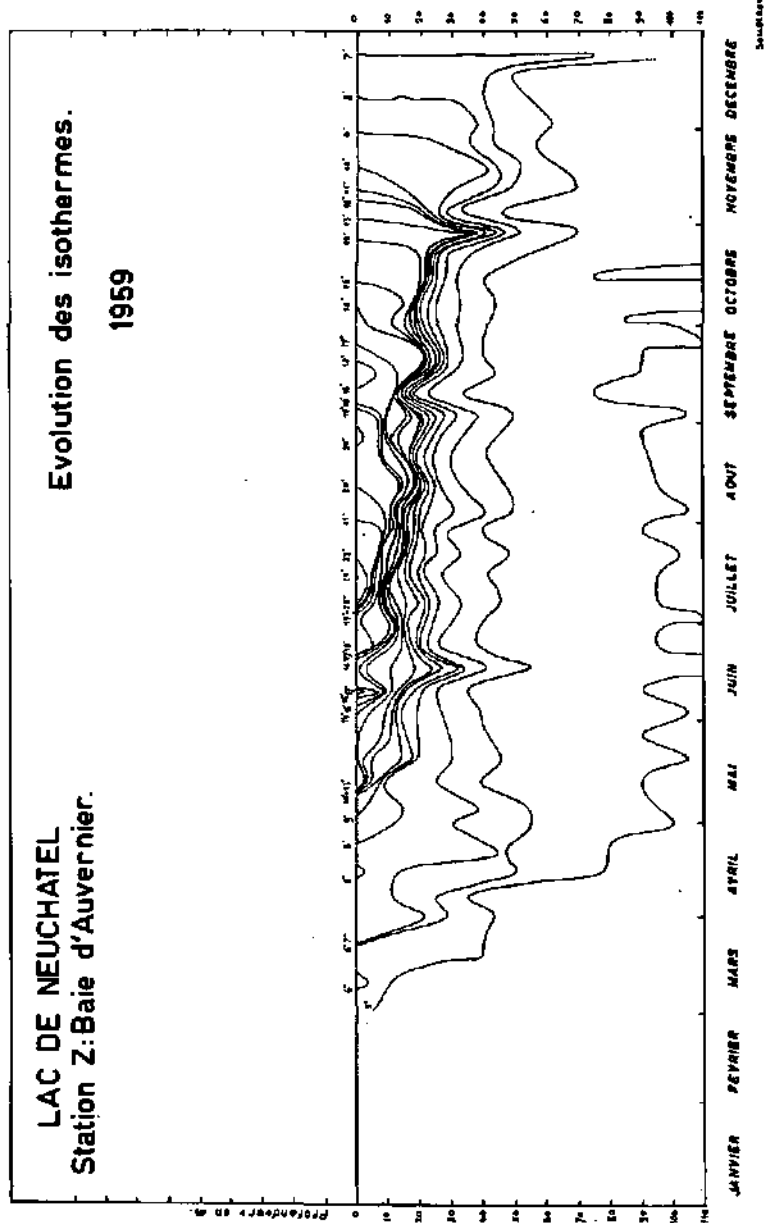


Fig. 41.

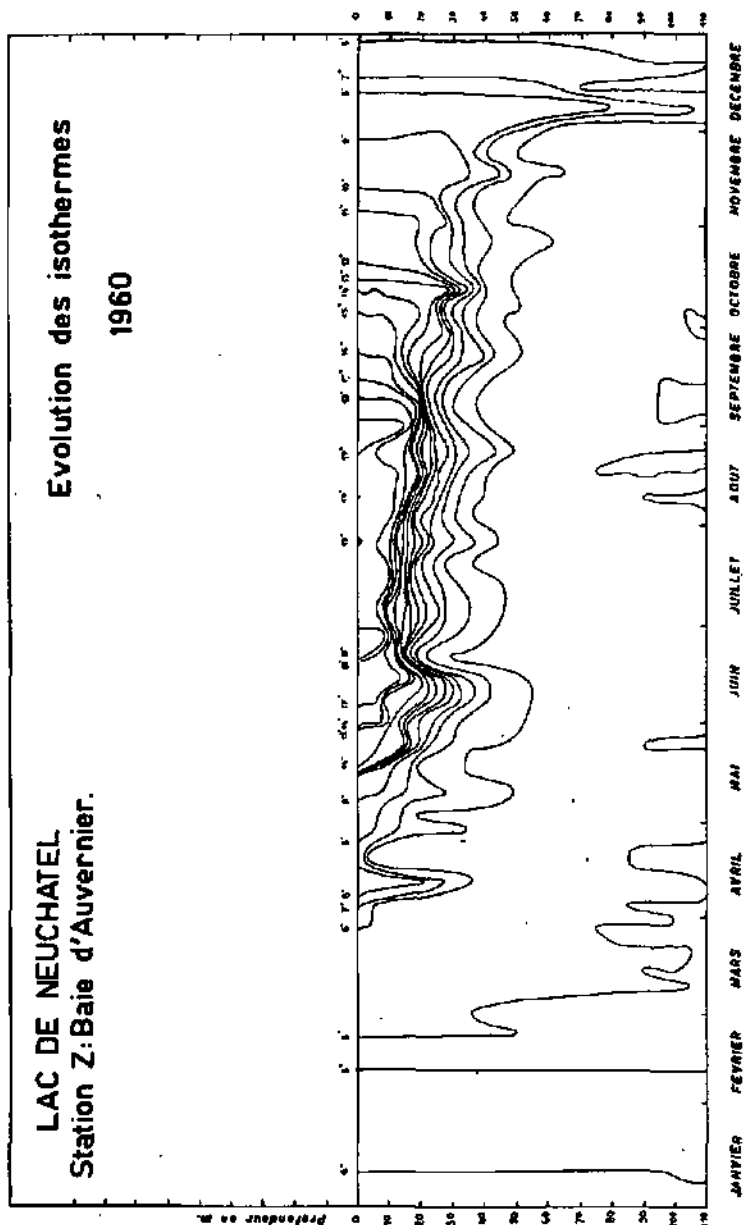
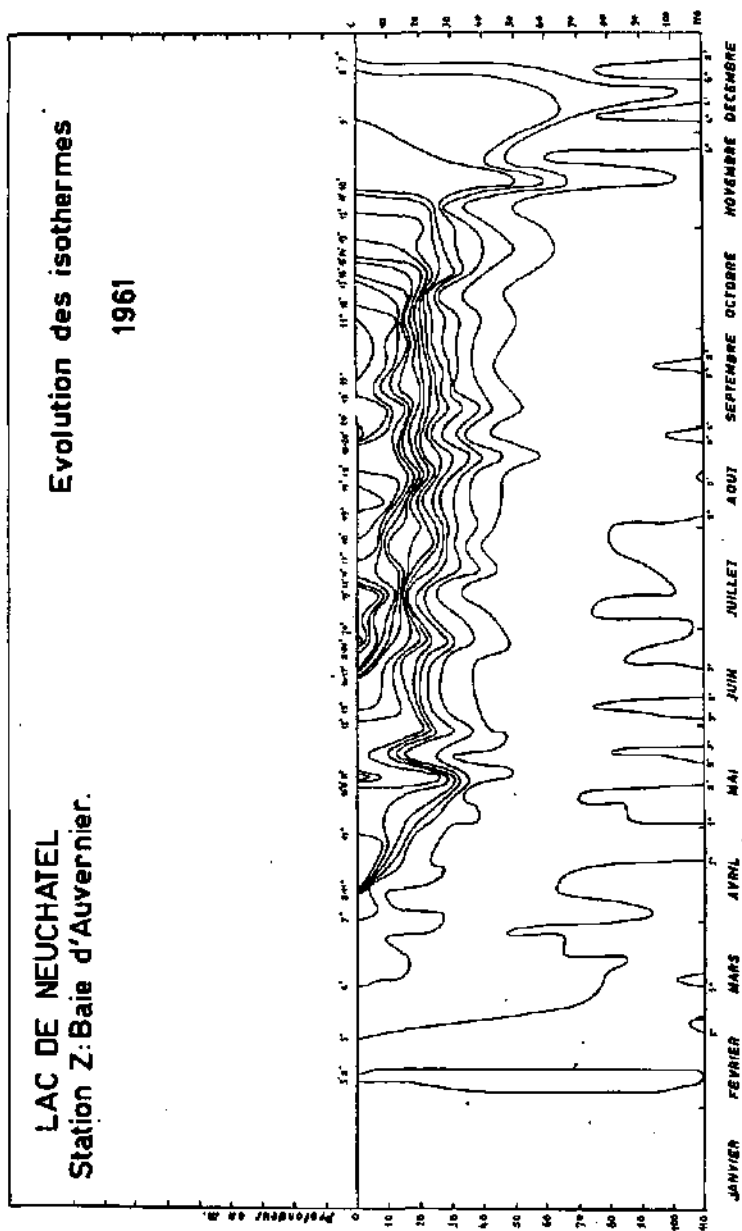


Fig. 42.



moitié de mai, permet aux isothermes de descendre rapidement vers la profondeur; par contre, le joran qui soufflé chaque jour a un effet insignifiant à la station Z. Dès le milieu du mois, plusieurs jours de forte bise provoquent une remontée brusque des isothermes car la température de l'eau en surface se refroidit rapidement et ravient, en profondeur, à une température inférieure à celle de l'eau qu'elle remplace. Fin juin, des vents moyens mais variables soufflent; jusqu'à 15 m de profondeur, les isothermes descendent, mais faiblement, car il y a seulement brassage des couches supérieures, sans que la température de l'air varie beaucoup. Par contre, au-dessous de 15 m, les isothermes remontent car de l'eau plus froide se substitue à celle qui s'y trouvait précédemment, et cela sous l'effet des courants créés par le vent à la surface. Dans le troisième tiers d'août, une série de forts vents d'W à SW, chassant l'eau de surface de la rive W vers la rive N, sans que la température ambiante baisse, provoque une remontée d'eaux profondes vers la rive W pour s'y substituer à l'eau déplacée en surface; simultanément, une remontée des isothermes au-delà de 15 m de profondeur se produit à Z. Au milieu de novembre, les isothermes s'abaissent rapidement en se rapprochant les unes des autres sous l'effet de brassage dû aux vents moyens mais variables; c'est le début de l'"overtun" d'automne.

En résumé, à la station Z, lorsque la bise souffle, les couches sub-superficielles (au-delà de 15m de profondeur) ont tendance à se réchauffer lorsque la température de l'air et celle de l'eau superficielle sont relativement élevées ou restent stables assez longtemps. Au contraire, lorsqu'elles sont relativement basses ou ont tendance à baisser, la bise refroidit les couches d'eau au-delà de 15 m de profondeur. Par contre le vent d'W, ou celui du SW, refroidit régulièrement les couches sub-superficielles. Cette différence dans le comportement des vents s'explique par l'orientation de la baie: la bise n'attaque la rive N qu'avec un angle très faible et n'a, pour ainsi dire, pas tendance à y accumuler de l'eau superficielle. Par contre, arrivant presque perpendiculairement à la rive W contre laquelle elle pousse de l'eau de surface, la bise crée alors un courant sous-lacustre dit de retour, de sens opposé à la bise et qui entraîne l'eau superficielle vers la profondeur, en direction de Z. Au contraire, le vent d'W entraîne l'eau superficielle loin de la rive W, dans la direction de Z; pour la remplacer, de l'eau profonde remonte vers la même rive en passant par Z. Le vent du SW provoque un phénomène semblable, mais un peu moins marqué car il croise la rive W de la baie sous un angle plus aigu que le vent d'W.

Le tableau XXXIX présente les profondeurs maxima que diverses isothermes peuvent atteindre chaque année à la station Z. Pour ne pas alourdir ce tableau, nous ne tenons compte que des isothermes de 20, 18, 15, 10 et 7 degrés. Celle de 7° correspond sensiblement à la température moyenne du lac à Z et celle de 18° est considérée comme limite de la température au-dessous de laquelle les baignades ne peuvent plus être pratiquées dans notre lac.

TABLEAU XXXIX

(cf. page suivante)

TABLEAU XXIX

Profondeur maximum atteinte par quelques isothermes à la station Z. pendant la stratification thermique de la période 1958-1961.

Iso-thermes	20°		18°		15°		10°		7°	
	Prof.	Date	Prof.	Date	Prof.	Date	Prof.	Date	Prof.	Date
1958	8	19.VIII	14	23.IX	26	23.IX	44	4.XI	58	4.XI
1959	10	3.VIII	15	11.VIII	20	11.VIII	40	28.X	75	22.XI
1960	-	-	18	6.IX	22	13.IX	35	11.X	106	6.XII
1961	2	29.VIII	14	3.X	22	16.VIII	33	17.X	102	12.XI

Ainsi, l'isotherme de 20° peut atteindre 10 m en août, mais en 1960 elle n'est même pas apparue à la station Z à cause du manque d'insolation et de l'été froid. L'isotherme de 18° descend entre 14 et 18 m en août ou septembre, parfois aux premières jours d'octobre seulement, avant de disparaître. Celle de 15° arrive au maximum entre 20 et 26 m en août ou septembre. Celle de 10° descend entre 33 et 44 m en octobre ou au début de novembre. Quant à celle de 7°, elle atteint 58 à 106 m de profondeur en novembre ou décembre.

Cette descente des isothermes est bien caractéristique du réchauffement du lac du printemps à l'automne et à partir de la surface. La circulation d'eau plus ou moins chaude sous l'effet des courants sous-lacustres perturbe bien, de temps en temps, la situation thermique en profondeur comme nous l'avons vu, mais est insuffisante, dans les conditions ordinaires, pour empêcher le réchauffement de couches de plus en plus profondes comme aussi pour empêcher la descente des isothermes.

26.2.4. Variation isobathe de la température à la station Z.

Pour définir la température du lac à diverses profondeurs en fonction des mois et des saisons, nous n'utilisons, pour le tableau XI que les températures de l'eau mesurées à intervalles verticaux de 5 m entre la surface et le fond. La fig. 43 donne, simultanément, l'ensemble des courbes correspondantes.

TABLEAU XI

(cf. page suivante)

TABLEAU XL

Température de l'eau de 5 m à la station 2. Moyennes mensuelles. Période 1959-1961

Profon- deur	Janv.	Révr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
0	5,47	<u>5,08</u>	6,10	8,75	12,10	17,29	<u>19,44</u>	19,32	18,01	14,55	10,14	7,48
5	5,47	<u>5,08</u>	5,78	8,24	11,16	16,33	<u>18,60</u>	<u>18,86</u>	17,63	14,45	10,08	7,44
10	5,47	<u>5,04</u>	5,59	7,49	10,28	14,42	16,46	<u>18,05</u>	16,83	14,37	10,08	7,43
15	5,47	<u>5,04</u>	5,39	7,03	9,27	12,20	13,01	<u>15,58</u>	15,18	14,00	10,05	7,43
20	5,47	<u>5,02</u>	5,35	6,67	8,06	10,21	10,07	12,14	<u>13,26</u>	12,70	10,00	7,43
25	5,47	<u>5,02</u>	5,26	6,34	7,45	8,52	8,40	9,63	9,93	<u>10,62</u>	9,50	7,43
30	5,46	<u>4,99</u>	5,17	6,12	6,72	7,47	7,32	8,02	7,87	<u>9,31</u>	8,78	7,44
35	5,46	<u>5,01</u>	5,09	5,88	6,46	6,82	6,67	7,09	7,21	8,20	<u>8,22</u>	7,41
40	5,46	<u>5,01</u>	5,03	5,75	6,06	6,25	6,12	6,42	6,61	7,18	<u>7,83</u>	7,27
45	5,46	5,01	<u>4,99</u>	5,62	5,89	5,99	5,85	6,07	6,04	6,56	<u>7,23</u>	7,07
50	5,46	5,01	<u>4,94</u>	5,47	5,70	5,75	5,64	5,81	5,80	6,20	<u>6,78</u>	<u>7,00</u>
55	5,46	5,00	<u>4,94</u>	5,37	5,51	5,60	5,54	5,59	5,62	5,93	6,44	<u>6,91</u>
60	5,46	5,00	<u>4,92</u>	5,26	5,43	5,48	5,43	5,45	5,45	5,74	6,19	<u>6,85</u>
65	5,46	4,99	<u>4,91</u>	5,19	5,35	5,35	5,35	5,34	5,38	5,63	6,03	<u>6,46</u>
70	5,45	4,99	<u>4,90</u>	5,12	5,27	5,31	5,22	5,26	5,31	5,54	5,78	<u>6,28</u>
75	5,45	4,99	<u>4,87</u>	5,07	5,22	5,22	5,15	5,18	5,24	5,44	5,70	<u>5,98</u>
80	5,44	4,98	<u>4,85</u>	5,02	5,14	5,17	5,11	5,13	5,22	5,37	5,61	<u>6,01</u>
85	5,43	4,98	<u>4,83</u>	4,98	5,06	5,11	5,07	5,09	5,19	5,33	5,52	<u>6,12</u>
90	5,42	4,98	<u>4,81</u>	4,96	5,02	5,06	5,06	5,07	5,11	5,31	5,49	<u>6,08</u>
95	5,34	4,98	<u>4,79</u>	4,93	5,01	5,05	5,03	5,04	5,04	5,28	5,38	<u>6,03</u>
100	5,33	4,95	<u>4,80</u>	4,90	4,99	5,02	5,00	4,98	5,03	5,24	5,38	<u>6,03</u>
Moyenne	5,45	5,01	5,11	5,91	6,72	7,79	8,07	8,53	8,43	8,24	7,44	7,12

Les minima et maxima sont soulignés.

TABLEAU XLI

Température de l'eau de 5 en 5 m à la station Z. Moyennes saisonnières et annuelles pour la période 1959-1961 et amplitude 1960-1961.

Profondeur	Hiver	Printemps	Été	Automne	Année	Amplitude
0	5,55	12,71	18,92	10,72	11,98	14,36
5	5,44	11,91	18,36	10,66	11,59	13,78
10	5,37	10,73	17,11	10,63	10,96	13,01
15	5,30	9,50	14,59	10,49	9,97	10,54
20	5,28	8,31	11,82	10,04	8,87	8,23
25	5,25	7,44	9,32	9,18	7,80	5,59
30	5,21	6,77	7,74	8,51	7,06	4,32
35	5,19	6,39	6,99	7,94	6,63	3,21
40	5,17	6,02	6,38	7,43	6,25	2,82
45	5,15	5,83	5,99	6,95	5,98	2,24
50	5,14	5,64	5,75	6,66	5,80	2,06
55	5,13	5,49	5,58	6,43	5,66	1,97
60	5,13	5,39	5,44	6,26	5,56	1,93
65	5,12	5,30	5,36	6,04	5,45	1,55
70	5,11	5,23	5,26	5,87	5,37	1,38
75	5,10	5,17	5,19	5,71	5,29	1,11
80	5,09	5,11	5,15	5,66	5,25	-
85	5,08	5,05	5,12	5,66	5,23	-
90	5,07	5,01	5,08	5,63	5,20	-
95	5,04	5,00	5,04	5,56	5,16	-
100	5,03	4,97	5,00	5,55	5,14	-
Moyenne	5,19	6,81	8,34	7,50	6,96	-

Dans les tableaux XL et XLI, les moyennes au bas des colonnes sont des moyennes arithmétiques.

Pour représenter l'ensemble des variations de la température à la station Z, nous utilisons des courbes isobathes, très représentatives du phénomène. Nous nous limitons alors aux données se rapportant à la surface ainsi qu'aux profondeurs de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 80 et 100 m, de manière à ne pas trop charger les dessins et à obtenir des courbes susceptibles d'être comparées ultérieurement à celles des composants chimiques de l'eau à ces mêmes profondeurs. Nous obtenons, pour

LAC DE NEUCHÂTEL
Station Z: Baie d'Auvernier.
TEMPÉRATURES MENSUELLES SAISONNIÈRES ET ANNUELLE.

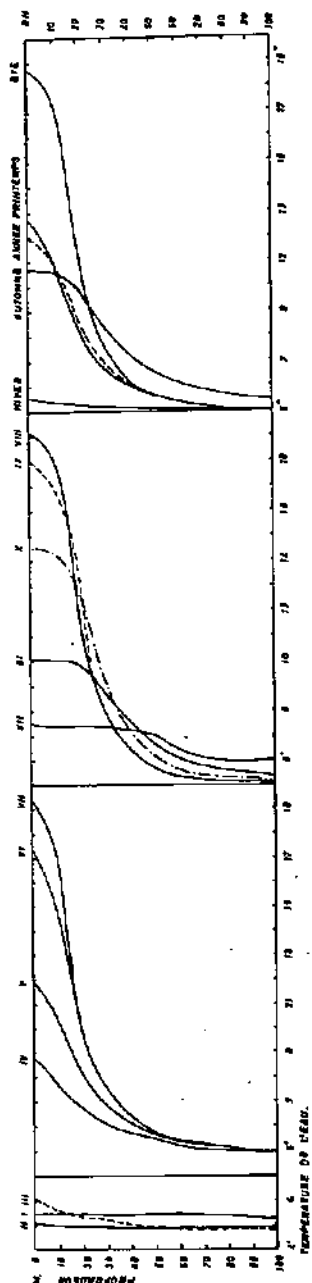


Fig. 44.

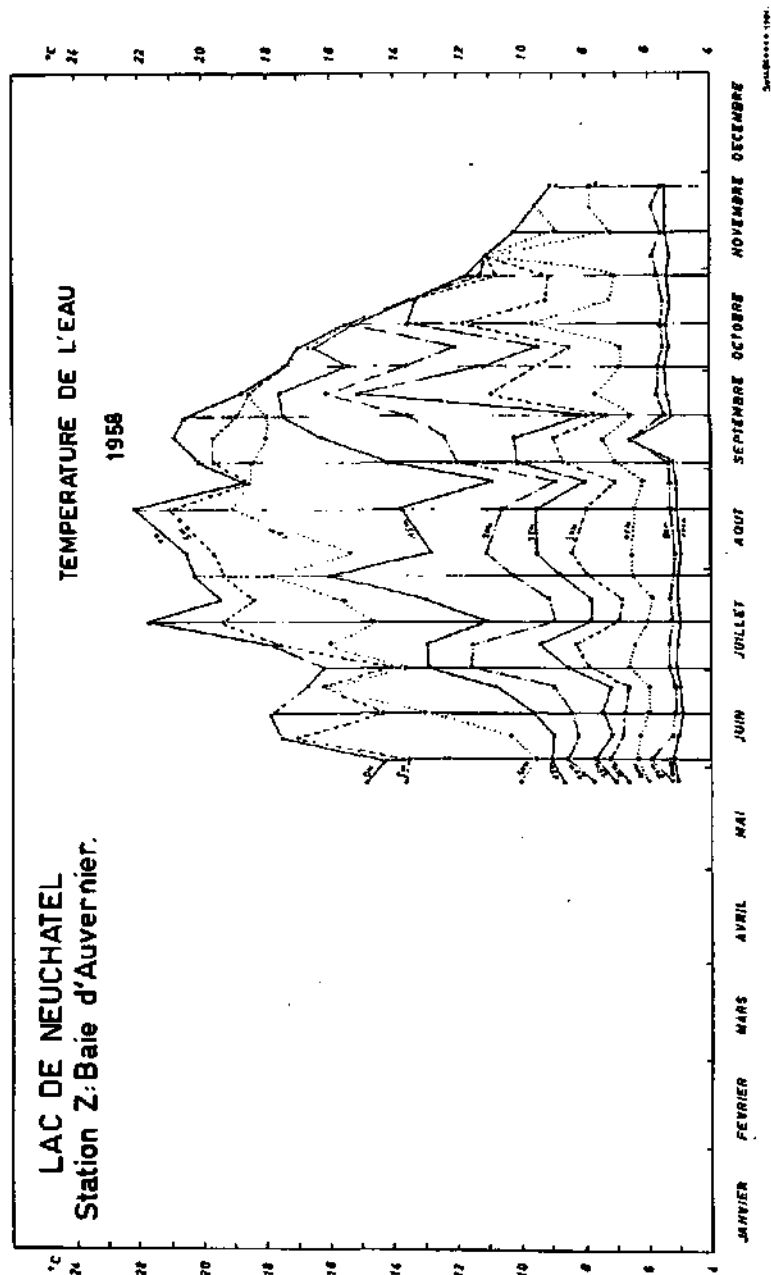


Fig. 45.

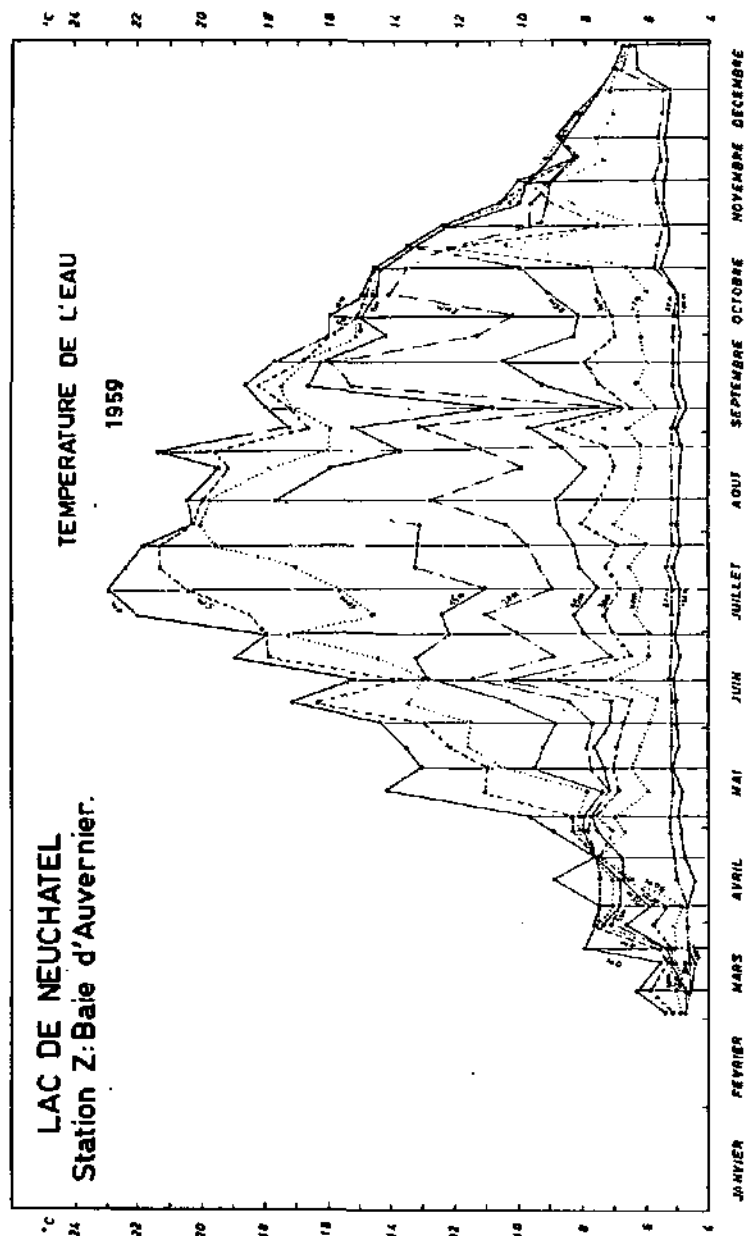
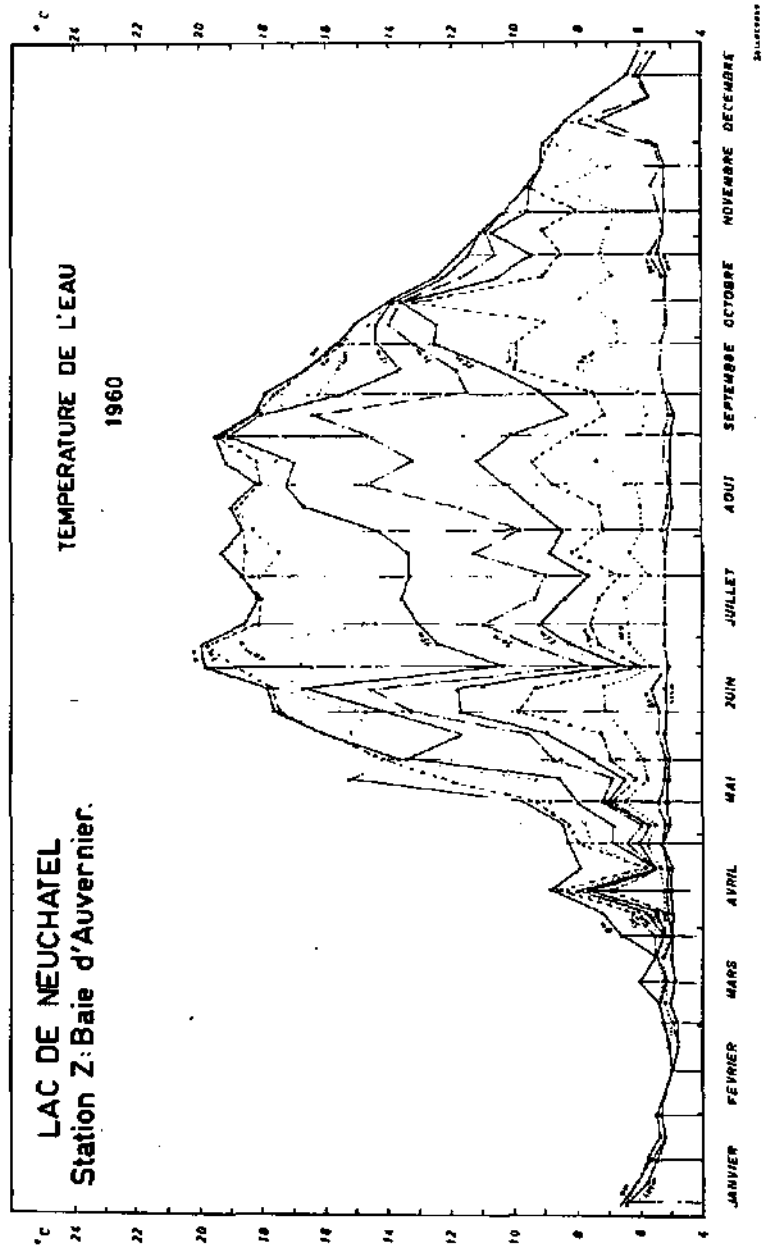


Fig. 46.



les températures isobathes, les fig. 44 à 47 dans lesquelles les variations de température donnent des courbes "en cloche" pour l'ensemble de l'année.

Les courbes isobathes présentent, vers l'automne, des décalages d'autant plus marqués que la profondeur est plus grande. Bien séparées les unes des autres au printemps, elles se rapprochent de plus en plus en automne, au début de l'"overturm"³⁶). Les irrégularités qui affectent les courbes durant l'année correspondent à celles constatées déjà dans les courbes isothermes (cf. paragr. 26.2.3); elles résultent des mêmes phénomènes.

D'après les fig. 44 à 47, le point culminant de chaque courbe isobathe se déplace de plus en plus vers la fin de l'année au fur et à mesure que la profondeur augmente. A la surface, le point culminant de la courbe se rencontre au début de l'été; plus bas, le même point se trouve retardé dans la même saison, jusqu'à apparaître en automne seulement. En d'autres termes, le maximum estival est atteint d'autant plus tard dans l'année que la profondeur considérée est plus grande.

Dès lors et d'après le tableau XL, nous pouvons dire que pour la période 1959-1961 à la station Z, l'état thermique de l'eau correspondant à l'été ou, plus simplement "l'été", se trouve en juillet à la surface, en août entre 5 et 15 m, en septembre à 20 m, en octobre de 25 à 30 m, en novembre de 35 à 45 m et enfin en décembre de 50 m jusqu'au fond.

En ce qui concerne l'hiver, nos résultats montrent que le minimum de température se manifeste à Z en février pour les couches d'eau supérieures à 45 m de profondeur et en mars pour celles situées au-dessous.

D'après le travail de Quartier, la répartition de l'été en fonction de la profondeur a eu lieu approximativement aux mêmes mois en 1943 et 1944. En surface, par contre, le maximum de température est tombé en août ces deux années. Ce décalage par rapport à ce que nous avons obtenu est imputable à des valeurs absolues plus élevées de la température superficielle après le mois de juillet encore, et cela parce que 1943 et 1944 sont des années chaudes. Plus bas que 50 m, l'époque des maxima thermiques de Quartier concorde avec nos déterminations.

En rapprochant nos mesures de celles de Mauvais (1929) (tableau XXXIII), compte tenu des seuls niveaux comparables, nous constatons qu'en 1928 le maximum thermique est apparu en août pour toutes les profondeurs comprises entre 30 et 100 m. Cette avance de 3 à 4 mois sur nos propres résultats et ceux de Quartier est bizarre. Elle ne peut, à notre avis, être attribuée au choix de la station à laquelle elle se rapporte, car nous avons vu déjà que les conditions morphologiques y sont les mêmes qu'à Z. Il faut admettre qu'elle n'est imputable qu'à l'été extraordinaire de 1928 qui a été le plus chaud depuis 1911 à Neuchâtel, alors que 1927 n'avait pas été une année anormale et que l'hiver 1927-1928 n'accusait pas de températures situées en dehors de la moyenne habituelle.

36) Dénomination adoptée généralement pour désigner l'homogénéisation thermique sous l'effet du brassage dû aux vents en automne.

Il est remarquable, cependant, que le réchauffement ait pu s'observer aussi tôt en été et aussi profondément sans que le brassage par les vents ait été extraordinaire cette année-là. Devrait-on plutôt penser à une imprécision dans les déterminations de température ? Nous n'avons pas la possibilité de répondre à cette question, faute de documents plus complets.

Dans les données du même auteur, nous constatons une succession désordonnée de l'époque des maxima thermiques lorsque la profondeur augmente en 1929. Il faut y voir un effet du réchauffement tardif, insuffisant et inégal du lac après l'hiver extraordinairement froid de 1928-1929.

Quant aux résultats de Guyot (1939) pour l'année 1938, ils s'écartent beaucoup moins des nôtres que les précédents, aussi bien en ce qui concerne leur valeur absolue que l'époque à laquelle ils apparaissent, bien que "l'été" s'y révèle en octobre partout entre 30 et 100 m de profondeur.

Aussi bien pour les travaux de Mauvais que pour ceux de Guyot, l'époque des minima concorde avec celles de Quartier et de nos recherches.

Nous estimons intéressant aussi de comparer entre elles les amplitudes annuelles de la variation de température avec la profondeur. C'est pourquoi nous réunissons dans le tableau XLII les valeurs qui se rapportent aux années entières à notre disposition.

TABEAU XLII

(cf. page suivante)

TABIEAU XLII

Amplitude annuelle de la variation de la température avec la profondeur dans l'eau pélagique du lac de Neuchâtel.

Profondeur en m.	1960 (degrés)	1961 (degrés)	Moyenne 1960-61	Variation de l'ampli- tude	1938 (degrés)
0	13,83	14,41	14,36	0,58	16,02
5	13,53	13,92	13,78	0,77	14,60
10	13,33	12,67	13,01	2,47	11,00
15	11,74	10,58	10,54	2,31	-
20	8,13	8,95	8,23	2,64	6,93
25	6,44	5,80	5,59	1,27	-
30	4,95	4,07	4,32	1,11	4,93
35	3,14	3,31	3,21	0,39	-
40	2,44	3,16	2,82	0,58	3,73
45	1,84	2,74	2,24	0,18	-
50	1,84	2,74	2,06	-	3,05
60	1,77	2,59	1,93	-	2,63
70	1,42	-	-	-	2,58
80	0,77	1,34	1,16	-	2,42
90	0,54	-	-	-	2,02

L'amplitude des variations de la température de l'eau diminue d'abord faiblement de haut en bas dans les couches sous-jacentes à la surface; en-dessous, elle varie davantage, en passant par un maximum situé entre 10 et 25 m de profondeur; enfin, au-delà de 30 m l'amplitude varie de moins en moins jusqu'au fond. A propos du tableau XLII, signalons que les différences entre les amplitudes de 1960 (année froide), 1961 (année très chaude) et 1938 (année assez chaude) ne proviennent pas uniquement des différences climatiques annuelles, mais aussi dans une proportion non négligeable de la différence du nombre de mesures ayant servi à calculer ces amplitudes (52 mesures par an pour 1960 et 1961, mais seulement une trentaine pour 1938).

Disposant de 173 séries de mesures de la température à 10 profondeurs de la station Z, nous désirons mettre en évidence les extrêmes enregistrés durant la période 1958-1961. Toutefois, nous limiterons le tableau XLIII aux maxima instantanés, car nous ne disposons pas des minima absolus de 1958 et 1959, les mesures n'ayant pu être faites alors à l'époque à laquelle ils se produisent généralement. Nous pouvons tout au plus mentionner ces minima pour les années complètes; ils

oscillent entre 4,7 et 4,9 pour les années 1960 et 1961.

TABLEAU XLIII

Maxima instantanés de la température de l'eau à la station 2 pour la période 1958-1961.

Pro- fon- deur	1958		1959		1960		1961	
	Tempé- rature	Date	Tempé- rature	Date	Tempé- rature	Date	Tempé- rature	Date
0	22,2	19.VIII	22,0	6.VII	19,9	28.VI	20,3	27.VI
5	21,1	19.VIII	21,3	28.VII	19,85	28.VI	19,9	11.VII
10	19,1	19.VIII	20,0	3.VIII	19,4	31.VIII	18,8	3.X
15	17,6	23.IX	17,65	11.VIII	19,1	31.VIII	17,55	16.VIII
20	16,2	23.IX	16,2	22.IX	16,4	6.IX	14,5	16.VIII
25	15,1	23.IX	13,4	28.X	13,7	11.X	11,9	16.VIII
30	11,8	14.X	13,4	28.X	13,7	11.X	10,25	17.X
40	10,95	4.XI	10,6	28.X	8,55	29.XI	8,25	21.XI
80	-	-	6,9	22.XII	8,0	6.XII	7,5	12.XII
100	-	-	6,6	5.I.60	7,35	6.XII	7,5	12.XII

D'après ce tableau, le maximum absolu de température à Z durant cette période est de 22,2 le 19 août 1958 en surface. Comme on pouvait s'y attendre, les maxima instantanés diminuent de valeur au fur et à mesure que la profondeur augmente, par analogie avec ce qui se passe pour les maxima mensuels par niveaux (tableau XI) et pour les amplitudes annuelles de la variation de la température (tableau XLII). Les maxima instantanés se déplacent vers la fin de l'année au fur et à mesure que la profondeur augmente, suivant en cela le déplacement des maxima mensuels par niveaux (tableau XI).

26.2.5. Variation horaire de la température.

La température de l'eau en profondeur varie suivant le moment considéré de la journée. Du 14 au 15 juillet 1943, Quartier (Insp. de la pêche, 1943-1961, No.1, p. 1-2) a fait suivre les températures de l'eau du lac pendant 24 heures devant le port de Neuchâtel et dans de très bonnes conditions : ciel clair et lac calme, qui ont permis d'éliminer d'emblée l'influence de facteurs tels que la variation de la couverture du ciel ou l'action des vents sur la température de l'eau. Les mesures ont été effectuées heure par heure en surface, puis à 5, 10, 15 et 20 m de profondeur, de 21 h. le 14, à 20 h. le lendemain.

Le courbe exprimant les résultats obtenus montre que le minimum est atteint à la fin de la nuit en surface, mais à des heures de plus en plus différentes au fur et à mesure que la profondeur augmente; le décalage atteint une dizaine d'heures à 20 m. Quant aux maxima, ils sont aussi décalés les uns par rapport aux autres, mais moins fortement que les minima. Le lac étant stratifié, l'amplitude de variation thermique a été mesurée en surface: 4,5 et à 20 m: 6,0; le maximum de l'amplitude semble s'être produit à 15 m de profondeur: 7,8.

En 1958, nous mesurons la température de l'eau à la station Z, à intervalles de 6 heures, du 1er juillet à 9 h au 2 juillet à 9 h. Nous relevons qu'au cours de ces opérations le lac est resté calme, sauf de 16 à 20 h où le "joran de Flamboz" (El)³⁷⁾ a soufflé modérément sur la baie d'Auvernier. Les résultats de nos mesures figurent dans le tableau XLIV.

TABLEAU XLIV

Variation horaire et amplitude des températures de l'eau et de l'air à la station Z.

Profondeur	1.VII.1958			2.VII.1958		Amplitude en 24 h
	9 h	15 h	21 h	3 h	9 h	
0	16,25	17,3	15,7	15,2	16,7	1,05
5	14,7	14,4	14,1	14,0	13,9	0,8
10	14,0	13,7	13,7	13,6	13,7	0,4
15	12,9	13,0	12,0	12,6	12,2	0,9
20	11,6	10,1	9,9	10,3	10,6	1,7
21	10,4	10,0	9,4	10,1	10,4	1,0
22	9,3	9,1	8,9	9,8	10,2	1,3
25	8,6	8,4	8,2	8,4	9,5	1,3
30	7,8	7,7	7,4	7,4	8,1	0,7
35	7,1	7,4	6,8	6,9	7,2	0,6
40	6,5	6,8	6,4	6,7	6,6	0,4
45	6,2	6,2	6,1	5,9	6,2	0,3
50	5,8	5,9	5,7	5,7	5,8	0,2
80	5,2	5,1	5,2	5,2	5,2	0,1
100	5,0	4,9	5,0	5,0	4,9	0,1
Air	17,3	18,0	14,3	13,0	16,9	5,0

37) vent du NW.

Dans ce tableau, les températures de l'air sont mesurées à Z à 2 m environ au-dessus de la surface du lac. Les températures de l'eau à 21 et 22 m de profondeur sont reportées également dans ce tableau parce qu'un saut thermique se trouve à ces niveaux au début des opérations; nous reviendrons à cette particularité ultérieurement. L'amplitude en 24 h n'est basée que sur les 5 mesures effectuées durant ce laps de temps; elle ne peut être considérée comme amplitude absolue de la journée, car il aurait fallu serrer les mesures bien davantage afin de ne pas laisser échapper les extrêmes thermiques absolus de ces 24 h. Il faut reconnaître que les mesures de Quartier que nous avons citées plus haut se sont rapprochées davantage que les nôtres de l'amplitude absolue journalière qui, par ailleurs, ne peut être atteinte véritablement qu'au moyen d'un enregistrement continu de la température à des niveaux aussi serrés que possible.

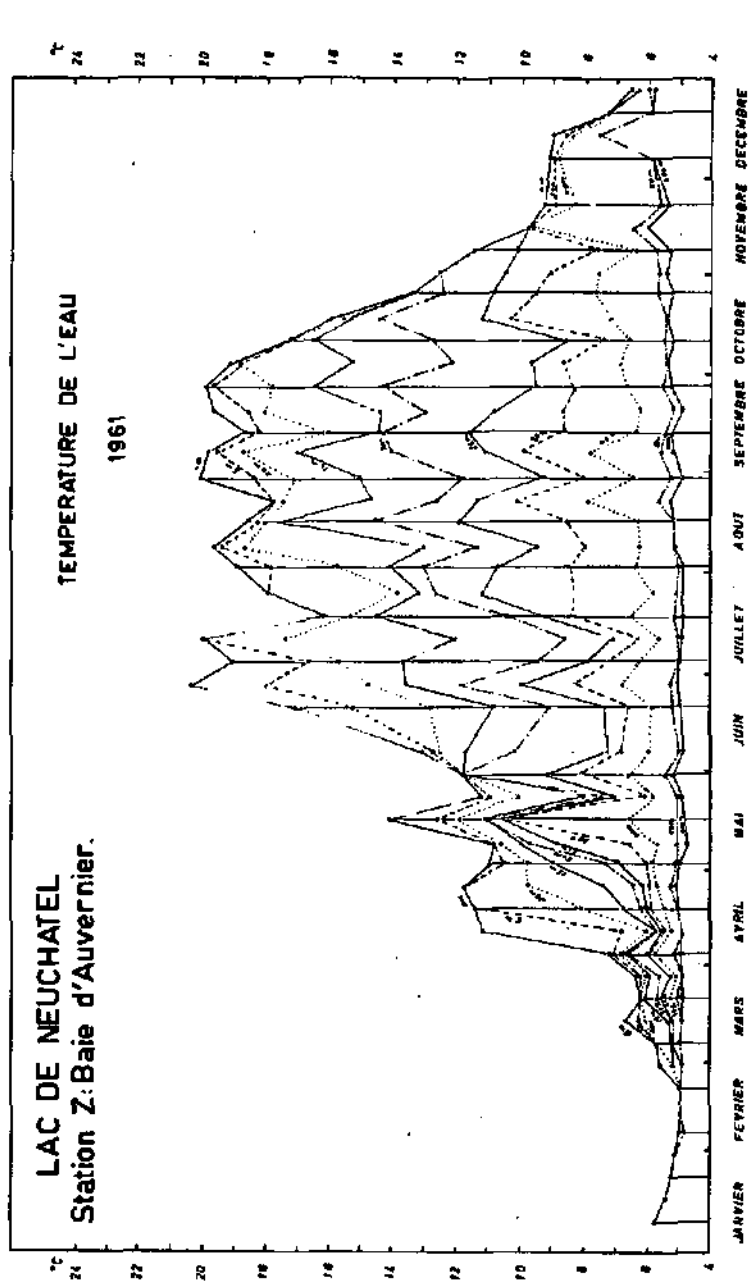
Quoi qu'il en soit, notre tableau fait voir que l'amplitude maximum de la variation thermique se produit vers 20 m de profondeur en juillet, autrement dit dans des conditions presque identiques à celles des travaux de Quartier. Dans notre cas, un saut thermique se trouve précisément à 20 m, profondeur qui correspond à l'interface épilimnion-métalimnion dont nous parlerons ultérieurement. L'amplitude maximum est donc en rapport avec la présence d'un saut thermique qui se déplace au cours de la journée sous l'effet des courants sous-lacustres. L'amplitude elle-même change de valeur lorsque le saut thermique se déplace. Elle varie alors d'autant plus que le gradient de température de la couche de saut thermique est plus marqué. Il y a tout lieu de croire qu'un phénomène semblable a eu lieu lors des recherches effectuées par Quartier en 1943.

Grâce à la sécheresse persistante de l'automne 1961 qui a obligé la ville de Neuchâtel à pomper de l'eau de manière ininterrompue dans le lac à Champ Bougin, nous disposons d'enregistrements continus de la température de l'eau, à proximité immédiate de notre station D, et pour la période du 15 septembre au 2 novembre 1961. Les fluctuations de la température sont observables à l'arrivée de l'eau brute dans l'usine de pompage. Lorsque la prise d'eau est continue, la température enregistrée correspond à celle régnant dans le lac à l'endroit où est située la crépine d'aspiration, car l'eau circule assez rapidement dans la conduite immergée et n'a que quelques mètres à parcourir par siphonnage, à l'intérieur de l'usine. La crépine du pompage est immergée à 33 m. de profondeur lorsque le lac est à son niveau normal; elle est distante de 420 m de la rive et de 50 m de notre station D.

Pour composer la fig. 48, nous choisissons huit journées caractéristiques de la période mentionnée ci-dessus et durant lesquelles nous faisons les observations suivantes :

Le 16 septembre, le lac est calme depuis 4 jours, il fait beau et la pression atmosphérique est en légère hausse. Néanmoins, des courants sous-lacustres se manifestent en déplaçant de l'eau à des températures différentes, ce qui fait monter la courbe d'enregistrement. L'écart de température en 24 h est de 2,7°.

Fig. 47.



Le 19 septembre, le lac est toujours calme (depuis 7 jours), mais la pression atmosphérique accuse une légère baisse. Le métalimnion est compris entre 3 et 15 m. Les courants sous-lacustres ont faibli depuis le 16 et la température à 33 m ne varie plus que de 1,6 en 24 h.

Le 30 septembre, le vent du SW souffle fortement de 11 à 16 h; le lac est agité le matin, très fortement l'après-midi; il pleut et la pression atmosphérique baisse fortement. Sous l'effet du vent et des vagues, l'eau chaude de la surface est poussée vers la rive, puis revient en profondeur vers le large, atteignant la crépine vers 15 h 45 environ et en y faisant monter la température. Ce jour-là, la température enregistrée varie de 4,5 en 24 h.

Le 1er octobre, le vent faiblit en tournant au N l'après-midi. Le long de sa rive gauche, le lac se calme lorsque le "Joran" (EL)³⁸⁾ se lève. Il pleut encore, mais la pression atmosphérique augmente. L'équilibre thermique, rompu la veille par l'arrivée en profondeur d'eau de surface, se rétablit peu à peu lorsque de l'eau profonde revient vers la crépine; la température baisse à nouveau. L'amplitude de la variation enregistrée atteint 5,0, en 24 h.

Le 2 octobre, le vent est tombé tout à fait; le lac est calme, la pluie cesse et la pression atmosphérique augmente encore. Cependant, une nouvelle montée de la température à la crépine prouve qu'à 33 m de profondeur de nouvelles masses d'eau chaude reviennent vers elle à partir de 6 h. Le déséquilibre thermique dû à la tempête du 30 septembre a provoqué un balancement de masses d'eau importantes ayant des températures différentes et qui glissent périodiquement les unes sur les autres, pratiquement sans se mélanger. A leur passage, la température varie à la crépine et l'amplitude maximum enregistrée ce jour-là est encore de 4,9 par 24 h.

Le 7 octobre, un fort vent d'WNW à WSW souffle; il pleut et la pression atmosphérique baisse. Le lac est très agité dès 4 h; l'effet des vagues se remarque à 33 m vers 8 h par une hausse de température. Ce jour, le gros temps provoque un effet semblable à celui du 30 septembre, mais l'amplitude est de 5,2 en 24 h.

Le 8 octobre, le vent tourne au SW, la pluie cesse et la pression atmosphérique augmente. Le lac continue à être très agité le matin; toutefois, les vagues diminuent d'intensité l'après-midi. L'eau de fond, revenue vers la crépine la nuit précédente, lorsque le vent avait faibli, abaisse entre 7 et 11 h la température à 33 m de profondeur. Mais l'agitation qui continue en surface contrecarre le phénomène en renvoyant de l'eau chaude vers le fond, de sorte que le balancement des couches continue, mais en s'estompant plus rapidement que lors de la précédente tempête; la température tend à remonter lentement,

Le 12 octobre, le vent d'E souffle modérément, mais peu de temps; il fait beau et la pression atmosphérique est stable. Le lac est très agité, mais l'effet des vagues de bise (EL)³⁹⁾ ne se manifeste pas pour ainsi dire pas à 33 m, car à cette profondeur on ne remarque pas

38) vent du N à NNW.

39) vent d'E.

une variation plus grande (amplitude 1,8) que les jours de calme.

En résumé, l'amplitude de la variation thermique en 24 h est maximum le 8 octobre (-5,8) et minimum le 19 septembre (+ 1,6). Par contre, l'amplitude de la variation thermique instantanée est maximum le 2 octobre (- 1,2 en 10 min.).

De ce que nous venons de voir, on peut déduire qu'en région pélagique largement ouverte, la température de l'eau à une profondeur donnée varie en 24 h, même si cette profondeur est située à certaines saisons au-dessous de la couche des sauts thermiques. La température varie par le déplacement de masses d'eau qui sont mises en mouvement par le vent lorsque celui-ci souffle suffisamment fort et longtemps et à condition qu'il attaque la rive sous un angle favorable. En particulier, à une trentaine de mètres de profondeur en automne, à un demi-kilomètre du rivage et alors que le lac est encore stratifié du point de vue thermique, l'action du vent se manifeste 4 à 5 heures après le début des vagues. Mais, par temps calme, on enregistre aussi des variations de température sous l'action des courants sous-lacustres qui ne faiblissent que très lentement après l'arrêt du vent qui les a causés. Il est donc certain que, même par temps calme, les températures mesurées à des intervalles d'un jour à une même station ne sont jamais que des valeurs comprises entre deux limites quotidiennes des températures qui peuvent varier rapidement et de façon notable. On peut dire cependant que l'amplitude de la variation thermique en 24 h est faible dans les périodes de calme prolongé du lac; elle peut atteindre plusieurs degrés par contre au moment des tempêtes ou dans les jours qui suivent. En tenant compte de ce qui précède et même pour des mesures quotidiennes, la détermination de la température de l'eau à 1/20 de degré près est plus que suffisante pour satisfaire aux demandes de la limnologie actuelle.

26.2.6. Mesures simultanées de la température à diverses stations.

En levant les profils thermiques transversaux, nous obtenons chaque fois et pour 39 stations visitées en une journée, 1812 mesures de température de l'eau. Ces mesures s'échelonnent en grande majorité mètre par mètre entre 0 et 50 m de profondeur, de 5 en 5 m au-delà et jusqu'au fond du lac.

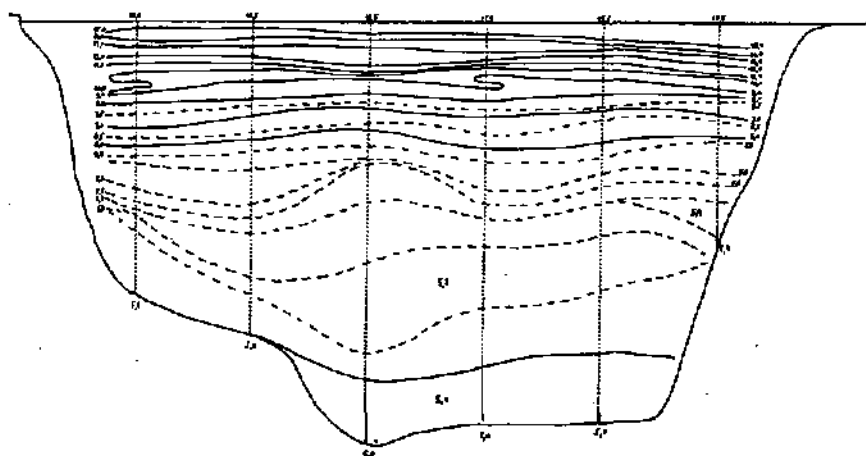
Grâce à ce grand nombre de déterminations et à la bonne répartition des stations, nous connaissons la température de chaque couche d'eau d'une puissance de 1 ou de 5 m pour l'ensemble du lac, zone littorale bordière exceptée. Quelques réparties sur les années 1959 à 1961, ces mesures ne couvrent bien cependant, que la période d'avril à octobre de chaque année, autrement dit l'époque durant laquelle le lac est stratifié, et que nous avons jugé la plus intéressante pour les recherches actuelles. Le levé de profils thermiques de novembre à mars (plus difficile à cause des conditions de travail en hiver et, plus spécialement, de la brièveté du jour) est prévu lors de recherches ultérieures.

LAC DE NEUCHÂTEL

Profils thermiques

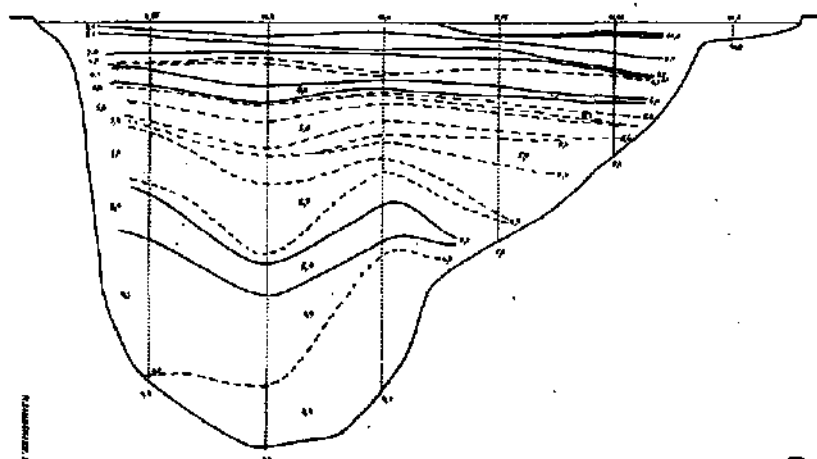
No.20: CHAMP BOUGIN-NONTBEC

2 juin 1960



11 avril 1961

No.50: SAINT AUBIN-ESTAVAYER LE LAC



R. LAMBERT, 1961, 1962

Fig. 49.

LAC DE NEUCHÂTEL Profils thermiques 6 avril 1960

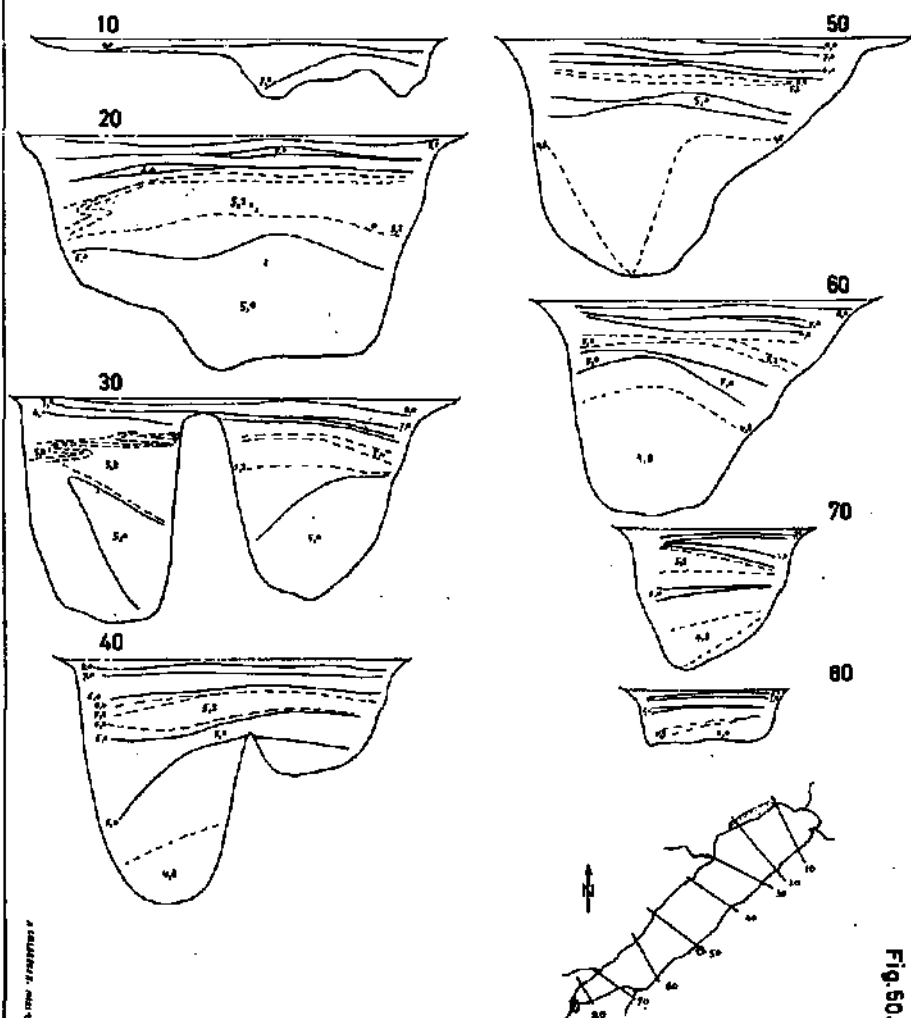


Fig. 50.

Nous représentons graphiquement les résultats obtenus en dessinant les isothermes de 144 profils transversaux et de 30 profils longitudinaux. Toutefois, pour ne pas alourdir le présent travail, nous ne donnons ici que 18 profils transversaux: deux, isolés, à grande échelle (fig. 49) et deux séries complètes de 8 profils chacune, à petite échelle (fig. 50 et 51).

Rappelons que dans le plan du profil, chaque isotherme est la trace, sur ce plan, des surfaces de même température qui, dans la troisième dimension, peuvent s'étendre à tout le lac. Dans l'eau, à chacune de ces surfaces correspond en réalité une couche, d'une puissance d'un mètre au moins, dans laquelle la température est constante à 0,05 degré près.

Nos observations montrent que dans la zone superficielle, la température de l'eau varie rapidement dans le sens vertical, de sorte que les couches qui viennent d'être définies y ont très souvent la puissance minimum d'un mètre. Au contraire, dans la zone profonde, au-delà du niveau le plus inférieur atteint par les sauts thermiques, la température de l'eau varie peu dans le sens vertical, de sorte que les couches atteignent facilement des puissances souvent considérables. En outre, pour toute la profondeur du lac, elles sont rarement horizontales sur une distance de quelques km et, par conséquent, leurs interfaces sont presque toujours gauches.

Dans les fig. 49 à 51, nous n'avons dessiné que quelques-unes des isothermes, car les échelles utilisées ne nous permettent pas de les représenter toutes sous peine de rendre la figure illisible. Au-dessus de 6°, les isothermes sont celles des degrés entiers ou des demi-degrés; au-dessous, elles sont dessinées de 0,2 en 0,2.

Dans l'ensemble des profils thermiques, les couches d'eau supérieures où la température dépasse 10°, ont un pendage très faible; les inférieures, au contraire, ont leurs interfaces caractérisées par un pendage plus marqué. La puissance des couches supérieures étant faible généralement, ces couches succèdent très rapidement les unes aux autres au fur et à mesure qu'on descend dans le lac. Mais le plus souvent à partir de 20 m, la puissance des couches d'eau augmente notablement.

De l'ensemble des profils levés, nous tirons les remarques suivantes :

Profil 10: En mai, une "lentille" d'eau plus chaude que l'eau environnante flotte en surface vers la station 13, autrement dit dans l'axe du canal de la Broye. Avec une puissance de 1 m environ, elle atteste la présence à cet endroit, d'eau plus chaude que celle du lac et venant du canal. C'est un des rares moments de l'année où l'eau amenée par la Broye peut être identifiée dans le lac. Jusqu'en juillet, le "Creux" (21) près de la station 14 et la partie amont du sillon de Cudrefin (station 16) sont remplis d'eau froide à température comprise entre 6° et 9°, alors que les couches supérieures de tout le Bas-lac (entre 0 et 9 m de profondeur) sont réchauffées depuis

longtemps. Dès le mois d'août, le réchauffement atteint le fond sur tout le profil.

Profil 20 : En avril, à partir de 70 m de profondeur, on se trouve dans une énorme masse d'eau voisine de 5° jusqu'au fond. En mai, cette couche prend une forme lenticulaire; elle se détache du fond en juin et reste sus-jacente à des couches plus froides (4,7 par exemple en juillet et août; ces dernières sont constituées d'eau provenant des bords de la cuvette et "coulant" sur le fond. En septembre et octobre, la chaleur se propage depuis la surface par les brassages dus au vent et la température remonte à 5° jusqu'au fond.

Profil 30 : Il est frappant de constater dans ce profil la présence, durant tous les mois étudiés, d'une masse importante d'eau froide (à température comprise entre 5,0 et 4,8) dont l'interface avec les couches supérieures, à température plus élevée, n'est pour ainsi dire jamais horizontale. Elle est inclinée, de sorte que les masses d'eau qu'elle limite ne remplissent pas exactement le fond de chacune des vallées encadrant la Motte à cet endroit, mais elles "collent" en quelque sorte au sol lacustre sur une certaine hauteur au pied de la pente latérale. Ceci est le cas constamment au bas de la pente issue de la berge du lac dans la vallée au S de la Motte; cela se produit très souvent aussi au bas de la pente de la rive gauche dans la vallée au N de la Motte.

Durant cette période de stratification thermique et en l'absence de tempêtes suffisamment violentes et durables (ce qui n'est pas toujours le cas en arrière-automne), ces masses d'eau profonde ne sont presque pas animées de mouvements, car les courants de retour dus à l'action des vents atteignent très faiblement les régions profondes. Par contre, la configuration du fond du lac à l'endroit du profil 30 est telle que des courants de densité peuvent très facilement se produire sur la pente de la vallée au S de la Motte, dirigée vers le NE et sur celle de la vallée nord dirigée vers le SW; cette dernière pente est d'ailleurs beaucoup moins accentuée que la première. Sous l'action de la force de Coriolis, le mouvement de la masse d'eau dévie à droite et applique alors cette masse contre le bas de la pente plutôt qu'au fond.

Rappelons que la "force de Coriolis" ou "force centrifuge composée" fait dévier vers la droite, dans l'hémisphère nord, toutes les masses d'eau en mouvement. C'est la rotation terrestre qui en est responsable et cette force s'exprime, pour un corps en mouvement de masse m par la formule :

$$f = 2 m \omega v \sin \varphi$$

où ω est la vitesse angulaire de rotation de la terre, v la vitesse du corps en mouvement et φ la latitude considérées.

Dans le cas du profil 30, tout se passe comme si la force de Coriolis se manifestait au maximum à cet endroit du lac, ce qui n'est pas surprenant car, dans les couches supérieures du moins, c'est

précisément dans la région de Portalban (extrémité S du profil 30) que, dans notre étude, nous avons rencontré les courants les plus violents et les plus actifs. Or, ces courants superficiels ne sont pas absolument sans exercer un effet sur ceux qui leur sont sous-jacents. La présence de la Motte à l'emplacement du profil 30 crée deux couloirs relativement étroits en regard de la largeur habituelle du lac. Il y a tout lieu d'admettre que dans ces deux rétrécissements du bassin lacustre, les courants dus au vent, de même que ceux résultant de l'écoulement général du lac, ont tendance à s'accélérer et, par conséquent, à augmenter leur déviation.

La Motte est la cause aussi d'une inégalité de répartition des températures: il est extrêmement rare, en effet, que les isothermes se trouvant simultanément à la même profondeur dans les deux vallées encadrant la Motte; la différence atteint plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres suivant la saison.

C'est une situation parfaitement semblable à celle découverte peu avant 1950 par les expéditions russes dans l'Océan Arctique de part et d'autre de la crête Lomonosov placée au milieu du bassin de cet océan comme la Motte dans notre lac (Rouch, 1959, p.120).

Profil 40 : Ce que nous venons d'énumérer pour le profil 30 se rencontre aussi ici, mais les phénomènes sont moins marqués. La dorsale prolongeant la Motte vers le SW détermine encore la présence de deux vallées : une profonde au N et l'autre, qui l'est beaucoup moins, au S. D'avril à juin et à fin octobre, les masses d'eau froide du fond sont déviées vers le bas des pentes sous-lacustres. La différence de profondeur à laquelle se trouvent les isothermes simultanément dans les deux vallées est plus faible dans le profil 40 que dans le profil 30.

Profil 50 : En avril et mai, l'eau froide a tendance à s'accumuler au pied de la pente venant de la rive droite. La dorsale de la Motte est effacée déjà à l'endroit de ce profil et il n'y a plus de décalage en profondeur dans la température des couches d'eau. On se rapproche donc d'une situation semblable à celle du profil 20.

Profils 60 et 70 : Il n'y a rien de spécial à signaler pour le profil 60. Dans les treize profils No. 70, plus petite que les No. 10 à 60, on rencontre encore une couche d'eau de fond déviée de son écoulement normal et qui suit en oblique le bas de la pente de la rive droite.

Profil 80 : Rien de caractéristique, ni d'extraordinaire.

A partir des profils transversaux et longitudinaux, on peut dresser la carte des isothermes par niveaux. Ce faisant, on se rend mieux compte encore de l'hétérogénéité thermique de l'ensemble du lac à un moment et à une profondeur donnés. Parmi ces cartes, nous en choisissons deux qui reproduisent, au moyen des fig. 52 et 53 la situation des isothermes aux profondeurs 10 et 50 m les 6 mai 1959 et 2 juin 1960 respectivement.

Le 6 mai 1959, à 50 m, des "lentilles" plus froides que l'eau ambiante sont situées près des côtes; c'est le cas vers Cunens, devant Estavayer, ainsi qu'à l'extrémité SW de la Motte. Par contre, devant Portalban, une zone d'eau plus chaude "colle" à la rive; il en est de même sur la pente gauche vers l'extrémité NE de la Motte.

Le 2 juin 1960, à 10 m, une masse importante d'eau chaude colle à la rive droite entre Cheyres et Estavayer; il en est de même, mais en plus faibles proportions, devant Chasseaux, alors qu'entre ces deux "lentilles", le Petit-lac est plus froid. La zone dont l'eau a une température comprise entre 13° et 14° s'étend à presque toute la longueur du lac, en passant cependant au S de la Motte seulement; elle présente une "lagune" d'eau plus froide devant Chabrey. A 50 m de profondeur, une "lentille" d'eau relativement froide se trouve devant Estavayer; par contre, la couche à 5,6 s'étend de Gorgier jusqu'au large de Neuchâtel, en dessinant une plage très compliquée et qui contourne la Motte par le S. Quant à la masse d'eau à 5,4, elle s'étire, par écoulement, d'Yvonand à Gorgier dans le sens longitudinal du lac, puis semble subir l'effet de la force de Coriolis qui la dévie vers Portalban.

Si ces cartes montrent que le lac est loin d'être homotherme, elles font voir aussi, d'après la répartition des températures de part et d'autre des isothermes, que les couches d'eau considérées présentent bien la forme de lentilles limitées par des interfaces plus ou moins bombées.

Dans les profils transversaux, le bombement des isothermes est presque toujours d'autant plus marqué que l'on se rapproche des températures de l'eau profonde. C'est donc dans l'hypolimnion que ce bombement est le plus marqué. Comme les échelles utilisées dans les dessins des profils exagèrent l'inclinaison des lignes d'égale température, nous désirons exprimer, par le tableau XLV quelques-unes des pentes réelles des isothermes observées lors des sondages en profils transversaux. Nous ne donnons que la liste des maxima en exprimant les pentes en pour-cents; ces chiffres sont le quotient de la différence de profondeur séparant les niveaux extrêmes de l'isotherme par la distance séparant ces extrêmes.

TABLEAU XLV

(cf. page suivante)

LAC DE NEUCHÂTEL Profils thermiques 16 août 1961

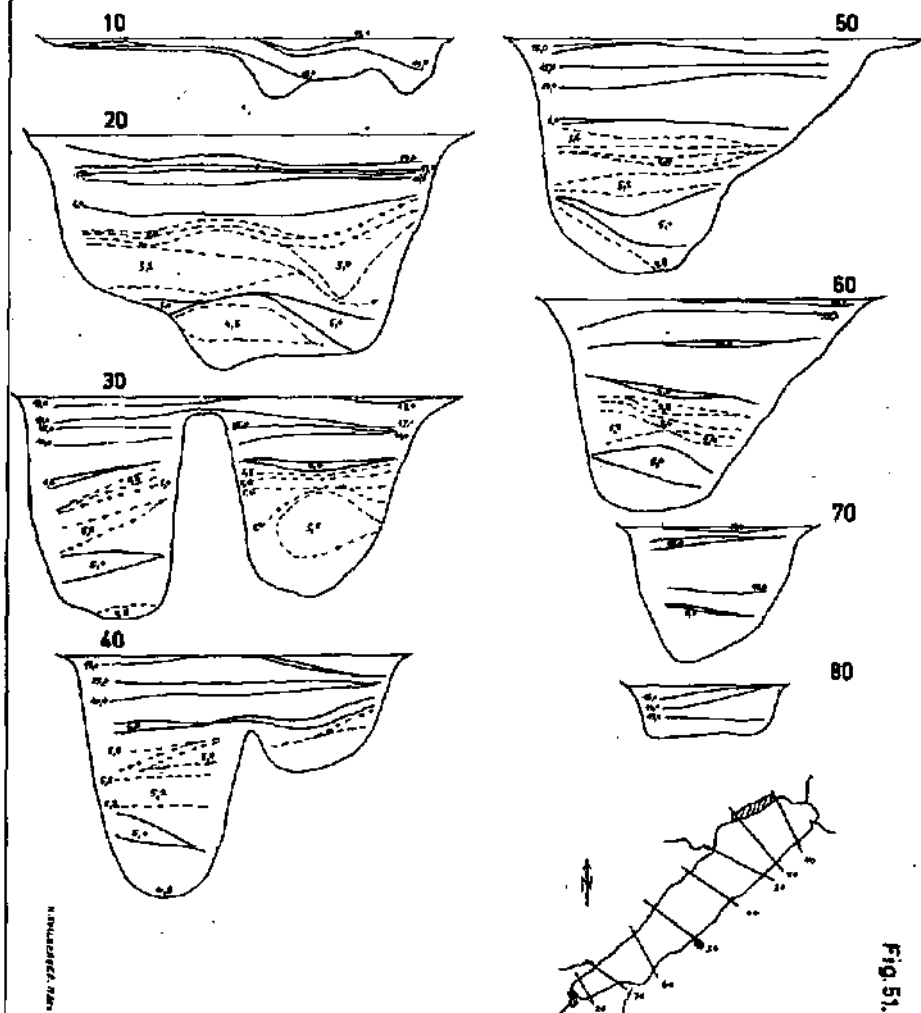


Fig. 51.

Fig. 52.

LAC DE NEUCHÂTEL

CARTE DES ISOTHERMES DU 6 MAI 1959

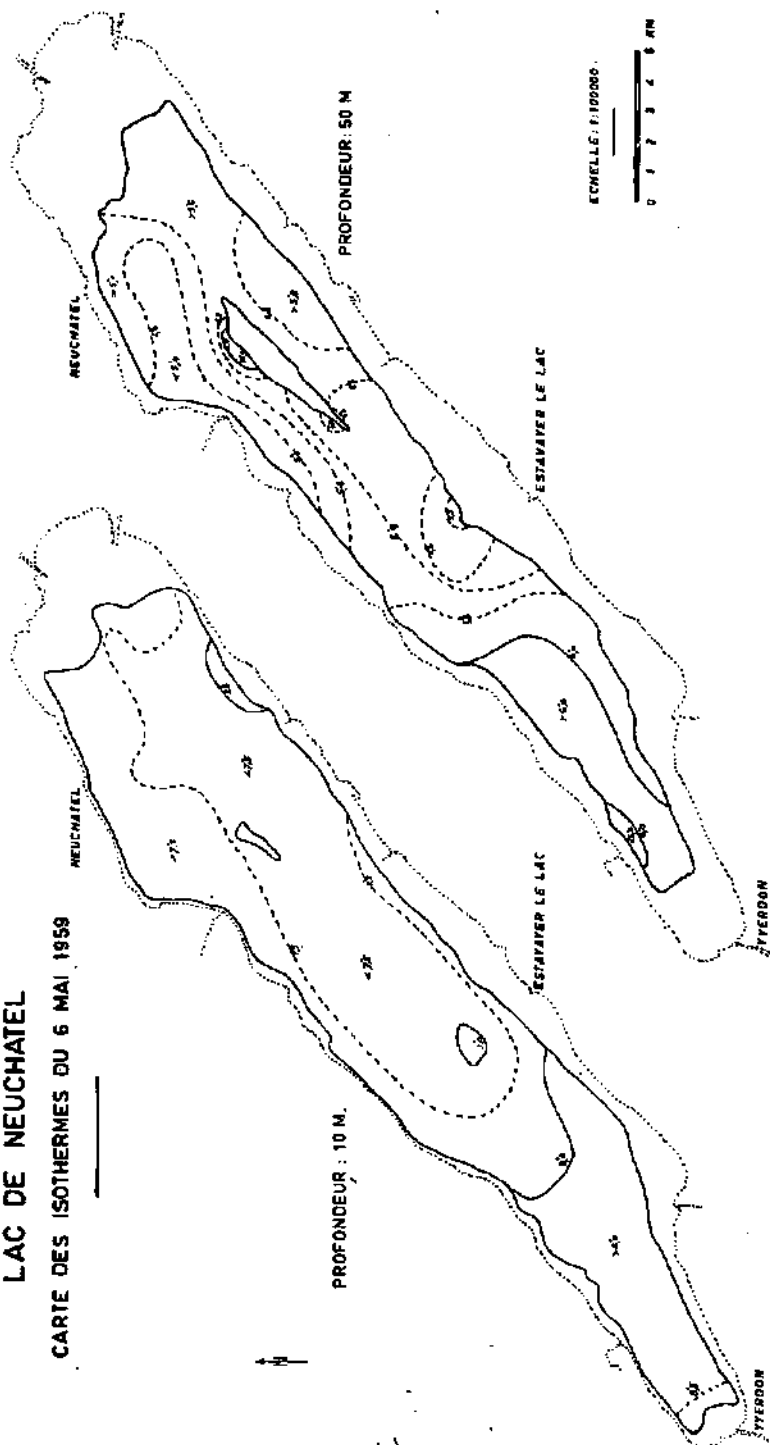


TABLEAU XLV

Pentes maxima en % de quelques isothermes observées lors des sondages en profile transversaux pendant la stratification thermique du lac durant la période 1959-1961.

Isotherme	Pente maximum	Profil	Date
20,0	0,3	80	16.VII.1959
19,0	0,6	40	5.VII.1960
18,0	1,4	80	10. IX.1959
17,0	0,5	30	17.VIII.1960
16,0	1,4	80	17.VIII.1960
15,0	1,4	30	14. X.1959
14,0	1,3	80	16.VIII.1961
13,0	0,8	50	25. X.1961
12,0	0,7	40	25. X.1961
8,0	0,6	10	6. IV.1960
7,0	1,8	30	4. V.1960
6,0	1,9	30	4. V.1960
5,5	1,7	20	2. VI.1960
5,2	1,9	20	31. X.1961
5,0	7,0	50	6. V.1959
4,9	8,0	30	6. IV.1960
4,8	8,1	50	6. IV.1960

Les pentes maxima ci-dessus apparaissent le plus souvent en 1960 et dans le profil 30. Toutefois, trois ans d'observations constituent une période trop courte encore pour qu'on puisse établir avec sécurité une corrélation éventuelle entre la fréquence d'apparition de ces maxima et la saison, autrement dit les conditions météorologiques. Si le profil 30 présente le plus souvent des pentes isothermiques, maxima, c'est qu'à notre avis et comme nous l'avons mentionné plus haut déjà, parce qu'à cet endroit les courants sont les plus rapides du fait du rétrécissement du bassin lacustre; les masses d'eau qui se déplacent alors dans cette région y ont tendance, davantage qu'ailleurs, à s'imbriquer les unes dans les autres en déviant et inclinant les isothermes.

La présence des isothermes matérialisées, en quelque sorte, la stratification thermique du lac. Mais la présence de pentes maxima pour ces lignes n'implique pas nécessairement une tendance plus marquée à

la formation de courants sous-lacustres dits de densité à l'endroit où ces maxima se trouvent. En effet, si d'une part les pentes maxima réelles sont faibles et peu propices à la création de courants importants, il faut relever aussi d'autre part que la formation de tels courants est liée essentiellement au gradient de densités entre couches voisines. Or, dans le cas particulier, ces gradients sont très faibles. C'est ainsi que pour l'isotherme de 19° par exemple, les écarts de densité entre couches voisines ne dépassent pas 5 unités de la cinquième décimale pour la pente maximum. Les écarts sont de 4 unités de la cinquième décimale pour l'isotherme de 8° et d'une unité du même rang pour l'isotherme de 6°. Pour les isothermes de moins de 6°, le gradient de densité n'est plus que de 2 à 3 unités de la sixième décimale.

Nous n'observons que rarement des interpénétrations thermiques importantes dans les profils transversaux. Les deux cas les plus remarquables se situent en 1960, l'un le 6 avril (fig. 50) et l'autre le 2 juin (fig. 49). Dans le premier, les isothermes de 5,4 et de 5,2 s'interpénètrent à proximité des stations 21 et 31. Une couche d'eau à 5,4, d'une puissance de 9 à 10 m se trouve alors au voisinage de la rive gauche du lac, à 40 m de profondeur sur le profil 20 et à 30 m sur le profil 30. Elle s'étend jusqu'à 2 km au large en deux branches superposées ayant des puissances de 2 à 3 m pour la supérieure et de 2 m pour l'inférieure, en se glissant à l'intérieur de la couche d'eau à 5,2 située aux stations 21 et 31. Entre ces deux branches superposées se trouve une langue régressive d'eau à 5,2. Dans le profil 30, la partie supérieure de la branche à 5,4 se divise à son tour en deux lames dont l'une chevauche et l'autre s'insinue sous une nouvelle langue régressive d'eau à 5,2.

Dans le second cas (2 juin 1960, fig. 49), à la station 21 une couche d'eau à 10,1 se glisse, entre 21 et 22 m de profondeur, à l'intérieur d'une couche à 9,5; à la station 24, c'est une couche à 9,2 qui pénètre dans une autre à 9,0 à 21 m de profondeur.

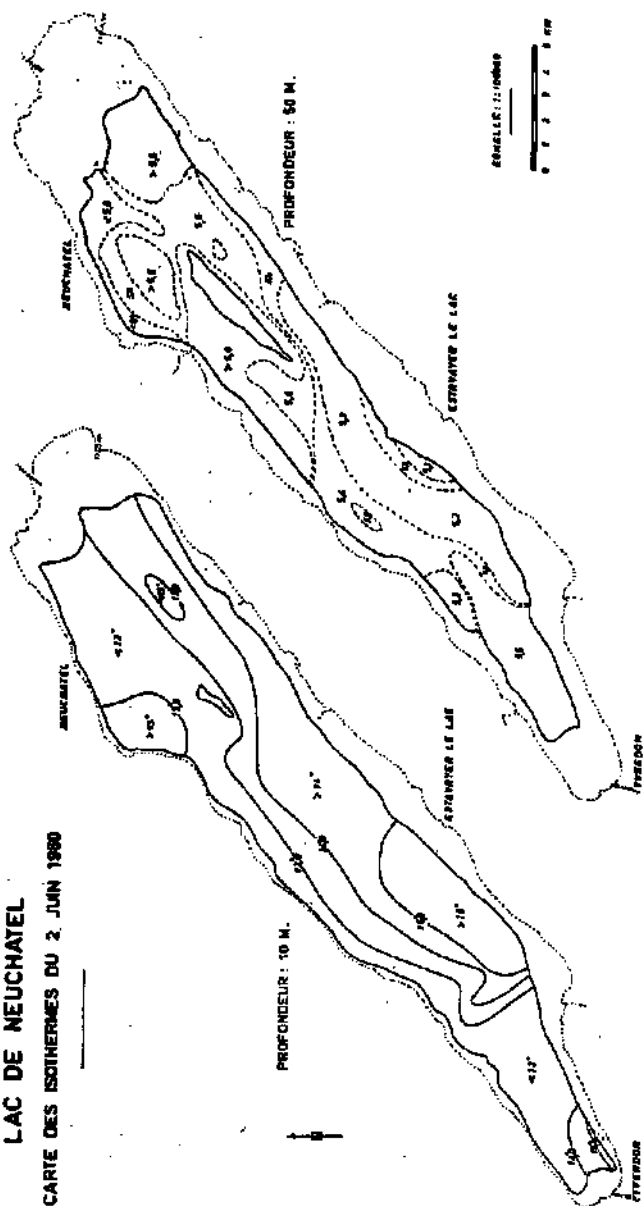
On se rend compte aussi des irrégularités dans la répartition des températures en profondeur en examinant les écarts thermiques isobathes pour chaque profil. Pour cela nous calculons l'amplitude thermique isobathe du lac pour chacune des séries de profils levés de 1959 à 1961. Cette amplitude correspond à l'écart enregistré, le même jour, entre la plus haute et la plus basse des températures de chaque niveau considéré, et nous procédons à ce calcul tous les mètres entre la surface et 30 m de profondeur, tous les 10 m au-delà.

Le tableau XXIX montre déjà que l'amplitude thermique de la surface du lac varie et qu'elle atteint le maximum absolu de 5,8 pour la période 1959-1961. Nous avons mentionné aussi, précédemment, que la température de la surface varie suivant l'heure de l'observation et les conditions météorologiques locales. A cause de la faible conductibilité calorifique de l'eau principalement, la température en-dessous de la surface devient très rapidement indépendante de ces deux causes de variation, au fur et à mesure que la profondeur augmente. Seuls les courants sous-lacustres permettent encore aux couches profondes d'avoir des rapports très lâches avec les conditions météorologiques locales.

Fig. 53.

LAC DE NEUCHÂTEL

CARTE DES ISOTHERMES DU 2. JUN 1980



AMPLITUDE THERMIQUE DU LAC DE NEUCHÂTEL

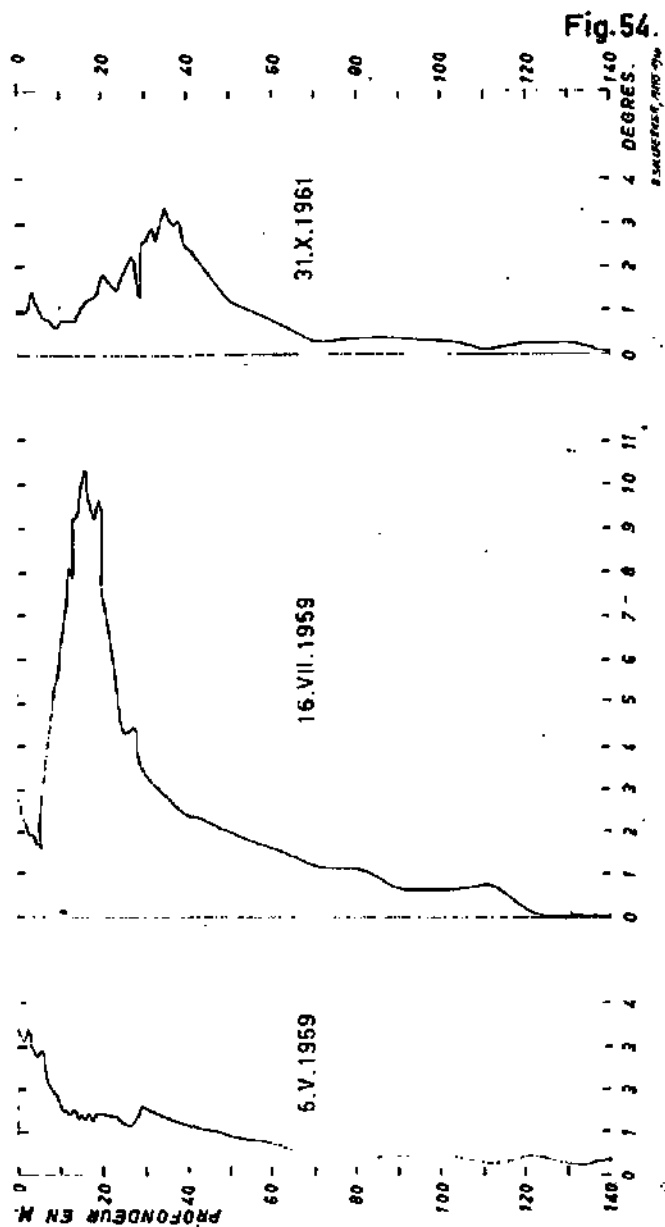


Fig. 54.

De plus, les variations saisonnières de la température diminuent et l'aire de chaque niveau considéré décroît au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans le lac. Il en résulte que les possibilités de rencontrer des écarts thermiques importants diminuent simultanément. On peut donc s'attendre à voir l'amplitude thermique du lac diminuer de la surface au fond.

En période de stratification, la réalité n'est pas si simple, ainsi que le montre la fig. 54. Examinées dans le sens vertical d'avril à octobre, l'amplitude thermique au-dessous de la surface passe par un maximum avant de diminuer plus ou moins régulièrement jusqu'au fond.

Pour la majorité des niveaux explorés lors des 11 expéditions au cours desquelles des profils thermiques ont été levés entre 1959 et 1961, nos calculs se basent sur 39 mesures de températures isobathes réparties sur l'ensemble du lac comme l'indiquent les fig. 1 et 33. On peut donc admettre que nos observations représentent bien l'ensemble des températures du lac chaque jour considéré.

Selon les résultats obtenus, l'amplitude thermique est inférieure à 1,0 dans les eaux profondes à partir des limites suivantes: 22 à 25 m en avril, 50 m en mai et juin, 50 à 90 m en juillet, 50 à 80 m en août et 60 m en octobre. Dans les eaux moins profondes, l'amplitude thermique varie entre 1,0 et 11,9 suivant les saisons et les années considérées. Dans le tableau XLVI, nous reportons les maxima de ces amplitudes pour chacune des 11 expéditions déjà mentionnées.

TABLEAU XLVI

(cf. pages suivantes)

TABLEAU XLVI

Maxima des amplitudes thermiques instantanées du lac de Neuchâtel pour la période 1959-1961.

Date	Profondeur en mètres	Amplitude en degrés	Stations correspondantes	Température correspondante	Métalimnion correspondant	Distance entre les stations (km)	Ecart de température au km
1959							
6.V.	2	3,35	25-62	7,75-11,1	1 - 3	20	0,17
16.VII.	16	10,3	35-82	9,7 -20,0	5 - 24	25½	0,40
1960							
6.IV.	12	2,15	71-14	5,2 - 7,35	1 - 24	29	0,07
4.V.	4	3,35	15-81	7,55-10,9	(1 - 23)	32½	0,10
5.VII.	17	9,1	72-55	9,4 -18,5	11- 20	10½	0,86
17.VIII	20	6,6	25-82	9,05-15,65	12- 23	29	0,23
1961							
11.IV.	7	3,5	21-55	6,4 - 9,9	(6 - 19)	15½	0,23
20.VI.	4	6,7	25-82	13,6 -20,3	1 - 14	29	0,23
25.VII.	10	4,2	41-72	13,6 -17,8	7 - 17	16½	0,25
16.VIII	20	11,9	45-14	6,5 -18,4	(13)-20	12	0,99
31.X.	35	3,4	24-64	7,6 -11,0	(19)-45	20	0,17

Dans la colonne "Métalimnion correspondant", les limites de celui-ci sont déterminées d'après la profondeur du ou des sauts thermiques qui le caractérisent, ainsi que cela sera exposé plus loin. Les chiffres entre parenthèses se rapportent à une délimitation basée sur des écarts thermiques plus petits que ceux définissant les sauts thermiques et nous reviendrons plus bas à cette question.

La profondeur des maxima de l'amplitude thermique varie au cours des saisons : partant d'une profondeur déterminée au printemps, elle diminue d'abord en avril, passe par un minimum en mai-juin, puis augmente lorsqu'on se rapproche de l'automne. Le maximum de l'amplitude thermique se trouve toujours dans le métalimnion. La valeur de ce maximum croît durant le printemps, passe par un maximum en été, puis décroît au cours de l'automne, à l'instar de la température moyenne du lac. L'écart thermique au km subit les mêmes fluctuations.

Sauf dans les cas, rares d'ailleurs, d'inversion thermique on rencontre en chaque point du lac et le même jour, les mêmes températures entre la surface et le fond. Mais si les diverses couches d'eau accusant ces températures se succèdent partout de haut en bas dans le même ordre, elles diffèrent généralement de puissance d'un endroit du lac à l'autre. Dès lors, les interfaces délimitant ces couches ne sont plus isobathes, ce qui revient à dire qu'une couche d'eau donnée n'est pratiquement jamais horizontale pour l'ensemble du lac et que, par conséquent, les isothermes qu'elle renferme sont inclinées sur l'horizon.

L'amplitude thermique du lac est l'écart thermique existant entre deux points isobathes. Pour une distance donnée entre ces deux points, l'amplitude est d'autant plus grande que les isothermes, qui sont très peu inclinées pour les couches peu profondes, sont plus serrées entre ces deux points, autrement dit que le gradient thermique est plus élevé. Or, la zone dans laquelle le gradient thermique est le plus élevé est précisément le métalimnion. Il n'est pas étonnant dès lors que le maximum d'amplitude soit lié à l'existence de cette zone thermique.

26.2.7. Température moyenne du lac.

En mesurant la température de l'eau en de nombreuses stations et profondeurs simultanément, on peut calculer la température moyenne de toute la masse d'eau en question. C'est l'opération que nous avons fait treize fois de 1959 à 1961 et nous en consignons les résultats dans le tableau XLVII comme suit :

Le lac de Neuchâtel étant loin d'avoir une forme géométrique simple, la superficie des divers niveaux de sa cuvette diminue lorsque la profondeur augmente. Par conséquent, il serait incorrect de déterminer la température moyenne du lac en calculant seulement la moyenne arithmétique de toutes les mesures de température effectuées le même jour. La seule manière qui convienne consiste à "débitier" le lac en tranches horizontales comme nous l'avons fait pour le calcul de son volume (paragraphe 3.1), à multiplier le volume de chacune par la température moyenne au milieu de la hauteur de la tranche puis, ayant additionné tous ces produits, à diviser le total par le volume du lac. La moyenne pondérée ainsi obtenue peut alors être admise comme température moyenne réelle du lac.

TABEAU XLVII

(cf. page suivante)

TABLEAU XLVII

Températures moyennes instantanées et mensuelles de l'ensemble du lac de Neuchâtel

Date	Température moyenne degrés	Moyenne 1959-1961	
		Mois	Degrés
1959			
6 mai	6,13		
16 juillet	8,58		
10 septembre	8,66		
1960			
6 avril	5,46	avril	5,64
4 mai	6,12	mai	6,13
2 juin	7,39	juin	7,46
5 juillet	8,39	juillet	8,31
17 août	8,58	août	8,74
1961			
11 avril	5,81	septembre	8,66
20 juin	7,53	octobre	8,22
25 juillet	7,95		
16 août	8,90		
31 octobre	8,22		

Le maximum de la température moyenne est atteint en août avec 8,74 et l'amplitude d'avril à octobre est de 3,44. Ajoutons que la moyenne arithmétique simple pour les mêmes sondages conduit à des moyennes qui diffèrent de 0,13 à 1,44 des valeurs mensuelles ci-dessus et par défaut.

26.3. Comparaison avec d'autres lacs.

A. Lac de Morat.

Pour comparer les températures moyennes des deux lacs, nous choisissons, dans chacun, une colonne d'eau de 30 m de hauteur et dont la température moyenne est calculée en tenant compte des profondeurs 0, 15, 20 et 30 m qui sont les seules communes aux deux masses lacustres. Les mesures à disposition pour Morat ne concordent pas avec une année civile, aussi faisons-nous en l'occurrence débiter nos mesures en novembre afin d'améliorer la comparaison entre les deux séries.

TABLEAU XLVIII

Températures comparées des lacs de Neuchâtel et de Morat, de 0 à 30 m de profondeur.

	Neuchâtel 1960-1961 (a)	Morat 1954-1955 (b)	Ecart de température (b - a)
Novembre	9,6	9,9	0,3
Décembre	7,0	7,0	0
Janvier	5,4	4,75	-0,65
Février	5,0	3,5	-1,5
Mars	5,6	3,2	-2,4
Avril	7,3	5,8	-1,5
Mai	9,1	8,1	-1,0
Juin	11,6	10,2	-1,4
Juillet	12,3	11,5	-0,8
Août	13,7	11,2	-2,5
Septembre	14,4	10,6	-3,8
Octobre	12,9	10,0	-2,9
12 mois	9,49	7,99	-1,50

Novembre et décembre 1954 ont été très chauds, mais les 10 mois suivants normaux quant à la température. Par contre, novembre et décembre 1960 sont caractérisés par leur mauvais temps, tandis que les 10 mois suivants appartiennent à une des années les plus chaudes de toute la statistique météorologique de Neuchâtel. Nous sommes donc obligés de tenir compte de ces particularités climatiques pour comparer les températures des deux lacs, en observant que la température de Neuchâtel est toujours supérieure à celle de Morat, et que le maximum de différence a lieu en septembre. Nous arrivons ainsi à la même conclusion que Quartier (1947) qui, pour d'autres années, avait tenu compte de 8 niveaux différents entre mars et le début d'août.

En augmentant à l'approche de l'automne, l'écart des températures entre les deux lacs semble confirmer le fait que, grâce à sa surface plus grande que celle de Morat, le lac de Neuchâtel subit davantage que le précédent l'action des vents qui propagent la chaleur à l'intérieur de la masse lacustre par l'intermédiaire des courants ce qui y accumule davantage de calories et par conséquent élève davantage la température de l'eau que dans le petit lac de Morat. Il s'avère indiqué, cependant, de continuer les mesures comparatives plusieurs

années durant, afin de vérifier mieux encore cette hypothèse, comme aussi celle selon laquelle le minimum de la différence de température entre les deux lacs se produit en novembre et décembre et le maximum en août ou septembre.

A partir des moyennes mensuelles de plusieurs stations, Rivier (1936) a calculé, pour l'ensemble du lac de Morat, dans la période 1934-1935, les extrêmes suivants : minimum 3,0 en février 1935; maximum 11,1 en août 1935. Ces valeurs correspondent à une amplitude de 8,1 alors que nous n'avons obtenu que 4,0 pour l'amplitude des températures moyennes de 1959 à 1961 dans le lac de Neuchâtel (minimum: 4,9; maximum: 8,9).

B. Ueberlingersee (Bodan).

A l'aide de la fig. 38, nous comparons les variations de la température moyenne mensuelle des deux lacs à diverses profondeurs, comme nous l'avons fait déjà pour l'eau de surface pélagique. A 10, 20, 30 et 40 m de profondeur, la température mensuelle varie de manière semblable dans les deux lacs durant la même période. Par contre, si très souvent les maxima se présentent en même temps, un certain nombre de fois aussi ils retardent d'un mois dans l'Ueberlingersee par rapport au lac de Neuchâtel.

Pour la période 1952 à 1955, Muckle (1956) signale dans l'Ueberlingersee une amplitude annuelle de 6,0 à 20 m de profondeur, de 1,5 à 2,0 à 50 m et de 0,7 à 100 m. Pour la période 1959-1961, notre tableau XI fournit les amplitudes suivantes : 8,23 à 20 m de profondeur, 2,06 à 50 m et 1,23 à 100 m. Les années 1952 à 1955 sont normales du point de vue météorologique; celles de 1959 à 1961, prises dans leur ensemble, ne sont pas trop différentes de la normale non plus. Par conséquent, on peut déduire de ce qui précède que la température varie davantage dans notre lac que dans l'Ueberlingersee, au cours de l'année. La différence est la moins marquée vers 50 m de profondeur et elle augmente pour les couches superficielles et profondes. Il est vraisemblable qu'on doit attribuer cette différence de comportement des températures entre les deux lacs aux vents dont l'action dépend de l'exposition et de l'orientation de la masse d'eau. C'est ainsi que notre lac est bien exposé aux vents dominants qui soufflent suivant son grand axe (le vent du SW tout particulièrement) et engendrent des courants qui brassent la masse d'eau en agissant sur sa température, alors que l'Ueberlingersee, de surcroît mieux protégé par ses rives que le nôtre, reçoit les vents par le travers, ce qui ne produit qu'un brassage plus faible de la masse d'eau.

Dans le travail que nous venons de citer, Muckle indique 15° à 20° comme amplitude maximum de température entre la surface et le fond dans l'Ueberlingersee. Cette amplitude est sensiblement du même ordre que celle de notre lac, ainsi que cela ressort de notre tableau XXXVI (13,9 à 17,5 degrés).

A la station de pompage de Sipplingen, Lehn (1956) a observé aussi des variations horaires de la température de l'eau pompée, entre juillet et décembre 1955. Ainsi, à 40 m de profondeur, la température

est montée de 1,8 en 16 heures les 27 et 28 octobre 1955. Dans le lac de Neuchâtel, nous enregistrons une baisse de 1,7 en 18 heures le 1er juillet 1958 à la station Z à 20 m de profondeur, de 5,8 (maximum de nos observations) en 24 heures le 8 octobre 1961 à la station D et de 1,2 en 10 minutes le 2 octobre 1961 également à la station D. Si nous ne tenons compte que des stations de Sipplingen (Ueberlingersee) et de Champ Bougin (station D de notre lac) où les prises d'eau se trouvent à la même profondeur, on voit que les variations horaires de la température sont plus marquées chez nous que dans l'Ueberlingersee, ce qui confirme une fois de plus la différence d'action des vents sur les deux lacs, compte tenu des différences climatiques entre les deux séries d'observations. De telles comparaisons méritent d'être poursuivies plusieurs années encore en tentant d'éliminer l'influence de ce facteur climatique; c'est ce que nous nous proposons.

C. Lac Léman.

Nous avons décrit au paragraphe 26.2.3 les variations isothermiques qui se produisent en profondeur à la station Z de 1958 à 1961. Nous avons montré la relation qui existe entre les conditions météorologiques en général, mais aussi entre le vent en particulier, et les variations de niveau des isothermes. Dans son travail sur le Léman, Dussart (1954) rapporte les variations de la température superficielle à divers phénomènes qui dépendent essentiellement des courants de dérive, entre autres dit des courants engendrés par les vents. Dans les pages 63 et 64, de son travail, cet auteur tente de mettre en évidence l'action de deux sortes d'ondes pour expliquer les variations de température en profondeur : des ondes progressives et des ondes stationnaires, ces dernières étant appelées saiches inteross.

Les résultats que nous possédons actuellement pour la station Z ne nous permettent pas de suivre Dussart aussi loin dans ses déductions pour appliquer sa théorie à la baie d'Auvernier en particulier et au lac de Neuchâtel en général. Nous estimons que plusieurs années d'observations sont nécessaires encore car, bien plus souvent qu'au Léman, nous notons des discordances très nettes dans la variation de profondeur d'isothermes voisines dont les unes se rapprochant de la surface du lac alors que, simultanément, d'autres s'enfoncent vers la profondeur, et vice versa, ce qui exclut l'analogie avec les phénomènes décrits par Dussart.

Il faut remarquer que nous n'avons pas procédé à des mesures quotidiennes suivies de la température à Z, contrairement à Quartier (1947) qui a fait de telles mesures devant Neuchâtel en juin 1945, ce qui a permis à Dussart d'établir la graphique de la page 84 de son travail. Nous nous sommes efforcés de mesurer la température à 2 mètre entre la surface et 50 m de profondeur, chaque semaine à Z, alors que Quartier avait dû se contenter des profondeurs 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30 m seulement. Dans nos résultats, la profondeur des isothermes est déterminée donc avec davantage de précision que dans les autres travaux quoiqu'à des intervalles plus longs et c'est vraisemblablement une des raisons primordiales pour lesquelles nos graphiques présentent un aspect moins régulier que ceux de Dussart et Quartier. Dans ces der-

niers, en effet, les courbes varient beaucoup plus parallèlement les unes aux autres que dans nos fig. 43 et 44 où le cas ne se produit que rarement. La prédominance des phénomènes aperiodiques sur ceux d'allure périodique dans notre cas peut être due à des courants de dérive ou de translation en rapport avec la morphologie de la baie d'Auvergnier. Toutefois, l'influence de cette dernière doit être relativement minime, étant donné que la baie est très ouverte et que la station Z est suffisamment éloignée des rives pour que la morphologie de celles-ci ne se fasse pas sentir fortement. Dans l'état actuel de nos recherches, il n'est donc pas possible d'envisager une similitude entre le Léman et le lac de Neuchâtel quant à la variation de profondeur des isothermes. Seule une prolongation des recherches et à des intervalles inférieurs à une semaine pourra peut-être résoudre ce problème.

27. La stratification thermique.

Le soleil déverse sur nos lacs de l'énergie en quantité variable suivant la saison, l'état du ciel, etc. Sverdrup (1952) a montré que pour les régions comprises entre les latitudes 70°N et 70°S, la quantité moyenne d'énergie qui parvient du soleil et du ciel à la surface de la mer pour y pénétrer, est de 0,22 cal-gr/cm²/min. A la surface du lac de Neuchâtel, la quantité d'énergie reçue est très voisine de cette valeur.

La faible conductibilité thermique de l'eau freine la pénétration de la chaleur dans les couches profondes. Dès lors, en l'absence de vent, seules les couches sub-superficielles accusent des changements rapides et importants dus au réchauffement diurne et au refroidissement nocturne.

En même temps que la température, la densité de l'eau change aussi et d'autant plus que la température s'écarte davantage de 4°. Il en résulte une stratification superposant les unes aux autres des couches d'eau de température et de densité différentes. Ce phénomène constitue, du printemps à l'automne, la stratification directe dans laquelle la température diminue de la surface vers le fond et en raison inverse de la densité, alors qu'en hiver il s'agit de la stratification dite inverse dans laquelle la température augmente de la surface vers le fond en même temps que la densité. Deux fois par an, entre ces deux périodes, le lac passe par un état d'homothermie.

Durant la stratification directe, la chaleur se propage vers les couches profondes par le brassage dû au vent. Mais Birge (1910a) a montré que l'efficacité du vent est contrecarrée par la résistance au mélange offerte par la densité plus faible de l'eau chaude sus-jacente par rapport à l'eau plus froide sous-jacente, ainsi que par la différence de viscosité de l'eau entre couches superposées.

Rappelons que, si, dans le phénomène de la distribution de la chaleur dans l'eau, l'efficacité du vent est supérieure à celle de tous les autres facteurs intervenant dans l'opération, il est clair qu'en considérant les différences de densité de l'eau par degré de

température, cette différence augmente d'autant plus que l'on s'écarte davantage de 4° . Dès lors, en considérant deux colonnes de même hauteur d'eau, de même section et dont la différence de température entre la face supérieure et la face inférieure est de 1° , le gradient thermique étant uniforme entre les deux faces de chaque colonne, celle de ces deux colonnes dont la température moyenne sera la plus différente de 4° offrira le plus de résistance au mélange thermique. C'est ainsi que la température moyenne d'une des colonnes étant de 4° , si la température moyenne de l'autre est de 10° , la résistance au mélange thermique de la seconde sera 10 fois plus grande que celle de la première, 25 fois supérieure si elle est de 20° , et ainsi de suite.

Reprenant le cas de la stratification thermique directe, nous constatons que la température diminue à partir de la surface vers la profondeur. Avec des mesures mètre par mètre, on constate une diminution de température de quelques dixièmes de degré par mètre au premier printemps. Puis, lorsque la saison avance, cette variation de température tend à s'accroître pour atteindre et dépasser 1° par mètre. Ce dernier phénomène, lorsqu'il se présente, prend le nom de saut thermique et la couche, d'une puissance d'un mètre au moins dans laquelle il se produit, est appelée couche de saut thermique (Rivier, 1937) ou, en allemand, "Sprungschicht" (Portner, 1951a, p.34). Dans le graphique des variations de la température en fonction de la profondeur, lorsque les températures sont reportées en abscisses et les profondeurs en ordonnées, la courbe représentative en période de stratification descend plus ou moins régulièrement à partir de la surface, puis un palier plus ou moins long traduit un saut thermique plus ou moins marqué. Au-dessous, la courbe reprend sa descente plus ou moins régulière et rapide vers le fond et ses basses températures.

Lorsque les sondages thermiques sont exécutés à des intervalles verticaux supérieurs à 1 m, on repère aussi, mais moins bien la présence et la profondeur du saut thermique et cela approximativement par un écart anormal de température entre deux niveaux successifs.

En opérant mètre par mètre, nous estimons raisonnable de considérer comme saut thermique tout écart de température de $1,0^{\circ}$ et plus par mètre de dénivellation. Dans le système de coordonnées que nous venons de mentionner et à condition que les échelles soient les mêmes en abscisses et en ordonnées, la portion de courbe correspondant à un saut thermique de $1,0^{\circ}/m$ est alors inclinée à 45° degrés. Avant nos travaux, Scheffelt (1921) avait déjà admis, pour le Chiesssee, un écart de $1,0^{\circ}/m$ comme manifestation minimum du saut thermique.

La stratification thermique ne se limite pas à des couches d'eau d'un mètre d'épaisseur, mais donne au lac un aspect feuilleté dont les diverses couches composantes ont une puissance qui peut varier de plusieurs mètres à quelques centimètres. Nous reviendrons plus bas à cet aspect lamellaire du lac. Mais pour éviter de laisser échapper des couches de saut thermique de puissance voisine du mètre mais inférieure à ce dernier toutefois, nous choisissons arbitrairement $0,9^{\circ}$ comme limite inférieure d'écart thermique par mètre pour définir le saut thermique dans nos travaux.

L'épilimnion est la partie du lac comprise entre la surface et la première couche de saut thermique rencontrée en descendant vers le fond. L'hypolimnion est la partie comprise entre la dernière couche de saut thermique rencontrée et le fond. La puissance et la structure de la couche de saut thermique varient suivant la saison, l'endroit et le lac considérés; on réserve le nom de métalimnion à la partie du lac dans laquelle elle se trouve. Nous aurons encore, ultérieurement, l'occasion de voir que les trois zones que nous venons de définir constituent en quelque sorte trois "lacs partiels", superposés, différant les uns des autres tant par leur état thermique que par leur chimisme ou leur biologie et évoluant en grande partie de manière indépendante l'un par rapport aux autres.

Delebecque (1898) considère comme thermocline une couche située à la limite des actions de réchauffement et de refroidissement journalières, tandis que Birge (1910a) estime que ce terme désigne la partie supérieure de l'hypolimnion. Quant à nous, nous suivons, avec Ekman (1943) l'opinion exprimée par Brönsted et Wesenberg-Lund: le thermocline est la zone où la chute de température est maximum dans la couche de saut thermique. Il ne s'agit donc pas d'un synonyme de saut thermique comme beaucoup d'auteurs ont cru le comprendre.

Rappelons encore que l'existence d'une stratification thermique a été signalée pour la première fois dans le Léman par H.B. de Saussure en 1799 (Dussart, 1954a). Par contre, c'est Richter qui a observé pour la première fois un saut thermique dans le Würthersee, en Carinthie, en 1889 (Herpich, 1911).

27.1. Résultats obtenus lors des campagnes précédentes.

C'est dans le travail de Ledame (1861b) qu'on trouve mention, pour la première fois, d'un saut thermique dans des mesures se rapportant au lac de Neuchâtel : 5,0 d'écart entre 4 et 6 m de profondeur le 21 juin 1839 et 2,5 entre 6 et 8 m, alors qu'en-dessus et en-dessous de ces niveaux les écarts sont bien plus faibles.

Robert (1921) mentionne 6 sauts thermiques observés par Furhmann et dont le plus faible existe entre 20 et 40 m de profondeur le 23 juin 1916 (saut de 5,2 pour 20 m) et le plus fort entre 10 et 20 m de profondeur le 8 août 1918 (saut de 9,8 pour 10 m). Dans ses propres travaux, Robert signale un minimum de saut thermique entre 10 et 30 m le 27 septembre 1919 (écart de 7,5 pour 20 m) et un maximum entre 10 et 15 m le 17 juillet 1920 (écart de 4,8 pour 5 m).

Pour la période 1943-1946, nous ne possédons que quelques données assez vagues sur la valeur et la position du saut thermique car, malheureusement, ni Quartier ni nous-mêmes n'avons procédé alors à des mesures de températures à intervalles verticaux de moins de 5 m, de sorte que les sauts thermiques nous ont échappé.

27.2. La stratification thermique à la station Z.

Nos recherches portent sur la période de 1958 à 1961 dont il a

été question précédemment déjà.

27.2.1. Durée de l'existence du saut thermique à Z.

A l'aide de nos sondages hebdomadaires et bien qu'une semaine soit une période déjà longue entre deux expéditions, nous pouvons néanmoins déterminer à quelques jours près les moments de l'année qui caractérisent les sauts thermiques à cette station. Dans le tableau II nous faisons figurer ces dates avec les profondeurs et les températures intéressantes correspondantes.

Dans ce tableau, le gradient est la différence maximum de température par mètre d'écart vertical, autrement dit entre deux niveaux distants d'un mètre, dans la couche de saut thermique mentionnée ci-dessus. Les profondeurs et températures extrêmes annuelles sont celles constatées chaque année durant la stratification; elles ne correspondent pas nécessairement aux valeurs enregistrées lors de l'apparition et de la disparition du saut thermique. Les profondeurs et les températures extrêmes figurent ici sans tenir compte de la date à laquelle elles ont été observées; elles ne se correspondent donc pas entre elles.

TABEAU II

Caractéristiques des sauts thermiques à la station Z. Période 1958-1961

	1958	1959	1960	1961
Apparition; date:	-	23.III	19.IV	11.IV
profondeur corresp. (m)	-	3-4	2-3	1-4
température " (°C)	-	6,7-5,7	7,2-5,7	9,6-6,8
gradient max. " (°/m)	-	1,0	1,5	1,0
Effacement vernal; début:	-	31.III	27.IV	25.IV
fin:	-	12.V	10.V	8.V
Disparition; date:	21.X	3.XI	11.X	7.XI
profondeur corresp.	26-28	21-22 23-24	31-32 40-41	24-25 26-27
température "	13,1-10,1	12,3-10,7 10,4-9,5	13,6-11,7 7,9-7,0	10,9-10,0 9,4-7,7
gradient max. "	2,1	1,6 0,9	1,9 0,9	0,9 1,7
Profondeurs extrêmes annuelles: minimum	-	1-3	1-3	1-4
maximum	-	37-38	40-41	32-33
Températures extrêmes annuelles: minimum	-	6,7-5,7	7,2-5,9	9,4-6,8
maximum	-	22,2-18,9	18,7-17,4	20,1-18,9

Par effacement vernal, il faut entendre la période du printemps durant laquelle aucun saut thermique n'existe plus après avoir pris naissance auparavant la même année; elle est donc différente des disparitions momentanées, périodiques ou apériodiques, qui se produisent pendant quelques heures seulement et qui affectent la couche des sauts thermiques aux autres saisons, disparitions dont la cause est due soit à l'effet des courants, soit à celle des seiches thermiques.

On constate donc à Z, durant les années 1959 à 1961, que les sauts thermiques apparaissent entre mi-mars et mi-avril, subsistent durant une à deux semaines, puis s'effacent pendant deux à six semaines pour réapparaître définitivement à époque fixe, entre le 8 et le 12 mai (ce dernier écart de 4 jours ne peut être réduit car nos sondages s'effectuant à jour fixe de chaque semaine, ils subissent un décalage d'un jour chaque année et de 2 jours en 1960 (année bissextile) par rapport à l'année précédente).

Robert (1921) a été le premier suédois à signaler l'effacement vernal du saut thermique : en 1920, le saut est apparu le 30 mars, s'est effacé le 12 avril après deux semaines de mauvais temps et est réapparu le 28 mai. On peut se demander, dès lors, si cet effacement vernal du saut thermique qui se produit toujours au même moment de l'année à la station Z et à une époque concordante devant Neuchâtel, dépend uniquement de l'action du mauvais temps comme Robert l'affirme, ou bien si cette disparition momentanée dépend d'autres facteurs aussi. C'est ce que nous cherchons à montrer par le tableau L. qui tient compte aussi de l'apparition du saut thermique.

TABLEAU L.

(cf. page suivante)

TABLÉAU L.

Influence de l'agitation du lac, de l'insolation et de la température de l'air pendant sept jours consécutifs, sur l'apparition et l'effacement vernal, puis la réapparition du saut thermique dans la baie d'Auvernier.

	1959	1960	1961
<u>Apparition du saut thermique.</u>			
Date	23.III	19.IV	11.IV
Agitation du lac	11	34	15
Insolation	19	11	50
Amplitude thermique de l'air	9,1	4,8	3,8
<u>Effacement du saut thermique.</u>			
Date	31.III	27.IV	25.IV
Agitation du lac	17	22	24
Insolation	30	70	14
Amplitude thermique de l'air	-4,4	-9,5	-5,0
<u>Réapparition du saut thermique.</u>			
Date	12.V	10.V	8.V
Agitation du lac	1	50	42
Insolation	51	67	39
Amplitude thermique de l'air	4,8	6,5	8,4

Dans chacune des subdivisions de ce tableau, les valeurs indiquées se rapportent aux 7 jours consécutifs qui précèdent chacun des phénomènes. L'agitation du lac, exprimée en unités arbitraires, est obtenue en additionnant les chiffres qui, chaque demi-journée, expriment l'agitation maximum due aux vagues, l'échelle de ces chiffres allant de 0 = calme à 9 = tempête; cette échelle sera présentée plus loin en détail. L'insolation est exprimée en heures arrondies à l'unité. L'amplitude thermique de l'air marque l'écart observé entre les extrêmes en 7 jours et son signe le sens de la variation de la température de l'air entre ces extrêmes.

D'après le tableau L, l'effacement vernal du saut thermique est précédé d'une baisse de température alors que cette dernière était en hausse avant l'apparition du saut thermique, et cela pour les trois ans considérés. Par contre, en 1959, bien que l'insolation augmente entre le 23 et le 31 mars, l'agitation emporte le saut thermique. En 1960, bien que l'agitation soit moins forte qu'avant le 19 avril, et l'insolation en nette hausse entre le 19 et le 27, c'est le

refroidissement de l'air ambiant qui commande le phénomène (on enregistre d'ailleurs la plus forte baisse de température de l'air pour les 3 ans durant les 7 jours qui précèdent l'effacement vernal du saut thermique). En 1961, l'insolation est si faible que l'agitation du lac, sans être plus forte qu'avant le 11 avril, est suffisante cependant pour effacer le saut thermique.

Lors de la réapparition du saut thermique, la température de l'air augmente. En 1959, l'insolation augmente par rapport à la période d'effacement en même temps que l'agitation du lac diminue. En 1960, l'insolation reste sensiblement la même, tandis que l'agitation est de 127% plus forte que précédemment; par contre, et par rapport à 1959, l'augmentation de la température de l'air est plus forte; c'est donc elle qui l'emporte sur l'influence des autres facteurs. En 1961, avec 75% seulement d'augmentation de l'agitation par rapport à la période d'effacement, l'insolation est plus que doublée par rapport à cette même période et la température de l'air enregistre la plus forte hausse des trois ans.

En résumé, alors que Robert (1921) n'attribue l'effacement vernal du saut thermique qu'au mauvais temps, nous pouvons préciser maintenant que l'insolation semble ne pas jouer de rôle important dans ce phénomène, alors que l'agitation du lac est beaucoup plus efficace en même temps qu'elle voit son effet largement dépassé par celui de la variation de température de l'air ambiant. Lors de la réapparition du saut thermique après cet effacement, l'agitation du lac n'a qu'un effet insignifiant alors que l'insolation et la variation de température de l'air ont, au contraire, beaucoup d'effet sur le phénomène.

La disparition définitive de la couche de saut thermique s'échelonne sur 8 semaines entre le 7 septembre et le 3 novembre. Elle dépend alors nettement de l'agitation du lac qui efface la stratification thermique par brassage des couches d'eau. Ainsi, en tenant compte des conditions météorologiques des huit semaines qui précèdent cette disparition, on constate pour 1959 où elle a été la plus tardive, de nombreuses et longues périodes de calme par beau temps, entrecoupées de brefs moments de faible agitation. En 1960, où la disparition avance de 3 semaines par rapport à l'année précédente, il y a beaucoup moins de calme mais un temps variable, généralement beau, alternant avec quelques tempêtes du SW. En 1961, la disparition est la plus prématurée des trois ans; on a affaire à un régime de vent du SW par temps relativement beau, mais à parsemement d'agitation et à plusieurs tempêtes du SW, en même temps que la prépondérance du refroidissement nocturne sur le réchauffement diurne tend à accélérer le phénomène.

D'après Dussart (1954 a), un lac ne peut former d'épilimnion au printemps car le refroidissement nocturne n'est pas assez intense pour entraîner vers le fond les calories absorbées par les couches superficielles durant le jour. Cet auteur admet, pour les lacs chauds, la formation d'un épilimnion temporaire, de très faible épaisseur et se reformant pratiquement chaque jour au début du prin-

temps. Toujours selon lui, un épilimnion épais ne peut se former avant juillet et il ne devient étale qu'au début de l'"overtun" d'automne.

Nos constatations lors des recherches effectuées de 1958 à 1961 sur le lac de Neuchâtel, s'opposent partiellement aux déductions de Dussart. S'il est vrai en effet qu'en mars et avril la couche de saut thermique est proche de la surface et que la puissance de l'épilimnion est faible et s'il est exact aussi que ce dernier phénomène est peu stable puisqu'on assiste chaque année à un effacement vernal du saut thermique, par contre, il est vrai également qu'un épilimnion se forme et subsiste bel et bien jour et nuit depuis le milieu de mai durant tout l'été et que sa puissance ne tombe pas au-dessous de 2 m. Quant à dire que l'épilimnion disparaît véritablement lorsque des oscillations à allure de seiches ou des courants sous-lacustres temporaires déplacent latéralement et momentanément la couche des sauts thermiques, nous ne pouvons pas nous rallier à cette opinion. Il en est de même lorsque, sous l'action des mêmes mouvements, l'interface épilimnion-métalimnion se relève ou se déprime. En n'admettant pas l'hypothèse de Dussart, nous confirmons l'idée exprimée par Mortimer (1952 et 1953b) selon laquelle, s'il y a balancement plus ou moins prononcé de la couche de saut thermique, celle-ci ne disparaît pas du lac pour autant. A plus forte raison, l'épilimnion ne disparaît pas; tout au plus se déforme-t-il momentanément.

En résumé, il faut admettre qu'à la station Z la couche de saut thermique et l'épilimnion qui en dépend existent réellement de fin mars au début de novembre, avec une courte interruption de printemps pouvant atteindre 2 à 6 semaines en avril-mai. La durée d'existence de la couche des sauts thermiques est représentée par la fig. 55.

27.2.2. Evolution saisonnière du saut thermique à Z.

Birge (1910a) en étudiant la répartition de la chaleur dans les lacs fait remarquer qu'on a toujours été étonné de la facilité avec laquelle le saut thermique peut être troublé momentanément, mais en même temps de la difficulté avec laquelle il se déplace de manière permanente. Cette constatation est en relation avec l'augmentation simultanée de la résistance thermique au mélange et de la température. Il ne faut donc pas être surpris de constater, dans la fig. 55 que les plus fortes fluctuations momentanées s'observent au début et à la fin des courbes, ce qui correspond, précisément, aux températures les plus basses comme le révèlent les fig. 44, 45 et 46. Si 1961 semble faire exception tout au long de la courbe de la fig. 55, c'est que les températures correspondantes sont, d'après la fig. 47, exceptionnellement basses aussi de mi-juillet à septembre. Il est bien entendu qu'on aurait pu voir apparaître aussi d'autres fluctuations importantes mais brèves, périodiques ou apériodiques, dans les courbes de la fig. 55 si les sondages correspondants avaient été exécutés à intervalles plus courts, chaque jour par exemple.

Indépendamment des fluctuations dont nous venons de parler,

la couche de saut thermique tend à se déplacer vers la profondeur au fur et à mesure que la saison avance. Relativement proche de la surface au printemps, cette couche se trouve à plusieurs dizaines de mètres de profondeur au moment où l'"overturn" d'automne la fait disparaître. La profondeur maximum à laquelle on observe la couche de saut thermique à Z est de 45 m, ce qui correspond sensiblement à ce que Robert (1921) a observé devant Neuchâtel le 31 octobre 1919 (entre 40 et 50 m).

Très souvent, à partir du mois de mai, le sondage thermique rencontre deux ou plusieurs sauts thermiques successifs, séparés l'un de l'autre dans le sens vertical par une couche plus ou moins épaisse d'eau dont la température ne varie que très peu ou même parfois pas du tout. Nous constatons que cette multiplicité des sauts thermiques à une station donnée est fréquente et, en ce qui concerne Z, on peut établir le tableau LI pour la période 1958-1961.

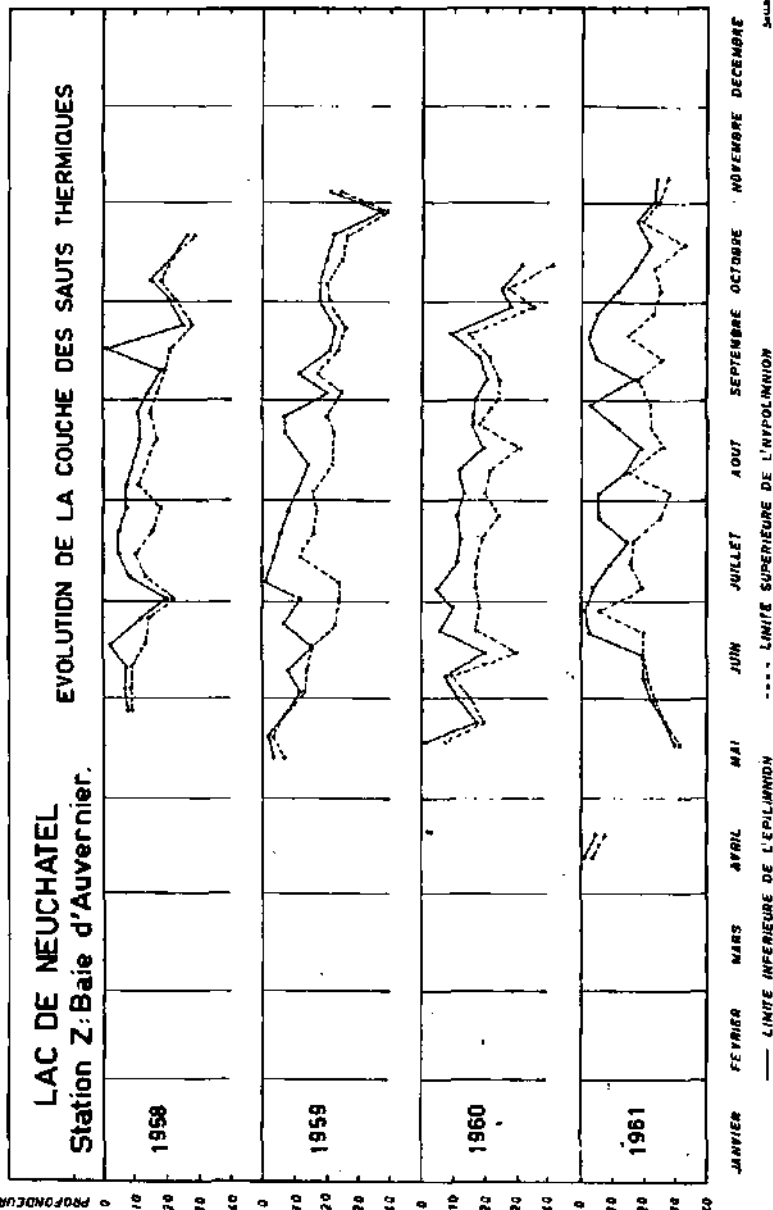
TABEAU LI

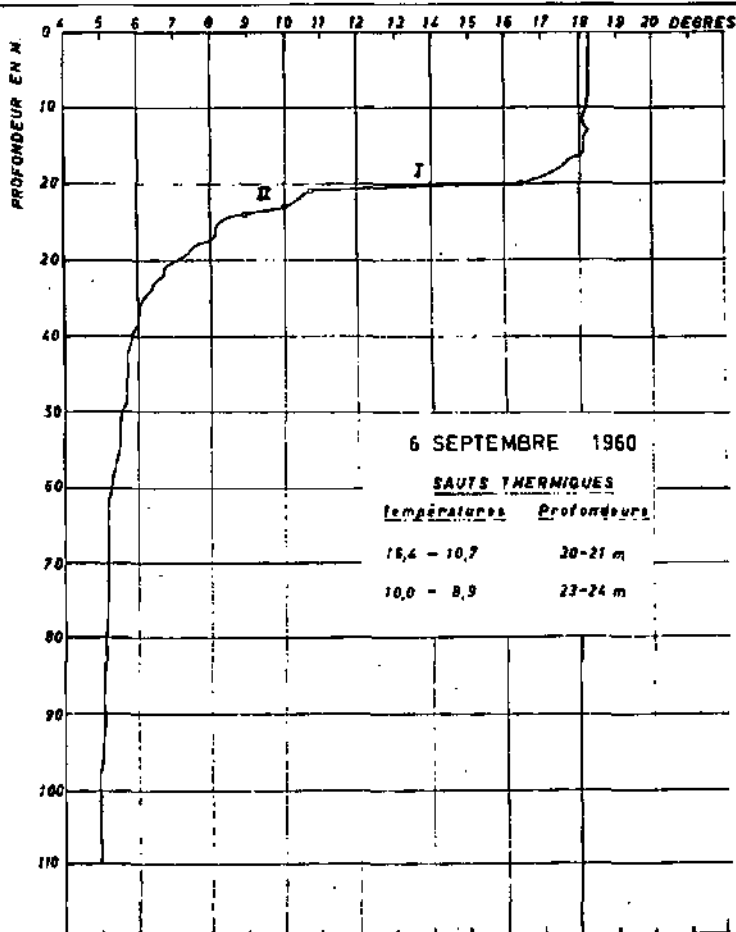
Fréquence selon laquelle existent des sauts thermiques multiples à la station Z, Période 1958-1961.

	sauts thermiques				
	simples	doubles	triples	quadruples	quintuples et plus nombreux
Pourcentage de cas:	35	37	18	8	2

Il ressort de ce tableau que c'est à des sauts thermiques doubles ou simples qu'on a affaire le plus souvent. Il est beaucoup moins fréquent de rencontrer trois sauts thermiques et plus rare encore d'en trouver 4 ou 5 superposés simultanément. Dans le cas des sauts multiples, le gradient thermique des couches d'eau qui les séparent ne diffère généralement pas de celui qu'on rencontre dans l'épilimnion et dans l'hypolimnion. Enfin, dans 65% des cas, on trouve des sauts thermiques multiples et dans 35 % seulement des sauts simples.

Quant à la formation des sauts multiples, on constate qu'elle a lieu à partir de la surface d'où les divers sauts thermiques successifs s'enfoncent peu à peu dans la profondeur, les uns derrière les autres. En effet, Steinböck (Arch. Hydrobiol. 27. (1934) a constaté, dans les lacs de montagne la présence d'une couche de saut thermique voisine de la surface (Oberflächensprungschicht) avec fort gradient thermique, phénomène éphémère et qui, par cela même, conduit à la formation et à la coexistence de plusieurs couches de saut thermique. Nous-mêmes avons eu aussi l'occasion de constater ce phénomène à de nombreuses reprises; c'est ainsi que, par exemple, lors des profils levés le 25 juillet 1961, on observe 12 fois des sauts thermiques





LAC DE NEUCHÂTEL
STATION Z : BAIE D'AUVERNIER

TEMPERATURE DE L'EAU.

Fig. 56.

entre 0 et 1 m de profondeur, le gradient allant de $1,0^{\circ}/m$ à la station 41 jusqu'à $2,0^{\circ}/m$ à la station 52. A la station Z aussi, plusieurs fois des sauts thermiques avoisinant la surface sont observés au cours de notre campagne de recherches.

Reprenons le cas de deux sauts thermiques superposés, séparés par des couches d'eau à faible gradient de température. La conductibilité thermique de l'eau étant faible, on ne peut s'attendre, en l'absence de vent, à ce que de la chaleur venant de la surface se transmette facilement à travers la couche supérieure de saut thermique pour modifier le gradient des couches sous-jacentes. L'état thermique de ces dernières ne peut donc se modifier que difficilement, de sorte que ces couches ne peuvent s'incorporer à l'un ou à l'autre des sauts thermiques qui les encadrent. Aussi considérons-nous l'ensemble des sauts thermiques et des couches occluses entre eux comme un tout suffisamment stable auquel s'applique le terme métalimnion.

La puissance du métalimnion varie au cours des saisons et on enregistre 23 m comme maximum absolu à 2 le 6 juillet 1959. Les puissances les plus fréquemment rencontrées sont, dans l'ordre décroissant : 1, 3 et 2 m, représentant ensemble 41% des cas, puis 6, 4, 7, 5 et 11 m (31%), auxquelles s'en ajoutent d'autres encore, mais nettement plus rares.

27.2.3. Variation du gradient de température dans les sauts thermiques à la station Z.

On appelle gradient de température ou gradient thermique l'écart de température entre deux points distants d'un mètre dans le sens vertical. Si la puissance de la couche de saut thermique dépasse le mètre, le gradient ainsi défini n'est pas nécessairement constant sur toute la hauteur de la couche et ce sont ses variations que nous allons examiner.

Le tableau LII groupe les maxima seulement des gradients de température observés à la station Z, car il est bien entendu que les minima ont tous la valeur de $0,9^{\circ}/m$, limite inférieure que nous avons choisie pour définir les sauts thermiques.

TABLEAU LII

(cf. page suivante)

TABLEAU LII

Gradiente maxima instantanées de la température à la station 2 durant la stratification thermique des années 1958 à 1961.

	1958			1959			1960			1961		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Hiver	-	-	-	1,3	3-4	23.III	-	-	-	-	-	-
Printemps	4,6	8-9	10.VI	2,2	8-9	9.VI	3,31	4-15	21.VI	2,13	0-31	16.V
Été	4,1	20-21	16.IX	4,12	3-24	22.IX	5,72	0-21	6.IX	3,31	4-15	8.VIII
Automne	2,1	27-28	21.X	1,92	2-23	21.X	1,93	1-32	11.X	1,81	7-18	10.X
Année	4,6	8-9	10.VI	4,12	3-24	22.IX	5,72	0-21	6.IX	3,31	4-15	8.VIII

Dans ce tableau: a = gradient en degrés par mètre; b = profondeur correspondante en mètres; c = date.

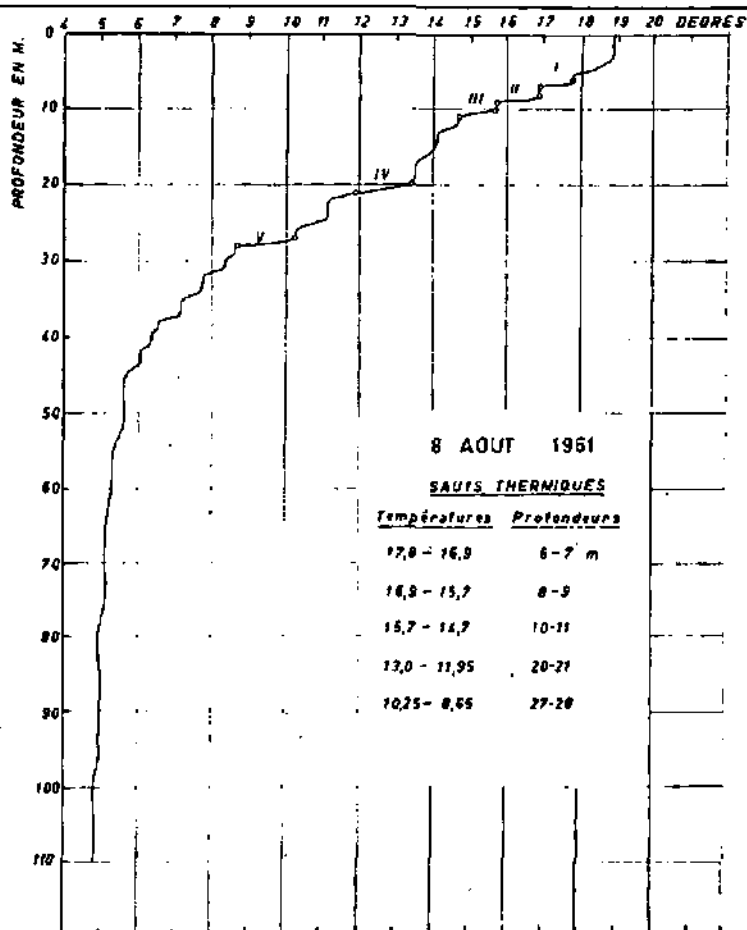
En général, les gradients les plus marqués se rencontrent en été, l'année 1958 constituant une exception encore inexpliquée. A la station 2, de 1958 à 1961, le plus fort gradient thermique est de 5,7; il s'observe entre 20 et 21 mètres de profondeur le 6 septembre 1960. Nous devons renoncer à comparer notre maximum à ceux de nos prédécesseurs (cf. paragraphe 27.1), car ceux-ci n'ont donné que des valeurs rapportées à des couches de plusieurs mètres d'épaisseur et nous venons de voir que, le gradient n'étant pas nécessairement constant, il est impossible, par calcul, de ramener au mètre ces valeurs. Ce gradient maximum à Z ressort clairement de la courbe de température constituant la fig. 56.

La fig. 57 montre l'existence simultanée de plusieurs sauts thermiques superposés, le 8 août 1961 à la station 2. C'est grâce à nos sondages mètre par mètre que la "structure en escalier" de la courbe des températures apparaît nettement ici. Simultanément, cet exemple révèle particulièrement bien les raisons pour lesquelles l'existence simultanée de plusieurs sauts thermiques a échappé à nos prédécesseurs qui se contentaient d'observations à des niveaux trop distants les uns des autres, ce qui permettait aux écarts thermiques fins de s'estomper.

Dans le tableau LIII est exposée la variation des gradientes moyens de la température à Z pour la période de 1959 à 1961. Nous ne tenons pas compte de l'année 1958 dont les observations sont incomplètes.

TABLEAU LIII

(cf. page suivante)



LAC DE NEUCHÂTEL
STATION Z : BAIE D'AUVERNIER

TEMPERATURE DE L'EAU.

Fig.57.

Fig. 58.

LAC DE NEUCHÂTEL Station Z: Baie d'Auvernier.

VARIATION MENSUELLE DU GRADIENT THERMIQUE MOYEN

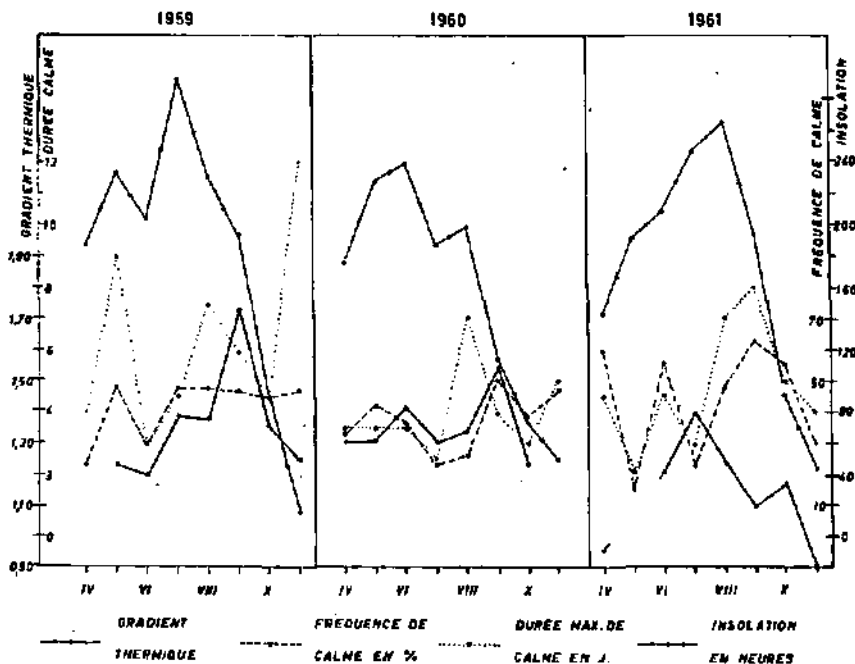


TABLEAU LIII

Gradients moyens mensuels, saisonniers et annuels de la température dans les sauts thermiques à la station 2 durant la période 1959-1961.

	1959	1960	1961	1959 - 1961
Mars	1,00	-	-	-
Avril	-	1,30	0,96	1,13
Mai	1,23	1,31	1,85	1,46
Juin	1,20	1,41	1,22	1,28
Juillet	1,39	1,30	1,40	1,36
Août	1,38	1,34	1,24	1,32
Septembre	1,73	1,54	1,10	1,46
Octobre	1,36	1,23	1,17	1,25
Novembre	1,25	-	0,90	1,08
Hiver	1,00	-	-	-
Printemps	1,21	1,38	1,22	1,27
Été	1,47	1,37	1,25	1,36
Automne	1,34	1,23	1,15	1,24
Année	1,40	1,36	1,22	1,33

Ce tableau montre que les gradients moyens diffèrent d'une année à l'autre et pour tenter d'expliquer ces différences, examinons les relations qui peuvent exister entre les gradients, l'agitation du lac et l'insolation, car il va de soi que plus l'insolation est forte, plus l'eau s'échauffe et, par conséquent, plus le gradient de température augmente en général. Par contre, plus les vagues et les courants sous-lacustres auxquels les vents donnent naissance sont forts, plus la stratification thermique a tendance à s'effacer. Toutefois, nous laissons de côté le gradient de mai 1961 qui n'est pas une moyenne véritable par comparaison aux autres; en effet, cette valeur ne résulte que de deux mesures seulement.

Pour construire la fig. 58, calculons, chaque mois, la proportion de jours entiers durant lesquels le lac a été calme. Cette valeur, exprimée en % du mois, est reportée en ordonnée sous le terme "fréquence de calme". Il est évident que plus la proportion de jours calmes est grande, plus le mois est favorable à la stratification thermique. Mais deux mois ayant la même proportion de jours calmes peuvent très bien ne pas être identiquement favorables à la stratification suivant la longueur plus ou moins grande de la période durant laquelle ces jours se suivent. C'est pourquoi nous reportons

aussi en ordonnée la "durée maximum de calme", exprimée en jours et qui n'est autre, chaque mois, que la plus longue suite ininterrompue de jours calmes. Quant à l'insolation, nous la reprenons de notre fig. 5 où elle est déjà exprimée en heures.

En comparant entre elles les courbes de la fig. 58, il apparaît clairement qu'au printemps (soit d'avril à juin) les fluctuations du gradient suivent bien celles du calme du lac, alors que les variations de l'insolation n'exercent aucun effet sur le gradient. En été (soit de juin à septembre), la courbe du gradient suit bien celle du calme, mais l'effet de l'insolation se fait sentir: les maxima du gradient et de l'insolation sont plus bas en 1960 (été froid) qu'en 1959 (été chaud), sans toutefois que la diminution plus précoce de l'insolation en 1960 par rapport à 1959 semble influencer le gradient thermique. En 1961, par contre, l'époque du maximum de gradient thermique est avancée par rapport aux années précédentes et ce maximum est situé plus bas qu'auparavant, ce qu'il faut imputer vraisemblablement à une agitation plus marquée du lac, durant le premier semestre de 1961, qu'en période correspondante de 1959 et 1960. En automne, (soit de septembre à novembre), l'insolation qui diminue rapidement et fortement, influence beaucoup le gradient thermique, alors que le calme relatif et la durée fortement augmentée du calme sont sans influence notable; c'est le cas en octobre-novembre 1960 et surtout en 1959, alors qu'en 1961 un très grand calme survenant en septembre, donc assez tôt dans la saison, influence légèrement encore le gradient thermique en octobre.

En résumé, l'influence de longues périodes de calme agit fortement sur le gradient thermique au printemps, diminue d'effet en été et s'estompe en automne, tandis que l'insolation qui est presque sans influence au printemps agit autant que le calme en été et acquiert une influence prépondérante en automne.

27.2.4. Evolution des températures de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion à la station Z.

À la station Z, les températures de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion se calculent en prenant la moyenne des températures mesurées aux divers niveaux comprises dans chacune de ces zones. La fig. 59 représente la variation de ces moyennes durant la période de stratification thermique.

On remarque tout de suite que les températures de l'épilimnion et du métalimnion évoluent de manière semblable à ce qu'on observe pour les courbes isobathes supérieures dans les fig. 44 à 47; la température moyenne s'élève au printemps, passe par un maximum d'été où elle se maintient plus ou moins longtemps, puis redescend en automne. Par contre, la courbe de la température moyenne de l'hypolimnion a une allure générale remarquablement constante.

En calculant les moyennes de la température de chacune de ces zones, on arrive au tableau LIV dans lequel sont reportés aussi les extrêmes atteints par la température moyenne de chaque zone durant la période 1958-1961.

TABEAU LIV

Variation des températures moyennes de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion à la station Z durant la période 1958-1961.

	Epilimnion	Métalimnion	Hypolimnion
<u>Moyennes.</u>			
1958	17,6	14,2	7,1
1959	16,7	12,6	6,4
1960	16,8	12,7	6,5
1961	16,3	13,0	6,7
1958-1961	16,9	13,1	6,7
<u>Extrêmes.</u>			
Minima	7,7	6,2	5,0
Maxima	22,4	18,3	9,1
Amplitude	14,7	12,1	4,1

Pour la période considérée, l'épilimnion accuse une température moyenne supérieure de 4° à celle du métalimnion et de 10° à celle de l'hypolimnion. On a donc bien affaire à trois zones distinctes du point de vue température.

27.3. La stratification thermique aux stations A à P'.

Bien que les investigations à ces stations s'étalent sur la période de juin 1957 à octobre 1960, il n'est pas possible de dresser un tableau de la durée d'existence des sauts thermiques à chacune d'elles, car les mesures sont trop espacées les unes des autres dans le temps.

Aux stations A à P' on constate aussi une descente des sauts thermiques durant l'été et l'automne, mais pour les raisons que nous venons d'énumérer, il n'est pas possible non plus d'observer la profondeur à laquelle disparaissent ces sauts.

Par contre, nous pouvons dresser le tableau LV indiquant les proportions des divers types de sauts thermiques observables de 1957 à 1960 dans l'ensemble des stations A à P'.

TABEAU LV.

(cf. page suivante)

TABLEAU LV.

Fréquence du nombre des sauts thermiques simultanés aux stations A à P⁸ durant la période 1957-1960.

% de cas	Sauts thermiques				
	simples	doubles	triples	quadruples	quintuples et plus nombreux
	47	33	18	1	0

Les sauts thermiques simples sont plus fréquents aux stations de la série A à P⁸ qu'à Z, mais les doubles et les triples s'y rencontrent dans les mêmes proportions. Par contre, on n'observe qu'une seule fois quatre sauts thermiques simultanés: le 27 septembre 1960 à la station B. N'oublions pas cependant que si la concordance avec Z n'est pas parfaite, c'est qu'il est légèrement malaisé de comparer entre eux des cas qui sont loin d'être aussi nombreux pour la série A à P⁸ que pour Z. Il est illusoire aussi de classer les stations A à P⁸ d'après la proportion de chacun des types de sauts thermiques rencontrés, car les profondeurs à ces stations, et par conséquent les conditions thermiques qui y règnent, sont trop différentes les unes des autres pour qu'on puisse établir une comparaison parfaite.

La puissance du métalimnion diffère d'une station à l'autre le même jour; c'est ainsi qu'on enregistre les extrêmes suivants le 26 août 1958: 19 m à la station C entre 13 et 32 m de profondeur (gradient du thermocline: 1,7 entre 14 et 15 m) et 1 m à la station K entre 9 et 10 m de profondeur (gradient: 2,6). Le maximum absolu de la série, soit 21 m, se trouve le 25 août 1959 à la station P⁸ entre 10 et 31 m de profondeur (gradient du thermocline: 1,2 entre 26 et 27 m).

En extrayant les maxima de l'ensemble des puissances observées pour le métalimnion, on obtient le tableau LVI dans lequel sont aussi reportés les thermoclines correspondants.

TABLEAU LVI

(cf. page suivante)

TABLEAU LVI

Puissances maxima observées pour le métalimnion durant les grandes expéditions de 1957 à 1960.

Station	Métalimnion			Thermocline	
	Puissance en m.	Profondeur en m.	Date	Gradient (degrés)	Profondeur (m)
A	18	17 - 35	27.IX.60	1,7	17 - 18
B	12	14 - 26	27.IX.60	1,0	20 - 21
B ²	16	20 - 36	29.IX.59	1,0	20 - 21
C	19	13 - 32	26.VIII.58	1,7	14 - 15
D	17	9 - 26	27.IX.60	1,2	9 - 10
E	4	12 - 16	26.VIII.58	2,0	15 - 16
F	15	5 - 20	25.VIII.59	1,6	6 - 7
K	1	9 - 10	26.VIII.58	2,6	9 - 10
L	3	8 - 11	27.VIII.57	1,8	8 - 9
M	7	15 - 22	26.VIII.58	1,7	21 - 22
N	8	16 - 24	25.VIII.59	1,7	22 - 23
P ²	21	10 - 31	25.VIII.59	1,2	26 - 27

La répartition des maxima de puissance du métalimnion apparaît désordonnée. Il faut donc se borner à constater que cette puissance maximum varie, comme la profondeur à laquelle se situe le métalimnion d'ailleurs, d'un endroit du lac à l'autre, sans relation apparente avec le thermocline ou avec la profondeur du lac à la station considérée.

La puissance maximum observée pour un saut thermique lors des grandes expéditions est de 5 m le 27 août 1957 à la station C.

Quant aux gradients maxima de température, chaque année est caractérisée comme suit :

en 1957 : 3⁰,8 entre 16 et 17 m, le 27 août à la station A (cette valeur est le maximum absolu de la période 1957-1960 pour la série A à P¹);

en 1958 : 3⁰,6 entre 13 et 14 m, le 24 juin à la station F;

en 1959 : 3⁰,1 entre 18 et 19 m, le 29 septembre à la station A et entre 35 et 36 m, le 27 octobre à la station D;

en 1960 : 2⁰,3 entre 24 et 25 m, le 25 octobre à la station B.

TABLEAU LVII

Gradients maxima de température, enregistrés par stations, de 1957 à 1960.

Station	Gradient	Profondeur	Date
A	3,8	16 - 17	27.VIII.57
B	2,8	34 - 35	27.X.59
B'	3,1	14 - 15	26.VIII.58
C	3,4	12 - 13	24.VI.58
D	3,3	15 - 16	26.VIII.58
E	2,5	6 - 7	25.VIII.59
F	3,6	13 - 14	24.VI.58
K	2,6	9 - 10	27.VIII.58
L	1,8	8 - 9	26.VIII.57
M	1,7	21 - 22	27.VIII.58
N	2,5	24 - 25	27.VIII.58
P'	2,9	24 - 25	23.IX.59

D'après ce tableau, L et M accusent les gradients les plus faibles de toutes les stations de cette période, en même temps que les puissances du métalimnion y sont parmi les plus faibles (cf. tableau LVI). Mais pour confirmer ces constatations et pouvoir tirer des conclusions sûres quant à la répartition des gradients maxima de température entre les diverses stations ci-dessus, il est nécessaire de disposer d'une série plus complète de résultats. C'est à cela, entre autres, que tend la continuation des grandes expéditions au-delà de 1961.

27.4. La stratification thermique révélée par les profils thermiques transversaux.

A partir des 144 profils transversaux levés de 1959 à 1961, on obtient des renseignements intéressants pour l'ensemble du lac :

- 1°) sur l'état de la stratification thermique à des époques données;
- 2°) sur l'évolution de cette stratification au cours de l'année.

Faisant abstraction des cas où, pendant l'été en particulier, le vent et les seiches thermiques effacent momentanément les sauts thermiques à certains endroits, on observe que ces sauts n'existent pas à toutes les stations simultanément, aussi bien au printemps qu'en arrière-automne. Il faut en déduire que l'apparition et la dispari-

TABLEAU LVIII

Caractéristiques maxima de la stratification thermique pour l'ensemble du lac durant la période de 1959 à 1961.

Date	Nombre maximum de sauts thermiques observés			Sauts thermiques maxima			Thermocline maximum		
	Nombre	Station	Métalim-nion cor-respond.	Station	Ecart therm.	Profondeur corresp.	Station	Thermo-cline	Profondeur
<u>1959</u>									
6.V.	2	13	1 - 5)	26	3,0	1 - 2	26	3,0	1 - 2
	2	53	1 - 4)						
16.VII.	4	21	5 - 18						
	4	32	5 - 19						
	4	43	7 - 18						
	4	51	7 - 23	45	7,8	10 - 14	45	3,7	10 - 11
	4	52	5 - 15						
	4	55	6 - 17						
	4	64	6 - 20						
9.IX.	4	41	14 - 24	65	9,3	19 - 24	64	5,1	20 - 21
	4	43	15 - 23						
<u>1960</u>									
6.IV.	<u>1</u>	-	-	71	2,4	1 - 3	71	1,5	2 - 3
4.V.	<u>1</u>	-	-	51	<u>1,2</u>	8 - 9	51	<u>1,2</u>	8 - 9
2.VI.	3	42	11 - 19	82	6,7	9 - 13	72	5,1	9 - 10
5.VII.	<u>5</u>	15	9 - 23	55	7,5	17 - 20	72	<u>7,3</u>	11 - 12
17.VIII.	4	16	7 - 32						
	4	24	12 - 19	31	7,8	17 - 23	23	3,9	14 - 15
	4	72	24 - 34						
<u>1961</u>									
11.IV.	2	16	5 - 8						
	2	61	1 - 4	62	3,4	2 - 5			
	2	73	1 - 4	82	3,4	4 - 6	82	2,4	4 - 5
	2	82	1 - 6						
20.VI.	4	62	1 - 11	81	5,2	8 - 11	82	3,6	9 - 10
	4	72	3 - 15						
25.VII.	4	31	7 - 29	82	4,3	10 - 13	81	3,0	9 - 10
	4	55	10 - 17						
16.VIII.	4	21	16 - 30						
	4	22	14 - 27	45	<u>10,8</u>	15 - 20	36	<u>7,3</u>	18 - 19
	4	41	13 - 27						
31.X.	<u>1</u>	-	-	81	2,6	30 - 31	81	2,6	30 - 31

tion de la stratification thermique n'ont pas lieu de la même manière et en même temps pour l'ensemble du lac. C'est ainsi que, sur 39 stations, 20 ne présentent pas de saut thermique le 6 mai 1959; en 1960, 30 sur 39 le 6 avril et 31 sur 39 le 4 mai; en 1961, 15 sur 39 le 11 avril.

Il ne nous est pas possible, pour les raisons exposées au début du paragraphe précédent, de déterminer le début et la fin des périodes de saut thermique aux diverses stations des profils transversaux, car ceux-ci ne sont jamais levés à des intervalles inférieurs à 1 mois.

Dans ces profils, on observe aussi que les sauts thermiques n'ont pas partout la même importance et ne sont pas tous situés à la même profondeur simultanément. Le nombre des sauts thermiques coexistants varie également d'un endroit du lac à l'autre et le gradient de température n'est pas identique en chacun des points observés. Il en résulte aussi que le métalimnion varie de structure et de profondeur d'un endroit du lac à l'autre le même jour.

Pour réduire l'ensemble considérable d'observations sur les sauts thermiques accumulées au cours des levés de ces trois ans, nous nous bornons à reporter dans le tableau LVIII les maxima seulement des valeurs obtenues, estimant que ce sont eux les plus intéressants.

Dans ce tableau ne sont groupés que les profils complets, donc levés pour l'ensemble du lac. En avril et mai 1960, de même qu'en octobre 1961, il n'existe que des sauts thermiques simples. Le plus important des sauts apparaît le 16 août 1961 avec un écart de 10,8 situé entre 15 et 20 m à la station 45 (devant Chevroux). Le même jour et à la même station, on enregistre le maximum absolu de la campagne avec un thermocline de 7,3 entre 18 et 19 m, la même valeur étant observée également le 5 juillet 1960 à la station 72 (au large de l'embouchure de l'Arnon), entre 11 et 12 m de profondeur.

De 1959 à 1961, les profondeurs maxima auxquelles on observe des couches de saut thermique sont : 26 m pour le profil 50, 30 m pour le profil 20; 31 m pour le 80; 34 m pour le 70; 36 m pour les profils 10 et 30; 41 m pour le 40 et 45 m pour le profil 60.

La puissance du métalimnion varie également suivant la station et la saison considérées. On note les maxima suivants :

en 1959 : 24 m le 10 septembre à la station 21, entre 4 et 28 m de profondeur
en 1960 : 25 m le 17 août à la station 16, entre 7 et 32 m,
en 1961 : 29 m le 25 juillet à la station 61, entre 9 et 38 m. Cette dernière valeur est le maximum absolu de la période 1959-61.

Quant aux thermoclines, ils figurent pour l'ensemble du lac, dans le tableau LIX;

TABLÉAU LIX

Gradients maxima instantanés de température dans l'ensemble du lac pour la période 1959-1961.

	River	Printemps	Été	Automne	Année
<u>1959</u>					
Gradient	-	3,0	5,1	3,8	5,1
Profondeur	-	1 - 2	20-21	22-23	20-21
Station	-	26	64	42	64
Date	-	6.V	10.IX	14.X	10.IX
<u>1960</u>					
Gradient	-	5,1	7,3	-	7,3
Profondeur	-	9-10	11-12	--	11-12
Station	-	72	72	-	72
Date	-	2.VI	5.VII	-	5.VII
<u>1961</u>					
Gradient	-	3,6	7,3	2,6	7,3
Profondeur	-	9-10	18-19	30-31	18-19
Station	-	82	36	81	36
Date	-	20-VI	16.VIII	31.X	16.VIII

L'évolution du gradient maximum de température vers la profondeur au fur et à mesure que la saison avance apparaît bien sur ce tableau. Par contre, il est difficile encore, malgré trois ans de recherches, de déceler si certaines stations sont favorisées par rapport aux autres quant à l'existence de thermoclines importants.

Il est intéressant aussi d'examiner avec quelle fréquence les divers gradients de température apparaissent dans ces levés. C'est ce que nous montrons dans le tableau LX où, pour les gradients supérieurs à 1,5, seules les valeurs 2,0; 2,5; 3,0 et 3,5 sont mentionnées; les intermédiaires ont été supprimées pour ne pas alourdir cette présentation.

TABLÉAU LX

(cf. page suivante)

TABLERAU LX

Fréquence d'apparition des gradients de température pour l'ensemble du lac durant la période 1959-1961.

Gradient (degrés)	Fréquence moyenne (%)	Fréquences extrêmes (%)
0,9	21,0	7,1 à 38,8
1,0	16,2	9,1 à 27,3
1,1	11,2	7,5 à 15,3
1,2	8,0	3,1 à 12,8
1,3	7,4	0 à 18,2
1,4	5,5	2,0 à 18,2
1,5	3,9	0 à 10,0
2,0	2,6	0 à 9,1
2,5	1,3	0 à 4,0
3,0	0,8	0 à 2,5
3,5	0,4	0 à 1,7
4,0	0,5	0 à 1,6
au-dessus	0,2	0 à 0,8

Ainsi, seuls les gradients de 0,9 à 1,1 degré par mètre se rencontrent plus d'une fois sur dix. Ceux de 3,0 à 7,3 degrés par mètre sont rares dans la période considérée.

Pour les raisons déjà énumérées à propos des stations A à P', nous renonçons à calculer les moyennes des températures de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion de l'ensemble du lac et durant la période entière des profils thermiques. Par le tableau LXI, nous nous bornons à mettre en évidence et séparément ces températures pour chacun des levés complets exécutés durant ces trois ans.

TABLERAU LXI

(cf. page suivante)

TABLERAU LXI

Températures moyennes de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion pour les profils levés de 1959 à 1961.

Date	Epilimnion	Métalimnion	Hypolimnion
<u>1959</u>			
6.V	11,7	9,9	6,8
16.VII	21,2	15,6	7,7
9.IX	17,5	12,7	6,8
<u>1960</u>			
6.IV	9,3	7,8	5,6
4.V	10,6	8,5	6,6
2.VI	15,3	11,8	6,7
5.VII	19,0	14,2	7,1
17.VIII	17,4	12,6	7,4
<u>1961</u>			
11.IV	10,3	8,6	6,0
20.VI	18,4	14,7	8,9
25.VII	17,3	13,8	7,9
16.VIII	18,2	14,2	7,9
31.X	12,1	10,4	7,6

On tire de ce tableau les valeurs moyennes suivantes par mois :

TABLERAU LXII

Evolution mensuelle des températures moyennes de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion pour les profils levés de 1959 à 1961.

Mois	Epilimnion	Métalimnion	Hypolimnion
Avril	9,8	8,2	5,8
Mai	11,1	9,2	6,7
Juin	16,9	13,2	7,8
Juillet	19,2	14,5	7,6
Août	17,8	13,4	7,7
Septembre*	17,5	12,7	6,8
Octobre *	12,1	10,4	7,6

Les mois marqués *, une seule série de mesures a été effectuée.

La fig.59 illustre les variations figurant dans ce tableau et les courbes en pointillé correspondant aux résultats qu'on obtiendrait vraisemblablement en disposant de plusieurs séries de déterminations pour les mois de septembre et d'octobre.

27.5. Existence d'une stratification thermique fine.

Au début du paragraphe 27, nous avons défini la limite au-dessous de laquelle nous considérons comme saut thermique l'écart de température entre deux couches d'eau voisines d'un mètre. Cette limite correspond à un gradient de 1,0, avec tolérance jusqu'à 0,9.

Or, on constate, tout particulièrement au moment de la disparition automnale du saut thermique ainsi défini, qu'il subsiste pendant quelque temps encore et approximativement aux niveaux où ont été constatés les derniers sauts thermiques, des écarts de température par mètre plus grands qu'aux niveaux où il n'y avait pas de sauts thermiques auparavant. C'est ainsi, par exemple, que le 3 novembre 1959, un saut thermique de 1,6 et un de 0,9 existent entre 21 et 22 m, ainsi qu'entre 23 et 24 m. Le 10 novembre, l'écart est de 0,2 entre 23 et 24 m, alors qu'au-dessus et au-dessous, sur une grande hauteur, il est de 0,1 par mètre ou même nul. Le 17 novembre, l'écart est de 0,8 entre 41 et 42 m, alors qu'au-dessus et au-dessous il est de 0,1 ou 0,2. Le 24 novembre, l'écart est de 0,4 entre 32 et 33 m, alors qu'au-dessus et au-dessous on note 0 à 0,1 par mètre. Et ainsi de suite. C'est donc que la stratification s'efface peu à peu seulement, malgré l'"overturn" dû au brassage par les vents.

Le 3 novembre 1959 aussi, mais cette fois en dehors de la zone où sont observées les derniers sauts thermiques, mais en même temps qu'eux cependant, on observe un écart de 0,5 entre 28 et 29 m, alors que les couches sous-jacentes n'accusent que des différences de 0,2 à 0,3.

On fait des observations analogues en automne 1960 et 1961.

De la même manière, on constate la naissance de sauts thermiques de faible puissance avant l'apparition de ceux que nous avons défini plus haut. Ainsi, le 23 mars 1959, au-dessus du saut thermique proprement dit et qui se situe entre 3 et 4 m (écart thermique: 1,0/m), on observe un écart de 0,5/m alors qu'entre les autres couches d'un mètre d'épaisseur, il n'est que de 0,1 à 0,2/m. Le 19 mars, on a aussi 0,2 entre 2 et 3 m, mais partout ailleurs 0,05 d'écart.

Durant la période pendant laquelle existe la stratification thermique au sens où nous l'avons définie plus haut, on observe aussi des sauts thermiques plus faibles que 1,0/m et l'exemple le plus frappant est illustré par la fig.57. Le 2 août 1961, en effet, en plus des cinq sauts thermiques indiqués dans la légende de la figure, on en observe dix plus faibles entre les niveaux 12 et 45 m, sauts

dont les principaux présentent des écarts de 0,85; 0,65; 0,6; 0,55; 0,45 et 0,25 et qui sont situés entre des différences de températures par mètre beaucoup plus petites.

On voit donc que l'existence des sauts thermiques est un phénomène très répandu pendant une bonne partie de l'année dans le lac. Il est la cause d'une structure feuilletée des couches d'eau du point de vue thermique. Cette dernière est plus ou moins fine suivant l'endroit et la période considérés. Elle se révèle d'autant mieux que les sondages se font avec une précision plus grande et à des intervalles verticaux plus faibles. Toutefois, nous nous contentons d'étudier la stratification thermique dans la limite des écarts (de température et de niveau) que nous avons défini précédemment, et cela pour des raisons d'exactitude de travail. En effet, même si la précision des mesures de température permet d'aller au-delà des lectures que nous faisons actuellement, il faudrait recourir pour déterminer des écarts de niveau d'un demi-mètre et moins à l'aide de sondages au fil, à une précision parfaitement illusoire et cela même lorsque le lac est parfaitement calme en surface, car les erreurs verticales dues aux dérives sous-lacustres sont alors de l'ordre de plusieurs décimètres encore.

27.6. Comparaison de la stratification thermique du lac de Neuchâtel avec celle d'autres lacs.

Pour voir si la stratification thermique est semblable dans les trois lacs du pied du Jura simultanément, nous mesurons, le même jour, la température dans les eaux de Neuchâtel, de Bièvre et de Morat, ce qui donne les résultats du tableau LXIII.

TABLEAU LXIII

(cf. page suivante)

TABLEAU LXIII

Comparaison des températures simultanées des lacs de Neuchâtel, de Bienn e et de Morat.

	Neuchâtel		Bienn e		Morat	
	Degrés	Pro- fondeur	Degrés	Pro- fondeur	Degrés	Pro- fondeur
<u>18 juillet 1961</u>						
Surface	16,25	-	15,8	-	17,8	-
Sauts thermiques	14,5 - 11,3	15-17	13,35-12,1 10,6 -9,65	18-19 22-23	16,2-9,35 8,8-6,95	9-13 14-16
Ecart s thermiques du métalimnion	3,2	15-17	3,7	18-23	10,15	9-16
Gradient de tem- pérature	1,2 2,0	15-16 16-17	1,25 0,95	18-19 22-23	1,6 0,9 2,35 1,0 1,0 0,9	9-10 10-11 11-12 12-13 14-15 15-16
Fond	4,85	115	5,85	45	4,9	45
<u>12 septembre 1961</u>						
Surface	18,55	-	18,3	-	19,6	-
Sauts thermiques	18,2 - 17,2 17,2 - 16,2 16,0 - 15,1 12,75- 11,55 11,55- 10,0	5-6 7-8 11-12 23-24 25-26	17,1 -16,1 13,65- 9,2	6-7 20-23	18,0-16,95 15,7- 8,8 8,25- 7,25	7-8 10-15 17-18
Ecart s thermiques du métalimnion	8,2	5-26	7,9	6-23	10,75	7-18
Gradient de tem- pérature	1,0 1,0 0,9 1,2 1,55	5-6 7-8 11-12 23-24 25-26	1,0 0,9 1,4 2,2	6-7 20-21 21-22 22-23	1,05 0,9 2,0 1,2 1,9 0,9 1,0	7-8 10-11 11-12 12-13 13-14 14-15 17-18
Fond	5,15	111	6,75	43	5,4	39

Pour les deux dates considérées, le lac de Bièvre est le plus froid des trois en surface, mais le plus chaud au fond. Les deux fois aussi, l'écart thermique du métalimnion est très semblable entre Bièvre et Neuchâtel, mais différent pour Morat. Par contre, le nombre, la valeur et la profondeur des sauts thermiques diffèrent complètement de l'un à l'autre.

Par comparaison avec nos profils thermiques, les différences de température entre les trois lacs, le même jour, sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées d'un endroit à l'autre chez nous. Il est dès lors difficile de voir, en partant des deux séries de mesures du tableau LXIII seulement, s'il existe une différence de répartition simultanée des sauts thermiques entre les trois lacs. Il est donc nécessaire de poursuivre les mesures comparatives et de les étendre à plusieurs autres années encore afin d'éliminer l'influence du climat annuel sur cette question.

Avant nos travaux, Quartier (1947) indique que la couche de saut thermique oscille entre 5 et 30 m dans notre lac au cours de l'année. Portner (1951a, p.35), reprenant les mêmes données, les compare simultanément à celles du lac Wigry en Pologne où cette couche oscille entre 2 et 5 m de profondeur, à celles de la Baltique (entre 15 et 25 m), ainsi qu'à celles du lac de Morat pour lequel il note 5 à 20 m de profondeur. A propos des profondeurs entre lesquelles évolue la couche de saut thermique, Findenegg (1932) mentionne 15 à 30 m pour le Würthersee en Autriche et Hubault (1947) 10 à 30 m pour le Léman, ainsi que 10 à 18 m pour le lac d'Annecy. Dès lors, en descendant jusqu'à 45 m ainsi que nous l'avons démontré, la couche de saut thermique dépasse largement chez nous les profondeurs observées précédemment dans d'autres lacs, ainsi que les limites assignées par Quartier (1947) pour celui de Neuchâtel.

Elster (1960) indique qu'au Bodan (Obersee) la stratification thermique commence au début de mars et subsiste jusqu'en décembre, alors que dans l'Untereee elle finit plus tôt. Ainsi, dans le lac de Constance, la stratification thermique dure deux mois de plus que chez nous, alors que dans l'Unterssee elle est sensiblement de même durée que dans notre lac.

L'Institut limnologique de la ville de Constance (Anstalt f. Bodenseeforschung d. Stadt Konstanz, 1957-1962) signale, à propos des mesures thermiques exécutées dans l'Ueberlingersee durant les années 1957 à 1961, qu'on constate dans cette partie du Bodan une faible stratification thermique dans le premier tiers d'avril, disparaissant ensuite vers le milieu du mois pour réapparaître fin avril-début mai. Il semble donc qu'il s'agisse d'un phénomène analogue à celui que nous constatons pour notre lac à la baie d'Auvergnier et qui, comme pour nous, se produit régulièrement aux mêmes dates chaque année.

Remarquons d'ailleurs que la fixité de la période d'apparition des couches de saut thermique n'est pas l'apanage exclusif des grands lacs, car Yoshimura (1932b) constate aussi, après 6 ans d'étude du Takasuka Pond, que le saut thermique apparaît régulièrement à fin avril dans ce petit lac japonais de 3 hectares.

La fin de la stratification thermique est à peu près fixe également : Auerbach et Rottengatter (1960) la signalent régulièrement en octobre pour l'Untersee et Scheffelt (1921) en novembre pour le Chiemsee.

En poursuivant les observations durant plusieurs années de manière à évincer la plus possible les effets climatiques annuels et en étendant les investigations à de nombreux lacs simultanément, on arriverait à déterminer les dates auxquelles apparaît et disparaît la stratification thermique, en fonction des conditions météorologiques des semaines qui précèdent le phénomène. On verrait aussi si ces dates sont caractéristiques ou non de la morphologie et du site de chaque lac étudié.

On connaît fort peu de choses sur l'existence de sauts thermiques multiples dans d'autres lacs. A côté des constatations faites par Müller (1933 et 1936) dans le petit lac de Sacrow près de Potsdam, et rapportées par Portner (1951a), seul Hutchinson (1957) mentionne la coexistence de deux ou trois sauts superposés au milieu de l'été dans deux grands lacs canadiens : le Grand lac des Esclaves et le lac La Ronge.

On dispose également de peu de données précises sur la valeur du gradient maximum de température dans d'autres lacs. Rivier (1936) indique un maximum de $6,0^{\circ}$ entre 10 et 11 m de profondeur pour le lac de Morat le 23 août 1934. Cette valeur est voisine des maxima que nous constatons chez nous. Quant à Mucke (1956), il signale une fois un gradient de 6° à 20 m de profondeur dans la période 1952-1955 pour l'Ueberlingersee.

On trouve encore moins de renseignements sur la variation de profondeur du saut thermique suivant l'endroit considéré dans d'autres lacs. Auerbach et Rottengatter (1960) trouvent, dans l'Untersee, en juillet 1956, 1957 et 1958, un saut thermique entre 7 et 9 m de profondeur dans la partie dénommée Gnadensee mais, simultanément, rien dans la partie appelée Markelfinger Winkel. Toujours dans le même lac, en août 1956 et 1957 aucun saut thermique n'est décelable à ces mêmes endroits, tandis qu'en août 1958 le saut thermique se situe entre 10 et 12 m dans le Gnadensee et, simultanément, entre 7 et 9 m dans le Markelfinger Winkel.

L'hypolimnion minimum, autrement dit la zone lacustre située entre le fond du lac et la profondeur maximum atteinte par les sauts thermiques au cours de l'année, représente 44,1% du volume total du lac de Neuchâtel si on prend 45 m pour cette profondeur maximum. Dès lors, le rapport du volume de l'hypolimnion minimum au volume des deux autres zones thermiques (épilimnion + métalimnion) est de $\frac{44}{50}$ pour notre lac, alors que Thienemann (1928) a obtenu $\frac{50}{56}$ pour l'Untersee.

Nous examinerons plus loin les relations du saut thermique avec les autres mesures et dosages effectués au cours de nos recherches

28. Le bilan thermique du lac de Neuchâtel.

La notion de "budget calorifique" (Heat Budget) a été introduite dans la limnologie par Birge (1916a) et sous trois formes:

- 1) le budget calorifique brut ou budget calorifique global, quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau du lac de 0° au maximum de température de l'été. Cette notion est inapplicable à notre lac dont la température moyenne n'atteint jamais 0°;
- 2) le budget calorifique annuel ou provision annuelle de chaleur (Annual Heat Budget), quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau du lac de la température minimum d'hiver à la température maximum d'été;
- 3) la chaleur distribuée par le vent (Wind-distributed Heat) ou apport calorifique d'été (Summer Heat-income), quantité de chaleur nécessaire pour amener l'eau du lac de la température de 4° à la température maximum d'été. Birge admet, en effet, que les mouvements de l'eau dus aux vents sont responsables de la pénétration des calories dans le lac lorsque la température de celui-ci est supérieure à 4°, d'où la dénomination de cette forme de budget-calorifique. Notons que cette troisième quantité de chaleur est la seule, parmi les trois mentionnées, à pouvoir être calculée pour un lac lorsque le minimum de la température d'hiver fait défaut, ce qui est souvent le cas.

Dans notre étude, nous ne nous occupons que des budgets calorifiques 2) et 3).

Forel (1892-1904, tome 2, p.400 sq) exprimait le budget calorifique d'un lac par le nombre de calories nécessaires pour faire passer la température d'une colonne d'eau de 1 cm² de base et de hauteur égale à la profondeur maximum du lac, du minimum d'hiver au maximum d'été. Par contre, Birge procède à un calcul analogue mais en utilisant la profondeur moyenne du lac comme hauteur de la colonne d'eau, ce qui permet de mieux comparer entre eux des lacs de profondeur maximum et de grandeur différentes. Dans son travail, Birge montre aussi qu'il suffit, pour pouvoir calculer les budgets calorifiques annuels de divers lacs, de déterminer les températures moyennes du minimum d'hiver et du maximum d'été en un seul point où la profondeur est suffisamment grande. En effet, l'écart entre les extrêmes annuels à cet endroit est très peu différent en réalité de celui calculé sur les extrêmes des températures moyennes de l'ensemble du lac. D'autre part, il est pour ainsi dire impossible d'avoir à disposition des mesures quotidiennes en un grand nombre de points simultanément et durant plusieurs années successives, surtout pour les grands lacs.

Birge et Juday (Bull-Bur.Fisheries, 32.(1914, p.1912) ont montré qu'en procédant ainsi, l'erreur dans le budget calorifique ne dépasse pas 3% de la valeur réelle de ce budget.

Aussi, désirant pouvoir comparer nos résultats à ceux de Birge et des autres auteurs qui se sont occupés de divers lacs, nous contenterons-nous d'utiliser la méthode dont nous venons de parler et cela en employant les moyennes pondérées obtenues à partir des températures mesurées à la station Z et rapportées aux volumes correspondants de l'ensemble du lac,

La provision annuelle de chaleur du lac de Neuchâtel s'obtient en multipliant la différence entre le minimum d'hiver et le maximum d'été des températures moyennes par 6420 qui n'est autre que la profondeur moyenne de notre lac en cm. La provision est alors exprimée en cal-gr. Ce mode de calcul est analogue, d'ailleurs, à celui d'Hubault (1947) pour les lacs de l'Est de la France.

En retranchant 4° de la température moyenne du maximum d'été et en multipliant le résultat par la profondeur moyenne en cm, on obtient l'apport calorifique d'été ou chaleur distribuée par le vent, exprimée également en cal-gr.

Nos résultats figurent dans le tableau LXIV.

TABLEAU LXIV

Provision annuelle de chaleur et apport calorifique d'été pour le lac de Neuchâtel durant la période 1959-1961

Minimum d'hiver		Maximum d'été		Différence de température	Provision de chaleur		Apport calorifique d'été
Date	Température	Date	Température		Période	Cal-gr.	
		19.VIII.58	9,38	4,70	1958-59	30174	34540
3.III.59	4,68	14.VII.59	8,50	3,82	1959	24524	28890
16.II.60	4,90	28.VI.60	8,82	3,60	1959-60	21112	
				3,92	1960	25166	30944
21.II.61	4,90	27.VI.61	9,01	3,92	1960-61	25166	
				4,11	1961	26386	32164
20.III.62	4,55			4,46	1961-62	28633	
				Moyenne :		25815	31635

Nous admettons donc 25800 cal-gr pour la provision annuelle de chaleur et 31600 cal-gr pour l'apport calorifique d'été. Le tableau LXV permet de comparer ces valeurs à celles obtenues pour d'autres lacs du monde au moyen des données extraites des travaux de Birge (1916a), de Hutchinson (1938) et d'Hubault (1947) en particulier.

TABLEAU LXV

Lacs dont les caractéristiques calorifiques sont semblables à celles du lac de Neuchâtel.

Nom	Pays	Latitude N.	Altitude m.	Long. en km	Larg. en km	Surf. en km ²	Profond.		Provision annuelle cal-gr	Apport ca- lorifique d'été cal-gr
							max.	mo.		
Neuchâtel	Suisse	46°54'	429	38,3	8,1	214,6	153	64	25800	31600
Loch Katrine	Ecosse	56°15'	111				151	61	25800	25800
Tegernsee	Allemagne	47°45'	725				71	40	25400	22200
Orta	Italie	45°50'	290	13,7	2,4	18,2	143	71	25400	25400
Annecy	France	45°54'	447	16,8	3,5	21,6	81	42	25200	23200
Quatre Cantons	Suisse	46°58'	434	39,8	4,2	113,6	214	128	24500	24500
Bolsena	Italie	42°35'	305	13,8			146	78	31600	31600
Loch Lochy	Ecosse	56°59'	28				162	70	31500	31500

le Loch Katrine est situé à 90 km et le Loch Lochy à 150 km au NW d'Edimbourg, le Tegernsee à 48 km au S de Munich et le Lago di Bolsena à 88 km au NW de Rome.

Après Birge, nous constatons aussi et selon nos propres résultats, qu'il n'existe pas de changement du budget calorifique avec la latitude entre 40° et 60° N, à condition que les profondeurs moyennes des lacs ne soient pas trop différentes les unes des autres. C'est tout particulièrement le cas pour notre lac et le Loch Katrine dont les profondeurs maximum et moyennes sont les mêmes, bien que ces deux masses d'eau soient séparées par 9°21' de latitude.

Par contre, le lac des Quatre Cantons, bien que situé sur le même parallèle que Neuchâtel, possède un budget calorifique qui diffère de plus de 5 % du nôtre, car sa profondeur moyenne représente plus du double de celle de notre lac.

Chapitre dixième : MESURES PHYSICO-CHIMIQUES.

29. Transparence.

Dans le présent travail, toutes les mesures de transparence se rapportent à des déterminations faites au moyen du disque de Secchi de 30 cm de diamètre.

Si nous sommes resté fidèle à cette ancienne méthode, c'est parce qu'elle présente, malgré son aspect un peu arbitraire, une très grande simplicité d'application "sur le terrain" et parce qu'elle est si généralisée qu'il nous est facile d'en comparer les résultats à ceux d'autres auteurs. C'est une opinion semblable que Brajnikof, Francis-Boeuf et Romanovsky (1943) ont exprimé lorsqu'ils qualifient les résultats obtenus de cette manière de "données gardant toute leur valeur pour les comparer entre elles".

Nous avons décrit au paragraphe 20.4 la technique de nos mesures par cette méthode.

On admet jusqu'ici et très généralement pour la plupart des lacs que la transparence augmente lorsque la température baisse et lorsque la quantité de plancton diminue, alors qu'elle diminue dans le cas contraire. C'est ce que Schmassmann (1920) a particulièrement bien montré pour le lac de Davos. Robert (1921) est arrivé à la même constatation lors de ses travaux sur le lac de Neuchâtel.

À côté de cela, la couleur de l'eau et les matières en suspension affectent fortement la transparence. C'est ainsi que d'après Juday et Birge (1933) les lacs les plus colorés accusent les transparences les plus faibles. Edmonson (1956) est arrivé d'ailleurs à une conclusion identique. Quant à Sauberer (1947), il a prouvé, par ses études des lacs de Carinthie, que les lectures au disque de Secchi ne renseignent pas sur la transparence propre de l'eau, mais sur le trouble en suspension. En plus de cela, Ruttner et Sauberer (1936) ont aussi montré l'influence du nanoplancton sur la transparence. Enfin, le cas le plus typique a été démontré par Worthington (1930) pour le Lac Victoria dont l'eau accuse une teneur exagérée en plancton et en vase très fine, de sorte que la transparence y tombe à 0,6 m.

Ces dernières années, Faust (1960) a prouvé, à propos du lac de Constance, que la transparence diminue lorsque la pollution augmente.

29.1. Résultats obtenus avant la campagne actuelle.

Grâce au travail de Robert (1921), nous possédons quelques données datant du début du siècle et dues à lui-même ainsi qu'à Fuhrmann, données dont nous extrayons les extrêmes comme suit :

		<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>	
1900 :	18.VI et 24.X	4,00 m	11,0 m	22.V
1916 :	25.VII	2,50	-	
1917 :	19.VI	2,70	<u>11,80</u>	19.XI
1918 :	2.V	<u>2,00</u>	11,50	28.II
1919 :	10.VII; 5 et 23.VIII	<u>2,00</u>	6,30	16.VI
1920 :	22.VI	2,80	10,00	3.III

L'amplitude de cette série est donc de 9,80 m.

En 1944 et 1945 (Sollberger, 1946, p.86), nous avons pu établir la courbe de variation de la transparence mesurée devant Champ Bougin; nous y reviendrons tout à l'heure à propos de la station D. On voit d'après cette courbe que la transparence suivait alors les variations considérées comme normales dans les lacs à cette époque, passant d'une forte transparence en hiver à une plus faible en été.

De 1943 à 1948, Quartier (document non publié) a fait exécuter de nombreuses mesures par l'Inspection de la pêche du canton de Neuchâtel. Elles sont de deux sortes : des mesures presque quotidiennes, du 13 juin 1943 au 7 septembre 1946 à 2 km environ au large de Neuchâtel, par 100 m de fond, autrement dit légèrement à l'E de notre station 22, d'une part et des séries de déterminations le même jour chaque fois, sur un parcours très proche du grand axe du lac et parallèle à lui, d'autre part. Grâce à l'amabilité de Quartier, nous avons pu calculer les moyennes mensuelles des mesures quotidiennes en question et nous les reportons, avec les extrêmes instantanés, dans le tableau LXVI.

TABEAU LXVI

(cf. page suivante)

TABLEAU LXVI

Transparences moyennes et extrêmes mesurées au large de Neuchâtel au moyen du disque de Secchi durant la période 1943-1946.

	1943	1944	1945	1946
<u>Moyennes.</u>				
Janvier	-	11,13	8,85	<u>12,45</u>
Février	-	<u>11,57</u>	8,90	8,53
Mars	-	10,05	7,69	10,59
Avril	-	6,79	6,37	7,95
Mai	-	5,56	3,62	4,70
Juin	<u>2,47</u>	3,78	<u>3,04</u>	3,67
Juillet	2,81	<u>2,72</u>	3,51	3,01
Août	3,80	2,74	4,31	<u>2,72</u>
Septembre	4,63	4,24	3,58	3,50
Octobre	6,64	5,23	5,65	-
Novembre	6,60	5,80	7,64	-
Décembre	9,59	7,63	<u>11,07</u>	-
Hiver	-	<u>10,92</u>	8,48	10,52
Printemps	-	5,38	4,34	5,44
Eté	3,75	3,23	3,80	<u>3,08</u>
Automne	7,61	6,22	8,12	-
Année	-	6,44	6,19	-
<u>Extrêmes.</u>				
Minimum	1,80	1,95	2,30	2,40
Date	24.VI	11.VII	30.V	14.VII
Maximum	12,40	14,90	13,90	14,00
Date	29.XII	18.I	15.XII	11.1

Les extrêmes des moyennes mensuelles sont soulignés par année et ceux des moyennes saisonnières pour la période entière.

L'Inspection de la pêche a procédé aux déterminations de la deuxième catégorie en parcourant le lac parallèlement à son grand axe, et en partant de la Tène (môle de la Thièle) en direction d'Yverdon.

Fig.59.

LAC DE NEUCHATEL

VARIATION DES TEMPERATURES MOYENNES DE L'EPIIMNION,
DU METALIMNION ET DE L'HYPOLIMNION SELON LES PROFILS

LEVES DE 1959 A 1961

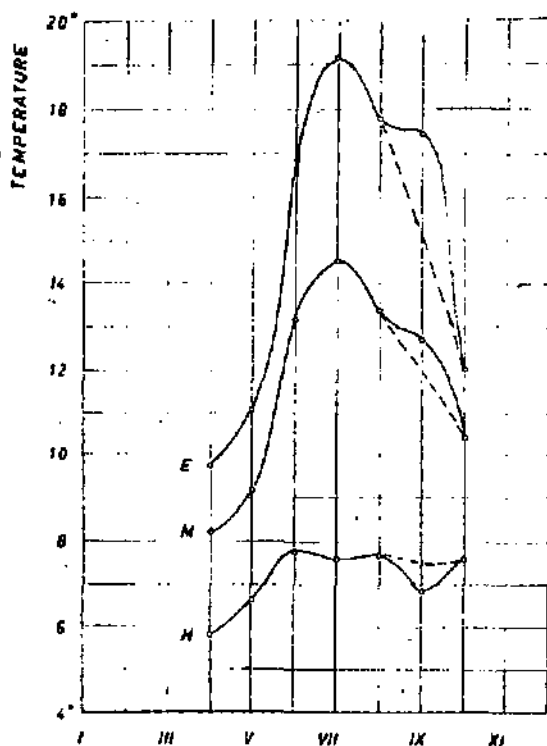


Fig.60.

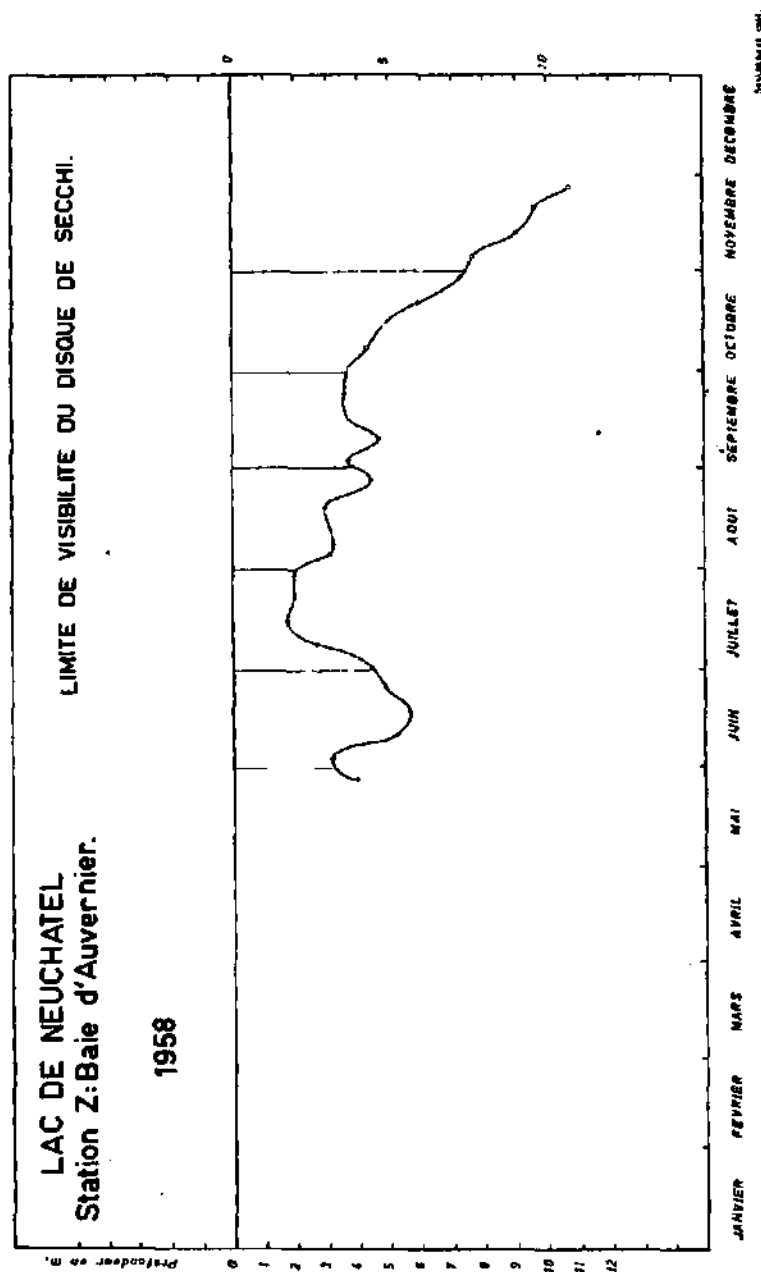


Fig. 61.

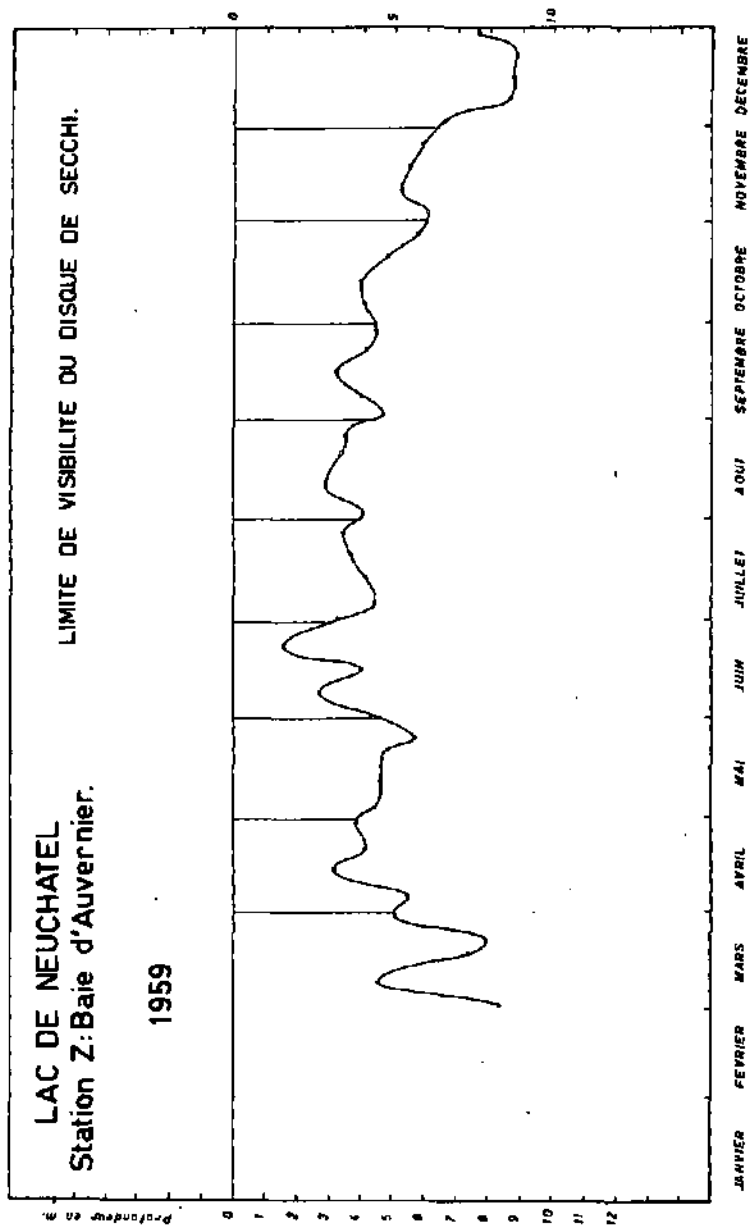
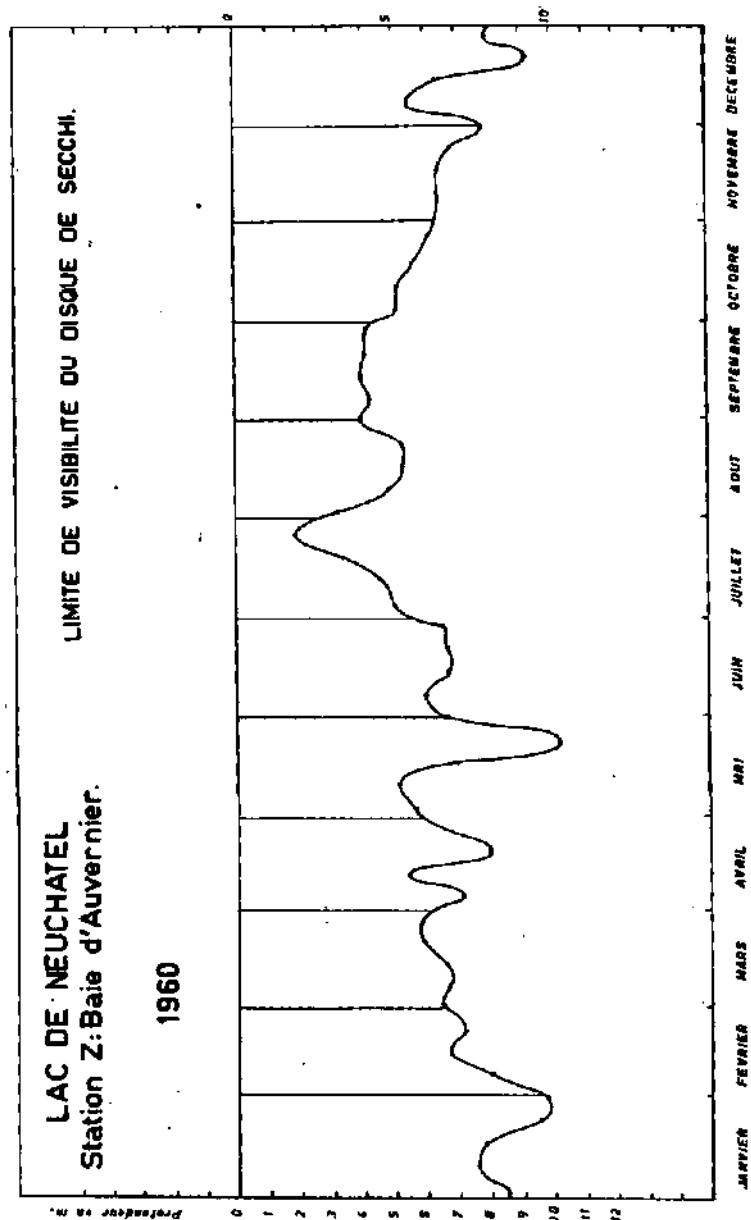


Fig.62.



La transparence a été mesurée toutes les 10 min environ, autrement dit à des intervalles d'à peu près 600 m. On a ainsi une bonne image des écarts de transparence qui peuvent se rencontrer dans une grande partie du lac presque simultanément. De ces nombreuses mesures, nous tirons les extrêmes et les moyennes qui forment le tableau LXVII.

TABLEAU LXVII

Transparences extrêmes et moyennes mesurées le même jour en profil longitudinal, en 1943.

Date	Minimum			Maximum			Ecart s		Transparence moyenne
	Transp.	Heure	Station	Transp.	Heure	Station	Transp.	Distance	
17.IV	6,00	1035	24	9,10	1425	Vaum.	3,10	17 km	7,44
8.V	5,70	0750	12	9,80	0845	Serr.	4,10	6 "	8,75
22.V	3,50	1020	Monr.	5,80	1540	Port.	2,30	7 "	4,61
7.VI	3,35	1535	43	5,20	1500	33	1,85	4 "	4,45

Les numéros des stations sont ceux utilisés pour nos profils transversaux; les abréviations signifient: Vaum=devant Vaumarcus; Serr=devant Serrières; Port=au large de Portalba et Monr=au large de Monruz.

D'après les tableaux LXVI et LXVII, les transparences de 1,80 m en juin 1943 et de 14,90 m en janvier 1944 constituent les extrêmes absolus de la période, tandis que les moyennes mensuelles oscillent entre 2,47 m et 12,45 m au large de Neuchâtel. Pour la période également, c'est bien l'hiver qui enregistre le maximum (10,92 m) et l'été le minimum (3,08 m). Mais il est surprenant de voir par le tableau LXVII que le même jour et en moins d'une heure, on enregistre une différence de transparence de 4,10 m entre deux points distants de 6 km seulement d'une part et que les écarts d'une journée croissent en même temps que la transparence moyenne d'autre part. Cette dernière est calculée en laissant de côté les mesures de transparence pour lesquelles le fond du lac est visible.

29.2. Résultats obtenus au cours de la campagne actuelle.

29.2.1. Transparence aux stations Z et D.

Les 173 mesures effectuées à la station Z de 1958 à 1961, rendant compte de l'évolution hebdomadaire de la transparence dans la baie d'Auvernier. Les fig. 60 à 63 illustrent cette évolution. La courbe représentative, quoique soumise à des écarts très marqués à certains

moments, indique, par son allure générale, que la transparence est faible en été (en juin et juillet surtout) et plus forte en automne et en hiver. On remarque aussi qu'en 1958 et 1959 n'apparaissent pas les écarts brusques et très marqués qui caractérisent les autres années, soit un écart fin mai 1960 et deux fin mars et fin juin 1961. Ces écarts sont en relation avec les mouvements du lac qui ont provoqué des variations de hauteur des isothermes à cette époque.

Selon notre fig. 64 se rapportant à 1960 et choisis comme exemple, la courbe des transparences eut, de décembre à mai, les fluctuations de celle représentant l'ensemble des diatomées. Mais le parallélisme de ces variations disparaît de juin à novembre. Les autres années se présentent de manière analogue.

Dans cette fig., nous reportons également les variations de la teneur en ions Ca^{++} dont la courbe accuse une baisse marquée dès le début de juin et qui correspond à une diminution de la teneur en sels de Ca dissous du fait des phénomènes de la décalcification estivale. La teneur en ions Ca^{++} reste relativement basse jusqu'à fin octobre, autrement dit jusqu'à la fin de la stratification thermique.

Les phénomènes de décalcification estivale se traduisent par la mise en liberté de calcite dont la présence rend l'eau trouble, ce qui contribue à faire diminuer la transparence de celle-ci.

Nous verrons, plus loin, que la majorité du plancton dans notre lac est formée de diatomées. Il n'est pas abusif, dès lors, de remplacer ici le terme "ensemble des diatomées" par celui plus bref de plancton.

Nous venons de voir que les fluctuations de détail des courbes de transparence et de plancton sont parallèles. Prises d'une manière générale pour la période de décembre 1959 à mai 1960, ces courbes représentent une valeur moyenne presque constante aussi bien pour la teneur en plancton que pour la transparence, cette dernière étant comprise entre 6 et 10 m. Si l'on compare l'allure générale des courbes correspondantes pour 1961 (cette courbe du plancton figure plus loin au chapitre "Aperçu hydrobiologique"), on constate que la transparence diminue nettement alors que la teneur en plancton augmente. Revenons à notre fig. 64 selon laquelle la teneur en Ca dissous est constante. On peut conclure, en tenant compte de ce qui précède, que la transparence de décembre à mai est régie par la teneur en plancton et les variations de celle-ci.

A partir de juin, la teneur en plancton diminuant, la transparence devrait augmenter; or, c'est l'inverse qui se produit. Par contre, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, la teneur en Ca dissous diminue par la décalcification estivale et le trouble qui en résulte commande la baisse de transparence. Lorsque le minimum de la teneur en Ca dissous est atteint, la transparence minimum est atteinte simultanément, en l'occurrence le 26 juillet 1960. Ensuite, la teneur en Ca dissous a tendance à augmenter lentement et la transparence également; le trouble de l'eau diminue donc. Enfin, vers la mi-novembre à une teneur en Ca dissous plus élevée au détriment des sels calciques en

Fig. 63.

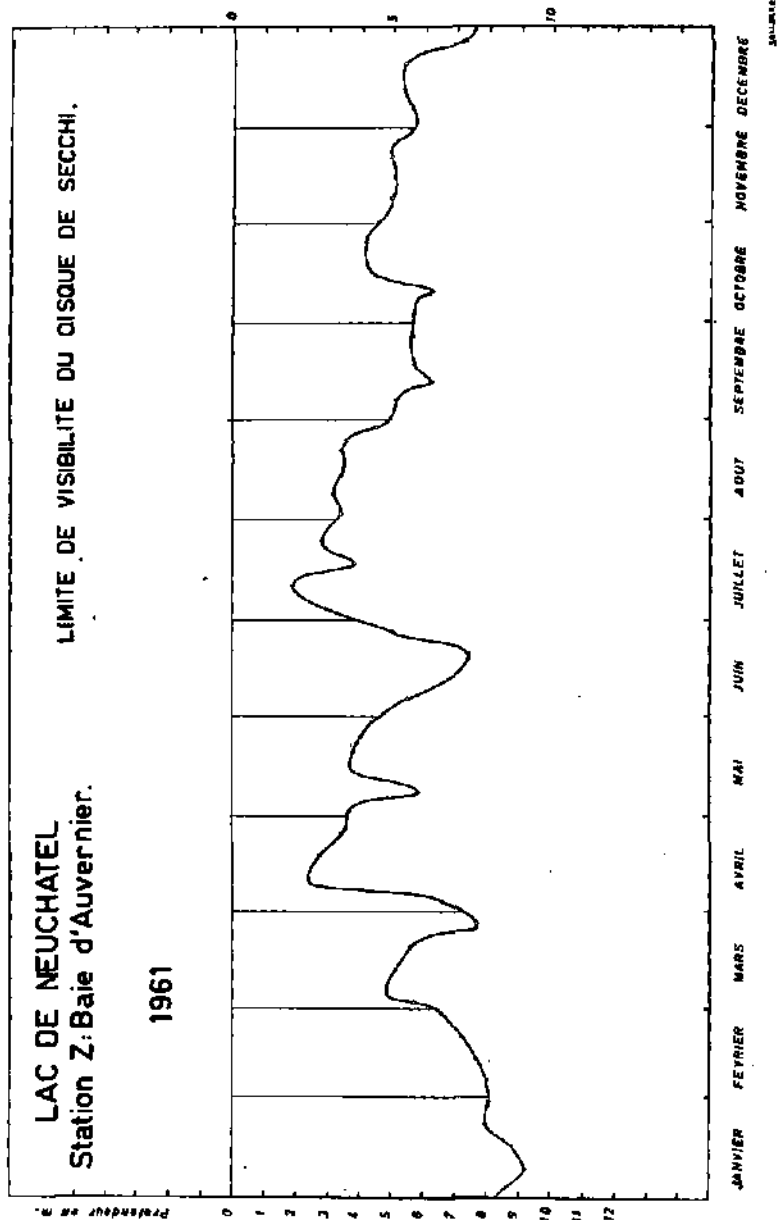
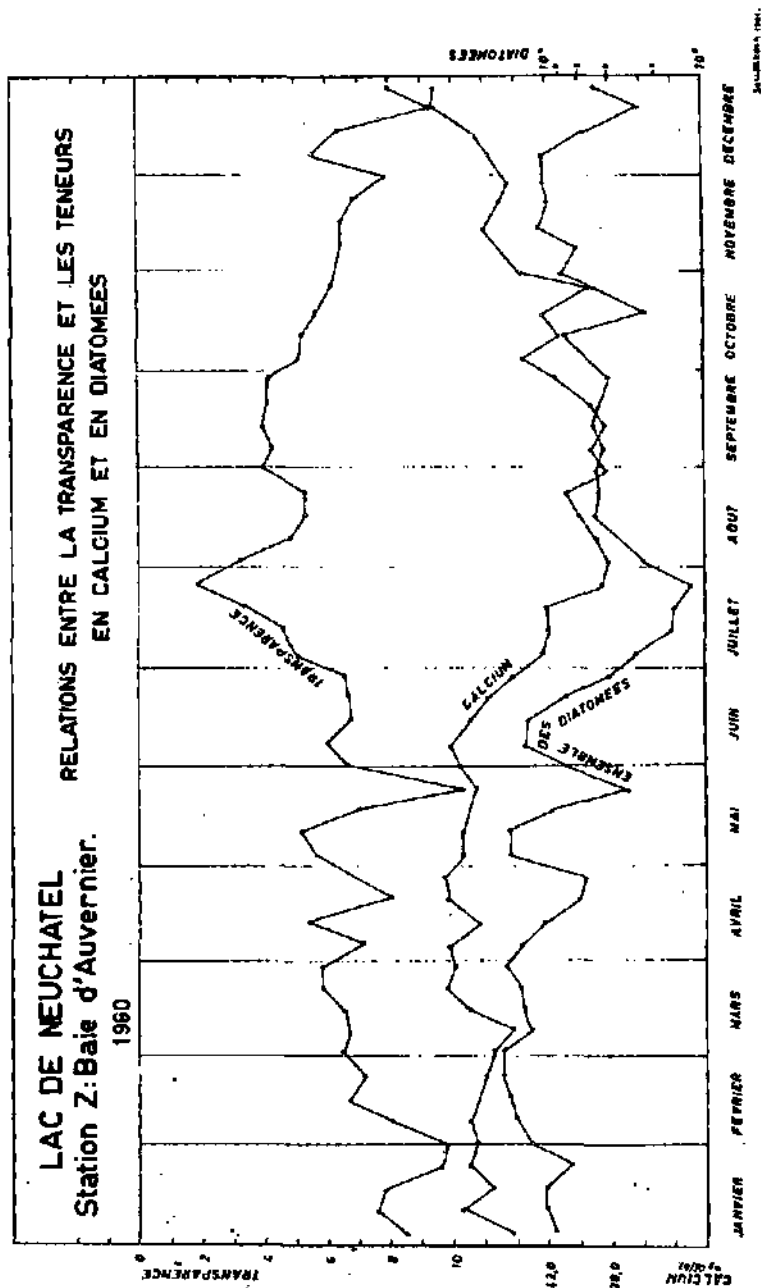


Fig 84.



suspension, correspond une augmentation marquée de la transparence. Pendant toute la période dont nous venons de parler, la teneur en plancton est restée relativement faible et constante. On peut conclure que durant l'été, c'est la teneur en sels de Ca dissous qui influence la transparence.

A partir de nos résultats hebdomadaires à la station Z, nous établissons le tableau LXVIII qui donne les moyennes et extrêmes à cet endroit.

Ajoutons que l'écart entre mesures hebdomadaires varie de manière désordonnée et que l'amplitude maximum de l'écart entre valeurs instantanées pour la période de juin 1958 à décembre 1961 est de 4,20 m entre les 4 et 11 avril 1961.

TABLEAU LXVIII

Transparences moyennes et extrêmes mesurées dans la baie d'Auvergnier, à la station Z au moyen du disque de Secchi durant la période 1958-1961.

	1958	1959	1960	1961
<u>Moyennes</u>				
Janvier	-	<u>9,20</u>	<u>8,38</u>	<u>8,53</u>
Février	-	-	7,93	7,38
Mars	-	6,60	6,30	5,85
Avril	-	4,10	6,75	3,80
Mai	-	4,80	6,90	4,28
Juin	4,68	<u>3,08</u>	6,53	5,97
Juillet	<u>2,50</u>	3,74	<u>3,73</u>	<u>2,85</u>
Août	3,47	3,38	4,58	3,54
Septembre	3,88	4,02	4,15	5,63
Octobre	5,18	4,60	5,55	4,92
Novembre	9,23	5,65	6,60	5,08
Décembre	-	8,04	7,30	5,85
Hiver	-	7,03	<u>7,44</u>	7,25
Printemps	4,52	3,99	6,74	4,54
Été	<u>3,20</u>	3,74	4,19	3,97
Automne	6,98	6,25	6,49	5,25
Année	-	4,97	6,21	5,23
<u>Extrêmes</u>				
Minimum	1,70	<u>1,50</u>	1,90	1,90
Date	15.VII	23.VI	26.VII	11.VII
Maximum	<u>10,70</u>	9,20	10,20	9,20
Date	25. I	28. I	23. V	10. I

Les extrêmes des moyennes mensuelles sont soulignés par année et ceux des moyennes saisonnières pour la période entière.

D'après ce tableau, les minima des moyennes mensuelles se présentent en juin-juillet et correspondent bien au moment de l'année où la décalcification commence à se faire sentir. Les maxima de transparence moyenne se manifestent en janvier, précisément au moment où l'homothermie est presque complète et où la presque totalité des matières en suspension dans les couches supérieures a disparu par précipitation puis dissolution à la suite de l'"overtun" automnal et de l'abaissement de température qui suit ce dernier.

L'année 1958 étant incomplète, il n'est pas possible d'y déceler un maximum sûr, car la moyenne de novembre n'est que la plus élevée parmi 6 déterminations qui ne couvrent même pas les extrémités de l'année.

Les extrêmes instantanés de la période ont les valeurs : 1,50 m le 23 juin 1959 et 10,70 m le 25 novembre 1958. L'amplitude maximum correspondante: 9,20 m est donc inférieure de 60 cm à celle des travaux de Fuhrmann et de Robert (1900 et 1916 à 1920).

Au cours des grandes expéditions, des mesures de transparence ont lieu à la station D, à des intervalles variant d'un à plusieurs mois comme le paragraphe 18 l'indique. De 1943 à 1946, des mesures semblables ont été effectuées aussi à la même station ou dans son voisinage immédiat. Jugeant intéressant de comparer les deux séries de mesures entre elles, nous n'en avons utilisé cependant que les résultats correspondant aux dates communes. C'est ainsi que pour la confection du tableau LXIX nous n'utilisons que les résultats des mesures faites le dernier mardi des mois d'avril, août, septembre et octobre de chaque année complète.

TABLEAU LXIX

(cf. page suivante)

TABLEAU LXIX

Transparences moyennes et extrêmes mesurées au large de Champ Bougin, à la station D au moyen du disque de Secchi durant les périodes 1943-1945 et 1958-1960.

	1943	1944	1945	1943 à 1945	1958	1959	1960	1958 à 1960
Moyennes.								
Moyennes	5,57	4,66	5,24	5,16	4,85	4,30	4,55	4,57
Amplitude				0,91				0,55
Extrêmes.								
Minima	1,80	1,95	2,30		3,70	3,80	3,40	
Date	24.VI	11.VII	30.V		24.VI	28.IV	30.VIII	
Maxima	12,40	14,90	13,90		6,40	4,80	5,90	
Date	29.XII	18.I	15.XII		29.IV	27.X	25.X	
Amplitude				13,10				3,00

Ce tableau met particulièrement bien en évidence les changements de transparence qui se sont produits en 15 ans à la station D. La deuxième série triennale présente une diminution générale des valeurs par rapport à la première, aussi bien en ce qui concerne les moyennes (baisse de 11,4%) que l'amplitude de celles-ci (39,6%). Mais ce sont surtout les extrêmes d'hiver et d'été qui se sont rapprochés, l'amplitude de leurs écarts ayant diminué de 77% de la première à la seconde série. C'est ce qu'illustre bien la fig. 65.

L'abaissement des moyennes trahit une augmentation généralisée du trouble de l'eau, à laquelle participe une augmentation des quantités de plancton présentes dans le lac. Des changements qualitatifs défavorables de celui-ci, affectant spécialement la couleur de l'eau, contribuent également à la diminution de la transparence, ainsi que nous pouvons le constater en comparant les résultats de l'analyse planctonique de la campagne actuelle à ceux que l'Inspection de la pêche nous a communiqué pour la première série de recherches. Ces changements affectent tout spécialement les maxima de la transparence puisque ceux-ci se produisent en hiver, donc en période où, comme nous l'avons vu plus haut, c'est le plancton qui conditionne le phénomène. Les changements qualitatifs et quantitatifs du plancton durant ces 15 ans sont une manifestation directe de la pollution, de sorte qu'on peut conclure à une action de celle-ci sur la diminution de la transparence moyenne et plus spécialement sur la transparence d'hiver de l'eau.

Si les minima, en 1943, 1944 et 1945 sont nettement plus bas que ceux de 1956, 1959 et 1960, c'est que la première période triennale est nettement plus chaude que la seconde. Or, la décalcification dont dépend largement le trouble en période estivale, est d'autant plus marquée que la température est plus haute. Dès lors, et du point de vue de la pollution des eaux, l'amélioration de la transparence lors des minima d'été de la seconde série par rapport à la première, n'est qu'apparente et due à des conditions météorologiques différentes.

29.2.2. Transparence aux stations A à P'.

Nous possédons les mesures de transparence effectuées à chacune de ces stations au cours des 18 grandes expéditions de A à F et des 14 de K à P'. Afin d'en tirer des moyennes comparatives, nous n'utilisons que les résultats acquis au cours des mois d'avril, juin, août, septembre et octobre des années 1957 à 1960 pour les stations du premier groupe, des années 1957 à 1959 pour celles du second groupe. Pour cette raison, les moyennes et les amplitudes du tableau LXX ne sont comparables entre elles qu'à l'intérieur de chaque groupe et non pour l'ensemble du lac.

TABLEAU LXX

Transparences moyennes et extrêmes mesurées aux stations A à P' au moyen du disque de Secchi entre les années 1957 et 1960.

Station	Moyennes mensuelles						Extrêmes instantanés				
	IV	VI	VIII	IX	X	Période	Minimum	Date	Maximum	Date	Amplitude
A	6,10	4,60	4,38	4,47	6,25	5,16	3,70	29.IX.59	12,50	26.XII.57	8,80
B	6,07	3,60	4,28	4,37	6,25	4,91	3,20	25.VI.57	11,30	26.XII.57	8,10
B'	5,33	4,45	4,05	4,37	6,48	4,93	3,60	24.VI.58	11,90	26.XII.57	8,30
C	5,53	3,00	4,28	4,30	5,83	4,59	3,00	25.VI.57	10,40	26.XII.57	7,40
D	5,13	3,00	3,73	3,97	5,25	4,22	2,30	25.VI.57	10,90	26.XII.57	8,60
E	6,25	2,35	3,35	3,75	4,30	4,02	0,80	25.VI.57	7,20	26.XII.57	6,40
F	4,20	2,50	3,00	4,40	4,30	3,68	1,60	25.VI.57	9,60	26.XII.57	8,00
K	3,00	4,25	4,77	3,80	6,40	4,44	2,10	25.VI.57	8,70	28.X. 58	6,60
L	6,90	6,55	5,00	3,50	9,15	6,22	3,50	30.IX.58	11,00	28.X. 58	7,50
M	6,80	6,15	6,35	5,80	8,95	6,81	4,60	26.VIII.58	10,00	28.X. 58	5,40
N	7,00	6,05	5,27	4,85	7,67	6,17	3,20	29.IX.59	10,50	28.X. 58	7,30
P'	6,30	6,10	3,95	5,25	6,85	5,69	3,40	25.VIII.59	9,00	28.X. 58	5,60

Nous avons vu plus haut que la transparence moyenne de l'eau diminue sous l'effet de la pollution. Les centres pollutifs susceptibles d'agir sur la transparence de l'eau sont essentiellement : l'agglomération urbaine de Neuchâtel et l'embouchure de la Broye pour les stations du premier groupe, l'agglomération urbaine d'Yverdon pour celles du second groupe.

Dans le premier groupe, en classant les stations selon leur distance à Neuchâtel, dans l'ordre décroissant, on obtient la série : A, B', B, C, D et E à laquelle correspond la série de moyennes extraites du tableau LXX: 5,16; 4,93; 4,91; 4,59; 4,22 et 4,02 m; en outre, pour F, on a: 3,68 m. Ceci revient à constater que la transparence moyenne diminue régulièrement à mesure qu'on se rapproche de Neuchâtel, puis de l'embouchure de la Broye. Les amplitudes des écarts instantanés classées dans le même ordre des stations, donnent la série: 8,80; 8,30; 8,10; 7,40; 8,60; 6,40, puis 8,00 m. A l'exception de la valeur 8,60 qui reste inexpiquée pour la station D, les amplitudes diminuent aussi régulièrement à l'approche de Neuchâtel. Par contre, si cette amplitude est plus grande à F qu'à E, contrairement à ce qui se passe pour les moyennes mensuelles, cela provient vraisemblablement d'une différence de qualité de la pollution, les apports de la Broye n'étant pas toujours semblables à ceux de Neuchâtel.

Dans le second groupe, en appliquant aux stations un classement semblable en fonction de l'éloignement d'Yverdon, on obtient la série: M, L, N, P' et K à laquelle correspondent les moyennes mensuelles: 6,81; 6,22; 6,17; 5,69 et 4,44 m, ce qui revient à dire que la transparence de l'eau diminue en moyenne à mesure que l'on se rapproche d'Yverdon. Quant aux amplitudes des écarts instantanés, elles fournissent la série suivante: 5,40; 7,50; 7,30; 5,60 et 6,60 m. Dans le cas particulier, la diminution des amplitudes à l'approche d'Yverdon est faussée par l'existence de centres secondaires de pollution à proximité de 2 stations situées très près de la rive. En effet, M est sous l'influence directe des déversements polluants de Concise et P' de ceux de Grandson, alors que L et N placées au large n'en subissent pas les effets. La station K, quoique proche d'Yverdon, a une amplitude plus grande que M et P'. L'anomalie apparente de cette amplitude par rapport à la moyenne mensuelle et aux extrêmes instantanés ne peut s'expliquer que par l'action de la force de Coriolis qui incurve le cours sous-lacustre de la Thielle vers la rive droite du lac et par conséquent détourne souvent de la station K, l'eau très polluée sortant de la Thielle. Nous avons pu reconnaître, à certains moments, le cours sous-lacustre dévié de la Thielle dans cette région et nous y reviendrons à propos de l'étude des courants. Mais sous l'effet soit des courants engendrés par les vents, soit du jeu des densités relatives de l'eau de l'affluent et de celle du lac, le cours sous-lacustre de la Thielle n'est pas fixe et alors le panache d'eaux polluées balaie plus ou moins bien toute la région terminale du Haut-lac en provoquant parfois une baisse de la moyenne mensuelle à K, en même temps qu'une forte diminution instantanée de la transparence comme cela a été le cas le 25 juin 1957 à cette station.

Relevons encore que dans le tableau LXX se trouvent les

extrêmes absolus de la transparence mesurée dans notre lac au cours de la campagne 1957-1961, soit: 0,80 m le 25 juin 1957 à la station E et 12,50 m le 26 décembre 1957 à la station A. A ces deux valeurs correspond l'amplitude maximum absolue de 11,70 m.

29.2.3. Variation horaire de la transparence.

Nous avons tenté de mesurer les variations horaires de la transparence en deux points déterminés du lac. Cependant les résultats obtenus jusqu'ici sont en nombre insuffisant et ne couvrent pas une période assez longue pour pouvoir être utilisés déjà. Ces recherches se poursuivent.

29.2.4. Transparence dans l'ensemble du lac.

En levant les profils transversaux pour l'étude de la thermique, nous mesurons la transparence à l'aide du disque de Secchi. C'est ainsi qu'on obtient 39 indications le même jour sur la transparence à diverses stations réparties dans l'ensemble du lac. Jusqu'ici, nos indications pour l'ensemble de la nappe d'eau proviennent exclusivement de la période de stratification thermique des années 1959 à 1961. Pour les raisons indiquées déjà au paragraphe 26.2.6 ci-dessus, nous n'avons pas encore de résultats systématiques pour la période de novembre à mars dont l'étude est prévue ultérieurement.

Nous ne donnons pas ici tous les résultats acquis qui sont au nombre de plus de 600, ce qui chargerait trop notre exposé. Par contre, constatant des différences de transparence d'un endroit à l'autre le même jour, nous estimons judicieux d'établir la carte des répartitions de ces diverses valeurs simultanées. Pour cela, après report des résultats sur la carte du lac, nous réunissons par des lignes conventionnelles, les endroits dont les transparences diffèrent de moins d'un demi-mètre. On obtient une série d'aires ou de plages isohyales qui schématisent bien la répartition des transparences dans l'ensemble de la surface lacustre. C'est ainsi qu'à partir des six profils levés en 1961, on obtient les fig. 66 à 71.

D'une manière générale, la répartition des plages isohyales varie beaucoup d'une figure à l'autre. La forme de ces plages et leur emplacement changent également, quoique très souvent leur forme soit allongée dans le sens du lac et déviée vers la droite par rapport à l'écoulement général des eaux. Nous commentons brièvement ces figures comme suit :

Le 11 avril : le lac subit des alternances de calme et de bise faible et sa température en surface est la même que celle de l'air ambiant. L'influence de la pollution urbaine se dessine, très faiblement pour Neuchâtel où la bise est faible, beaucoup plus nettement à mesure qu'on se rapproche du Haut-lac où le vent d'E a davantage d'effet; c'est ainsi que la transparence est la plus faible devant Estavayer-le-Lac et depuis là dans une zone allongée par les courants superficiels en direction de la pointe d'Yvonand; il en est de même devant Saint-Aubin (en face d'Estavayer), ainsi qu'à l'extrémité du

EVOLUTION DES MOYENNES MENSUELLES DE LA LIMITE DE VISIBILITE DU DISQUE DE SECCHI

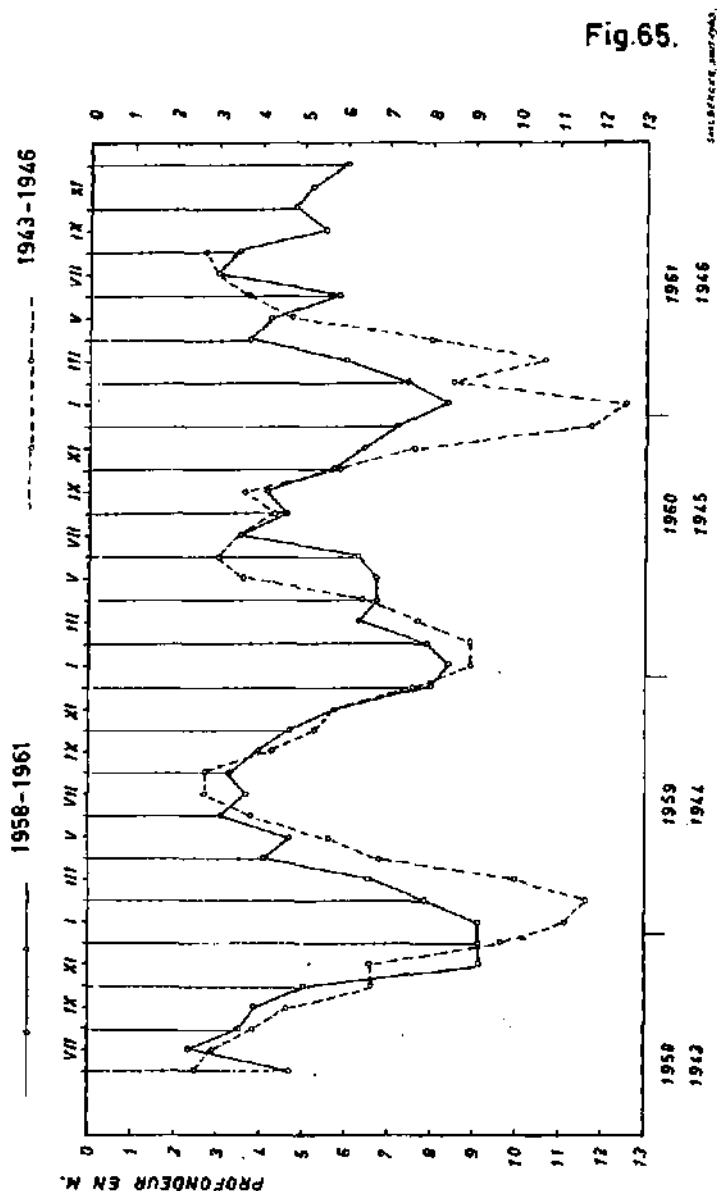


Fig.65.

Fig. 56.

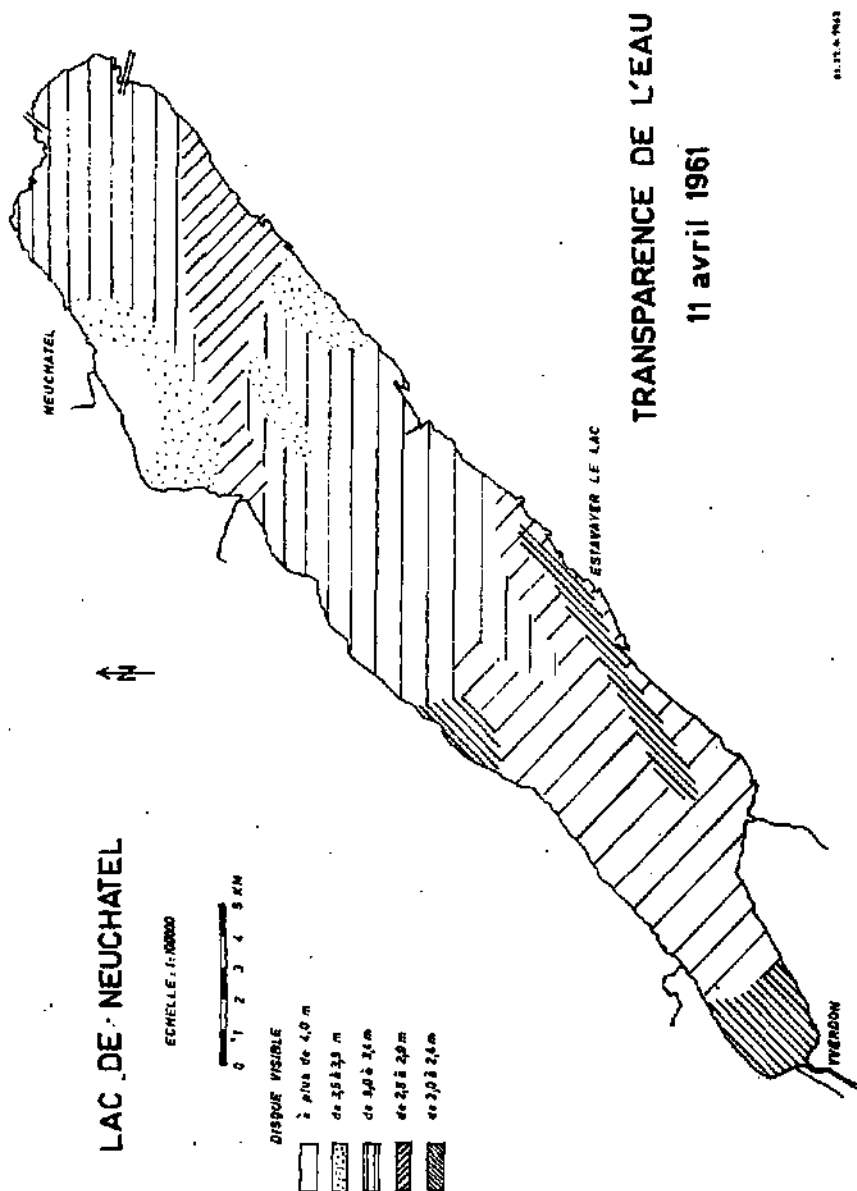


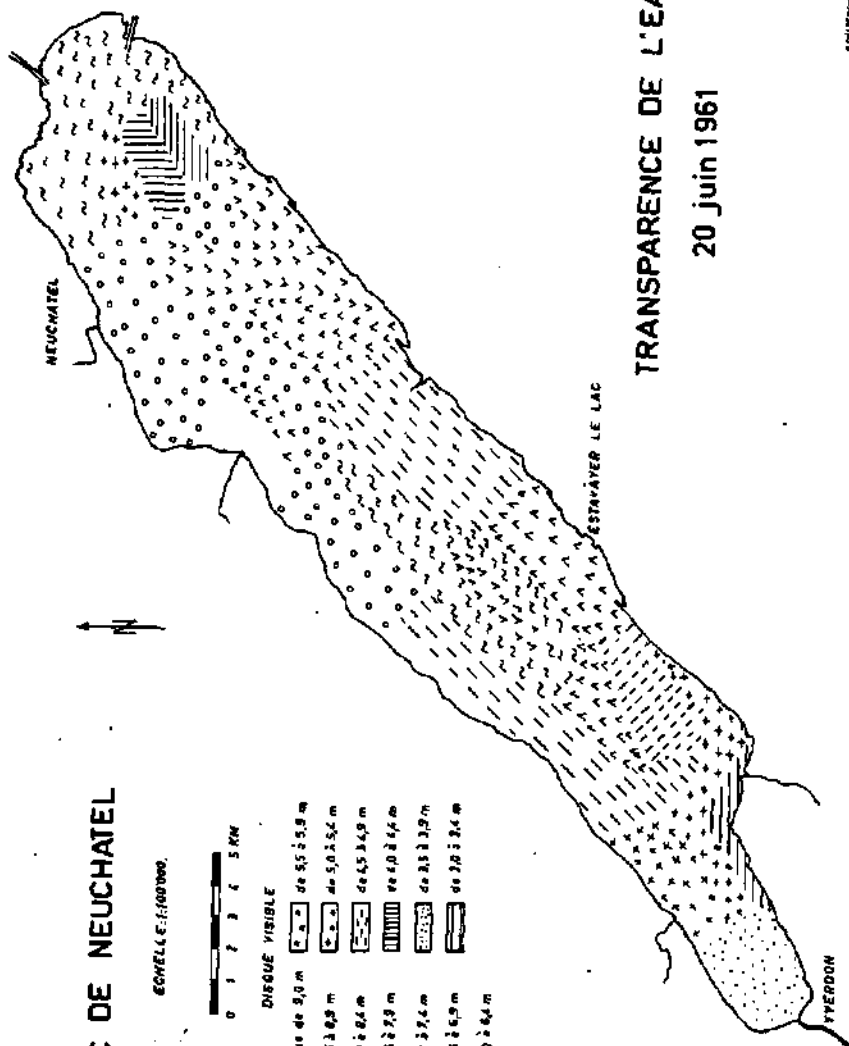
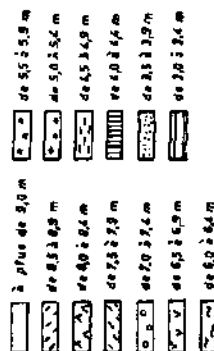
Fig. 67.

LAC DE NEUCHÂTEL

ÉCHELLE: 1:100 000.



DISQUE VISIBLE



TRANSPARENCE DE L'EAU
20 juin 1961

Fig 69.

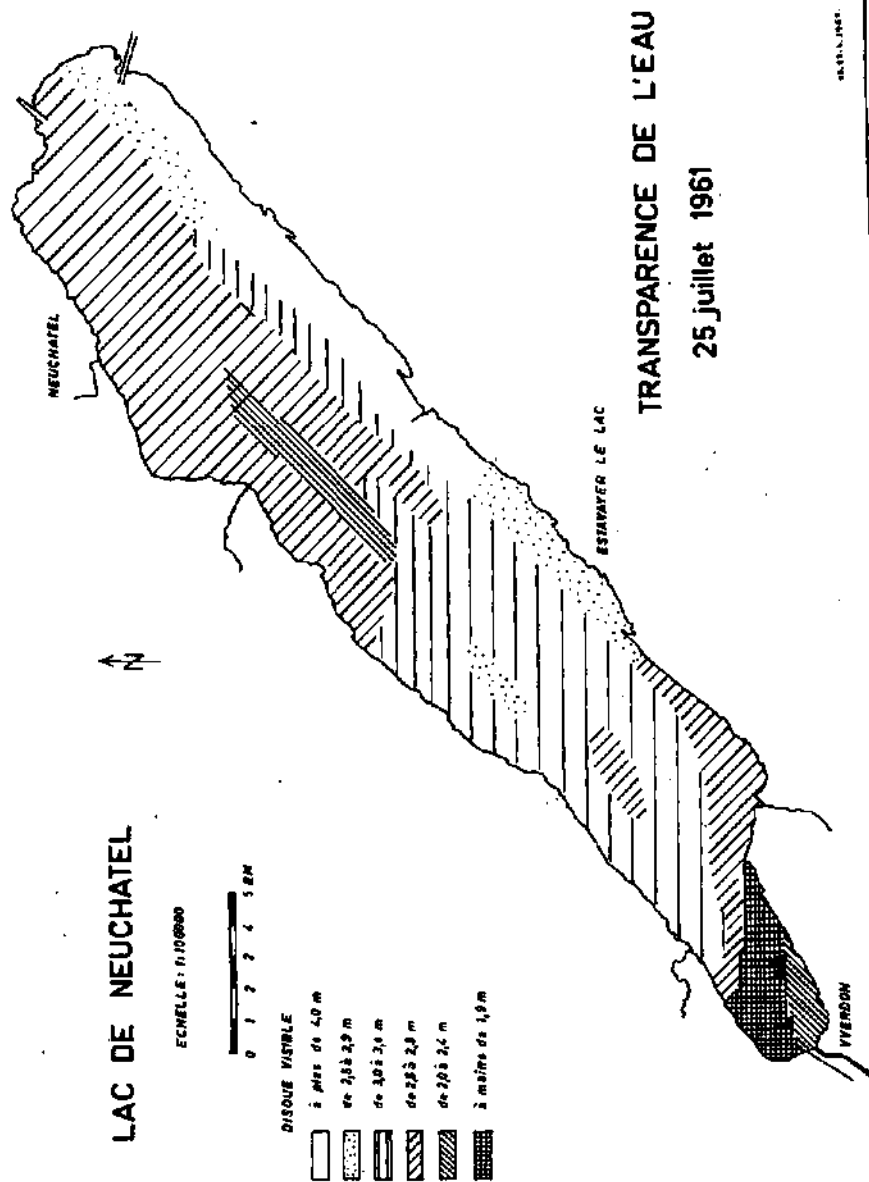


Fig. 89.

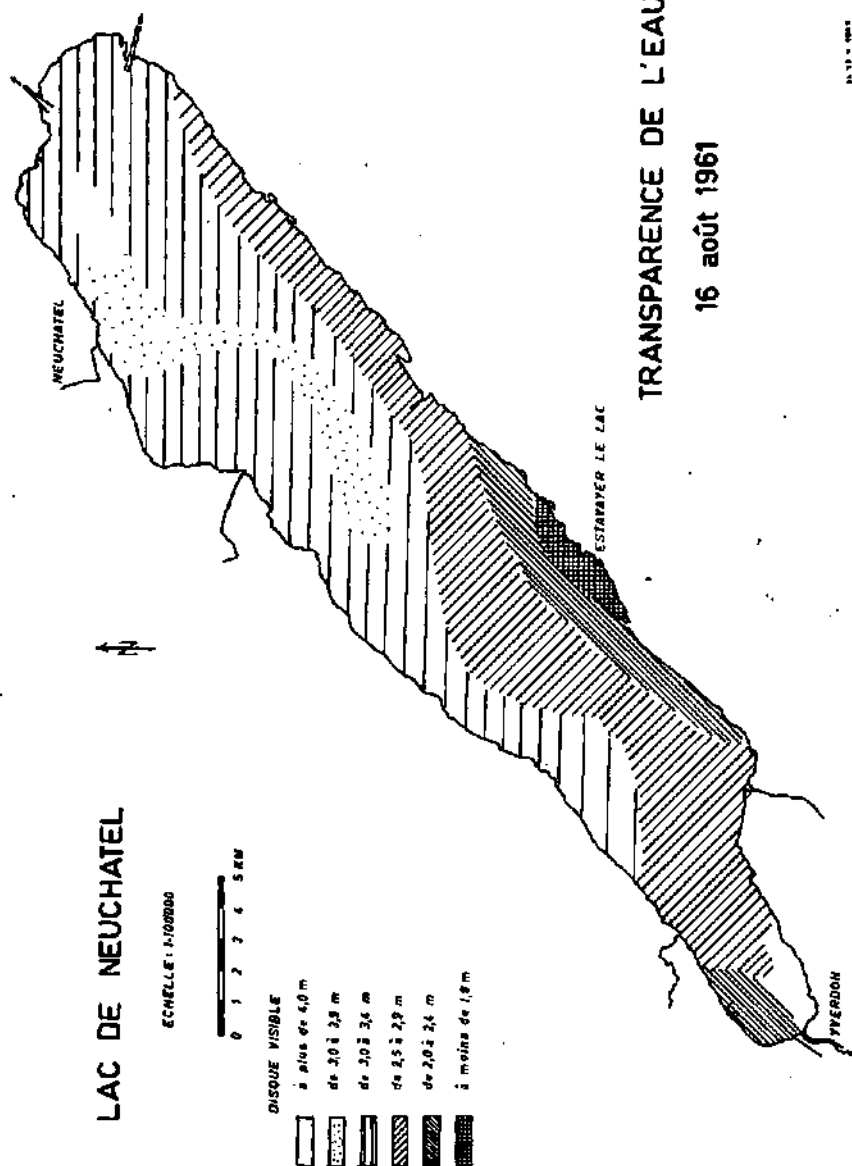


Fig. 70.

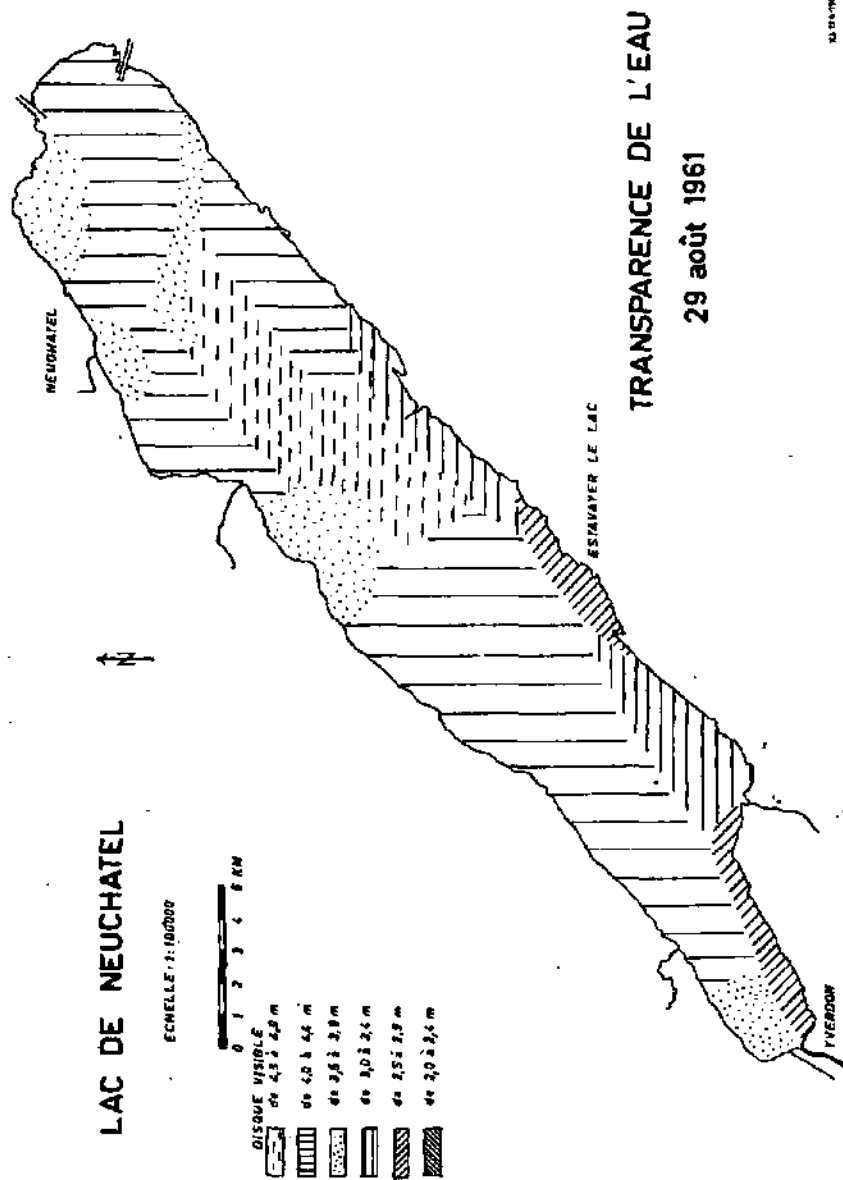


Fig. 71.

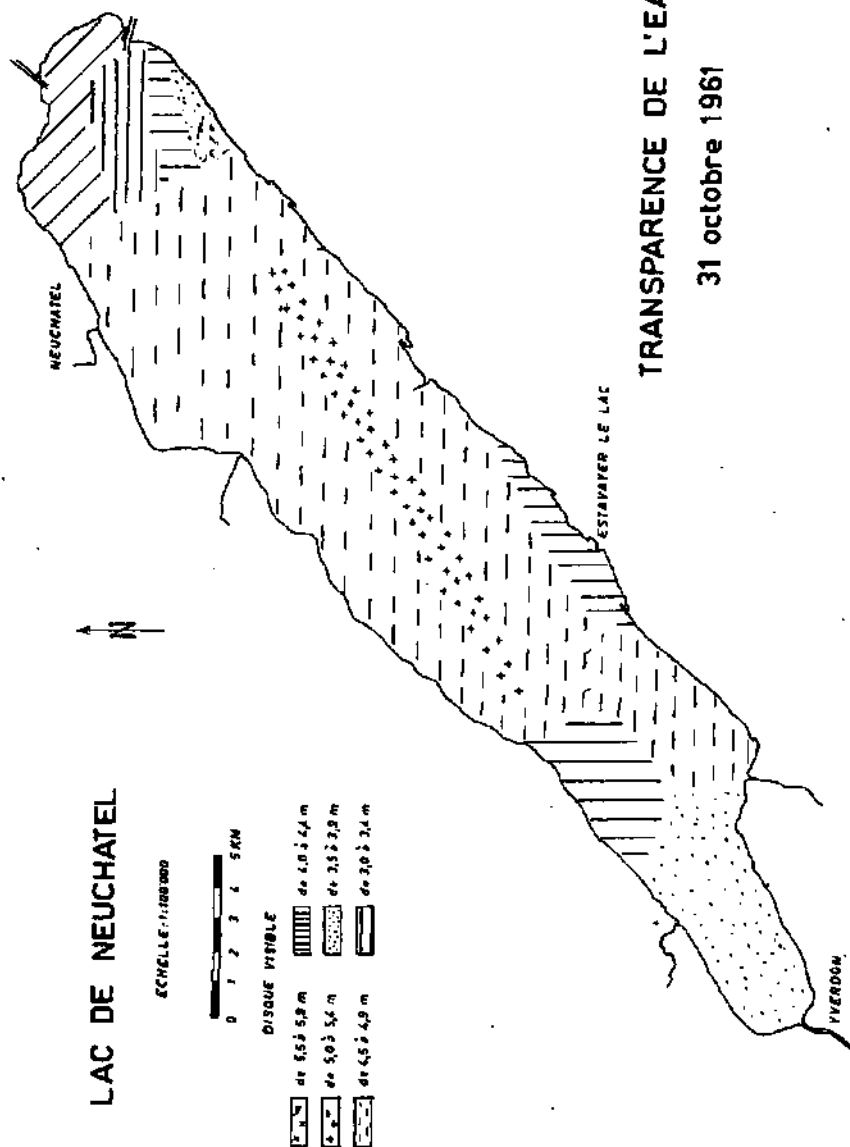
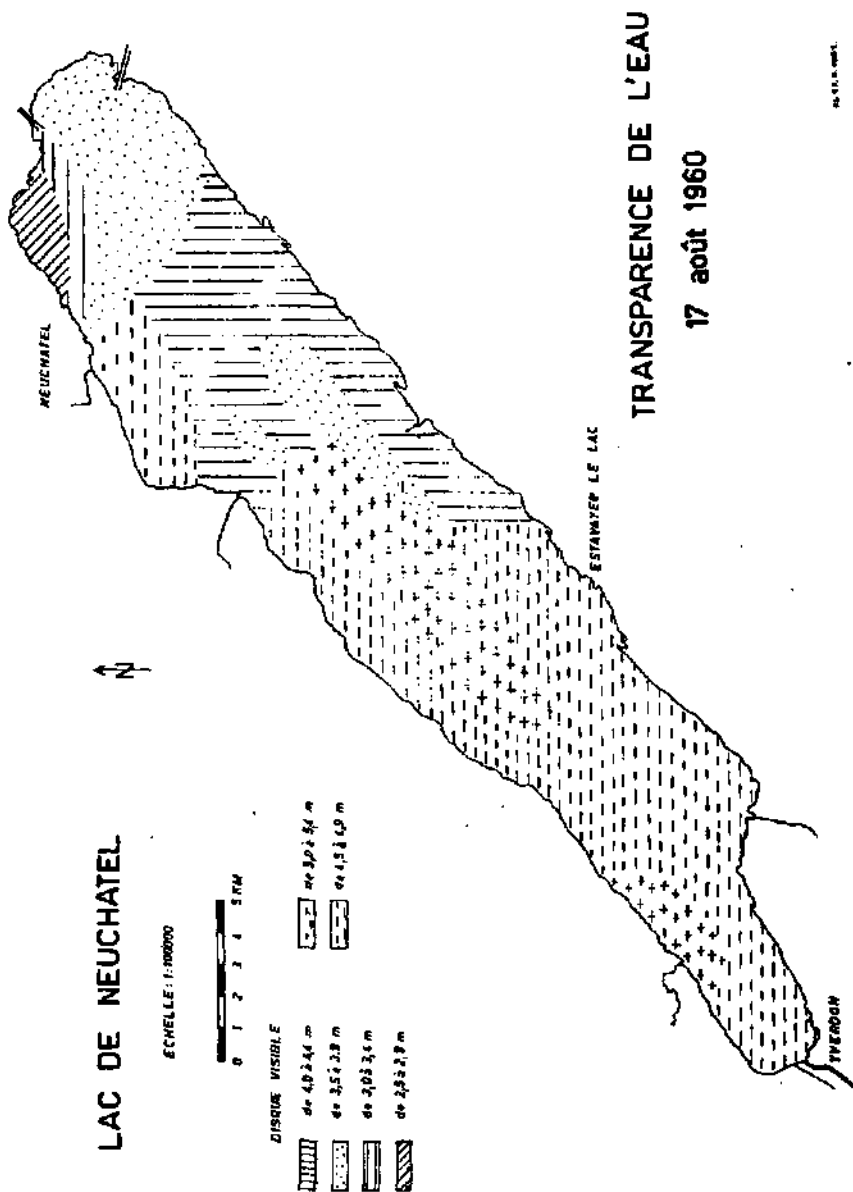


Fig.72.



Haut-lac devant Yverdon et Grandson.

Le 20 juin : après une longue période de calme, la température de l'eau est en hausse, la teneur en plancton diminue et on est à la veille de la décalcification. C'est le moment où la transparence est la plus diversifiée, sans que la pollution urbaine se manifeste de manière visible.

Le 25 juillet : le lac vient de passer par des alternances de calme et de vent d'E faible; l'eau est plus chaude que l'air ambiant; la décalcification estivale est en cours. Une zone importante de faible transparence due à ce dernier phénomène auquel s'ajoute la pollution urbaine s'étend, sur les 2/3 de la largeur du lac, de la Tène à Bevaix. Le Haut-lac est encore moins transparent sous l'effet de la bise qui accumule les troubles de l'eau dans cette région.

Le 16 août : le lac est dans une période agitée, de vent d'E tout d'abord, puis du SW. L'eau trouble résultant de la pollution urbaine d'Yverdon-Grandson se déplace en direction du Bas-lac, par les courants superficiels dus au vent, et, déviée par la force de Coriolis, s'étale le long de la rive droite jusqu'à Cudrefin.

Le 29 août : soit deux semaines plus tard seulement la situation est différente après une longue période de calme; la transparence est un peu plus grande, mais la pollution urbaine d'Yverdon et celle d'Estavayer-le-Lac se remarquent encore. Par contre, celle de Neuchâtel n'est pour ainsi dire pas visible.

Le 31 octobre 1961, le lac est calme depuis plusieurs jours et la période de décalcification touche à sa fin. La transparence augmente par rapport aux profils précédents, mais sa répartition est relativement uniforme sauf dans le Bas-lac proprement dit.

Afin de montrer à quel point la situation peut être différente d'une année à l'autre suivant les conditions météorologiques, nous avons construit, pour la comparer à la fig. 69, la fig. 72 sur les données recueillies à l'époque correspondante de l'année précédente, autrement dit le 17 août 1960. A cette dernière date, le lac sort d'une période très agitée et vient de subir trois jours auparavant les effets d'une tempête du SW. La transparence est presque uniforme dans les 2/3 supérieurs du lac; seuls subsistent des troubles un peu plus élevés dans le Bas-Lac et plus spécialement dans la baie de St-Blaise, peu profonde, et où la vase reste plus longtemps en suspension après les tempêtes du SW.

D'une manière générale, ces figures révèlent le maximum de transparence simultanée dans une zone allongée au centre du lac, sensiblement le long de l'arête sommitale de la Motte. En faisant abstraction des phénomènes tels que la décalcification estivale et l'augmentation généralisée de la teneur en plancton qui provoquent tous deux l'abaissement généralisé de la transparence d'une part, en tenant compte de la diminution généralisée de celle-ci due à la pollution par les eaux usées d'autre part, l'existence de la zone dont nous venons de parler atteste

que l'influence de la pollution urbaine est la plus faible dans la région de la Motte.

On constate habituellement que toute la région sommitale en question se trouble sous l'effet des tempêtes prolongées qui y mettent en mouvement le sable du fond. Or, la fig. 72 ne correspond pas à une exception par rapport à ce que nous venons d'énoncer, malgré la tempête du 14 août 1960 car, non seulement la forte agitation s'est produite 3 jours auparavant déjà, mais surtout elle a été de courte durée, ce qui a permis à l'eau de se clarifier.

A défaut de l'ensemble des mesures simultanées, nous reportons dans le tableau LXXI les moyennes, ainsi que les extrêmes et l'amplitude instantanée de la transparence mesurée durant les années 1959 à 1961, mais seulement pour les levés complets des profils transversaux.

TABLEAU LXXI

Moyennes, extrêmes et amplitudes instantanées de la transparence de l'eau, mesurées pour l'ensemble du lac au moyen du disque de Secchi de 1959 à 1961.

Date	Moyenne	Extrêmes instantanées					Températ. moy. de la surface	Distance entre les stations	Ecart de transpar. par km.
		Minimum	Station	Maximum	Station	Amplitude			
<u>1959</u>									
6.V	3,06	1,90	14	4,00	26	2,10	12,01	4	0,53
16.VII	3,11	2,60	45	4,50	26	1,90	21,44	8	0,24
10.IX	3,89	3,20	81	4,80	23	1,60	18,59	28½	0,06
<u>1960</u>									
6.IV	7,28	5,60	81	8,80	43	3,20	9,08	20½	0,16
4.V	6,59	5,10	11	7,60	53	2,50	10,05	20	0,13
2.VI	8,93	5,90	81	11,70	53	5,80	16,41	13½	0,43
5.VII	4,54	3,90	81	5,60	54	1,70	19,38	14	0,12
17.VIII	4,52	2,70	11	5,50	71	2,80	18,36	30	0,09
<u>1961</u>									
11.IV	2,86	2,00	82	4,00	21	2,00	10,31	29	0,07
20.VI	6,30	3,40	15	9,00	31	5,60	18,71	9½	0,59
25.VII	2,91	1,90	73	4,20	36	2,30	18,61	22	0,10
16.VIII	3,04	1,80	56	5,10	12	3,30	18,69	19½	0,17
29.VIII	3,86	2,60	73	4,80	32	2,20	-	20½	0,11
31.X	4,36	2,90	12	5,50	44	2,60	12,46	13	0,20

De ce tableau, il résulte qu'entre avril et octobre, la transparence moyenne oscille entre 2,86 m et 8,93 m pour l'ensemble du lac. Toutefois, une période triennale est encore insuffisante pour pouvoir obtenir des moyennes mensuelles suffisamment sûres. Quoi qu'il en soit, il est intéressant de relever que les extrêmes instantanés de la période sont: 1,80 m le 16 août 1961 devant Estavayer-le-Lac et 11,70 m le 2 juin 1960, également devant la même localité, mais à 3 km plus au large. L'amplitude des extrêmes, qui mesure en quelque sorte la diversité des transparences observées sur l'ensemble du lac le même jour, varie de 1,60 m le 10 septembre 1959 à 5,80 m le 2 juin 1960 où le lac présente alors les transparences les plus variées. Quant à l'écart au km il indique le gradient de ces variations: le 10 septembre 1959, la différence des transparences est la moins perceptible, tandis qu'elle est dix fois plus accusée le 20 juin 1961.

29.3. Comparaison de la transparence de l'eau du lac de Neuchâtel avec celle d'autres lacs.

Grâce aux publications de l'Institut limnologique de Constance, nous disposons (Anst.f.Bodenseeef.Stadt Konstanz, 1957-1963) d'une série importante de mesures de transparences effectuées pendant la même période et avec le même rythme que nos propres mesures. À l'aide de ces documents, nous calculons les moyennes mensuelles de la transparence de l'Ueberlingersee pour les comparer à celles de la station Z (baie d'Auvernier) de notre lac.

Il ressort de la fig. 73 que les variations de la transparence de l'Ueberlingersee suivent bien celles de Neuchâtel, les extrêmes étant toutefois presque toujours en retard d'un mois dans le Bodan. Dans ce dernier, les maxima d'hiver sont beaucoup plus marqués que ceux de chez nous dont ils diffèrent de plusieurs mètres; par contre, les minima d'été sont beaucoup plus semblables dans les deux lacs. La différence dans les maxima doit vraisemblablement être attribuée à des différences planctoniques, quantitatives et qualitatives. Les différences légères qui séparent les minima estivaux des deux lacs, spécialement en 1960 et 1961, ne semblent pas dépendre, à première vue, des différences de température entre les deux, car on sait que la décalcification estivale, autrement dit le trouble de l'eau est d'autant plus marqué que la température est plus élevée. Or, en comparant les courbes de la fig. 73 à celles de 0m de la fig. 38, on s'aperçoit qu'en 1960 à une température très faiblement supérieure, puis nettement inférieure de l'Ueberlingersee, correspond une transparence très nettement inférieure à celle de Neuchâtel. En 1961, par contre, à une plus forte température dans l'Ueberlingersee, correspond une plus forte transparence que dans le lac de Neuchâtel. Il semble donc que les minima estivaux de 1960 et 1961 subissent l'influence d'un phénomène nouveau, mais en relation tout de même avec le plancton et que l'Institut de Constance signale de la manière suivante pour 1961: en août et septembre, une quantité énorme de plancton tombe au fond et entraîne, dans sa chute, passablement d'autres matières en suspension, d'où une augmentation anormale et passagère de la transparence à cette époque. Un phénomène semblable mais à échelle plus restreinte semble s'être produit

en 1960 aussi.

De juin 1958 à décembre 1961, les moyennes mensuelles de la transparence varient de 2,50 m à 9,20 m pour le lac de Neuchâtel, mais simultanément de 2,70 m à 12,80 m pour l'Ueberlingersee.

Nous venons d'exposer comment la transparence d'un lac peut varier, non seulement de manière périodique au cours des saisons, mais aussi de manière apériodique d'un endroit à l'autre de sa surface, ainsi qu'au cours des années. Aussi n'est-il guère possible de comparer plusieurs lacs entre eux en utilisant uniquement les transparences instantanées ou moyennes que donnent la plupart des auteurs. Faute de disposer d'un grand nombre d'observations étalées sur de nombreuses années, nous nous contenterons donc des quelques valeurs récentes suivantes: la transparence du lac de Bret a passé, de 1900 à 1951, des limites 2,00 m et 5,50 m à 1,60 m et 2,60 m (Cosandey, 1955). Celle du Lac Léman oscille, ces dernières années, entre 3,50 m et 13,00 m (Monod, 1960 b).

Rappelons que les extrêmes mondiaux de la transparence mesurée dans les lacs au moyen du disque de Secchi ont pour minimum 0,10 m à 0,20 m dans le Neusiedlersee lorsque les vagues brassent l'eau de ce lac austro-hongrois très peu profond (Varga, 1928) et pour maximum 48,0 m dans le lac Akimoto, nappe d'eau volcanique de la préfecture de Fukushima, au NNE de Tokio (Yoshimura, 1932a).

30. Absorption de la lumière.

A côté des mesures de la transparence au disque de Secchi, nous mesurons l'absorption de la lumière par l'eau au moyen d'un dispositif à cellule photoélectrique décrit au paragraphe 20.5.2 ci-dessus.

Ålvik (1937) a montré que l'absorption de la lumière varie suivant la profondeur, en relation avec l'écologie du lac et Davis (1941) a fait voir que la pénétration de la lumière dans l'eau est en relation avec la lumière incidente selon la formule:

$$I_0 = A + R + U$$

dans laquelle I_0 représente la lumière incidente, A la lumière absorbée, R la lumière réfléchie par la surface du lac et U la lumière dispersée par les matières en suspension dans l'eau. Or, la perte de lumière, soit la valeur (R + U) varie avec l'élévation du soleil, l'état du ciel et celui de la surface du lac. Nous ne nous occuperons que de la quantité A.

En quantité variable, la lumière pénètre tout de même profondément dans l'eau où elle participe à la photosynthèse chlorophyllienne, du moins dans les couches superficielles; cela a permis à Maucha (1938) de définir l'intensité lumineuse optimale qui est, dans la profondeur, celle à laquelle correspond le maximum de production du phytoplancton. Cette intensité lumineuse optimale ne correspond pas

au maximum d'intensité qu'on rencontre immédiatement au-dessous de la surface, car la trop forte lumière des couches supérieures fait échec à la photosynthèse, ainsi qu'à la croissance de certaines algues. (Edmonson, 1956 a). Comme on le verra plus loin, l'intensité lumineuse optimale se rencontre dans notre lac aux environs de 5 m de profondeur.

Enfin, Le Grand (1954) a prouvé que, dans l'océan, le noir absolu ne commence qu'entre 500 et 1000 m de profondeur.

Dans le présent travail, nous nous bornons à la mesure de l'absorption de la lumière blanche dans l'eau, laissant volontairement de côté pour l'instant l'étude de l'absorption de la lumière monochromatique qui sort du cadre de nos recherches. En effet, notre premier but est de déterminer l'ordre de grandeur de l'absorption lumineuse dans notre lac, ainsi que la variation éventuelle de cette absorption avec le temps et en fonction de l'évolution de la pollution. Signalons que si de nombreux auteurs travaillent en lumière monochromatique, beaucoup aussi tels que Birge et Juday effectuent des travaux en lumière blanche.

Nos mesures hebdomadaires à la station Z se rapportent aux années 1961 et 1962; elles débordent légèrement le cadre que nous nous étions imposé précédemment, ceci afin d'avoir des résultats portant sur plus d'une année, car 1961 est le premier cycle complet à notre disposition.

Reprenant la définition donnée par Rouch (1943-1948, t.2, p.254) et qui correspond à celle de Suchlandt et Schmassmann (1935), nous appelons coefficient de transparence de l'eau la fraction d'intensité lumineuse qui parvient à 1 m de profondeur. Ce coefficient est toujours inférieur à 1; il est lié à la lumière incidente par la relation:

$$I = I_0 \cdot p$$

dans laquelle I est l'intensité lumineuse à 1 m de profondeur, I_0 l'intensité lumineuse incidente et p le coefficient de transparence.

L'absorption lumineuse augmente avec la profondeur suivant la loi de Bouguer qui s'énonce ainsi : En chaque point de son parcours, le rayon lumineux incident d'intensité I perd une partie de son énergie et sur un parcours dx la fraction perdue dI est donnée par la relation:

$$dI = K \cdot I \cdot dx$$

d'où on tire facilement: $K = \frac{dI}{I \cdot dx}$

et si dx est égal à 1 m, alors K est appelé coefficient d'extinction par mètre.

De l'ensemble de nos résultats à Z, nous tirons les moyennes de 1961 et 1962. Chacune de ces moyennes exprime, mètre par mètre, entre la surface et 20 m de profondeur, l'intensité de la lumière restan-

te, en pour-cent de l'intensité de la lumière incidente. Ces moyennes sont reportées dans le tableau LXXII en même temps que les moyennes calculées de la même manière sur les mesures que nous avons effectuées simultanément dans le lac de Bienne, dans celui de Morat, ainsi que dans le Loclat.

A côté de ces mesures, toutes faites dans le sens vertical, nous avons essayé de mesurer l'absorption de la lumière dans le sens horizontal à diverses profondeurs. Les résultats de ces tentatives ne sont pas repris ici, car ils ne sont pas encore assez nombreux pour donner des moyennes sûres et nous n'avons pu opérer, faute de câbles suffisamment longs, jusqu'à des profondeurs correspondant aux changements brusques de transparence de l'eau, phénomènes qui nous ont été signalés récemment par les plongeurs autonomes travaillant dans notre lac. Ces mesures horizontales continuent actuellement.

TABLEAU LXXII

Intensité lumineuse restante à diverses profondeurs. Moyennes annuelles pour le lac de Neuchâtel; moyennes instantanées pour ceux de Bienne et de Morat ainsi que pour le Loclat. Mesures en lumière blanche, effectuées en 1961 et 1962.

Profondeur	Lac de Neuchâtel		Bienne	Morat	Loclat
	1961	1962	1961	1961	1961
0	100	100	100	100	100
1	64,1	55,7	49,3	38,3	40,6
2	48,7	36,4	32,0	30,0	20,9
3	34,4	25,6	22,6	22,7	6,7
4	25,9	19,0	11,9	5,1	3,7
5	19,5	14,0	9,1	4,2	2,3
6	15,6	11,4	7,5	1,00	1,40
7	11,5	9,0	3,5	0,67	1,22
8	8,8	7,3	2,9	0,59	1,15
9	6,9	6,0	2,3	0,48	-
10	4,7	5,3	1,82	0,31	-
11	4,1	4,7	1,63	0,30	-
12	3,6	4,4	1,39	0,27	-
13	3,4	3,9	1,32	-	-
14	3,1	3,8	1,17	-	-
15	2,6	3,8	1,17	-	-
20	0,80	3,0	0,56	-	-

VARIATION MENSUELLE DE LA TRANSPARENCE MOYENNE . 1958-1961

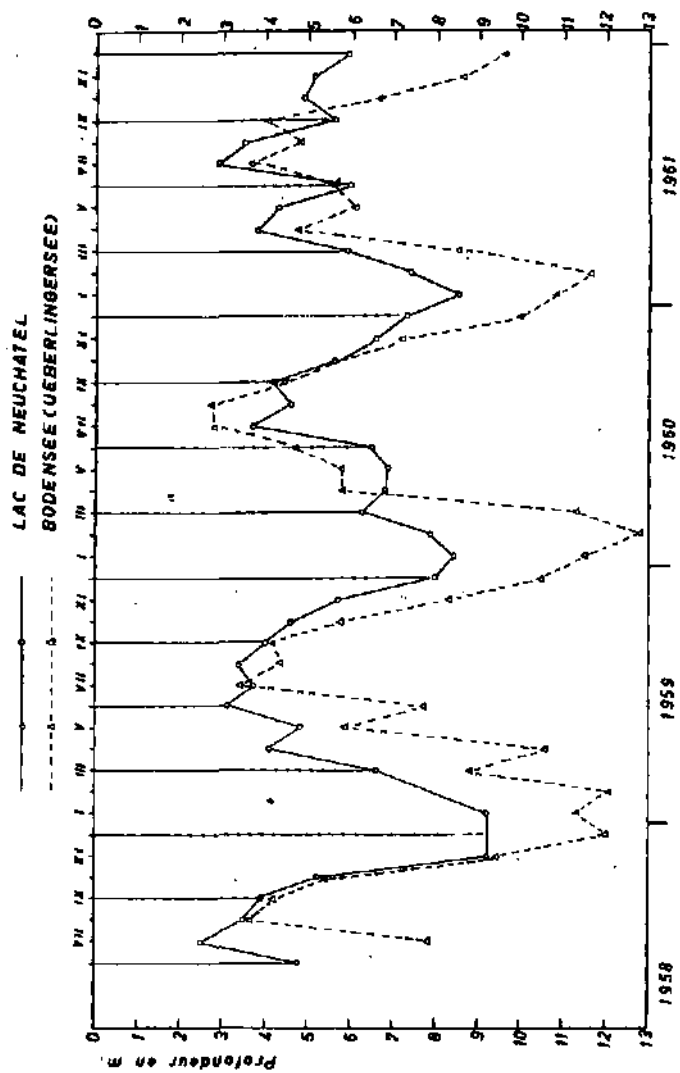
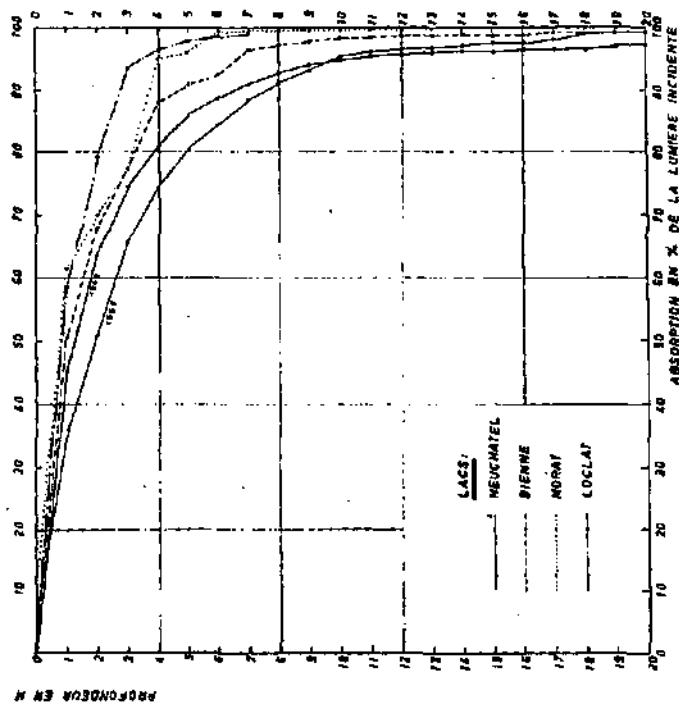


Fig.73.

Fig. 74.

ABSORPTION DE LA LUMIERE DANS L'EAU.



Pour illustrer ce tableau, nous construisons la figure 74 qui montre bien que jusqu'à 9 m de profondeur, l'absorption moyenne de la lumière augmente en 1962 par rapport à 1961. Ce phénomène qui affecte les couches supérieures seulement est une manifestation directe de l'augmentation de la pollution des eaux du lac. En 1962, l'absorption lumineuse chez nous tend donc à se rapprocher de celle du lac de Bienns et de celle du lac de Morat dont l'eutrophisation n'est plus à démontrer. D'ailleurs, du point de vue de l'absorption de la lumière les couches supérieures de ce dernier tendent à se rapprocher de plus en plus de celles du Loclat qui est le plus pollué des quatre.

A partir du tableau LXXII, on calcule le coefficient de transparence qui est de 0,641 en 1961 et de 0,557 en 1962 pour le lac de Neuchâtel, de 0,493 pour celui de Sienns, de 0,383 pour Morat et de 0,406 pour le Loclat.

Quant au coefficient d'extinction par mètre, il est de 0,359 en 1961 et de 0,443 en 1962 pour notre lac, en moyenne. Par contre, les extrêmes ont les caractéristiques suivantes :

en 1961 : 0,581 le 22 août et 0,020 le 12 décembre;

en 1962 : 0,739 le 18 septembre et 0,021 le 17 avril.

On constate donc par le tableau LXII et la fig.74 que la transparence de l'eau à la lumière diminue rapidement dans les couches les plus superficielles, de sorte que pour notre lac, la moitié de la lumière incidente est absorbée à 1,90 m de profondeur en 1961 et à 1,30 m en 1962, alors que le lac de Bienns a perdu la moitié de la lumière incidente à 0,80 m déjà et celui de Morat à 0,70 m. Cela revient à dire que durant la traversée du premier mètre d'eau, la lumière incidente perd les 4/10 de son intensité dans le lac de Neuchâtel, la moitié dans celui de Bienns et les 6/10 dans celui de Morat et dans le Loclat.

31. Le pH.

La mesure du pH de l'eau du lac est décrite au paragraphe 20.6 plus haut.

Saunders (1927) a montré que le pH d'une eau douce naturelle dépend à la fois de la concentration des carbonates et bicarbonates alcalins et alcalino-terreux, de la concentration du gaz carbonique dissous, de la température et de la concentration des sels neutres dissous autres que les carbonates et bicarbonates.

Ruttner (1931) a fait voir que pour une concentration constante en bicarbonates, les variations du pH correspondent à un départ ou à un apport de CO_2 .

Ohls (1934), à propos des lacs d'Allemagne du nord, prétend que l'eutrophisation d'un lac est moins importante pour les variations du pH que celles de la concentration en bicarbonates et de la température.

Dans notre travail, nous ne tenons pas compte, pour les années 1957 à 1961, du dosage du CO₂ libre, car, ainsi que nous l'avons exposé au paragraphe 22, lettre W, la méthode utilisée n'a pas une précision suffisante pour qu'on puisse utiliser avec sécurité les résultats obtenus. Nous nous permettons donc, en ce qui concerne la présence de CO₂ dans l'eau, de renvoyer le lecteur au chapitre ad hoc du travail de Portner (1951 a) dans lequel cet auteur explique les relations de CO₂ avec les carbonates et bicarbonates dissous dans l'eau.

31.1. Le pH à la station Z.

Nous nous occuperons tout d'abord des mesures hebdomadaires au pH-mètre électrique. Toutes ces mesures sont effectuées dans les 6 heures qui suivent le prélèvement des échantillons et à la température de 20°.

On constate que le pH varie suivant la saison et la profondeur. Les résultats obtenus varient également en fonction des conditions météorologiques, car, à des époques correspondantes, ils accusent des différences d'une année à l'autre.

Le pH moyen à la station Z, entre la surface et le fond, calculé au moyen des dix niveaux examinés chaque semaine, varie de manière sensible comme le montre le tableau LXXIII qui comprend également les extrêmes instantanés enregistrés durant la période 1958-1961.

TABEAU LXXIII

Moyennes et extrêmes du pH à la station Z, entre la surface et le fond, durant les années 1958 à 1961.

	1958	1959	1960	1961	1958-1961
<u>pH moyen (0-100 m)</u>					
Moyenne annuelle	7,90	7,87	8,10	8,02	7,98
Minimum	7,73	7,62	7,88	7,74	7,62
Date	19.VIII	21.VIII	26.VII	18.VII	21.VIII.59
Maximum	8,28	8,19	8,29	8,21	8,29
Date	7.X	22.XII	14.VI	24.I	14.VI.60
<u>pH instantané.</u>					
Minimum	7,10	7,44	7,68	7,50	7,10
Date	21.X	21.VIII	23.V	18.VII	21.X.58
Profondeur	100	25	100	0	100
Maximum	8,36	8,21	8,46	8,50	8,50
Date	7.X	15.XII	14.VI	26.IX	26.IX.61
Profondeur	10	15	10	5	5

L'amplitude du pH moyen à Z est donc de 0,67 unité pour la période considérée, mais de 1,40 unité en valeurs instantanées.

Le tableau LXXIV indique, en pour-cent des déterminations effectuées, la fréquence avec laquelle les extrêmes se rencontrent à diverses profondeurs. Pour chacun des extrêmes, les maxima de fréquence sont soulignés par année.

TABEAU LXXIV

Fréquence des extrêmes instantanés du pH à diverses profondeurs à la station Z.

Profondeurs	1958	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Minima</u>					
0	5	22	18	16	15,2
20	13	10	4	6	8,2
25	<u>26</u>	12	5	<u>25</u>	17,0
30	23	8	5	22	14,5
40	13	8	5	6	8,0
80	10	14	12	3	9,8
100	10	<u>25</u>	<u>47</u>	16	24,5
<u>Maxima</u>					
0	23	5	8	16	13,0
5	<u>48</u>	<u>29</u>	<u>35</u>	<u>30</u>	35,5
10	26	23	11	9	17,5
15	0	16	11	3	7,5
30	0	5	13	9	6,8
40	0	0	4	13	4,3

Dans ce tableau ne figurent pas les profondeurs pour lesquelles la fréquence des extrêmes ne dépasse jamais 10% chacune des années considérées. On voit donc que durant la période de 1958 à 1961, c'est à 100 m de profondeur que se trouve le plus souvent le minimum de pH instantané et à 5 m le maximum. Or, comme on le verra encore plus loin, c'est vers 5 m de profondeur que la vie planctonique est la plus active et à quelques mètres au-dessus du fond qu'elle l'est le moins.

Pour examiner les variations à différentes profondeurs, nous en reportons les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles dans

le tableau LXXV, mais pour les niveaux 5 et 100 seulement, afin de ne pas alourdir inutilement ce tableau. Ces niveaux correspondent précisément aux profondeurs auxquelles les extrêmes instantanés sont les plus fréquents. Nous choisissons également les années 1960 et 1961 exclusivement, car ce sont les seules dont tous les mois comportent des mesures hebdomadaires en nombre suffisant pour obtenir des moyennes comparables.

TABLEAU LXXV

pH de l'eau dans la baie d'Auvernier (station 2). Moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à 5 et 100 m de profondeur, en 1960 et 1961.

	Profondeur 5 m			Profondeur 100 m		
	1960	1961	1960/61	1960	1961	1960/61
Janvier	8,14	8,13	8,14	8,15	8,15	8,15
Février	8,09	8,04	8,07	8,15	8,06	8,10
Mars	8,20	8,12	8,16	8,15	7,99	8,07
Avril	8,12	8,18	8,15	7,95	7,94	7,95
Mai	8,26	8,15	8,21	8,00	7,94	7,97
Juin	8,38	8,19	8,29	7,98	7,86	7,94
Juillet	8,17	8,00	8,09	7,89	7,82	7,86
Août	8,19	8,07	8,13	7,92	7,96	7,94
Septembre	8,30	8,44	8,37	8,02	8,01	8,02
Octobre	8,24	8,14	8,19	7,92	7,92	7,92
Novembre	8,22	8,00	8,11	7,93	7,84	7,89
Décembre	8,09	7,96	8,03	7,99	7,92	7,96
Hiver	8,14	8,10	8,12	8,15	8,07	8,11
Printemps	8,25	8,17	8,21	7,98	7,91	7,95
Été	8,22	8,17	8,20	7,94	7,93	7,94
Automne	8,18	8,03	8,11	7,94	7,89	7,92
Année	8,20	8,12	8,16	8,00	7,95	7,98

Ainsi, le pH est plus élevé, en moyenne, au printemps et en été à 5 m de profondeur, qu'en automne et en hiver. Par contre, il ne varie pas du printemps à l'automne à 100 m de profondeur, mais y est plus élevé en hiver.

Fig. 75.

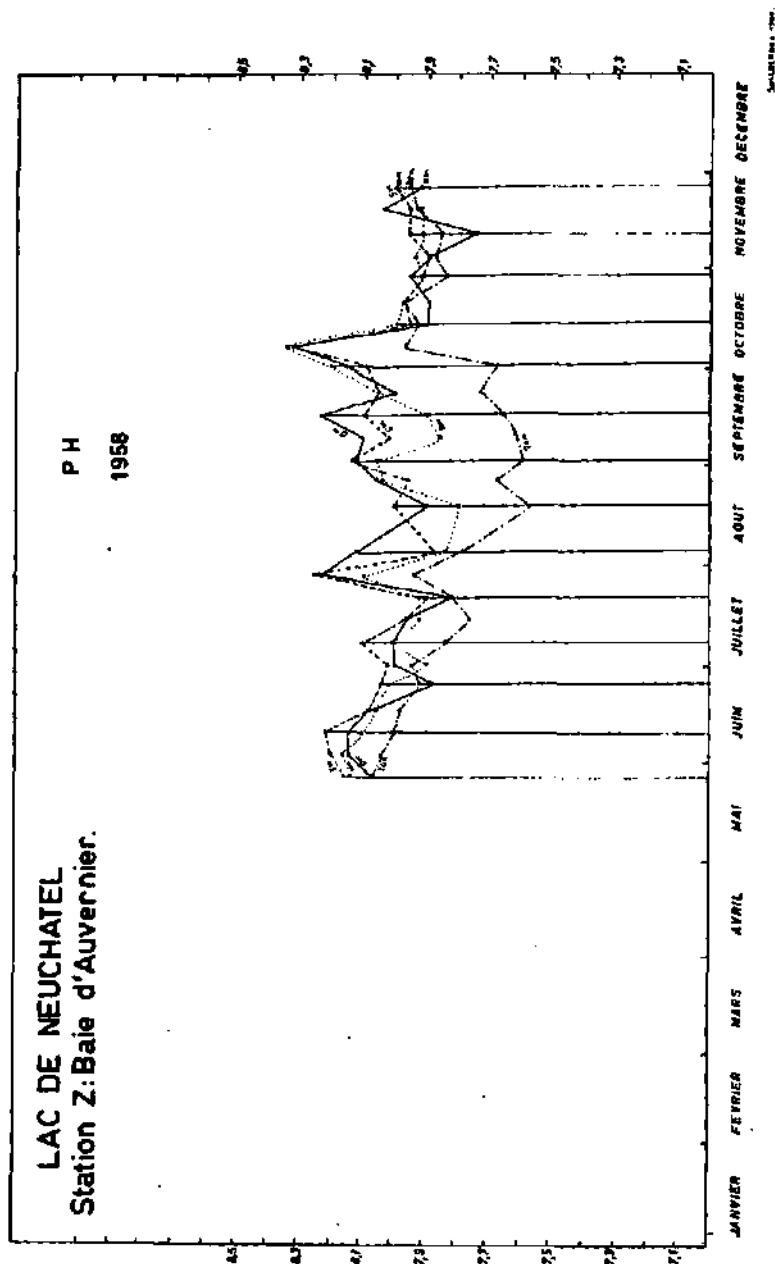


Fig. 76.

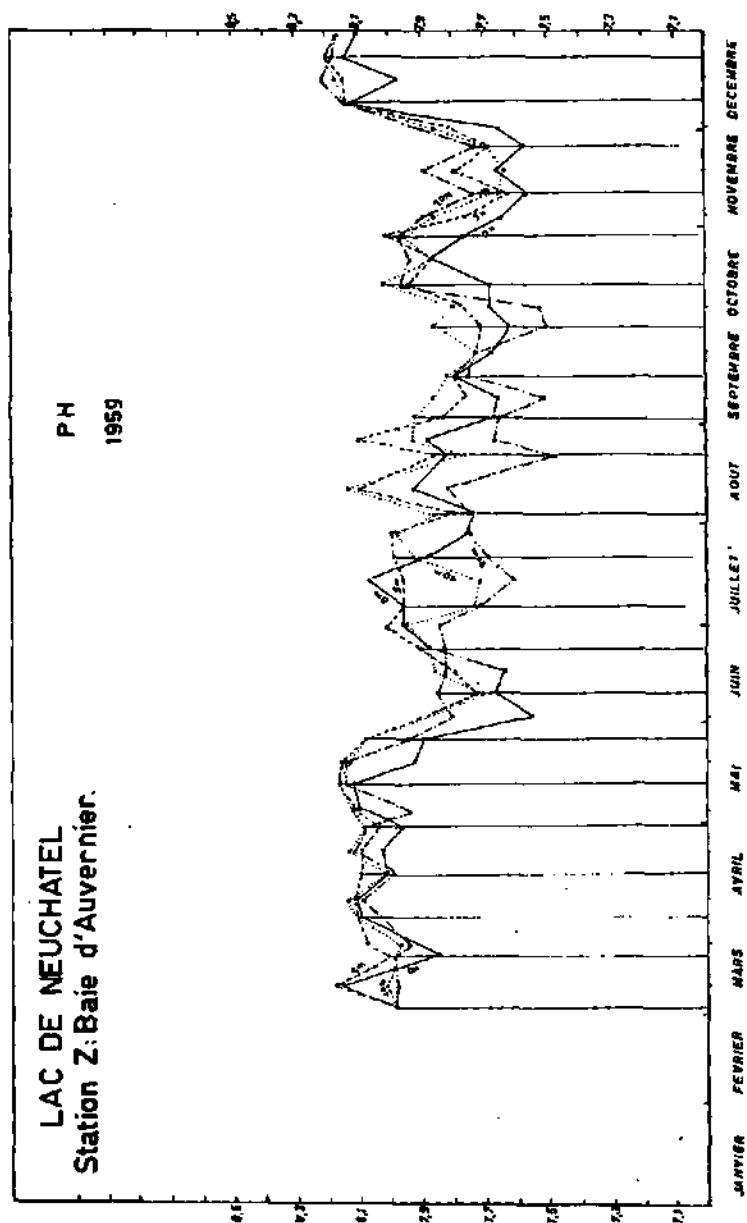


Fig. 77.

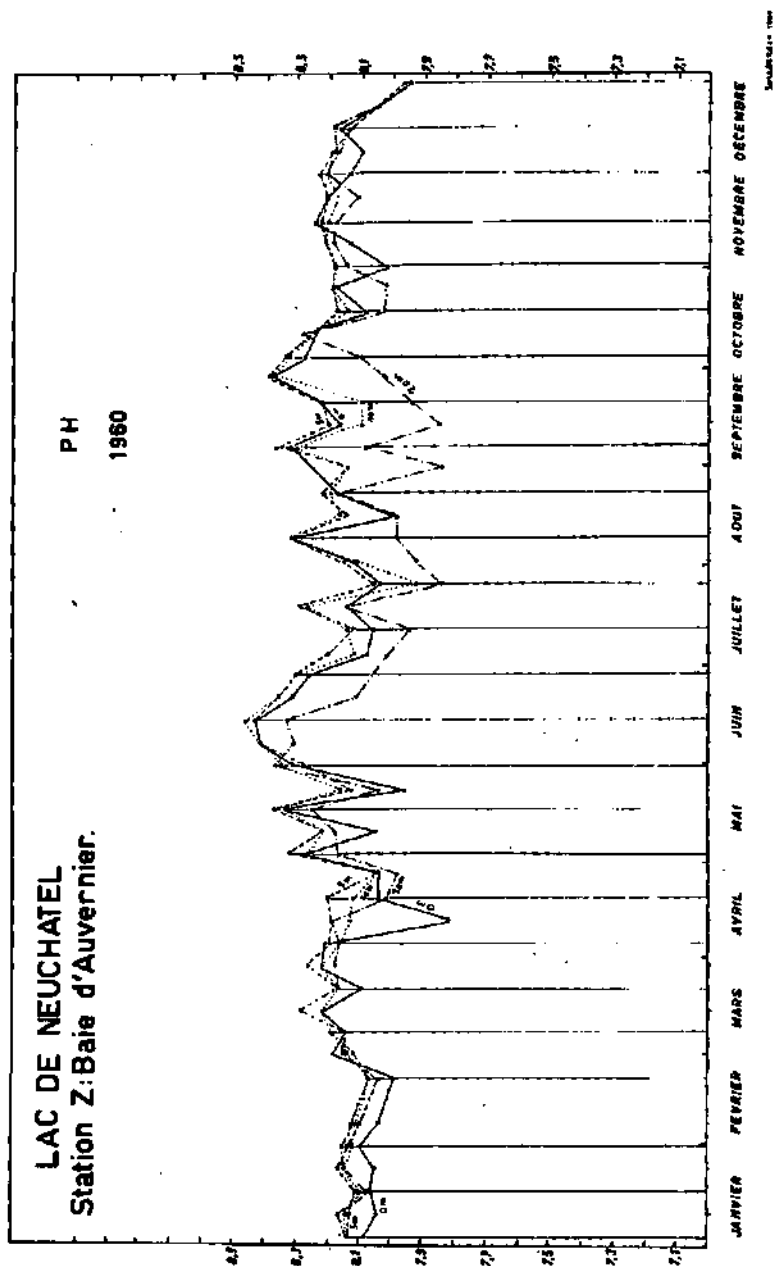
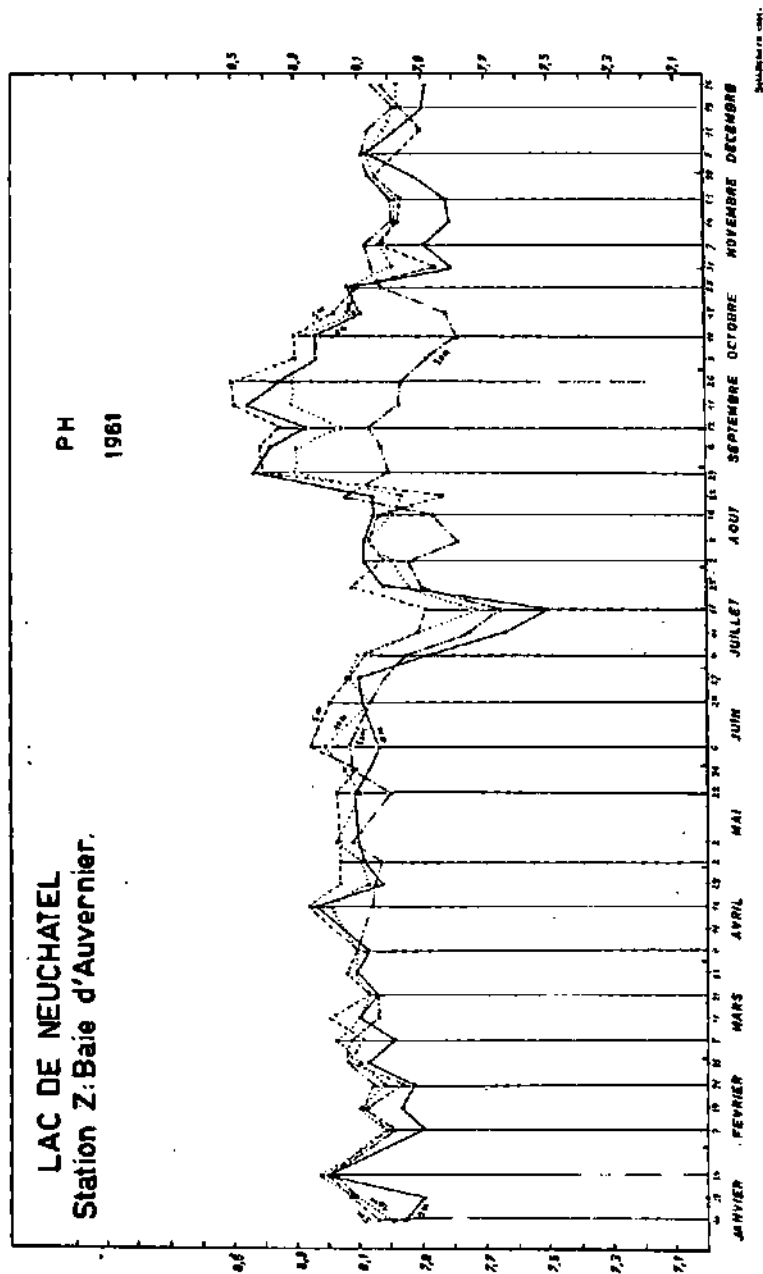


Fig. 78.



On trouvera, sur les figures 75 à 78, les courbes représentatives de la variation du pH entre 0 et 20 m de profondeur à la station Z de 1958 à 1961. Pour ne pas surcharger ces graphiques, nous nous sommes abstenus d'y faire figurer les courbes des niveaux 30, 40, 80 et 100 qui présentent d'ailleurs des fluctuations moins intéressantes, parce que de plus faibles amplitudes.

Examinons de manière un peu plus détaillée les fluctuations du pH des couches supérieures (fig. 75 à 78) en rapport avec les variations de la température superficielle (fig. 44 à 47), ainsi qu'avec celles des teneurs en calcium (fig. 127 à 130) et en diatomées (fig. 144). Pour une meilleure comparaison des courbes, celles-ci sont reproduites en période triennale, mais à échelle réduite, dans la fig. 79. Cette dernière ne donne toutefois que les courbes à 0m pour la température, le pH et le Ca.

Nous nous attachons surtout à l'époque où débute la stratification thermique car, c'est à notre avis la période durant laquelle les variations du pH sont les plus intéressantes.

En 1959, année chaude et relativement bien ensoleillée, on enregistre des températures estivales élevées fin juin et durant une partie de juillet seulement. En mai, le pH baisse par la mise en liberté du CO_2 due à l'échauffement de l'eau. En même temps, la décalcification commence; elle continue en juin et, par une précipitation massive autant que rapide du carbonate de calcium, entraîne une grande quantité de bactéries au fond du lac. Ce phénomène se traduit par l'aspect blanchâtre à gris que prennent les couches superficielles durant plusieurs jours, mais plus particulièrement le 23 juin; on a affaire alors à ce que les pêcheurs appellent "le lac blanc" (EL) qui apparaît régulièrement au début des étés chauds. Puis, de nouvelles quantités de diatomées réapparaissent et le pH remonte au fur et à mesure que l'assimilation chlorophyllienne consomme le CO_2 dissous et équilibrant encore présent. Nous aurons l'occasion de revenir, plus bas, sur la question posée par la montée brusque du pH en décembre 1959.

En 1960, année caractérisée par un manque d'insolation, un été pluvieux et du mauvais temps durant le second semestre, les hautes températures estivales atteignent des valeurs moins élevées mais se maintiennent plus longtemps qu'en 1959. L'abaissement passager du pH consécutif à la hausse des températures se manifeste en mai, brièvement toutefois, en même temps que la décalcification et la diminution du nombre des diatomées s'ébauchent. Ces dernières manifestations se poursuivent ensuite en juin et juillet, mais plus lentement qu'en 1959. Par contre, le pH s'élève et se maintient plus haut qu'en 1959 jusqu'en novembre où l'"overturn" ramène par brassage la teneur en calcium à sa valeur vernale, tout en faisant baisser le pH.

En 1961, une des plus chaudes années de toute la statistique de Neuchâtel, les hautes températures estivales atteignent une valeur un peu supérieure à celle de l'année précédente, mais surtout se maintiennent un mois de plus qu'en 1960. La forte et brusque chaleur

du début de l'été libère du CO_2 qui fait baisser le pH d'autant mieux que la décalcification rapide de juin et juillet provoque une diminution nette de l'effet tampon du milieu. La décalcification particulièrement marquée (le "lac blanc" s'observe tout spécialement bien du 9 au 11 juillet) et de longue durée qui suit ne tarde pas à faire remonter d'autant mieux le pH qu'elle annihile encore davantage l'effet tampon du milieu par la précipitation massive du carbonate de calcium qui entraîne à son tour une forte précipitation des diatomées au fond du lac. A la remontée de la teneur en calcium dissous au début de novembre correspond alors une chute nette du pH.

On peut donc déduire de ce que nous venons de voir que dans les couches supérieures de notre lac et durant la stratification thermique, la variation du pH est liée à celles de la température, de la teneur en calcium et en diatomées. Cette dernière participe en effet au phénomène lorsqu'après la première précipitation du carbonate de calcium et sans que la température change beaucoup, la production de diatomées augmente à nouveau, suivie d'une assimilation chlorophyllienne plus intense qui libère de nouvelles quantités de carbonate en consommant du CO_2 équilibrant. Nous constatons donc que le pH de l'eau des couches supérieures diminue d'abord en mai ou juin, puis s'élève d'autant plus fortement ensuite que l'été est plus chaud et plus long et d'autant plus rapidement que l'effet tampon du milieu est davantage compromis par une plus forte décalcification de l'eau.

Il n'est pas exclu, toutefois, que les diatomées agissant sur les variations du pH autrement que par l'intermédiaire de la décalcification. En effet, Sernow (1958, p.278-295) a montré que les diverses espèces de phytoplancton peuvent faire varier considérablement le pH de l'eau à certains moments de l'année, telles les Protococcales et les Cyanophycées par exemple, qui peuvent très facilement faire monter le pH à 9, voire 10. Dès lors, l'évolution des espèces, aussi bien durant la période de stratification thermique que pendant les autres mois, mais surtout, à notre avis, l'évolution des associations d'espèces planctoniques qui diffèrent souvent d'une année à l'autre, peuvent fort bien, en ce qui nous concerne, faire varier le pH au cours de l'année ou même provoquer un décalage durable tel qu'on le constate en décembre 1959 par rapport aux mois précédents. Cette question ne peut être résolue dans le cadre du présent travail et nécessite encore d'autres recherches qui sont en cours actuellement.

En examinant les variations du pH durant la stratification thermique et en tenant compte des trois zones superposées alors dans le lac, on obtient le tableau LXXVI

TABEAU LXXVI

(cf. page suivante)

TABLEAU LXXVI

Moyennes et extrêmes du pH mesuré à la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961.

	1958		1959		1960		1961	
<u>Épilimnion</u>								
Moyenne	8,05		7,88		8,22		8,11	
Extrêmes	7,82	8,35	7,70	8,12	8,01	8,45	7,70	8,45
Dates	22.VII	7.X	9.VI	12.V	26.VII	14.VI	18.VII	19.IX
Amplitude	0,53		0,42		0,44		0,75	
<u>Métalimnion</u>								
Moyenne	7,88		7,74		8,10		8,03	
Extrêmes	7,57	8,28	7,50	8,17	7,84	8,41	7,79	8,32
Dates	23.IX	7.X	30.IX	12.V	31.VIII	7.VI	17.X	19.IX
Amplitude	0,71		0,67		0,57		0,53	
<u>Hypolimnion</u>								
Moyenne	7,83		7,74		8,01		7,92	
Extrêmes	7,53	8,08	7,52	8,05	7,77	8,24	7,74	8,14
Dates	21.X	7.X	21.VIII	19.V	31.VIII	31.V	11.VII	22.VIII
Amplitude	0,55		0,53		0,47		0,40	

Pour la période de 1958 à 1961, on tire de ce tableau une moyenne de 8,07 pour l'épilimnion, de 7,94 pour le métalimnion et de 7,88 pour l'hypolimnion. Durant ce même laps de temps, chacune des fractions lacustres en question voit son pH varier de 7,70 à 8,45, de 7,50 à 8,41 et de 7,52 à 8,24, ce qui donne les amplitudes respectives suivantes : 0,75 pour l'épilimnion, 0,91 pour le métalimnion et 0,72 pour l'hypolimnion.

La diminution de la moyenne du pH lorsqu'on passe de l'épilimnion à l'hypolimnion est une conséquence directe de la teneur en CO₂ qui est plus élevée en moyenne lorsqu'on s'enfonce dans le lac. Si les amplitudes diminuent de 1958 à 1959, puis augmentent de 1960 à 1961 dans l'épilimnion, c'est que le climat de chacune de ces années influence directement le pH des couches supérieures, comme nous l'avons vu. Par contre, la baisse régulière de ces amplitudes, aussi bien dans le métalimnion que dans l'hypolimnion peut vraisemblablement être

mise en relation avec l'augmentation de la pollution du lac qui, en augmentant la teneur en sels dissous, augmente le "tamponnement" du milieu et, par conséquent, diminue les possibilités de variation du pH. Cependant, il est encore trop tôt pour admettre définitivement cette explication, bien que la diminution de ces amplitudes représente 25% pour le métalimnion et 27% pour l'hypolimnion en 4 ans; il est nécessaire de poursuivre les mesures quelques années encore, ce qui est dans notre programme ultérieur.

31.2. Le pH aux stations A à F.

Durant les grandes expéditions, on mesure le pH des échantillons d'eau dans les mêmes conditions qu'à la station Z. On observe ainsi des différences de pH d'un endroit du lac à l'autre, mais les mesures à chacune de ces stations n'ayant lieu qu'à des intervalles d'un ou plusieurs mois, il n'est pas possible d'y suivre l'évolution du pH aussi bien qu'à Z. C'est pourquoi nous nous contentons de donner dans le tableau LXXVII les moyennes groupées par mois (chaque année les grandes expéditions ont lieu la dernière semaine des mêmes mois), ainsi que les extrêmes instantanés observés durant les années 1957 à 1960.

Dans ce tableau, les extrêmes des moyennes sont soulignés par année et nous nous limitons aux niveaux 0, 10, 20, 30 et 40 qui sont ceux pour lesquels les variations sont les plus marquées et les plus intéressantes parce qu'il s'agit des couches supérieures du lac.

TABLEAU LXXVII

(cf. page suivante)

TABLEAU LXXVII

Moyennes et extrêmes des mesures de pH aux stations A à F pendant les années 1957 à 1960.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	8,11	8,13	<u>8,11</u>	<u>8,06</u>	<u>8,04</u>
Juin	<u>8,19</u>	<u>8,18</u>	8,09	8,04	7,97
Août	8,11	8,07	<u>7,85</u>	<u>7,79</u>	7,84
Septembre	8,07	<u>8,01</u>	7,82	7,80	7,81
Octobre	<u>7,81</u>	8,06	8,02	7,91	<u>7,79</u>
Amplitude	0,38	0,17	0,26	0,27	0,25
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	7,52	7,68	7,48	<u>7,45</u>	7,49
Station	A	A	A	C	D
Date	29.IX.59	29.IX.59	29.IX.59	25.VIII.59	27.X.59
Maximum	<u>8,49</u>	8,43	8,33	8,30	8,34
Station	B'	C	A	B'	B'
Date	29.X.57	27.IX.60	26.IV.60	29.X.57	27.IX.60
Amplitude	0,97	0,75	0,85	0,85	0,85

L'amplitude des variations du pH durant cette période quadriennale, tant en ce qui concerne les moyennes groupées par mois que les extrêmes, sont variables à 0 et à 10 m de profondeur, mais remarquablement constantes plus bas. On peut attribuer ce fait à l'action du plancton particulièrement abondant entre la surface et 10 à 15 m de profondeur, et qui agit sur les fluctuations du pH comme nous l'avons vu précédemment.

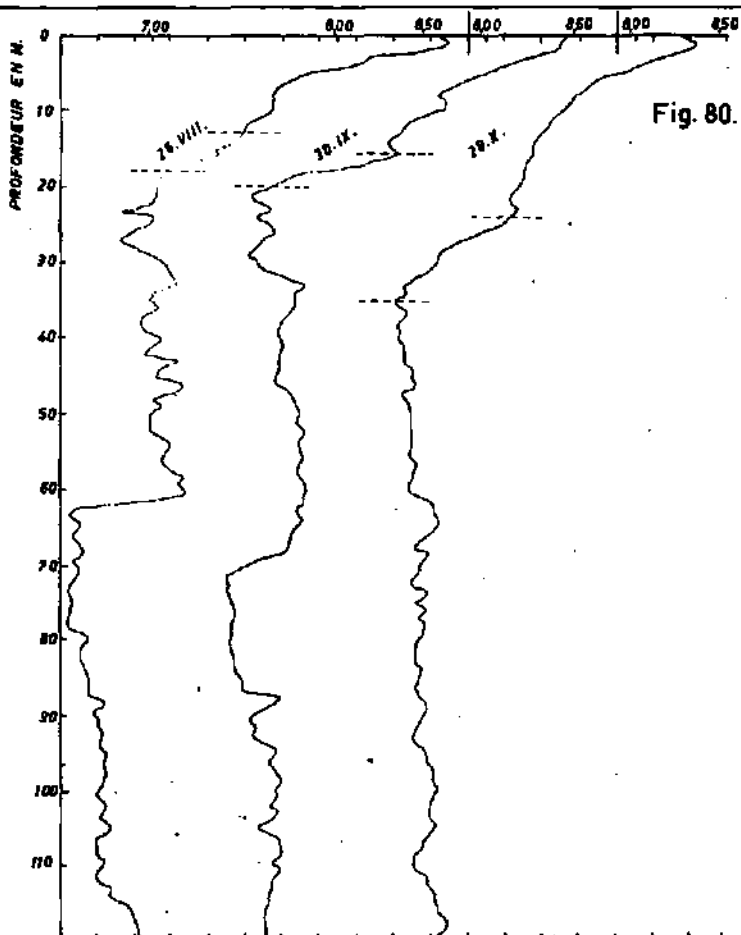
31.3. Le pH mesuré "in situ".

Avec l'appareillage décrit au paragraphe 20.6, nous mesurons le pH mètre par mètre directement dans le lac. Reportant ces mesures en fonction de la profondeur, nous obtenons les courbes de la fig.80 qui présentent, en plus des fluctuations à divers niveaux, deux parties distinctes: une supérieure très inclinée, allant de la surface à l'interface métalimnion-hypolimnion (le métalimnion est comprise entre les lignes horizontales pointillées) et une inférieure, au-dessous de cette interface et dont l'allure générale se rapproche fortement de la verticale, sauf quelques décrochements dont nous reparlerons

tout à l'heure. On voit, par la fig. 80, que le pH varie beaucoup dans la partie supérieure, autrement dit dans l'épilimnion et le métalimnion, de manière semblable à ce qu'on observe pour la température dans la région des sauts thermiques. Dans cette partie supérieure de la courbe, le pH présente une amplitude de 1,6 à 1,8 unité suivant la saison. Dans la partie inférieure, au contraire, les écarts les plus nombreux sont de l'ordre de 0,2 à 0,1 pH et même moins. Entre 60 et 70 m de profondeur, toutefois, à un écart plus marqué doit correspondre une augmentation rapide de la teneur en CO_2 , acide qui conditionne le pH dans les couches profondes, ce qui atteste la présence, vraisemblablement, d'une zone de discontinuité chimique des couches d'eau, car on n'enregistre aucun écart thermique à ces profondeurs. D'ailleurs, cet écart du pH va s'atténuant avec le temps et tend à disparaître fin octobre.

L'ensemble constitué par l'épilimnion et le métalimnion n'est autre ici que la zone trophogène du lac et l'hypolimnion la zone tropholytique. Rappelons que Thienemann (1928) a défini comme trophogène la zone dans laquelle les plantes à chlorophylle créent des substances organiques par assimilation et comme tropholytique la zone dans laquelle l'assimilation est impossible et où les substances organiques sont détruites. Ainsi donc, la fig. 80 montre, pour la station A de notre lac, que le pH varie énormément dans la zone trophogène et très peu dans la zone tropholytique.

La fig. 81 montre qu'il en est de même à d'autres stations; ainsi, le même jour, les variations du pH sont tout à fait semblables à A et B, stations de régions profondes. Par contre, la situation est un peu différente en même temps à B' où le coude séparant les deux parties de la courbe du pH se trouve dans le métalimnion. L'explication est donnée par la fig. 82 dans laquelle sont reportées, pour les stations A et B' le même jour, les variations simultanées du pH et de la teneur en CO_2 libre. Dans les deux cas, le maximum (relatif) de la teneur en CO_2 correspond, quant à la profondeur, au point d'inflexion de la courbe du pH; au-dessous de ce niveau, la teneur en CO_2 libre ne varie pas beaucoup, tandis qu'au-dessus l'écart est bien plus marqué. A la station A, la forte variation du pH correspond à la forte variation de la teneur en CO_2 libre; elles se trouvent toutes deux au-dessus de l'interface métalimnion-hypolimnion; les points d'inflexion et la partie sensiblement verticale des deux courbes sont situées toutes deux dans l'hypolimnion. A la station B', ces deux points d'inflexion se rencontrent dans le métalimnion, contrairement à A le même jour. Si l'on considère les variations de température de l'eau du lac les jours qui ont précédé le 26 août 1958, on constate une baisse de température superficielle consécutive à du vent; ce dernier, par les courants qu'il a provoqués dans la région peu profonde où se trouve B', a ramené, vers les couches superficielles, de l'eau de la zone tropholytique, moins décalcifiée que celle de la zone trophogène. Mais comme les 25 et 26 août la température remonte rapidement, les couches superficielles à B' s'échauffent rapidement aussi car cette station est située en région peu profonde. Un métalimnion important apparaît alors, dû à plusieurs sauts thermiques superposés qui se reforment en englobant de l'eau qui appartenait à la zone tropholytique les jours précédents. Si on observe encore dans

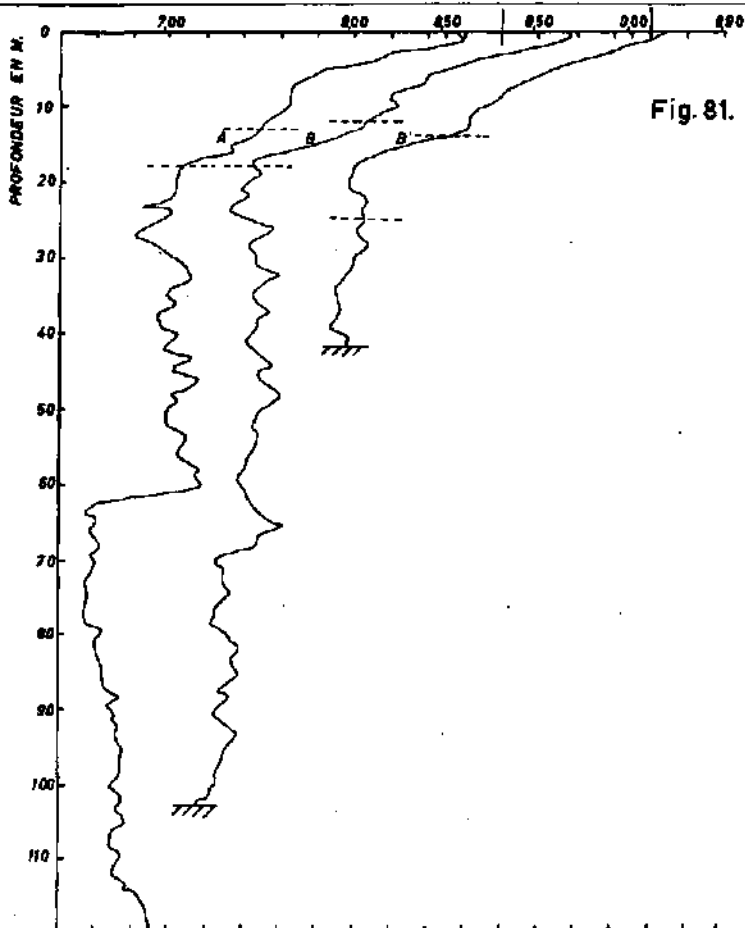


LAC DE NEUCHÂTEL

PH DE L'EAU IN SITU

Station A: Treytel.

1958



LAC DE NEUCHÂTEL

PH DE L'EAU IN SITU

Stations A, B & B'

26 AOÛT 1958

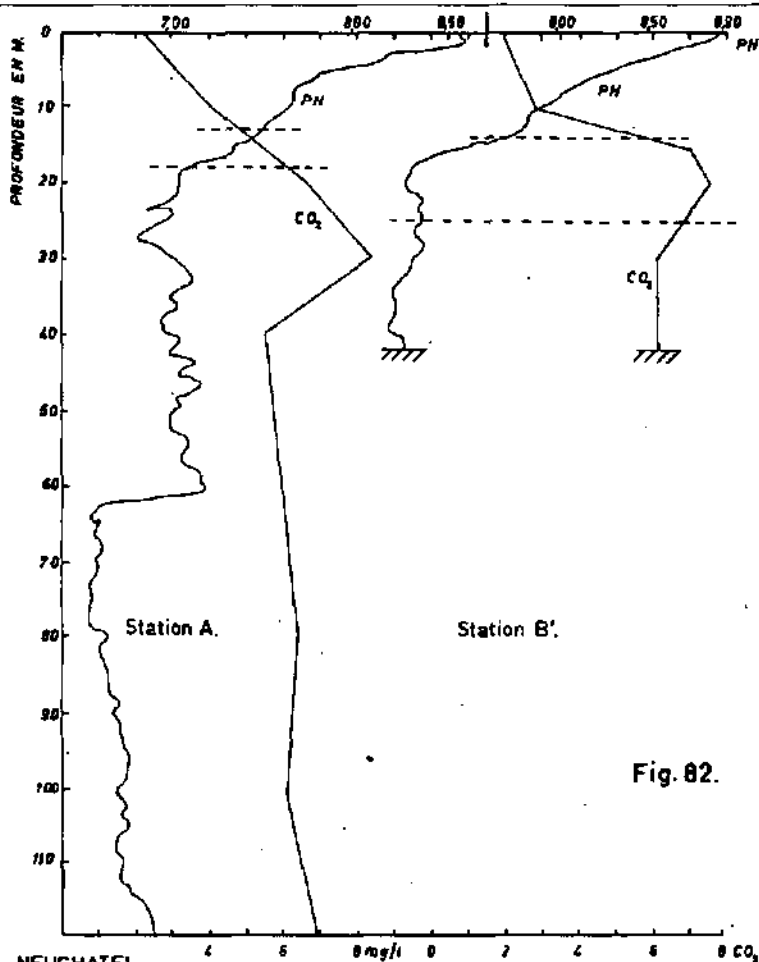


Fig. 82.

LAC DE NEUCHÂTEL

26 AOUT 1958

PH DE L'EAU IN SITU ET CO_2 LIBRE

le métalimnion les deux points d'inflexion du pH et du CO_2 , c'est que l'assimilation chlorophyllienne n'a pas encore eu le temps de consommer suffisamment de CO_2 et, par conséquent, de faire remonter le pH à des valeurs proches de celles qu'il a dans l'épilimnion qui est davantage décalcifié. On se trouve donc en quelque sorte, à la station B', en présence d'un métalimnion "plus jeune" qu'à A, station située plus au large et qui n'a pas subi les mêmes effets de mélange dus au vent que B' plus proche du littoral.

Enfin, la situation est pareille le 26 août 1958 à la station C, encore plus proche du rivage que B'. C'est ce que montre la fig. 83 qui la compare à la situation du 24 juin 1958 au Grand Verger. Dans ce dernier cas, les jours précédant les mesures, le lac était calme et la température en hausse, favorisant la décalcification des couches sub-superficielles. On se trouve alors dans une situation tout à fait semblable à celle de A le 26 août 1958.

On peut conclure de ce qui précède que le pH de l'eau "in situ" varie fortement dans la zone trophogène en même temps que la teneur en CO_2 libre, mais simultanément peu dans la zone tropholytique. Après plusieurs jours de calme, la limite entre les deux zones correspond à l'interface métalimnion-hypolimnion des stations aisées suffisamment au large. Sous l'action des courants engendrés par les vents, cette limite remonte provisoirement dans le métalimnion des stations littorales. Cette dernière partie de nos conclusions précise un peu mieux la limite des deux zones que ne le fait le Livre de l'Eau (1954-1957, tome 2, p. 76).

Nos dosages de CO_2 libre sont très espacés en profondeur et soumis aux réserves que nous avons formulées déjà quant à leur précision inhérente à la méthode employée. Ils donnent tout de même une idée des variations simultanées du pH et du CO_2 libre, mais il est probable que la concordance entre les deux mesures serait meilleure si les dosages de CO_2 pouvaient être exécutés tous les mètres par exemple et par une méthode plus précise.

31.4. Le pH mesuré dans l'ensemble du lac.

Pour avoir une image du pH dans l'ensemble du lac, nous opérons en profils transversaux, comme pour les mesures de la température. Ainsi, on recueille en un jour plus de 1800 mesures réparties aussi également que possible dans toute la masse lacustre. Nous examinerons les résultats de la première série de profils levés le 29 mai 1962, bien que l'opération ait eu lieu en dehors du cadre du présent travail.

Les extrêmes instantanés enregistrés ce jour ont pour valeurs : 9,30 à la station 56 (devant Estavayer-le-lac) à 1 m de profondeur (température 12,4) et 7,00 à la station 2 (baie d'Auvonnier), à 105 m de profondeur (température 4,3). En décomposant le lac en tranches superposées de 10 m d'épaisseur, additionnant les produits des volumes de chacune de ces tranches par le pH moyen au milieu de l'épaisseur de la tranche et en divisant le total par le volume du

lac, on obtient le pH moyen de l'ensemble de la masse lacustre. C'est ainsi qu'on obtient 7,64 le 29 mai 1962.

31.5. Comparaison avec d'autres travaux.

Ström (1931) a reconnu déjà dans le Feforvatn (Norvège) une augmentation du pH dans les couches sub-superficielles où se rencontre généralement le maximum dû au phytoplancton (exemple, pour ce lac : 7,20 en surface, 7,70 à 5 m et 7,35 à 10 m). Nos courbes des figures 80 à 83 montrent bien le même phénomène vers 2 m le 26 août 1958 où le plancton atteint sa productivité maximum.

Parmi les travaux plus récents, Rouch (1946, p.231) signale qu'en mer le pH diminue de la surface au fond et souvent très rapidement entre 0 et 400 m, beaucoup plus lentement ensuite. Il s'agit donc d'une constatation semblable à celle que nous faisons dans notre lac.

Des mesures du pH directement dans la masse lacustre, sont mentionnées pour la première fois par Allgeier, Hafford et Juday (1941) pour 11 lacs du Wisconsin (U.S.A.), mais à 5,8,10 et 12 m de profondeur seulement. Contrairement à ce que ces auteurs ont obtenu, nous estimons que seules des mesures aussi serrées dans le sens vertical que celles auxquelles nous procédons permettent de se faire une idée exacte de la variation du pH avec la profondeur.

A bord du bathyscaphe F.N.R.S.III, Diatèche et Dubuisson (1960) ont mesuré le pH "in situ" dans la Méditerranée jusqu'à 2300 m de profondeur. Les courbes obtenues en fonction de la profondeur varient de la même manière que les nôtres pour le lac de Neuchâtel.

Rappelons encore, pour terminer, que Monod (1960) indique un abaissement du pH de 7,6 à 7,4 de 1954 à 1959 dans les couches profondes du Léman par 50 m de fond, abaissement qu'il attribue à l'eutrophisation de ce lac. Nos mesures dans les couches profondes du lac de Neuchâtel ne portent que sur 2 années complètes jusqu'à ce jour. Il n'est donc pas possible pour l'instant d'en tirer des conclusions parallèles à celles de Monod.

Enfin, selon une communication personnelle de Messikommer (juillet 1960), le pH superficiel du lac de Pfäffikon a passé de 7,6 en 1959 à 8,8 en 1960, présentant par ce changement une analogie certaine avec le décalage observé dans notre lac entre 1959 et 1960. Il y a là un phénomène encore inexpliqué mais qui pourrait être en relation avec les changements planctoniques brusques et massifs observés à la même époque dans les deux lacs.

32. La conductivité électrique.

La mesure de la conductivité électrique de l'eau est décrite au paragraphe 20.7.

C'est une mesure très appréciée de tous ceux qui s'occupent de recherches dans le domaine des eaux car, non seulement elle est facile à exécuter, mais est en relation étroite avec la teneur totale en sels dissous, au point qu'on peut même dire que, dans les eaux douces, la conductivité électrique est directement proportionnelle à la teneur en électrolytes dissous. En limnologie, on l'exprime⁶ en micromho par cm, cette unité étant la réciproque du mégohm (10^6 ohm).

La conductivité ou son inverse la résistivité électrique varie avec la température, de sorte que pour comparer les mesures entre elles, il est nécessaire de les ramener à une température donnée. Pendant longtemps, on a ramené les conductivités à la température standard de 18° , mais maintenant chacun s'efforce d'utiliser 20° , à l'exception de certains pays tels que les U.S.A. qui, parce qu'une partie de leur territoire s'étend aux régions subtropicales, ont choisi la température de 25° . Nous avons adopté 20° et, comme indiqué déjà au paragraphe 21 plus haut, la formule de conversion suivante pour les mesures faites à d'autres températures que 20° :

$$K_{20} = K_t [1 - 0,023(20-t)]$$

où t est la température de la mesure en degrés centigrades.

Juday et Birge (1933), se référant à des recherches de Ruttner, ont montré que la conductivité électrique de l'eau en surface varie suivant la saison, passant de la valeur minimum en mai à un maximum en automne et en hiver. Ruttner avait observé une diminution de la conductivité lors de la décalcification estivale, et il l'attribuait uniquement à l'action de certaines plantes aquatiques faisant baisser plus ou moins la teneur en électrolytes de l'eau par photosynthèse. Juday et Birge ont prouvé, par leurs observations sur les lacs du Wisconsin (U.S.A.), que la décalcification n'est pas la cause unique de la diminution de la conductivité électrique, mais seulement un facteur participant à cette diminution, car les substances organiques lorsqu'elles se combinent aux électrolytes y participent aussi tout en compliquant sérieusement le problème.

Dans l'étude des lacs, la mesure de la conductivité électrique permet, par exemple, de suivre avant leur mélange le cheminement de masses d'eau de compositions différentes les uns des autres. C'est ainsi que Nümann (1936) a pu facilement déterminer le parcours sous-lacustre du Rhin et de la Bregenzer Aach dans le Bodan, en particulier grâce aux sulfates que la première de ces rivières contient, en hiver, en bien plus grandes quantités que le lac. Nous ne pouvons malheureusement pas utiliser le même procédé pour repérer le parcours sous-lacustre de l'Orbe-Thièle ou de la Broye dans le lac de Neuchâtel, car les conductivités respectives des échantillons provenant de ces affluents sont, durant la plus grande partie de l'année, trop proches de celle du lac.

Entz et Sebestyén (1946) ont prouvé que, dans le Balaton, la variation de la conductivité durant la journée est en rapport avec l'assimilation chlorophyllienne. Quant à Vollenweider et Frei (1953),

ils sont arrivés à une conclusion analogue avec le phytoplancton du Rotsee (Suisse). Il y a dès lors aussi relation entre la conductivité électrique et la teneur en CO_2 de l'eau.

32.1. La conductivité électrique à la station Z.

En même temps que le pH, nous mesurons la conductivité électrique des échantillons hebdomadaires prélevés à la station Z et ramenés à la température de 20° .

La conductivité varie suivant la saison et la profondeur, ainsi que les figures 84 à 87 le font voir.

En moyenne annuelle, la conductivité électrique de l'eau augmente légèrement avec la profondeur, ce qu'indiquent les chiffres suivants correspondant à la période de 1960 à 1961 :

Profondeur	0	5	10	15	20	25	30	40	80	100	m
Conducti- vité	225	218	219	221	224	226	227	228	229	231	micromho. om.

La surface fait exception pour une raison qui nous échappe encore après deux ans de moyennes seulement.

La conductivité électrique moyenne à la station Z, entre la surface et le fond, calculée à l'aide des résultats obtenus chaque fois pour les dix niveaux habituels, varie comme le montre le tableau LXXVIII dans lequel nous reportons aussi les extrêmes instantanés relevés durant les années 1958 à 1961.

TABLEAU LXXVIII

(cf. page suivante)

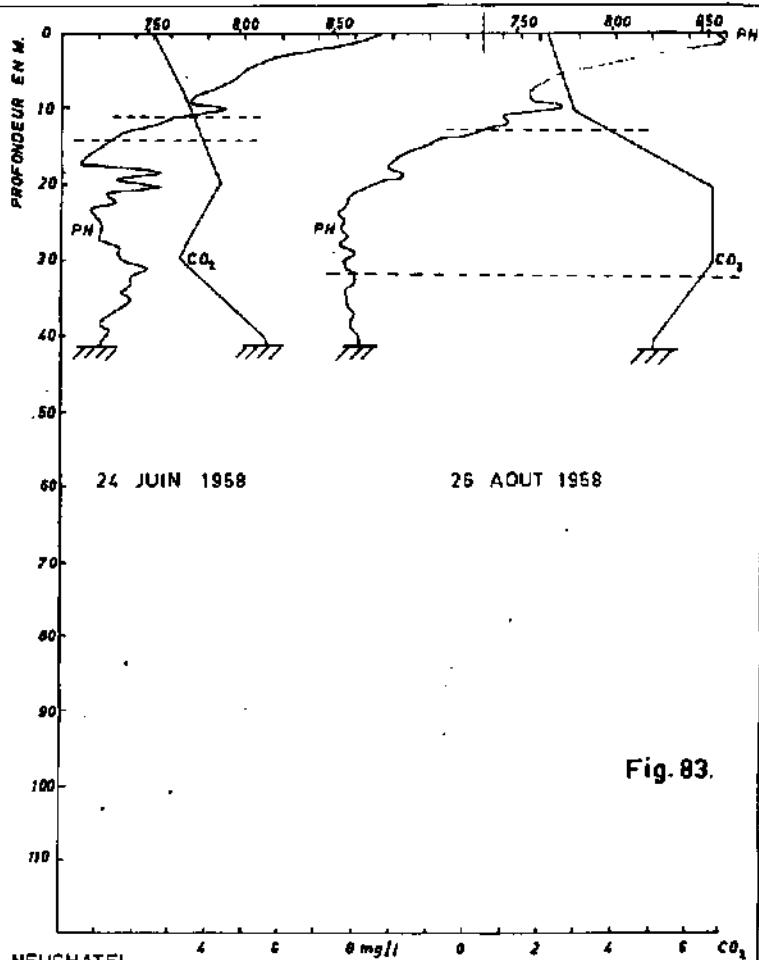


Fig. 83.

LAC DE NEUCHÂTEL

Station C: Grand Verger

PH DE L'EAU IN SITU ET CO₂ LIBRE.

Fig. 84.

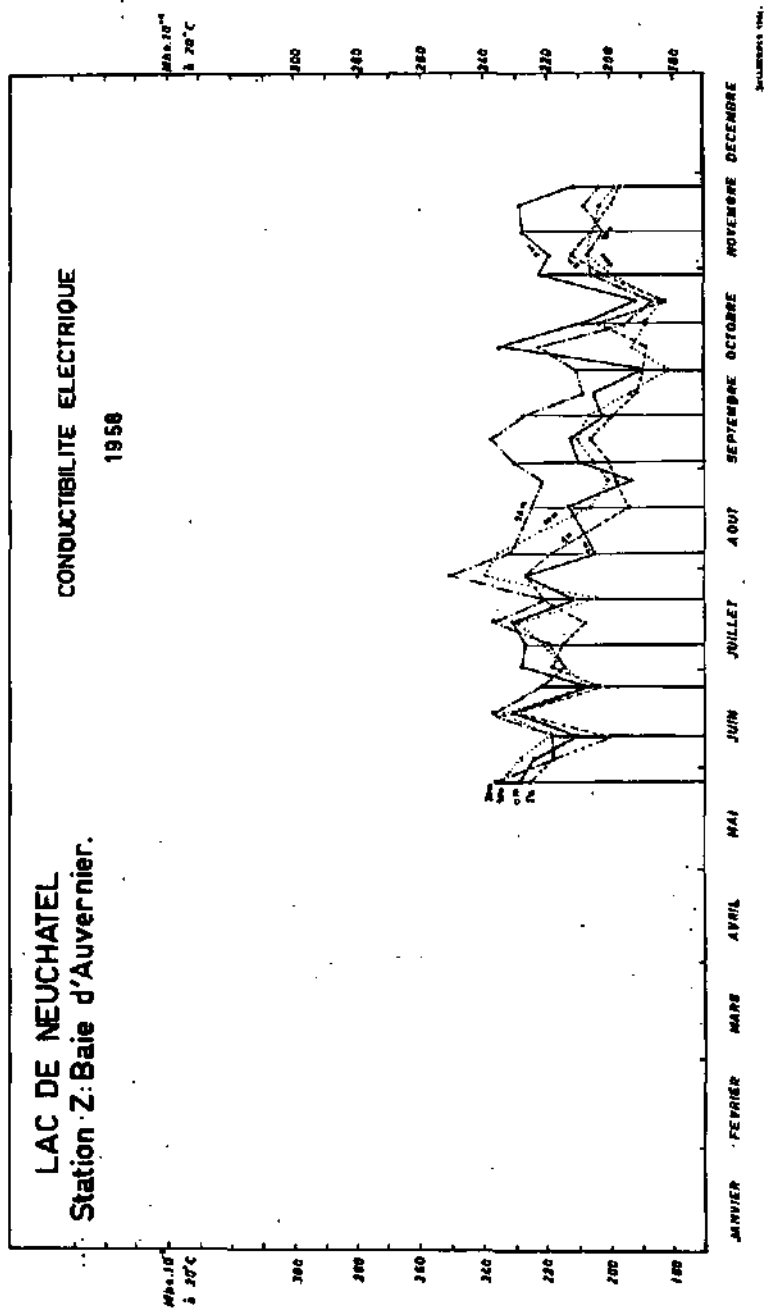


Fig. 85.

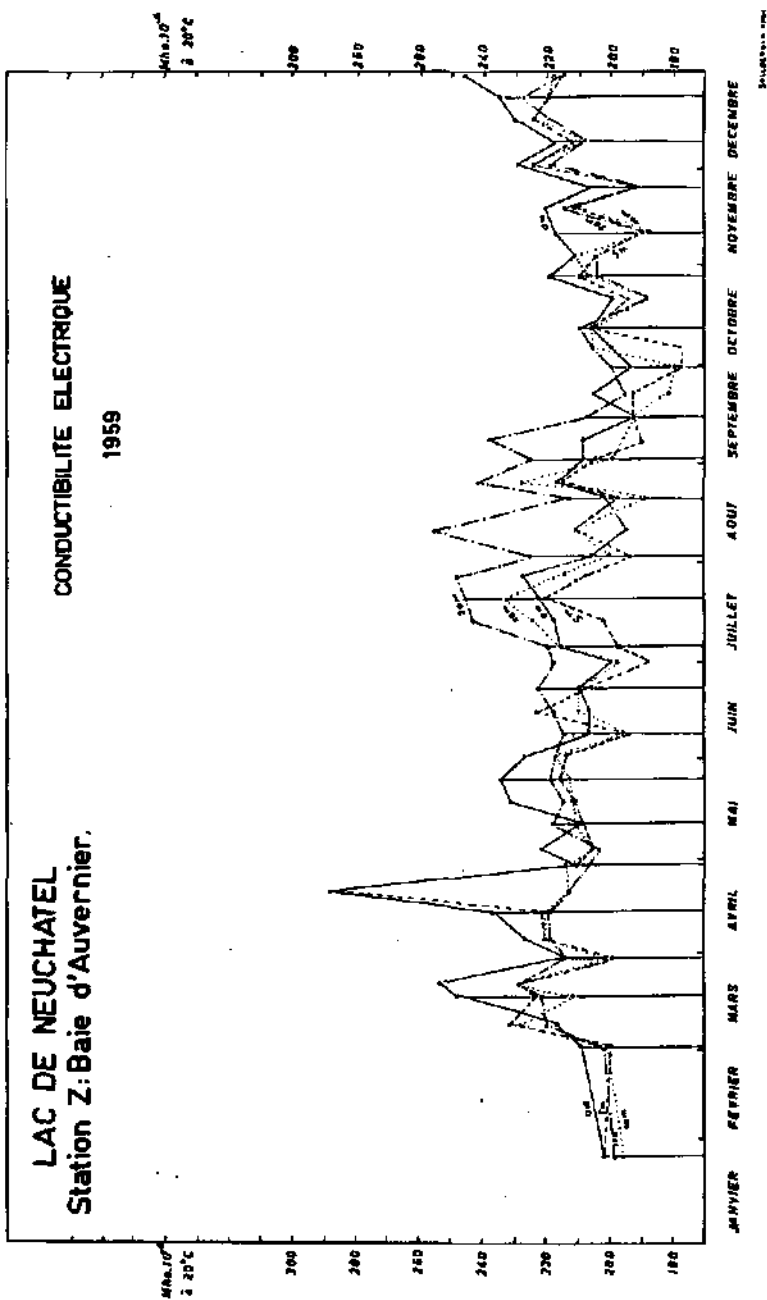
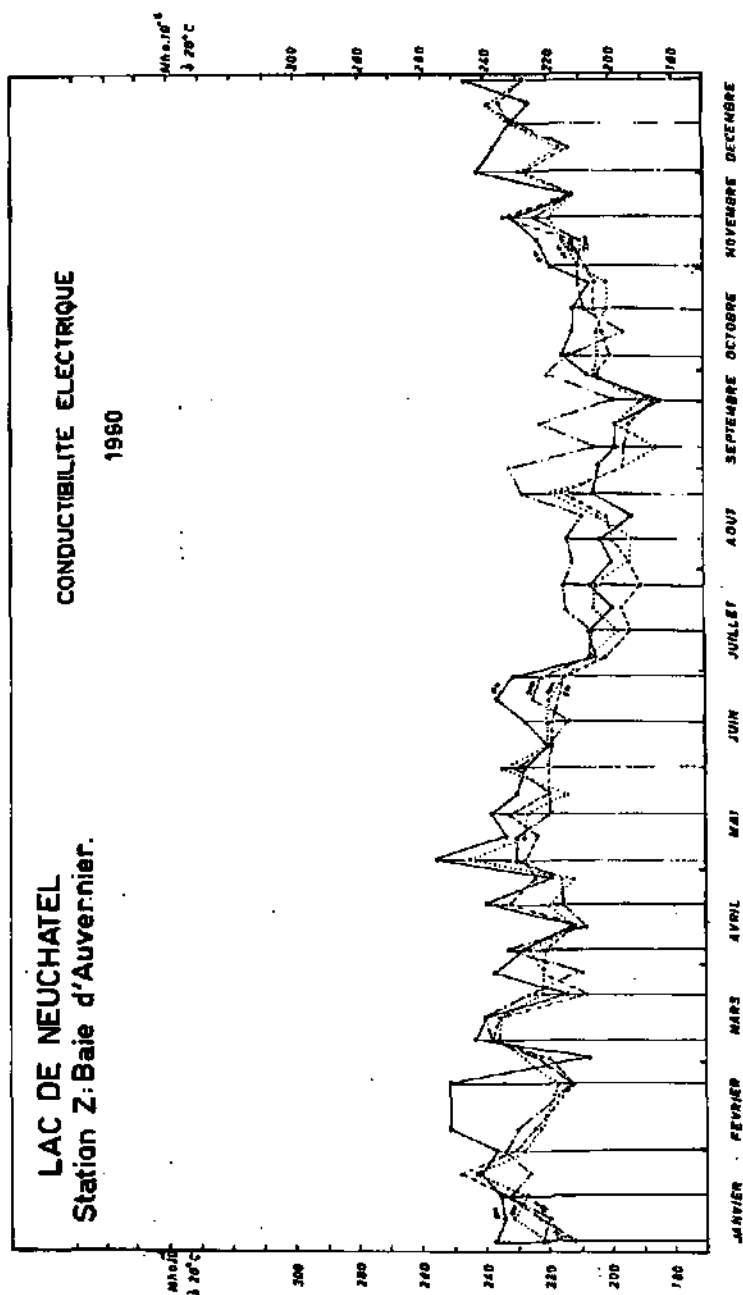


Fig. 28.



Source: 1980.

TABLEAU LXXVIII

Moyennes et extrêmes de la conductivité électrique à la station Z entre la surface et le fond durant les années 1958 à 1961.

	1958	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Conductivité moyenne</u>					
Moyenne annuelle	220	218	220	229	222
Minimum	201	196	197	215	196
Date	14.X	30.IX	20.IX	24.I	30.IX.59
Maximum	245	240	239	255	255
Date	29.VII	26.VIII	3.V	4.VII	4.VII.61
<u>Conductivité instantanée</u>					
Minimum	181	177	184	195	177
Date	1.X	30.IX	20.IX	24.I	30.IX.59
Profondeur	10	5	0	15	5
Maximum	255	255	255	269	269
Date	29.VII	26.VIII	3.V	4.VII	4.VII.61
Profondeur	100	100	0	100	100

D'après ce tableau, l'amplitude de la conductivité électrique moyenne est de 59 micromhos soit 26,6% de la moyenne de la période considérée et celle des valeurs instantanées de 92 micromhos.

En calculant la fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés ci-dessus se rencontrent aux diverses profondeurs et en exprimant cette fréquence en pour-cent des déterminations effectuées, on obtient le tableau LXXIX dans lequel, pour les minima comme pour les maxima, les plus grandes fréquences sont soulignées par année.

Nous n'utilisons, pour élaborer ce tableau et afin de ne pas l'encombrer de données insignifiantes, que les profondeurs pour lesquelles la fréquence des extrêmes atteint ou dépasse 10 % une fois au moins pendant l'une des années de la période considérée.

TABLEAU LXXIX

(cf. page suivante)

TABEAU LXXIX

Fréquence des extrêmes instantanées de la conductivité électrique à diverses profondeurs à la station Z.

Profondeurs	1958	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Minime</u>					
0	10	6	0	<u>30</u>	11,5
5	<u>59</u>	<u>38</u>	<u>28</u>	25	37,5
10	14	17	17	16	16,0
15	7	8	9	13	9,3
20	3	15	9	3	7,5
40	0	0	10	3	3,3
<u>Maxima</u>					
0	8	<u>24</u>	<u>32</u>	11	18,8
25	14	6	7	0	6,8
30	19	14	5	0	9,5
40	8	16	14	0	9,5
80	11	6	5	15	9,3
100	<u>33</u>	<u>24</u>	14	<u>74</u>	36,3

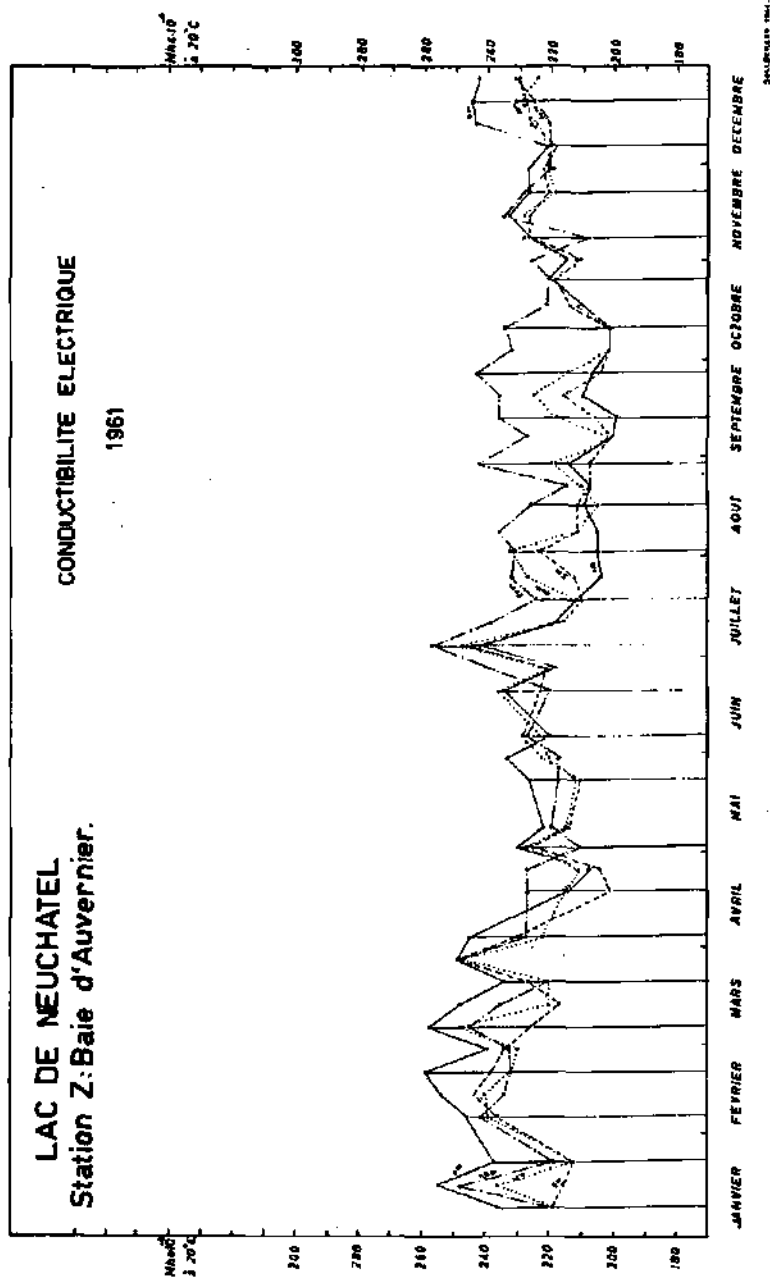
Il ressort de ces chiffres que, durant la période de 1958 à 1961, c'est à 5 m de profondeur que la conductivité électrique est le plus souvent minimum et à 100 m de profondeur le plus souvent maximum. Ces constatations, inverses en quelque sorte de celles qui se rapportent au pH, doivent, comme dans ce dernier cas, être rapprochées des phénomènes dépendant de l'activité biologique due au plancton.

A la suite de ce que nous venons de voir, nous groupons comme pour le pH mais dans le tableau LXXX, les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles de la conductivité électrique aux profondeurs 5 et 100 m. Seules les années 1960 et 1961 entrent en ligne de compte, car les autres ne possèdent pas des mesures hebdomadaires en nombre suffisant tous les mois.

Afin de ne pas rendre les graphiques confus, les courbes des figures 84 à 87 ne concernent que les profondeurs 0, 5, 10 et 20 m, qui semblent présenter les variations les plus intéressantes.

Comme pour le pH, les courbes représentatives de la conductivité électrique accusent, en plus de fluctuations hebdomadaires d'amplitude variable, une allure générale caractérisée par une

Fig. 87.



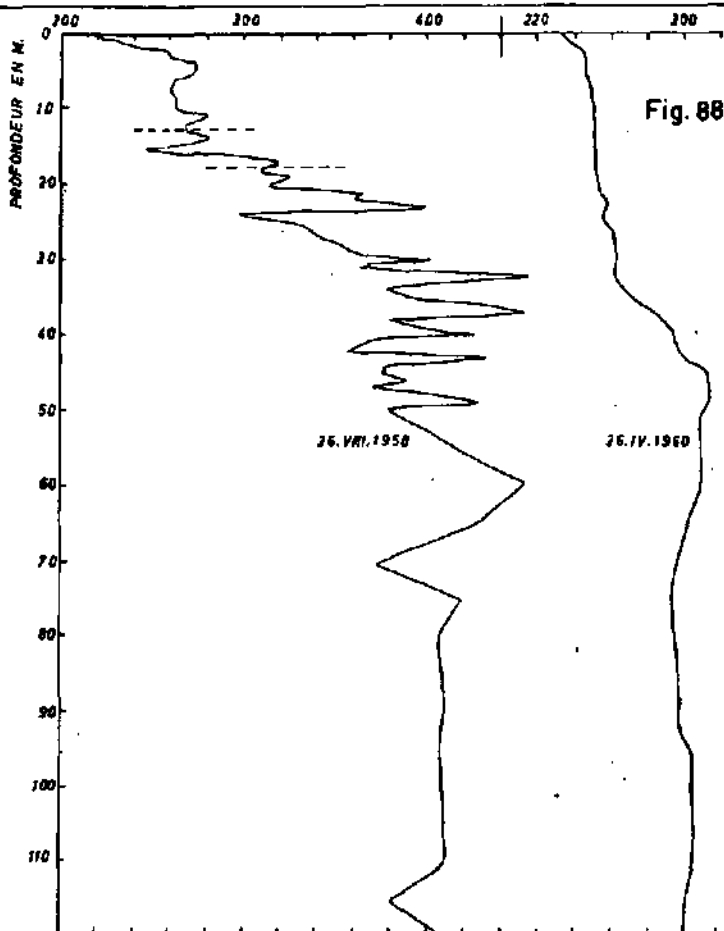


Fig. 88.

LAC DE NEUCHÂTEL

CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE DE L'EAU IN SITU

Station A: Treytel.

RAMENEE A 20°C

inflexion en juin ou juillet et qui correspond au début de la décalcification estivale comme pour le pH. A l'instar de ce que nous avons signalé pour ce dernier, l'instant et l'amplitude de ce fléchissement varient suivant les conditions météorologiques de l'année. C'est ainsi qu'en 1959, la conductivité électrique à la surface diminue depuis fin mai et se maintient basse jusqu'en octobre, alors qu'à 20 m par exemple, c'est l'inverse qui se produit jusqu'en septembre.

TABLEAU LXXX

Conductivité électrique de l'eau dans la baie d'Auvernier (station 2).
Moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles à 5 et 100 m de pro-
fondeur, en 1960 et 1961.

	Profondeur 5 m.			Profondeur 100 m.		
	1960	1961	1960/61	1960	1961	1960/61
Janvier	229	216	223	232	231	232
Février	221	238	230	224	233	229
Mars	225	230	228	226	233	230
Avril	222	212	217	220	229	225
Mai	226	218	222	228	228	228
Juin	217	224	221	221	244	233
Juillet	196	220	208	211	243	227
Août	201	214	208	225	247	236
Septembre	195	206	201	222	252	237
Octobre	203	209	206	219	238	229
Novembre	220	225	223	227	245	236
Décembre	227	225	226	224	237	231
Hiver	225	228	227	227	232	230
Printemps	222	218	220	223	234	229
Été	197	214	206	219	247	233
Automne	217	220	219	223	240	232
Année	215	220	218	223	238	231

En 1960, c'est de fin juin à fin septembre qu'on observe des changements analogues dans la conductivité et en 1961, de juillet à fin octobre. Il est facile de comprendre, d'ailleurs, que la conductivité électrique des couches supérieures diminue en été par suite de la décalcification estivale, puisqu'alors une quantité non négligeable

de Ca précipite, ce qui correspond à une diminution des ions Ca^{++} . Or, la conductivité électrique dépend essentiellement de la présence des cations alcalins et alcalino-terreux dans l'eau.

En résumé, l'abaissement de la conductivité électrique à la surface est semblable d'une année à l'autre, mais en 1960 et 1961, il commence trois semaines plus tard qu'en 1959 pour finir sensiblement en même temps durant toute la période.

Selon le tableau LXXX et pour la période biennale considérée, la conductivité électrique à la fin de l'été (septembre) est minimum à 5 m et maximum à 100 m. Par contre, elle est maximum à 5 m en hiver (février) et minimum à 100 m au printemps (avril). En dressant la liste des mois auxquels apparaissent les minima et maxima de la conductivité électrique pour les dix niveaux observés à la station Z, on constate qu'entre 0 et 20 m de profondeur, la conductivité est minimum à la fin de l'été et au début de l'automne et maximum en hiver. A partir de 40 m jusqu'au fond, la conductivité est minimum au printemps et maximum en été. La zone de transition se situe entre 25 et 30 m de profondeur où les deux extrêmes se produisent aussi bien au printemps qu'en été.

D'après le tableau LXXX, l'amplitude biennale des moyennes mensuelles est de 29 micromhos/cm, soit 14,4% à 5 m et de 12 micromhos/cm, soit 5,3% à 100 m.

Durant la stratification thermique de 1958 à 1961, on observe des variations de la conductivité dans les trois zones superposées du lac; elles figurent dans le tableau LXXXI ci-dessous.

TABEAU LXXXI

(cf. page suivante)

TABLEAU LXXXI

Moyennes et extrêmes de la conductivité électrique mesurée à la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961.

	1958	1959	1960	1961
<u>Épilimnion</u>				
Moyenne	211	207	210	214
Extrêmes	195 231	185 253	185 239	199 243
Dates	I.X 17.VI	30.IX 23.III	20.IX 19.IV	12.IX 4.VII
Amplitude	36	68	54	44
<u>Métalimnion</u>				
Moyenne	220	217	216	227
Extrêmes	193 243	199 241	195 232	206 251
Dates	7.X 29.VII	30.IX 11.VIII	20.IX 31.VIII	18.IV 4.VII
Amplitude	50	42	37	45
<u>Hypolimnion</u>				
Moyenne	230	228	220	236
Extrêmes	219 252	205 252	204 233	203 261
Dates	10.VI 29.VII	30.IX 26.VIII	20.IX 23.VIII	27.VI 4.VII
Amplitude	33	47	29	58

Pour cette période quadriennale, la moyenne de la conductivité électrique est de 211 micromhos pour l'épilimnion, de 220 pour le métalimnion et de 229 pour l'hypolimnion. Pour la même période et les mêmes zones, les amplitudes sont de 68, 58 et 58 micromhos respectivement. Ainsi, la conductivité augmente en moyenne lorsqu'on passe de l'épilimnion à l'hypolimnion, mais l'amplitude des variations instantanées est plus forte dans l'épilimnion que dans les deux autres zones.

Il n'est pas possible pour l'instant de voir si les moyennes annuelles subissent une variation régulière due à l'eutrophisation du lac, ni pour la totalité des niveaux de Z, ni pour les trois zones de la stratification thermique, car il est nécessaire de disposer de quelques années de mesures encore, pour pouvoir éliminer l'influence des facteurs météorologiques sur la question. Nos recherches continuent donc dans ce domaine.

32.2. La conductivité électrique aux stations A à P'. mensuelles

Dans le tableau LXXXII sont groupés les moyennes/et les extrêmes instantanés correspondant aux grandes expéditions des années 1957 à 1960. Seuls les niveaux 0, 10, 20, 30 et 40 entrent en ligne de compte, car ceux situés plus bas n'existent qu'à deux stations seulement. Comme pour le pH, il n'est pas possible de suivre l'évolution détaillée de la conductivité électrique à ces stations de la même manière qu'à Z, car les prélèvements sont trop espacés les uns des autres dans le temps et dans l'espace.

TABLEAU LXXXII

Moyennes et extrêmes de la conductivité électrique mesurée en micromho/cm aux stations A à P' pendant les années 1957 à 1960.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	242	246	245	244	236
Juin	<u>250</u>	<u>252</u>	<u>255</u>	<u>262</u>	<u>248</u>
Août	223	227	244	251	244
Septembre	<u>218</u>	<u>224</u>	232	242	235
Octobre	229	228	<u>228</u>	<u>233</u>	<u>232</u>
Amplitude	32	28	27	29	16
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	187	185	197	192	196
Station	A	B'	D	C	B'
Date	29.IX.59	30.IX.58	28.X.58	29.IX.59	28.X.58
Maximum	315	330	320	315	320
Station	L	K	M	M	N
Date	27.II.58	26.VIII.58	27.II.58	25.VI.57	27.VIII.57
Amplitude	128	145	123	123	124

On voit d'emblée que l'amplitude des moyennes a tendance à diminuer au fur et à mesure qu'on descend dans le lac. Par contre, celle des extrêmes accuse un maximum, à 10 m de profondeur, autrement dit encore dans la zone trophogène où l'assimilation chlorophyllienne provoque des changements importants de la composition de l'eau. Mais il est probable que cette amplitude serait aussi maximum à 5 m, ce que l'absence de mesures à ce niveau ne nous permet pas de vérifier.

Quoi qu'il en soit, nous pouvons constater des différences dans la mesure de la conductivité électrique lorsqu'on passe d'un endroit du lac à l'autre le même jour. Il est frappant aussi de voir que les maxima de la période quadriennale se rapportent tous aux stations de la partie vaudoise du lac. Or, le Haut-lac reçoit dans un volume restreint une quantité importante mais variable d'eau polluée; il n'est donc pas étonnant que la conductivité qui dépend de la teneur en matières dissoutes de ces eaux subisse des fluctuations qui la rapprochent du maximum des valeurs observées.

32.3. La conductivité électrique mesurée "in situ".

L'appareillage permettant de mesurer la conductivité électrique directement dans le lac est décrit au paragraphe 20.7. Afin d'avoir des mesures comparables entre elles, il importe de ramener toutes ces déterminations à la température constante de 20°. La conversion se fait par calcul au moyen de la formule rappelée en tête du paragraphe 32 ci-dessus. En reportant les valeurs obtenues alors en fonction de la profondeur, on obtient une courbe telle que celle de la figure 88. Cette dernière montre que dans le cas de la station A choisie comme exemple, la conductivité électrique mesurée mètre par mètre accuse des fluctuations plus ou moins importantes suivant qu'on est en période de stratification thermique du lac (26 août 1958) ou en dehors de cette période (26 avril 1960). Pendant la stratification thermique, les zigzags de la partie supérieure trahissent la structure feuilletée que prend le lac sous l'effet de l'échauffement qui superpose les unes aux autres des couches d'eau dont la teneur en sels dissous varie dans le sens vertical. En dehors de la stratification, l'hétérogénéité de la teneur de l'eau en sels dissous est très peu marquée au contraire et la courbe de la conductivité dépourvue de zigzags.

L'allure générale de la courbe pendant la stratification révèle un changement de pente aux environs de 30 m de profondeur où, après avoir été oblique, elle devient verticale. Cette inflexion de l'allure générale de la courbe s'observe également vers la même profondeur dans le cas des autres stations (dont nous n'avons pas reproduit les courbes ici) le même jour, ainsi qu'à d'autres périodes de la stratification. Il s'agit donc de la zone de transition que nous avons mentionnée déjà dans le cas de Z et qui sépare le lac en deux zones superposées dans lesquelles les extrêmes de la conductibilité électrique apparaissent à des moments différents de l'année.

Plusieurs années d'observations sont nécessaires encore pour constater si les particularités révélées vers 30 m de profondeur se maintiennent à ce niveau malgré les changements de composition de l'eau dus à la pollution et quelles que soient les conditions météorologiques de l'année.

32.4. La conductivité électrique calculée pour l'ensemble du lac.

Il ne nous a pas été possible de procéder à des mesures de

la conductivité électrique de l'eau selon des profils transversaux comme nous l'avons fait pour la température et le pH. Constatant que les courbes qui représentent la conductivité en fonction de la profondeur sont en général peu différentes d'une station à l'autre le même jour lors des grandes expéditions, nous calculons la conductivité moyenne par niveau pour l'ensemble des stations A à P le même jour. En appliquant le procédé du découpage du volume du lac en tranches superposées comme nous l'avons mentionné pour la température et le pH, on arrive à calculer alors la conductivité électrique moyenne pour l'ensemble de la masse lacustre, ce qui donne, pour la période considérée, le tableau LXXXIII dont les valeurs sont toutes ramenées à 20°.

TABLEAU LXXXIII

Conductivité électrique moyenne de l'eau du lac de Neuchâtel.

Date	Conductivité
24 juin 1958	307,4
26 août 1958	352,4
25 août 1959	268,8
26 avril 1960	324,6
27 septembre 1960	322,6

L'amplitude de la variation de ces moyennes (83,6 micromhos/cm) est considérable et représente 26,5% de la valeur moyenne de ce tableau. Nous devons nous borner à l'enregistrer sans pouvoir en tirer des conclusions pour l'instant. En effet, pour déterminer les variations de la conductivité électrique de l'ensemble du lac, il est indispensable en tous cas de prolonger davantage la période des observations et il y aurait un avantage certain à baser les moyennes par niveau sur des profils transversaux, ce qui donnerait trois fois plus de points que dans le cas des grandes expéditions. Ce programme reste inscrit dans le cadre de nos travaux ultérieurs.

32.5. Comparaison avec d'autres travaux.

On ne possède que très peu de travaux systématiques et de longue durée ou de grande envergure sur la conductivité électrique des lacs.

Ruttner (1955) signale le cas intéressant du Lunzer Mittersee qui est devenu méromictique⁴⁰⁾ par la sécheresse et dans lequel la

40) on appelle méromictique un lac dont les eaux de fond sont en état de stratification à peu près permanente et échappent à la circulation générale.

conductivité électrique double en passant de la surface au fond (à 2 m) en octobre 1951.

Edmonson (1956 b) a observé, dans 4 lacs méromictiques de l'Etat de Washington, un minimum de conductivité électrique dans la zone de photosynthèse. Cette remarque concorde parfaitement avec nos observations puisqu'à la station Z, ainsi que nous l'indiquons au paragraphe 32.1 ci-dessus, la moyenne annuelle par niveau est minimum à 5 m de profondeur qui est précisément le niveau où la photosynthèse est très active dans notre lac.

32.6. La conductivité électrique et la teneur en sels dissous.

Edmonson (1956 b) lors de ses mesures "in situ", a observé la relation étroite qui existe entre la conductivité électrique et le total des sels dissous dans l'eau d'un lac.

La règle élaborée en 1913 déjà par Doroschewski (Journ. Soc. chim. russe, 45. (1913) et selon laquelle une relation existe entre la conductivité électrique et la salinité, autrement dit le résidu sec d'une eau, devrait pouvoir s'appliquer à notre lac. Cette règle, établie empiriquement par son auteur, a été modifiée et améliorée par Richard et Van Cu (1961), car les calculs de la salinité d'une eau à partir des mesures de la conductivité électrique ne sont qu'approchés étant donné que la détermination précise du résidu sec se trouve limitée par les risques de décomposition des bicarbonates, le départ d'eau de cristallisation de certains sels tels que les sulfates, etc. Ces derniers auteurs ont réussi à établir, en examinant une certaine d'échantillons divers, 7 formules applicables aux différents types de minéralisation de l'eau à examiner. A l'unique formule donnée par Doroschewski, nous substituons donc la suivante:

$$\text{Salinité (en mg/litre)} = \frac{769574}{\text{résistivité à } 20^{\circ}\text{C}}$$

préconisée parmi 7 autres par Richard et Van Cu pour les eaux faiblement minéralisées et dont la conductivité est comprise entre 330 et 165 micromhos/cm.

Disposant des moyennes de la conductivité électrique et de celles du résidu sec pour les échantillons prélevés à 0,10,20,30 et 40 m de profondeur durant les grandes expéditions de 1957 à 1960, nous obtenons pour l'ensemble de nos déterminations, les moyennes suivantes :

résidu sec par pesée pour les stations A à P : 173,1 mg par litre
résidu sec par calcul : 183,7 " " "

La différence représente 6,1% par excès pour le calcul par rapport à la moyenne obtenue par pesée; cette différence est située dans les limites données, par Richard et Van Cu, pour l'application de leur formule. En admettant cette dernière, on calcule qu'à la station Z

le résidu sec moyen pour l'ensemble des niveaux et pour la période de 1958 à 1961 est de 170,8 mg/lit. avec, pour extrêmes de la même période : 136,2 et 221,6 mg/lit.

En résumé, la règle de Doroschewski, modifiée par Richard et Van Cu est applicable à l'eau de notre lac, dans les limites de la précision à laquelle elle peut prétendre.

32.7. La conductivité électrique et la dureté temporaire.

Portner (1951c) admet que la teneur en sels dissous dans le lac de Neuchâtel est constituée à 80% par des bicarbonates, le reste étant des sulfates et des chlorures essentiellement. Il calcule la conductivité électrique de cette eau à partir des conductivités de chacun des sels dissous et obtient ainsi une valeur qui ne diffère que de 6% de la conductivité mesurée. Se référant aux travaux de Wasmund (*Lakustrische Unterwasserböden, Hdb. der Bodenlehre, 5, (1930), p.97-189*), Portner essaie de démontrer que le rapport : Dureté temporaire/Conductivité électrique est constant pour les eaux du lac de Neuchâtel prélevées à différentes profondeurs et à des époques différentes.

En calculant ce rapport pour la station Z à diverses époques prises au hasard des années 1959 à 1961, nous obtenons, à partir des moyennes calculées sur les 10 niveaux de Z: des valeurs échelonnées de 0,525 à 0,599, soit avec un écart de 13,2% sur la valeur moyenne; à partir des valeurs instantanées: 0,491 à 0,607, soit avec un écart de 21,2% sur la valeur moyenne.

Pour les 10 niveaux de Z, pris séparément, la valeur du rapport varie, suivant la profondeur, de 0,513 à 0,584, ce qui représente un écart de 13,0% sur la valeur moyenne en 1960 et de 0,471 à 0,537, soit un écart de 12,6% en 1961.

Au vu de ces résultats, on peut donc considérer que le principe énoncé par Portner s'applique mal au lac de Neuchâtel pour calculer la dureté temporaire de l'eau à partir de la conductivité électrique comme il le préconise.

Comme notre facteur moyen (0,543) diffère notablement de celui calculé par Portner (0,467), il n'est pas exclu que l'eutrophisation du lac ait modifié cette dernière valeur et il serait possible aussi que, par l'accroissement de la pollution, le rapport entre la conductivité électrique et la dureté temporaire subisse des fluctuations suivant l'époque et la profondeur envisagées.

Quoi qu'il en soit et bien que les relations entre la conductivité électrique et la composition chimique d'une eau de lac ne puisse jamais prétendre à une grande précision, nous estimons nécessaire pour l'instant d'abandonner l'idée d'un rapport constant entre la conductivité et la dureté temporaire, car les variations de ce rapport sont beaucoup trop fortes pour pouvoir calculer cette dernière à partir de la conductivité électrique.

Chapitre onzième : ANALYSES CHIMIQUES.

On possède peu d'analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel et la plupart d'entr'elles sont très disséminées dans le temps et l'espace, portant le plus souvent, sur une seule station et un ou deux niveaux seulement. De plus, elles sont presque toujours incomplètes, telles celles de Conne pour l'eau devant Saint-Aubin (1903), de Billeter au même endroit (1905), de Jeanprêtre (1908) à Cortaillod; (1920) Auvernier et (1935) à Monruz; de Robert au large de Neuchâtel (1920).

Deux analyses sont plus complètes : celle de Monnier en 1901, citée par Portner (1951a) qui résume dans le tableau 13, p.40 de son travail tous les résultats connus à cette époque et celle de Zender (1908) se rapportant à un prélèvement de 1906.

Une étude systématique des variations de la composition chimique avec le temps n'a été faite que deux fois: par Moser (inédit) de 1936 à 1938 et par Sollberger (1946) de 1944 à 1945. Cependant, chacune ne concerne qu'une station à la fois: Grandson dans le premier cas, Champ Bouglin dans le second.

Nous exposons, dans l'introduction du présent travail, les raisons générales qui nous conduisent à l'étude approfondie du lac de Neuchâtel. Du point de vue chimique plus particulièrement, nous désirons voir si la composition chimique de l'eau varie non seulement en fonction de la profondeur, mais aussi d'un point à un autre du lac simultanément d'une part et si elle varie également en fonction de la saison et des années, de manière périodique ou apériodique, d'autre part.

33. Résidus d'évaporation et de calcination.

Le résidu d'évaporation ou résidu sec d'une eau douce est une mesure du total des matières dissoutes et en suspension contenues dans cette eau.

Le résidu de calcination ou résidu calciné s'obtient à partir du précédent chauffé au rouge sombre et dans des conditions bien déterminées exposées au paragraphe 22 plus haut.

La différence de poids entre les deux déterminations correspond à ce qu'on appelle la perte au feu.

Nous ne nous occuperons ici que des résidus eux-mêmes.

Hutchinson (1957) appelle salinité totale le résidu d'évaporation et considère qu'il s'agit uniquement du total des sels ionisables, contrairement à certains auteurs qui veulent inclure, dans la définition de la salinité totale, la teneur en silice, en

alumine et en oxydes de fer. Quant à nous, nous nous tenons à la définition donnée par le Livre de l'Eau (1954-1957), t.1, p. 314 pour le résidu sec: quantité totale des matières en solution, en suspension et colloïdales.

Lors de la campagne 1944-1945, nous n'avons pas déterminé le résidu d'évaporation ni celui de calcination de l'eau à la station Z, mais nos mesures à la station D avaient donné (Sollberger, 1946) les résultats suivants en mg/litre :

<u>Résidu</u>	<u>Moyenne</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>
d'évaporation	168	160	180
de calcination	153	135	165

33.1. Résidus d'évaporation et de calcination aux stations A à P.

Nous renonçons, pour les motifs déjà indiqués plus haut, à calculer les moyennes par niveau pour la période entière, étant donné que les expéditions sont trop espacées dans le temps. Par contre, comme précédemment, nous donnons, dans les tableaux LXXXIV et LXXXV quelques moyennes mensuelles ainsi que les extrêmes instantanés des niveaux 0, 10, 20, 30 et 40 pour les mois correspondants.

TABLÉAU LXXXIV

(cf. page suivante)

TABLEAU LXXXIV

Moyennes et extrêmes du résidu d'évaporation de l'eau aux stations A à P' pour la période 1957-1960, en mg par litre.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	<u>179,2</u>	<u>178,3</u>	178,3	178,2	177,6
Juin	177,1	177,6	<u>181,6</u>	<u>185,1</u>	<u>188,8</u>
Août	160,3	164,4	175,1	183,7	182,3
Septembre	<u>155,0</u>	162,1	167,3	174,9	<u>172,7</u>
Octobre	160,6	<u>161,8</u>	<u>162,5</u>	<u>168,2</u>	174,9
Amplitude	24,2	16,5	19,1	16,9	16,1
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	<u>127,0</u>	144,5	145,0	152,0	149,0
Station	D	C	B'	C	C
Date	29.IX.59	25.VIII.59	27.X.59	30.IX.58	30.IX.58
Maximum	192,0	<u>205,0</u>	195,0	202,0	201,0
Station	B'	K	D	A	N
Date	30.VIII.60	26.VIII.58	27.VIII.57	24.VI.58	25.VIII.59
Amplitude	65,0	60,5	50,0	50,0	52,0

D'après ce tableau, les amplitudes des moyennes ont une légère tendance à diminuer lorsque la profondeur augmente, mais le niveau 10 m présente une exception qui ne peut s'expliquer tant qu'on ne pourra pas disposer d'une plus longue série d'observations. Par contre, l'amplitude des extrêmes diminue de 0 à 40 m de profondeur, attestant par là que la salinité de l'esu subit des fluctuations de moins en moins marquées au fur et à mesure que la profondeur augmente.

A l'aide des extrêmes des moyennes soulignés dans ce même tableau, on peut mettre en évidence la diminution de la teneur en résidu sec du printemps à l'automne par suite de la décalcification estivale; c'est ainsi que la teneur en résidu sec commence à diminuer après avril dans les couches superficielles, pour atteindre son minimum en septembre à la surface, mais en octobre seulement à 10 m de profondeur. Le même phénomène débute après le mois de juin à 20 et 30 m pour atteindre le minimum en octobre. Il ne débute pas plus tôt à 40 m, mais, tant qu'on ne disposera pas d'une plus longue période d'observations, il n'est pas possible d'affirmer que le

minimum est atteint à 40 m plus vite dans la saison qu'à des profondeurs moindres malgré ce qu'indique notre tableau. La décalcification provoque, en définitive, une diminution de la teneur en résidu d'évaporation qui varie de 13,5 à 8,5 % du maximum printanier lorsqu'on passe de la surface à 40 m de profondeur. Quant à l'écart maximum absolu instantané pour la période, il représente une diminution de 38% de la teneur maximum en résidu d'évaporation pour la zone comprise entre 0 et 40 m de profondeur.

TABEAU LXXXV

Moyennes et extrêmes du résidu de calcination de l'eau aux stations A à P' pour la période 1957-1960, en mg/par litre.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	<u>158,8</u>	<u>158,3</u>	156,5	156,5	154,3
Juin	155,9	157,4	<u>159,5</u>	159,6	<u>160,1</u>
Août	139,9	144,0	154,5	<u>162,7</u>	158,5
Septembre	<u>133,2</u>	<u>138,7</u>	<u>142,2</u>	<u>149,8</u>	<u>147,9</u>
Octobre	143,4	145,4	145,3	151,6	157,2
Amplitude	25,6	19,6	17,3	12,9	12,2
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	<u>116,5</u>	118,0	129,0	128,5	127,0
Station	F	B	B'	B'	B'
Date	27.X.59	27.X.59	27.X.59	27.X.59	29.IX.59
Maximum	181,5	196,0	178,5	191,5	<u>199,0</u>
Station	K	K	P'	N	A
Date	29.IV.58	26.VIII.58	28.IV.59	25.VIII.59	26.VIII.58
Amplitude	65,0	78,0	49,5	63,0	72,0

L'amplitude des moyennes de la teneur en résidu de calcination baisse régulièrement de la surface à 40 m de profondeur, autrement dit la teneur en matières minérales de l'eau varie de moins en moins lorsqu'on s'enfonce dans le lac à partir de la surface, du moins dans les couches jusqu'à 40 m de profondeur.

Les variations de la teneur moyenne en résidu calciné au cours de la saison ont lieu de manière très semblable à celles du résidu d'évaporation; cependant, aucun minimum n'est enregistré après

septembre. La diminution de la teneur en résidu de calcination varie de 16,1 à 7,6% du maximum printanier lorsqu'on passe de la surface à 40 m de profondeur et l'écart maximum absolu instantané pour la période représente une diminution de 41,4 % de la teneur maximum en résidu de calcination de la zone comprise entre 0 et 40 m de profondeur.

Si, dans la même période (1957-1960) on compare les variations de l'amplitude des moyennes avec la profondeur, on constate pour les résidus de calcination (tableau LXXXV) une variation régulière et pour les résidus d'évaporation (tableau LXXXIV) une variation désordonnée. La première concerne les matières minérales essentiellement et la seconde l'ensemble des matières minérales et combustibles ou volatiles. La différence, désordonnée aussi, correspond à la perte au feu, à la combustion de matières organiques vraisemblablement d'origine pollutive. Cette perte au feu se manifeste davantage dans les couches les plus superficielles et on peut admettre, dès lors, que la présence de matières polluantes influence de manière irrégulière la teneur en résidu sec de l'eau du lac dans les couches supérieures.

Parmi les extrêmes des tableaux LXXXIV et LXXXV, il y a prédominance du minimum à la station C pour le résidu d'évaporation et à la station B' pour le résidu de calcination. Nous estimons que la durée des observations de la période 1957-1960 est encore insuffisante pour vérifier que ces minima se produisent régulièrement à ces endroits. C'est pourquoi nous nous bornons à relever le fait sans l'expliquer pour le moment.

A titre comparatif, nous reportons dans le tableau LXXXVI les extrêmes des résidus d'évaporation et de calcination en eaux profondes pour la période de 1957 à 1960; mais elles ne se rapportent qu'aux stations A et B seulement, les seules où la profondeur du lac dépasse 80 m.

TABLEAU LXXXVI

Valeurs extrêmes des résidus d'évaporation et de calcination de l'eau profonde pour la période 1957 - 1960, en mg par litre.

	Résidu d'évaporation		Résidu de calcination	
	100 m	140 m	100 m	140 m
Minimum	<u>160,0</u>	170,0	138,0	<u>137,5</u>
Station	A		A	
Date	29.X.57	27.II.58	30.VIII.60	30.VIII.60
Maximum	<u>208,5</u>	<u>208,5</u>	168,5	<u>179,0</u>
Station	B		B	
Date	26.VIII.58	26.VIII.58	26.VIII.58	26.VIII.58
Amplitude	48,5	38,5	30,5	41,5

On voit que l'amplitude des variations de la teneur en résidu d'évaporation continue à diminuer au-delà de 40 m jusqu'au fond du lac. Celle des variations de la teneur en résidu de calcination est aussi irrégulière dans les couches profondes qu'au-dessus de 40 m.

Rappelons encore qu'à partir de la conductivité électrique et à l'aide de la règle de Doroschewski (Richard et Van Cu, 1961) nous avons calculé, au paragraphe 32.6 ci-dessus, une moyenne de 183,7 mg par litre pour le résidu sec à toutes les profondeurs aux stations A à P', alors que, par pesée, cette moyenne est de 173,1.

33.2. Comparaison avec l'eau des affluents du lac.

Nous ne possédons pas de mesures pour tous les affluents principaux du lac durant la période 1957-1960. Nous nous contentons de mettre en évidence quelques valeurs pour certains d'entr'eux seulement.

TABLEAU LXXXVII

Résidu d'évaporation de l'eau du canal de la Broye, déterminé à la Saugue pour la période 1957-1960 et exprimé en mg par litre.

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
<u>Moyenne</u>	261,3	248,3	255,9	253,8	254,8
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	250,0	213,0	222,0	227,5	213,0
Date	30.X	27.VIII	30.IX	20.VII	27.VIII.58
Débit *	7	9	2	6	9
Maximum	280,0	269,0	288,5	301,5	301,5
Date	27.XII	30.IV	29.IV	18.V	18.V.60
Débit *	6	7	10	-3	-3
<u>Amplitudes</u>					
Résidu	30,0	56,0	66,5	74,0	88,5
Débit *	1	2	8	9	12

* Les débits en m³/sec sont mesurés à Sugiez, correspondent à la date qui les précède mais ne figurent dans ce tableau que pour donner l'ordre de grandeur de la variation du débit à la Saugue, le débit de l'ensemble des affluents entre ces deux points n'étant pas connu. Les

débites négatifs indiquent, rappelons-le, un écoulement de l'eau du lac de Neuchâtel dans celui de Morat.

L'amplitude des résidus d'évaporation augmente de 1957 à 1960 d'après ce tableau, mais celle des débits également, quoique pas proportionnellement à la première. Il n'est pas possible, actuellement, de dire si l'augmentation des variations du débit est la seule cause de l'augmentation des variations de la teneur en résidu d'évaporation ou si l'augmentation générale de la pollution dans le cours d'eau et ses affluents participe aussi à ces changements. Une période d'observations plus prolongée est nécessaire encore pour pouvoir trancher cette question.

TABLEAU LXXXVIII

Résidu de calcination de l'eau du canal de la Broye, déterminé à la Sauge pour la période 1957-1960 et exprimé en mg par litre.

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
<u>Moyenne</u>	223,8	222,4	215,2	209,9	217,8
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	205,0	193,0	188,5	171,0	171,0
Date	28.VIII	1.X	30.IX	31.VIII	31.VIII.60
Débit *	5	9	2	14	14
Maximum	260,0	244,0	241,0	242,0	260,0
Date	27.XII	29.X	29.IV	18.V	27.XII.57
Débit *	6	10	10	-3	6
<u>Amplitude</u>					
Résidu	55,0	51,0	52,5	71,0	89,0
Débit *	1	1	8	17	8

* Cf. tableau LXXXVII.

La période d'observation est encore trop courte pour vérifier si les moyennes de la teneur en résidu de calcination subissent une baisse régulière due à des causes indépendantes du climat annuel. Quant à la variation de l'amplitude du résidu, elle n'apparaît que désordonnée pour le moment. Des observations plus prolongées sont indispensables pour tenter d'élucider ces points.

Quoiqu'il en soit, les moyennes et les extrêmes du canal de la Broye sont supérieures à ceux du lac pour les résidus d'évaporation. Pour les résidus de calcination, par contre, les moyennes de l'eau

de la Broyé sont supérieures à celles du lac, mais les extrêmes les chevauchent partiellement.

Nous estimons intéressant aussi de comparer les variations des résidus d'évaporation et de calcination de l'eau du lac à celles de l'eau d'autres affluents. Toutefois, nous ne disposons pour cela que des résultats se rapportant au Seyon, à la Serrière, à l'Areuse et à la Raisse et pour l'année 1960; ils figurent dans le tableau LXXXIX.

TABLEAU LXXXIX

Résidus d'évaporation et de calcination de l'eau de quatre affluents du lac de Neuchâtel en 1960 et exprimée en mg par litre.

	Résidu d'évaporation				Résidu de calcination			
	Seyon	Serrière	Areuse	Raisse	Seyon	Serrière	Areuse	Raisse
Moyennes	349,9	311,6	256,7	244,2	286,6	256,8	212,5	203,7
Minimum	268,0	268,0	223,5	228,5	253,5	231,0	191,0	184,0
Date	23.III	27.X	23.III	20.VII	20.VII	27.X	18.V	23.III
Maximum	445,5	369,0	313,5	250,0	346,5	297,5	235,0	225,0
Date	27.X	18.V	27.X	18.V	27.X	18.V	27.X	27.X
Amplitude	177,5	101,0	90,0	21,5	93,0	66,5	44,0	41,0

Rappelons que le Seyon a les caractères d'un égout urbain, La Serrière d'une rivière fortement chargée de résidus industriels, l'Areuse d'une rivière ayant subi une autoépuration importante dans les gorges qu'elle traverse et la Raisse le caractère d'une eau de source issue de terrain jurassique.

L'eau de ces quatre affluents accuse donc des teneurs en résidus d'évaporation et de calcination supérieures aux moyennes et aux extrêmes constatées pour le lac de Neuchâtel.

33.3. Comparaison avec d'autres lacs.

Rawson (1951), lors de ses travaux sur les grands lacs canadiens, a montré que la teneur en résidu d'évaporation de la plupart des lacs ayant des affluents était comprise entre 100 et 200 mg par litre si l'effluent était d'un débit moyen suffisant pour évacuer

normalement l'eau apportée par les affluents. Cette teneur augmente jusqu'à 300 et davantage lorsque l'écoulement par l'effluent est trop restreint et l'apport des affluents compensé alors par l'évaporation plus ou moins grande à la surface du lac. C'est le cas pour le Balaton, où la teneur en résidu sec est de 313 mg par litre en moyenne (1930).

Ainsi, notre lac serait analogue à la série des lacs canadiens dont le débit de l'effluent est suffisant par rapport à l'apport des affluents, sans que l'écart entre les deux doive être compensé par une trop forte évaporation.

34. Les duretés de l'eau.

La dureté totale d'une eau est constituée par la somme des sels de calcium et de magnésium dissous car, ainsi que l'Association internationale des hydrogéologues (1960 b) l'a reconnu, la teneur en sels d'autres cations, de même que de Fe et de Mn est si faible dans la plupart des eaux douces que la dureté correspondant à ces autres sels est négligeable.

La dureté temporaire est celle qui disparaît après ébullition prolongée de l'eau; elle est due à la présence de bicarbonates de Ca et de Mg.

La dureté permanente est celle qui persiste après l'ébullition de l'eau.

Les duretés s'expriment en degrés ou en mg CO_3Ca par litre ou encore en ppm (parties par million de parties). Nous utilisons dans nos travaux la notation en mg CO_3Ca par litre ou le degré français tel que 1° fr. = 10,00 mg CO_3Ca /lit.

Nous avons montré déjà, au paragraphe 22, comment se déterminent les duretés de l'eau actuellement. Signalons qu'autrefois, avant d'utiliser le dosage au palmitate, on déterminait la dureté totale d'une eau par la méthode dite au savon ou méthode de Boutron-Boudet. Le degré Boutron-Boudet ainsi obtenu correspond à 10,27 mg CO_3Ca /lit.

Rappelons encore que la dureté temporaire est désignée souvent par le terme d'alcalinité car son dosage s'opère par titrimétrie de l'alcalinité de l'eau en présence de méthylorange comme indicateur.

34.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle.

La plus ancienne détermination mentionnée pour le lac de Neuchâtel est celle de Knab (1867 a) qui a obtenu une dureté de 11,25 degrés Boutron-Boudet le 27 juillet 1861, ce qui correspond à 115,5 mg CO_3Ca /lit. Bien que l'auteur ne l'ait pas précisé, il doit

s'agir vraisemblablement de la dureté temporaire étant donné l'ordre de grandeur du résultat obtenu.

Par contre, Ritter (1888a) obtient 133,5 mg de $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{lit}$, ce qui peut correspondre alors à la dureté totale en été.

Au cours de notre campagne précédente (Sollberger, 1946), nous avons obtenu, pour les duretés exprimées en mg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{lit}$, les valeurs suivantes pour 1944-1945 :

<u>Duretés.</u>	<u>Moyenne</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>
totale	166	150	185
temporaire	139	118	145
permanente	26	10	47

la dureté totale étant déterminée par la méthode au palmitate.

Enfin, dans l'étude de Thomas (1953) pour 46 lacs suisses, on relève, en ce qui concerne Neuchâtel, les duretés temporaires suivantes mesurées à l'effluent : 132,5 mg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{lit}$ en eau d'hiver (29 décembre 1951) et 115,0 en eau d'été (13 septembre 1951).

34.2. La dureté totale.

34.2.1. La dureté totale à la station Z.

D'après les mesures effectuées chaque semaine à cette station, la dureté totale varie avec la saison et avec la profondeur. Dans le tableau XC nous reportons les valeurs de la dureté totale moyenne entre la surface et le fond, calculée au moyen des résultats obtenus aux dix niveaux habituellement explorés à cette station. Ce tableau comprend aussi les extrêmes instantanés enregistrés durant la période 1958-1961.

TABLEAU XC

(cf. page suivante)

Fig. 89.

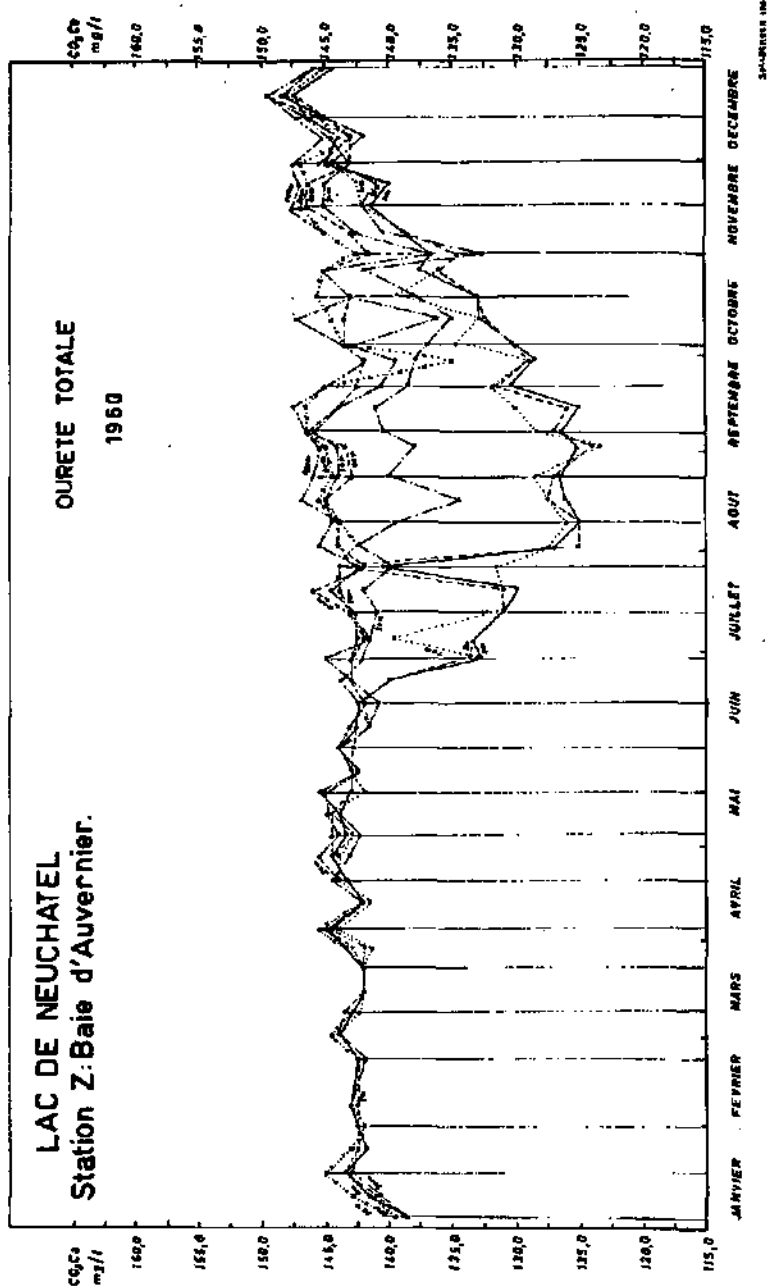


Fig. 90.

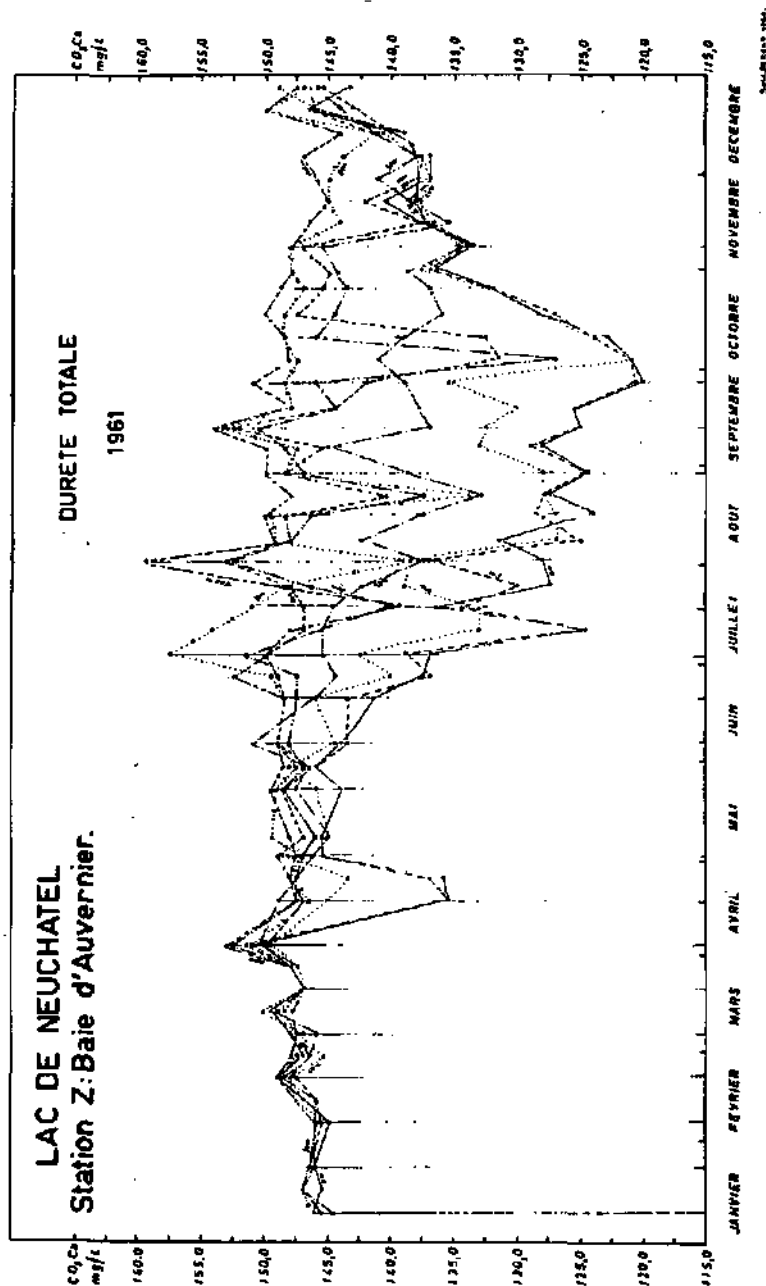


TABLEAU XC

Moyennes et extrêmes de la dureté totale à la station Z, entre la surface et le fond, durant les années 1958 à 1961 et exprimées en mg CO₃-Ca par litre.

	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Dureté moyenne</u> <u>(0-100 m)</u>					
Moy. annuelle	138,2	141,5	141,4	143,1	141,7
Minimum	132,7	129,2	135,4	133,4	129,2
Date	14.X	28.X	28.IX	3.X	28.X.59
Maximum	141,8	148,7	148,2	151,1	151,1
Date	25.XI	4.V	20.XII	4.IV	4.IV.61
<u>Dureté instan-</u> <u>tanée</u>					
Minimum	119,0	117,0	123,5	120,0	117,0
Date	9.IX	15.IX	31.VIII	26.IX	15.IX.59
Profondeur	0	5	10	0	5
Maximum	151,0	152,5	149,5	159,5	159,5
Date	16.IX	11.VIII	20.XII	2.VIII	2.VIII.61
Profondeur	80	40	40	100	100

* = année incomplète.

La variation de la dureté moyenne possède une amplitude de 21,9 mg CO₃-Ca/lit, soit 15,5% de la valeur moyenne de la période; par contre, celle des duretés instantanées représente 42,5 mg CO₃-Ca/lit, soit 30,0% de la valeur moyenne de la période.

La dureté moyenne de la surface au fond à la station Z est minimum en octobre, donc au début de l'automne, tandis qu'elle est maximum en hiver. Quant aux duretés totales instantanées, elles sont minimum entre 0 et 10 m de profondeur au début de l'automne et maximum entre 40 et 100 m du milieu de l'été à la fin de l'automne.

Les variations de la dureté totale au cours de l'année changent suivant la profondeur considérée. C'est ce que prouvent les fig. 89 et 90 établies pour les années 1960 et 1961, les seules complètes de nos recherches.

En hiver et au printemps, la dureté totale est sensiblement la même quelle que soit la profondeur considérée. Mais dès le mois

de juin, les courbes représentatives des niveaux 0, 5 et 10 m se détachant nettement des autres. Le phénomène coïncide avec la décalcification biologique estivale dont nous avons montré les effets déjà à propos du pH dans la figure 79. Fin novembre ou début décembre, ces courbes rejoignent les autres au moment de l'"overtun" d'automne; la dureté totale redevient alors sensiblement uniforme sur toute la hauteur de l'eau par le brassage dû aux vents.

Les courbes de 20 m accusent encore une faible dépression durant la période où celles de 0, 5 et 10 m sont les plus basses. La limite des changements dus à la décalcification est donc voisine de 25 m environ, car à partir de 30 m les courbes de la dureté totale ne varient pas plus à cette saison qu'au début de l'année. En fin de saison, par contre, celles de 30 et 40 m divergent légèrement l'une de l'autre et de celles de 80 et 100 m, attestant qu'à la fin de l'automne des changements se produisent tout de même dans la dureté totale jusqu'aux environs de 40 à 50 m, mais ne sont qu'une manifestation très atténuée de ce qui s'est passé auparavant dans les couches supérieures.

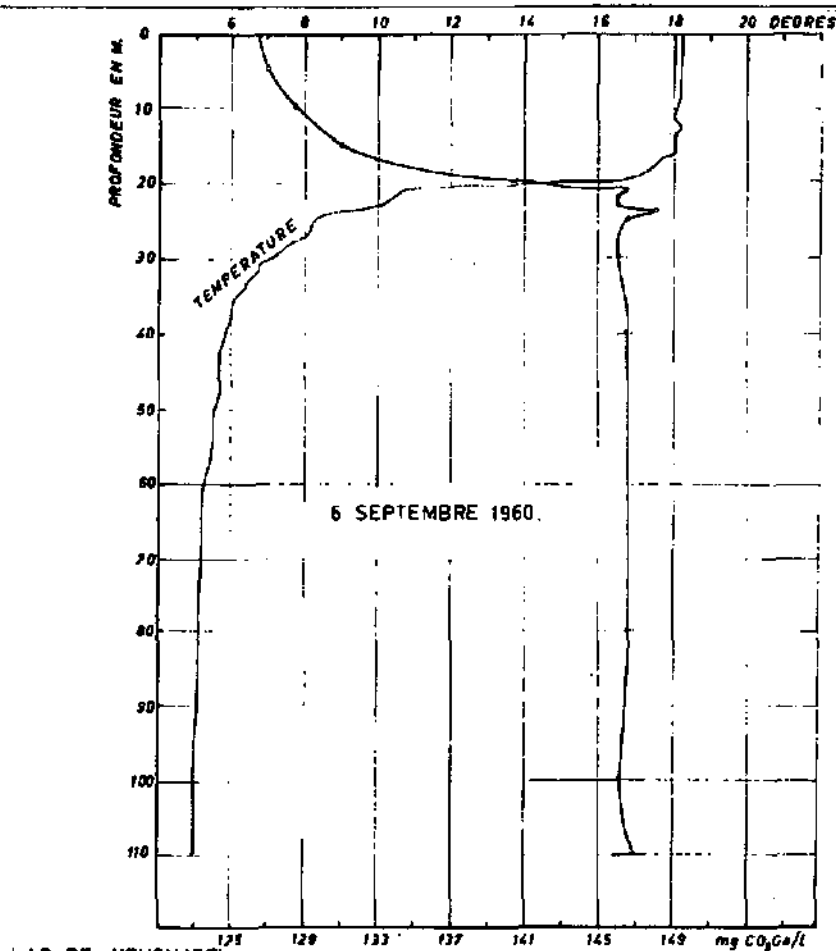
En déterminant la fréquence avec laquelle les extrêmes apparaissent aux divers niveaux de la station Z durant l'année, on constate que le minimum de la dureté totale se rencontre une fois sur trois à la surface et le maximum tout aussi fréquemment à la profondeur 100 m, autrement dit au voisinage du fond.

Comment varie la dureté totale en fonction de la profondeur à un moment donné ? Des déterminations simultanées à divers niveaux et dans la région des sauts thermiques, nous tirons les figures 91 et 92 qui se rapportent aux dates que nous avons choisies précédemment pour mettre en évidence la présence des sauts thermiques.

Selon ces deux figures, la dureté totale varie non seulement avec la profondeur, mais il se produit à certains niveaux des écarts semblables à ce qui se passe pour la température. De plus, ces changements brusques dans la valeur de la dureté correspondent aux sauts thermiques. Il y a donc relation entre les deux phénomènes, ce qui revient à dire que la variation de la dureté totale présente des sauts correspondant aux sauts thermiques.

En déterminant la dureté totale à des intervalles verticaux d'un mètre dans la région des sauts thermiques, on obtient, dans la courbe représentative, l'image de petits écarts correspondant à ceux que l'on observe aux mêmes niveaux dans la courbe thermique et qui, comme nous l'avons fait voir déjà pour cette dernière, révèlent l'existence d'une stratification fine, donnant un aspect feuilleté à la masse lacustre. Il y a donc analogie entre la température et la dureté totale.

Il est bien entendu que ces détails seraient encore plus accentués et la stratification chimique due à la dureté totale encore plus apparente, si cette dernière était déterminée mètre par mètre sur une plus grande hauteur d'eau.



LAC DE NEUCHÂTEL

STATION Z: BAIE D'AUVERNIER

TEMPERATURE DE L'EAU ET DURETE TOTALE

Fig. 91.

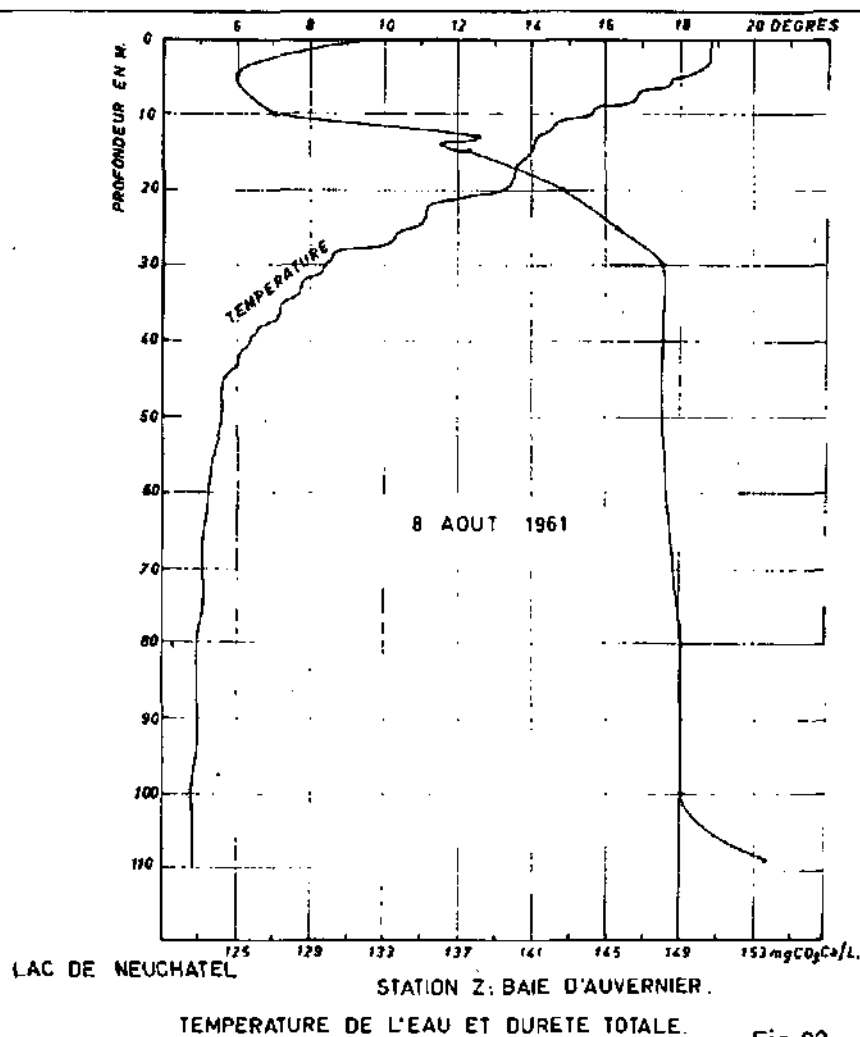


Fig. 92.

Malgré cette différence dans l'établissement des courbes correspondantes, il est facile de voir, par les figures 91 et 92, qu'à la partie de la courbe thermique correspondant à la zone épilimnique correspond une partie bien déterminée de la courbe de dureté. Il en est de même des sauts respectifs correspondant à la zone métalimnique. Quant aux parties presque verticales des deux courbes, elles correspondent à la zone hypolimnique.

Les variations instantanées de la dureté totale des trois zones thermiques superposées sont représentées par les courbes de la fig. 93 pour les années 1959 à 1961.

Les différences d'aspect de la partie épilimnique de la courbe de dureté totale du 6 septembre 1960 par rapport à celle du 8 août 1961 n'est pas sans relation avec les différences d'aspect des courbes thermiques correspondantes. L'épilimnion étant la zone du lac la plus directement en contact avec les agents météorologiques, nous estimons que ce sont ces derniers qui différencient les parties supérieures de ces courbes. En effet, les jours précédant le 6 septembre 1960, un fort vent du SW a soufflé, provoquant un brassage important des couches supérieures, en même temps que des pluies intermittentes mais abondantes tombaient à la station Z, la température de l'air étant en baisse également. Les jours qui ont précédé le 8 août 1961, au contraire, le lac a été parfaitement calme et seules quelques petites averse ont eu lieu, alors que la température de l'air baissait également. Il n'est pas surprenant dès lors que la courbe de la figure 92 présente un zigzag marqué correspondant à une stratification thermique non perturbée dans les couches subsuperficielles, tandis que la courbe de la figure 91 accuse pour la dureté totale une baisse régulière de celle-ci correspondant à une stratification thermique presque effacée par les vagues et les courants dus au vent au point qu'elle tende vers une homogénéisation des couches subsuperficielles du lac.

34.2.2. La dureté totale aux stations A à P'.

Comme pour les précédentes déterminations, nous reportons dans le tableau XCI les moyennes et les extrêmes de la dureté totale mesurée aux stations A à P' durant les grandes expéditions des années 1957 à 1960.

TABLEAU XCI
(cf. page suivante)

TABIEAU XCI

Moyennes et extrêmes de la dureté totale pour les stations A à P' de 1957 à 1960 et exprimées en mg CO₃Ca par litre.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	<u>147,2</u>	<u>147,3</u>	146,7	147,1	147,2
Juin	142,2	143,1	<u>147,0</u>	<u>147,3</u>	<u>149,3</u>
Août	127,4	<u>129,8</u>	138,3	145,2	145,6
Septembre	<u>126,0</u>	130,2	137,7	143,7	144,8
Octobre	133,3	133,7	<u>133,9</u>	<u>138,1</u>	<u>144,6</u>
Amplitude	21,2	17,5	13,1	9,2	4,7
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	<u>115,0</u>	119,0	121,5	126,0	130,0
Station	K	A	A	D	B'
Date	29.IX.59	29.IX.59	27.X.59	27.X.59	26.VIII.58
Maximum	160,0	162,5	160,0	<u>165,0</u>	155,0
Station	A	X	A	A	C
Date	25.VI.57	26.VIII.58	24.VI.58	24.VI.58	29.X.57
Amplitude	45,0	43,5	38,5	39,0	25,0

Les amplitudes des moyennes diminuent régulièrement de la surface vers la profondeur; il en est de même, en gros pour les amplitudes des extrêmes. Ces constatations confirment ce que l'on observe à la station Z. La dureté totale diminue à mesure que la saison avance et comme pour le résidu d'évaporation, les maxima de la moyenne sont atteints plus tard, à partir de 20 m de profondeur, qu'au-dessus. De manière analogue, les minima apparaissent d'autant plus tard que la profondeur est plus grande. Il est frappant aussi de voir que les extrêmes se manifestent plus souvent à la station A qu'aux autres de la même série.

Quant aux grandes profondeurs, la dureté totale y atteint une valeur moyenne de 148,0 mg CO₃Ca/lit et des extrêmes de 136,0 et 155,0, soit une amplitude de 19,0 pour la période considérée.

34.2.3. La dureté totale des affluents du lac.

Seul le canal de la Broye permet d'avoir des résultats pour toute la période et nous en tirons le tableau XCII.

TABLERAU XCII

Durété totale de l'eau du canal de la Broye, déterminée à la Sauge pour la période 1957-1960 et exprimée en mg CO₂Ca par litre.

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	201,3	194,4	193,9	193,3	195,7
Minimum	180,0	155,0	170,0	149,5	149,5
Date	28.VIII	27.VIII	30.IX	31.VIII	31.VIII.60
Maximum	225,0	220,0	218,5	217,0	225,0
Date	27.XII	28.II	29.IV	18.V	27.XII.57
Amplitude	45,0	65,0	48,5	67,5	75,5

La moyenne des déterminations de la durété totale de l'eau de la Broye dépasse donc celle de l'eau du lac; par contre, les extrêmes pour le canal chevauchent légèrement ceux du lac.

Nous ne disposons qu'en 1960 seulement des données relatives aux affluents principaux (cf.fig. 36); nous les groupons dans le tableau XCIII.

TABLERAU XCIII

Durété totale de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960, exprimée en mg CO₂Ca par litre.

Affluent	Moy- enne	Mini- mum	Date	Maxi- mum	Date	Amplitude	
						a)	b)
La Broye(canal)	193,3	149,5	31.VIII	217,0	18.V	67,5	34,9
Le Seyon	268,5	234,0	18.V	325,0	27.X	91,0	33,9
La Serrière	221,1	205,5	18.V	237,0	27.X	31,5	14,3
L'Areuse	214,7	186,0	18.V	248,0	27.X	62,0	28,9
La Raisse	218,9	199,0	23.III	243,0	14.IX	44,0	20,1
L'Arnon	234,9	203,0	25.IV	267,5	16.XII	64,5	27,5
La Brine	305,3	277,5	18.V	332,5	27.X	55,0	18,0
Le Bey	319,5	285,0	25.IV	352,5	27.X	67,5	21,2
Le Mujon	432,1	370,0	14.IX	519,5	23.III	149,5	34,7
L'Orbe-Thielle	196,9	172,5	18.V	213,5	24.VIII	41,0	20,8
Le Canal orien- tal	409,5	335,0	20.VII	472,0	27.X	137,0	33,5
Le Buron	282,8	167,5	14.IX	365,0	16.XII	197,5	69,8
La Mentue	266,5	230,0	20.VII	294,5	27.X	64,5	24,2

a) = mg CO₂Ca par litre; b) = % de la moyenne.

La dureté totale de l'eau amenée par le canal de la Broye est, parmi les affluents considérés, celle qui se rapproche le plus de celle du lac. Le Mijon, par contre, possède l'eau la plus dure de toutes. Enfin, la dureté totale de l'eau du Euron varie le plus durant l'année 1960, alors qu'à la Serrière on enregistre le minimum de fluctuations.

Nous nous bornons à constater que la dureté totale de l'eau des affluents est supérieure à celle du lac, car il serait hasardeux de tirer d'autres conclusions en se basant sur des données qui ne concernent qu'une année; aussi attendrons-nous d'avoir les résultats de plusieurs années ultérieures avant d'examiner en détail l'influence des affluents sur la composition de l'eau du lac.

34.3. La dureté temporaire ou alcalinité.

34.3.1. La dureté temporaire à la station Z.

Les mesures hebdomadaires à cette station ont débuté en 1959, de sorte que notre tableau XCIV ne comprendra les valeurs moyennes et extrêmes entre la surface et le fond que pour la période triennale de 1959 à 1961.

TABEAU XCIV

Moyennes et extrêmes de la dureté temporaire à la station Z. entre la surface et le fond durant les années 1959 à 1961 et exprimées en mg CO₂Ca par litre.

	1959	1960	1961	1959-1961
<u>Dureté moyenne</u> (0 - 100 m)				
Moyenne annuelle	124,7	123,7	125,4	124,6
Minimum	115,3	118,0	117,8	115,3
Date	28.X	11.X	3.X	28.X.59
Maximum	131,5	128,0	130,3	131,5
Date	21.VII	12.I	7.III	21.VII.59
<u>Dureté instantanée</u>				
Minimum	102,5	107,5	107,5	102,5
Date	26.VIII	2.VIII	29.VIII	26.VIII.59
Profondeur	0	0	0	0
Maximum	140,0	130,0	135,0	140,0
Date	1.VII	12.I	10.X	1.VII.59
Profondeur	20	80	30	20

LAC DE NEUCHÂTEL

Station Z: Baie d'Auvernier.

EVOLUTION DE L'EPIIMNION, DU METALIMNION ET DE L'HYPOLIMNION.

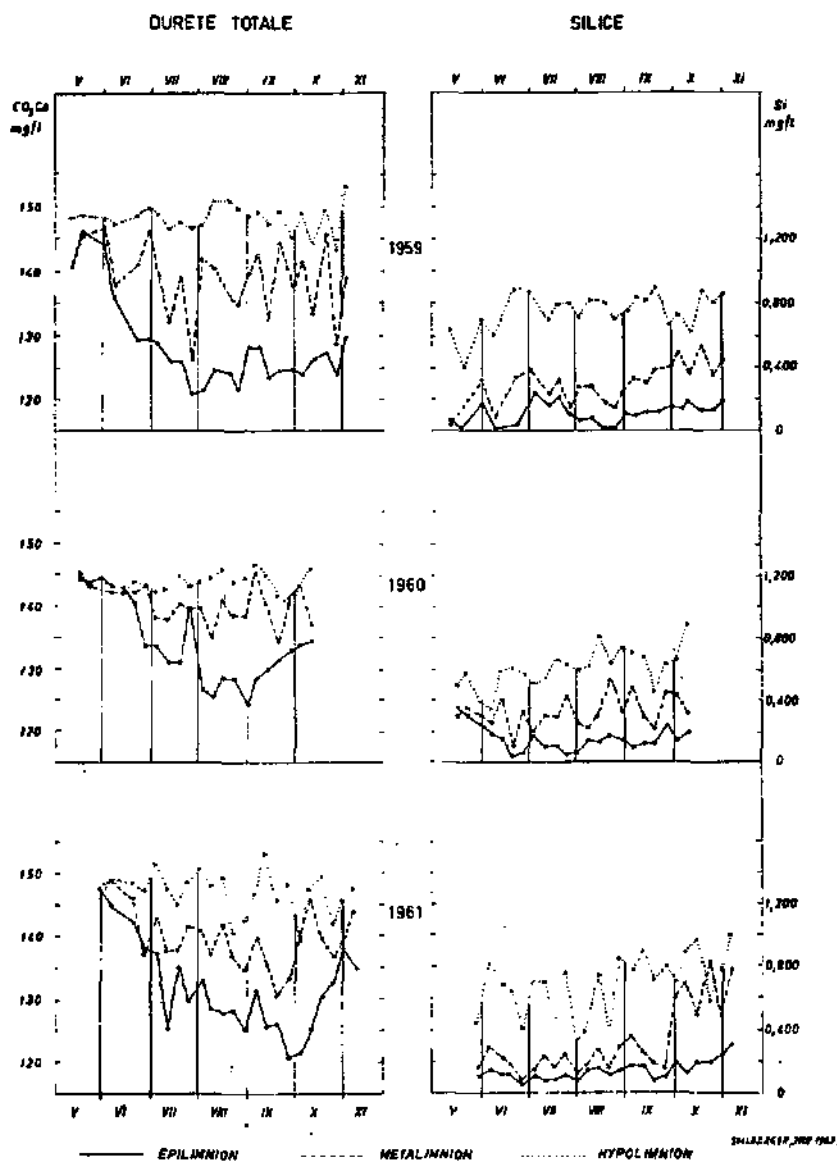


Fig. 94.

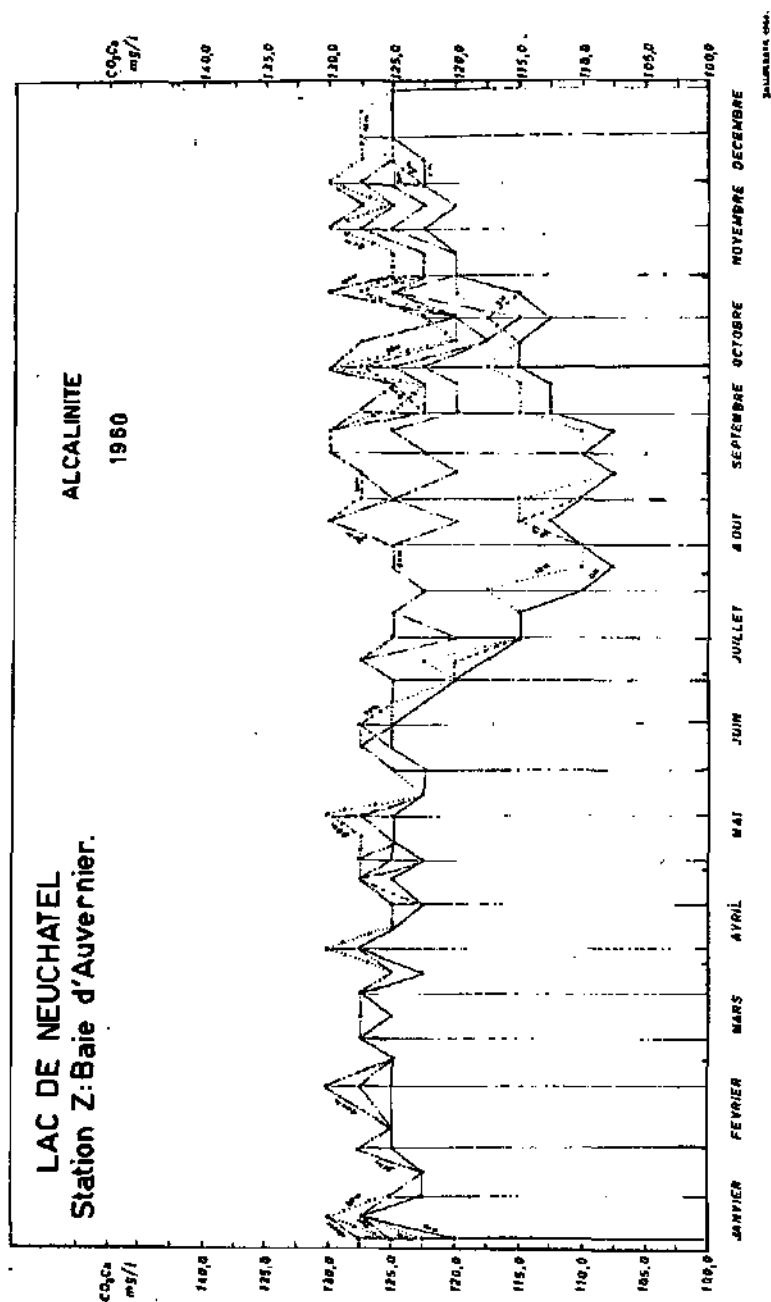
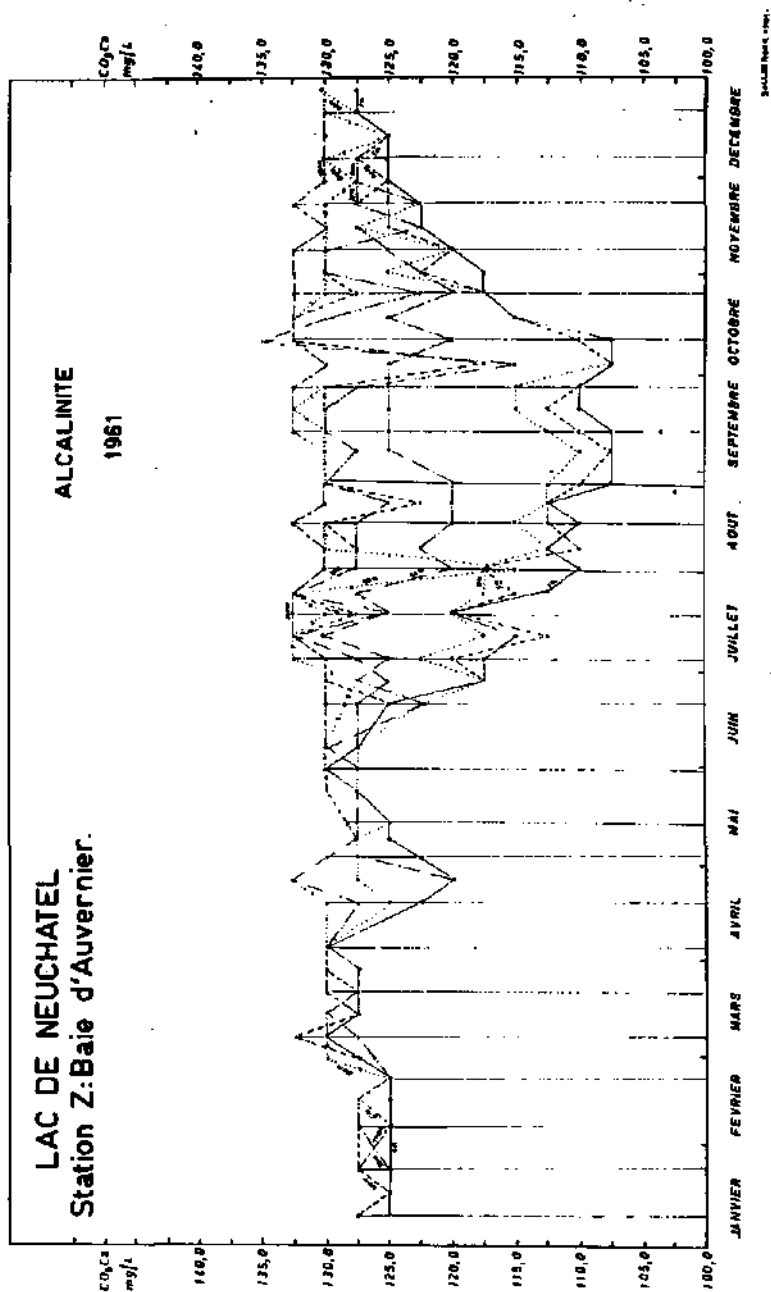
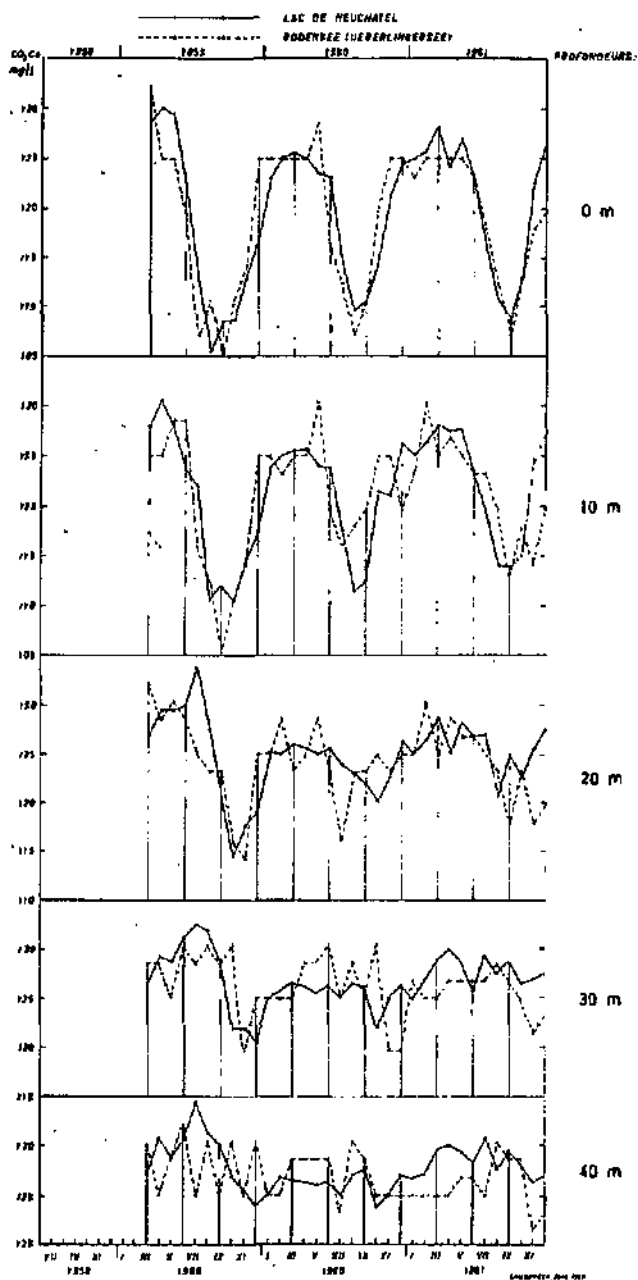


Fig. 95.



· VARIATION MENSUELLE DE L'ALCALINITE, 1959-1961



L'amplitude de la variation de la duresté temporaire est de 1,7 mg $\text{CO}_2\text{Ca/lit}$, soit 1,3 % de la valeur moyenne de la période; par contre, celle des durestés temporaires instantanées représente 37,5 mg $\text{CO}_2\text{Ca/lit}$, soit 30,2 % de la valeur moyenne de la période.

Pour les trois ans considérés, la duresté temporaire moyenne de la surface au fond est minimum en octobre, donc au début de l'automne, à l'instar de ce que nous constatons pour la duresté totale. Par contre, le maximum de la duresté temporaire moyenne de la surface au fond ne semble pas se produire à une période déterminée de l'année. Peut-être une plus longue période d'observations permette-t-elle de reconnaître une période préférentielle pour l'apparition de ce maximum. Quant aux durestés temporaires instantanées, elles sont minimum en surface en août; mais on peut tout au plus dire qu'elles sont maximum ailleurs qu'en surface et à des moments variables de l'année, car nos observations triennales sont encore insuffisantes pour tirer des conclusions quant à l'apparition de ces maxima.

A l'aide des figures 94 et 95, on se rend compte que la duresté temporaire varie au cours de l'année, mais différemment suivant la profondeur considérée. C'est ainsi qu'on voit nettement qu'en hiver et au début du printemps, la duresté temporaire est pratiquement la même sur toute la hauteur d'eau; par contre, dès le mois de juin, autrement dit lors de la décalcification biologique déclenchée par l'élévation de la température de l'eau, les couches superficielles sont affectées par le phénomène et la duresté temporaire baisse rapidement pour se maintenir basse jusqu'à l'ouverture d'automne qui brasse toute la masse du lac et mélange les couches supérieures décalcifiées à l'eau plus dure des couches profondes.

Par analogie avec la duresté totale au-dessous de 20 m de profondeur, la duresté temporaire accuse aussi des fluctuations vers la fin de l'été et en automne, mais elles sont d'autant plus faibles que la profondeur considérée est plus grande.

En déterminant la fréquence avec laquelle les extrêmes apparaissent aux divers niveaux de la station Z durant l'année, on constate que le minimum de la duresté temporaire se rencontre jusqu'à 1 fois sur trois à la surface et le maximum jusqu'à une fois sur deux à 100 m de profondeur.

La variation de la duresté temporaire instantanée avec la profondeur ne présente pas des écarts aussi caractéristiques que ceux signalés pour la duresté totale. C'est pourquoi nous renonçons à en dessiner la courbe représentative, nous bornant à signaler que l'augmentation de la duresté temporaire avec la profondeur présente des à-coups.

34.3.2. La duresté temporaire aux stations A à P.

Le tableau XCV comprend les moyennes et les extrêmes de la duresté temporaire mesurée aux stations A à P durant les grandes expéditions de 1957 à 1960.

TABLÉAU XCV

Moyennes et extrêmes de la dureté temporaire pour les stations A à P' de 1957 à 1960 et exprimées en mg CO₃Ca par litre.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	<u>131,4</u>	<u>131,9</u>	131,3	131,3	130,9
Juin	130,1	130,7	<u>136,0</u>	<u>137,2</u>	<u>139,3</u>
Août	115,5	118,2	125,9	131,8	132,2
Septembre	<u>112,0</u>	<u>116,6</u>	122,3	129,8	<u>128,3</u>
Octobre	120,3	121,4	<u>121,9</u>	<u>125,6</u>	130,8
Amplitude	19,4	15,3	14,1	11,6	11,0
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	<u>105,0</u>	<u>105,0</u>	107,5	110,0	112,5
Station	-	A	B'	B'	B'
Date	1959	29.IX.59	25.VIII.59	27.X.59	29.IX.59
Maximum	145,0	155,0	155,0	<u>160,0</u>	150,0
Station	A	K	A	A	A
Date	27.II.58	26.VIII.58	24.VI.58	24.VI.58	24.VI.58
Amplitude	40,0	50,0	47,5	50,0	37,5

Les amplitudes moyennes diminuent très régulièrement de la surface vers la profondeur. Par contre, celles des valeurs extrêmes instantanées varient de manière désordonnée. Il n'est pas exclu qu'en possession d'observations de plus longue durée, on arrive à découvrir une régularité dans la variation de ces extrêmes aussi. L'apparition des extrêmes semble reculer dans la saison avec la profondeur, l'exception apparente de 40 m n'étant due, probablement, qu'au nombre insuffisamment grand des stations ayant servi à établir notre tableau.

Aux grandes profondeurs, la dureté temporaire atteint une valeur moyenne de 133,7 mg CO₃Ca par litre, avec des extrêmes de 125,0 et de 150,0, soit une amplitude de 25,0 pour la période considérée.

34.3.3. La dureté temporaire des affluents du lac.

Le tableau XCVI donne les résultats pour l'ensemble de la période 1957-1960.

TABEAU XCVI

Dureté temporaire de l'eau du canal de la Broye, déterminée à la Saugé pour la période 1957-1960 et exprimée en mg CO₃Ca par litre.

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	182,5	175,7	170,4	163,9	173,1
Minimum	165,0	145,0	152,5	130,0	130,0
Date	28.VIII	27.VIII	30.IX	31.VIII	31.VIII.60
Maximum	205,0	200,0	185,0	195,0	205,0
Date	27.XII	4.XII	29.IV	18.V	27.XII.57
Amplitude	40,0	55,0	32,5	65,0	75,0

La dureté temporaire de l'eau du canal de la Broye présente par rapport à celle de l'eau du lac à peu près les mêmes caractéristiques que la dureté totale. C'est ainsi que les moyennes pour la Broye dépassent celles du lac, mais les extrêmes se chevauchent.

Le tableau XCVII groupe les données relatives aux affluents principaux pour l'année 1960 seulement.

TABEAU XCVII

Dureté temporaire de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960, exprimée en mg CO₃Ca par litre.

Affluent	Moyenne	Minimum	Date	Maximum	Date	Amplitude	
						a)	b)
La Broye(Canal)	163,9	130,0	31.VIII	195,0	18.V	65,0	39,7
Le Seyon	251,5	212,5	23.III	315,0	27.X	102,5	40,8
La Serrière	205,0	192,5	18.V	222,5	27.X	30,0	14,6
L'Areuse	200,0	180,0	23.III	225,0	27.X	45,0	22,5
La Raisae	201,5	180,0	23.III	220,0	14.IX	40,0	19,9
L'Arnon	221,9	192,0	25.IV	245,0	27.X	53,0	23,9
Le Brine	272,4	240,0	25.IV	300,0	24.IX	60,0	22,0
Le Bey	261,5	236,0	25.IV	280,0	14.IX	44,0	16,8
Le Mujon	369,2	345,0	23.III	410,0	17.VI	65,0	18,1
L'Orbe-Thielle	188,1	165,5	25.IV	215,0	16.XII	49,5	26,3
Le Canal oriental	326,7	295,0	20.VII	365,0	27.X	70,0	21,4
Le Buron	235,6	155,0	20.VII	300,0	16.XII	145,0	61,7
La Mantue	242,5	214,5	25.IV	275,0	27.X	60,5	25,0

a) = mg CO₃Ca/lit.

b) = % de la moyenne.

On tire de ce tableau les mêmes considérations pour la dureté temporaire que du tableau XCIII pour la dureté totale.

34.3.4. Comparaison avec d'autres lacs.

Grâce aux travaux de l'Institut pour l'étude du Bodan (Anstalt für Bodensesforschung, 1957-1963), nous disposons des dosages hebdomadaires de la dureté temporaire pour l'Ueberlingersee durant la même période que celle de nos recherches. Ceci permet de construire les courbes de la figure 96 représentant les variations de la dureté temporaire des deux lacs. Pour l'Ueberlingersee, les résultats obtenus en degrés allemands ont été convertis en $\text{mg CO}_3\text{Ca}$ par litre.

On voit d'emblée dans cette figure que les variations de la dureté temporaire sont très semblables dans les deux lacs pour l'eau de surface. Les extrêmes correspondent en valeurs absolues et apparaissent simultanément dans les deux lacs, quelle que soit l'année considérée. A 10 m de profondeur, par contre, en plus d'un léger décalage dans le temps, les extrêmes n'atteignent pas les mêmes valeurs dans les deux lacs spécialement en 1960. Cette différence par rapport à l'eau de surface est imputable à la différence qui existe entre les planctons des deux masses lacustres; elle se manifeste surtout à 10 m, vers le milieu de la zone trophogène, alors qu'en surface ce sont surtout les conditions météorologiques qui régissent le phénomène.

Le même désaccord se manifeste à 20, 30 et 40 m de profondeur, vraisemblablement pour les mêmes raisons.

En utilisant les données de l'BAWAG (1960, non publiées) pour Morat, nous comparons, dans le tableau XCVIII les duretés temporaires de l'eau de ce lac à celles de Neuchâtel pour 5 niveaux correspondants.

TABLEAU XCVIII
(cf. page suivante)

TABLEAU XCVIII

Duretés temporaires comparées des lacs de Neuchâtel et de Morat pour les années 1960-1961 et 1954-1955, exprimées en mg CO_3Ca par litre.

	. 0.m .		15.m		20.m		30.m		40.m	
	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M
Moyenne	120,5	169,0	123,3	187,2	124,9	191,3	126,6	193,7	127,2	195,6
Minimum	109,7	122,5	117,2	162,5	121,3	175,0	124,2	185,0	125,3	187,5
Mois	IX	IX	IX	I	X	XI	X	XII	III	II
Maximum	126,8	195,0	126,8	197,5	127,4	200,0	128,2	200,0	128,5	205,0
Mois	III	IV	III	I	III	IX	IV	I	IX	XI
Amplitude absolue	17,1	72,5	9,6	35,0	6,1	25,0	4,0	15,0	3,2	17,5
relative	14,2	42,9	7,8	18,7	4,9	13,1	3,2	7,8	2,5	8,9

Par amplitude absolue, il faut entendre l'écart entre les extrêmes et par amplitude relative ce même écart rapporté à la moyenne correspondante et exprimé en %.

A chaque niveau, la moyenne est calculée sur l'ensemble des déterminations hebdomadaires de deux ans à la station Z pour le lac de Neuchâtel et sur l'ensemble des déterminations manuelles de novembre 1954 à octobre 1955 pour le centre du lac de Morat.

Le tableau XCVIII montre que dans les deux lacs la dureté temporaire moyenne augmente avec la profondeur, mais que les extrêmes se rapprochent. Par contre, l'augmentation des moyennes et la diminution des amplitudes sont plus rapides à Morat qu'à Neuchâtel.

34.4. La dureté permanente.

La dureté permanente est représentée par l'ensemble des sels de calcium et de magnésium autres que les bicarbonates; il s'agit, en grande majorité des sulfates. Toutefois, au lieu de l'exprimer en degrés, nous l'exprimons, conventionnellement, en mg CO_3Ca par litre, afin d'avoir des valeurs comparables aux autres duretés.

Le tableau IC exprime les variations de la dureté permanente à la station Z, entre la surface et le fond pour la période triennale 1959-1961.

TABLEAU IC

Moyennes et extrêmes de la dureté permanente à la station Z, entre la surface et le fond, durant les années 1959 à 1961 et exprimées en mg CO₃Ca par litre.

	1959	1960	1961	1959-1961
<u>Dureté moyenne (0-100m)</u>				
Moyenne annuelle	16,8	17,6	17,7	17,4
Minimum	10,8	13,6	11,3	10,8
Date	21.VII	12.I	5.XII	21.VII.59
Maximum	22,0	21,7	23,5	23,5
Date	8.XII	18.X	21.II	21.II.61
<u>Dureté instantanée</u>				
Minimum	6,5	12,0	9,0	6,5
Date	23.VI	13.IX	7.XI	23.VI.59
Profondeur	10	25	20	10
Maximum	25,0	24,5	29,5	29,5
Date	17.XI	11.X	2.VIII	2.VIII.61
Profondeur	80	80	100	100

L'amplitude de la variation de la dureté moyenne est de 0,9 mg CO₃Ca par litre, soit 5,2% de la valeur moyenne de la période.

Quant aux extrêmes instantanés de la période 1957-1960, on enregistre pour les stations A à F: 2,6 mg CO₃Ca par litre à 10 m de profondeur à la station M et 30,0 en surface à la station A. Dans le canal de la Broye : 10,0 le 27 août 1958 et 40,5 le 23 mars 1960.

35. Les matières azotées de l'eau.

L'azote libre existe à l'état dissous dans l'eau des lacs. Mais à l'état combiné, on le rencontre sous quatre formes essentiellement : sels ammoniacaux ou ammoniacque libre, azotites, azotates et combinaisons organiques azotées. Dans les présentes recherches, nous n'avons pu nous occuper de l'azote libre ni des combinaisons organiques azotées.

L'ammoniacque (libre et sous forme de sels ammoniacaux) constitue la plus grande partie des produits finaux de la décomposition bactérienne des matières organiques azotées.

Les azotites et azotates constituent les produits d'oxydation des sels ammoniacaux dissous,

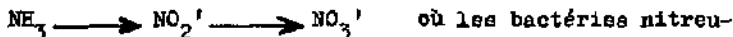
Nous examinons ensemble les combinaisons azotées contenues dans l'eau du lac étant donné l'interdépendance remarquable qui existe entre ces trois groupes de composés.

L'étude des combinaisons azotées dissoutes n'a fait de grands progrès que durant les dernières décennies, car la teneur de l'eau des lacs en ces corps chimiques varie parallèlement avec la pollution des eaux; celle-ci augmentant, la teneur en substances azotées est devenue plus facilement dosable.

Depuis de nombreuses années, on remarque une corrélation entre la teneur en substances azotées et la présence, de même que l'évolution, du plancton ainsi que de la végétation lacustres.

Pearsall (1930) observe déjà une disparition presque complète des azotates en été, bien plus précoce que celle des phosphates et du fer; par contre, la teneur en azotates redevient notable en hiver alors que la dénitrification des eaux de surface faiblit énormément par suite des basses températures et que, simultanément, l'"overtum" ramène dans toute la hauteur du lac des masses d'eau préalablement en contact avec le fond et dans lesquelles celui-ci a libéré une quantité importante de la réserve d'azote qui s'y était accumulée du fait de la sédimentation au cours de la saison précédente. Un peu plus tard, Pearsall (1932) constate que les diatomées apparaissent en hiver et au printemps lorsque les eaux sont les plus riches en azotates (mais simultanément aussi en phosphates et en silice), tandis qu'au contraire, ce sont les algues vertes et les Desmidiacées qui apparaissent en été lorsque les quantités d'azotates sont faibles dans l'eau (en même temps que les phosphates). Cet auteur reconnaît même que pour se développer normalement, *Asterionella* nécessite une quantité d'azotates plus grande que celle dont *Tabellaria fenestrata* a besoin.

Einsele et Vetter (1938), étudiant le Schleinsee (Allemagne) observent, durant la stagnation estivale, de très faibles variations de la teneur en ammoniac dans l'épilimnion et le métalimnion, mais simultanément des variations considérables dans l'hypolimnion et cela en relation avec la mortalité du plancton en été. Ils découvrent aussi que les bactéries dénitrifiantes commencent leur action au printemps pour atteindre l'effet maximum en été, cependant que les bactéries nitrifiantes commencent la leur avec la circulation d'automne, pour atteindre le maximum en hiver et selon le processus schématisé suivant :



ses ne sont pas les mêmes que les bactéries nitriques (Guilliermond et Mangenot, 1946, p. 400 sq.).

Ruttner (1938) signale également que les combinaisons azotées sont très fortement minéralisées dans l'hypolimnion des lacs méromictiques du Salzkammergut (Autriche).

Lastockin (1945) montre que la concentration optimum d'azotates pour le développement d'*Aphanizomenon* est nettement plus faible que pour *Anabaena*. Cette découverte permet déjà de comprendre les raisons de l'apparition brusque de certaines espèces planctoniques et met en évidence l'importance de la teneur en azote lié pour la croissance du plancton.

De ce point partent les recherches de Pennington (1942) sur les cultures d'algues en milieux enrichis artificiellement en substances azotées. Puis Thomas (1953) démontre qu'en ajoutant des azotates et des phosphates à l'eau du lac, on obtient une végétation luxuriante d'algues. En même temps, cet auteur rappelle la notion de "substance minérale" attribuée à ces deux composants des matières dissoutes dans l'eau et qui sont en rapport direct avec l'eutrophisation des lacs. Après Minder (1926) qui s'était occupé de l'azote lacustre et Gesaner (1939) du phosphore, Thomas prouve que les azotites et l'ammoniaque ne se trouvent qu'en très petites quantités dans les lacs oligotrophes, mais que, par contre, la présence des azotates est toujours réelle dans tous les lacs suisses en hiver. Enfin, il démontre aussi que plus la différence est grande entre la teneur en substances azotées entre la période de la circulation totale et celle de la fin de la stagnation estivale, plus la production planctonique est grande en général. Cette constatation est donc particulièrement importante dans les années actuelles où l'eutrophisation de nos lacs a tendance à augmenter.

Dugdale, Dugdale, Neess et Goering (1959) confirment, en utilisant l'isotope N^{15} , certains processus de fixation biologique de l'azote atmosphérique par les lacs, ce qui était très peu connu auparavant : il est prouvé, entre autres, qu'*Anabaena* est capable de transformer l'azote libre en azote lié, tout comme le font *Azotobacter* et les bactéries photosynthétisantes.

Enfin, absorbant les composés organiques azotés par des résines de polystyrène sulfoné, Fovoledo (1961a) réussit, à partir de l'eau du Lago Maggiore, à concentrer suffisamment ces composés pour pouvoir les étudier. Il identifie ainsi des substances colorées ou fluorescentes, des aminoacides libres, des peptides et des protéines.

En résumé, les dosages de matières azotées dans l'eau des lacs apporte une contribution intéressante à l'étude du biotope et de son évolution pollutive.

35.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle.

Nous disposons d'extrêmement peu de résultats anciens concernant les substances azotées contenues dans l'eau du lac.

Pour l'ammoniaque, Conne (1904) donne 0,01 à 0,02 mg NH_3 par litre en 1903 au large de St-Aubin et Jeanprêtre (Portner, 1951a) les mêmes valeurs au large de Cortaillod en 1908 et d'Auvernier en 1920. Robert (1921) indique 0,03 au large de Neuchâtel et

nous-même: (Sollberger, 1946) trouvent 0,10 à 40 m de profondeur au large de Champ Bougin en 1944-45.

Quant aux azotites, Conne (1904) n'en trouve pas et nous (Sollberger, 1946) seulement des traces, en moyenne, le maximum instantané ayant atteint une fois 0,80 mg NO_2 ' par litre.

Les azotates n'ont jamais été trouvés qu'en très petite quantité au début du siècle, et, si nous n'en avons point décelé durant la campagne 1944-1945, c'est le manque de sensibilité de la méthode utilisée alors qui en est responsable.

35.2. Les combinaisons azotées à la station 2.

Nous groupons dans les mêmes tableaux les résultats qui se rapportent aussi bien à l'ammoniaque qu'aux azotites et aux azotates.

A la station 2, les déterminations hebdomadaires des combinaisons azotées n'existent que pour les années 1960 et 1961. Pour ces deux ans, nous calculons la moyenne entre la surface et le fond en utilisant les résultats obtenus aux 10 niveaux habituels, déjà mentionnés aux paragraphes précédents.

TABLEAU C
(cf. page suivante)

TABLEAU C

Moyennes et extrêmes des combinaisons azotées à la station Z, entre la surface et le fond, durant les années 1960 et 1961.

	Ammoniaque mg NH_3 /lit.		Azotites mg NO_2 '/lit.		Azotates mg NO_3 '/lit.	
	1960	1961	1960	1961	1960	1961
<u>Valeurs moyennes</u> <u>(0-100 m)</u>						
Moyenne	0,02	0,03	0,011	0,011	2,6	2,5
minimum	0	0	0	0	1,7	1,9
Date	-	28.XI	-	-	6.IX	10.IX
Maximum	0,09	0,10	0,028	0,025	3,4	3,6
Date	12.IV	31.X	19.VII	10.X	12.I	24.I
<u>Valeurs instantanées</u> <u>(par niveau)</u>						
Minimum	0	0	0	0	1,0	0,8
Date	-	-	-	-	6.IX	-
Profondeur	-	-	-	-	0	-
Maximum	0,20	0,14	0,030	0,080	4,0	4,0
Date	17.V	29.VIII	3.V	6.IX	5.IV	10.I
Profondeur	40	10	20	15	80	0

Certaines valeurs des moyennes et des extrêmes se rencontrent très souvent, de sorte qu'il est impossible de les reporter toutes dans ce tableau. On remplace alors la date par un tiret. Il en est de même pour certaines profondeurs.

Les amplitudes de la variation des moyennes représentent 0,10 mg NH_3 /lit, 0,017 mg NO_2 '/lit et 1,9 mg NO_3 '/lit, soit respectivement et par rapport à la valeur moyenne de la période : 400% pour NH_3 , 155% pour NO_2 ' et 74,5% pour NO_3 '.

Les figures 97 à 102 représentent les variations de la teneur en composés azotés de l'eau à la station Z et en fonction de la saison aux niveaux 0, 5, 10 et 20 m que nous considérons comme étant les plus intéressants.

Les courbes des figures 97 et 98 montrent que dans notre

Fig. 97.

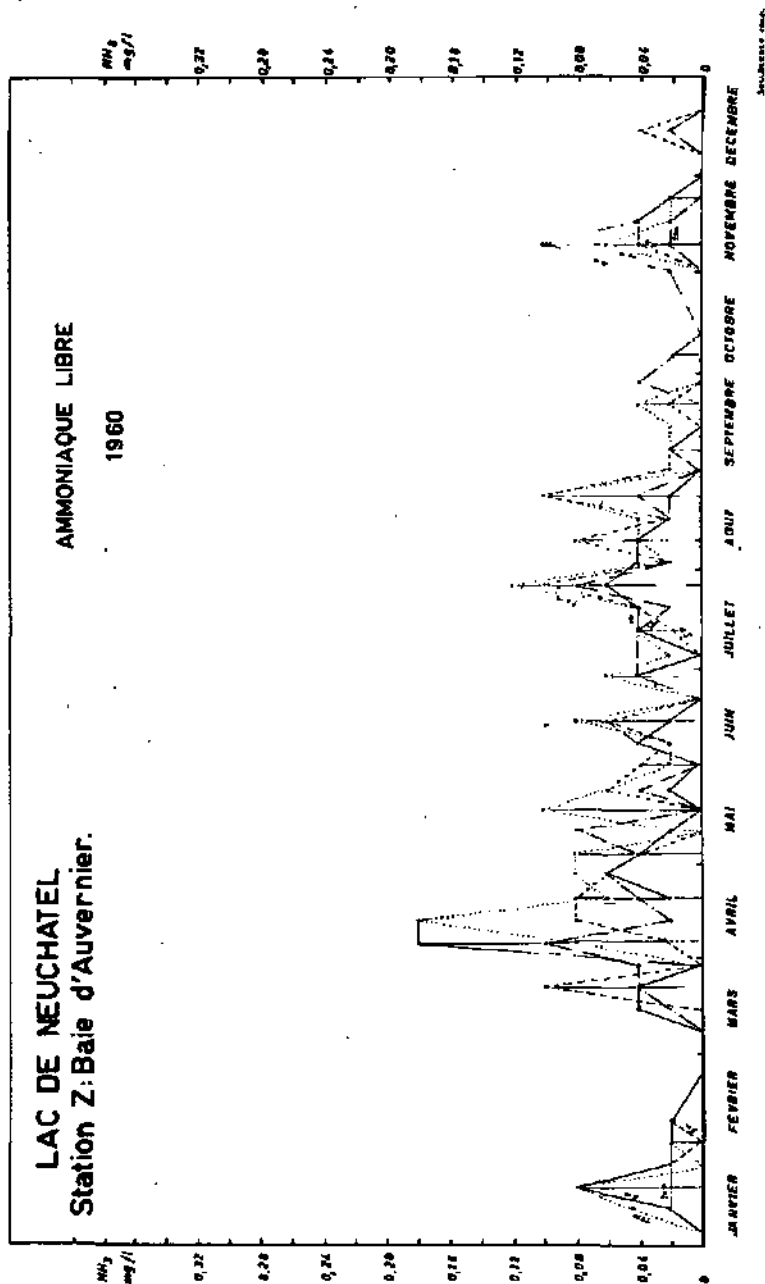


Fig. 98.

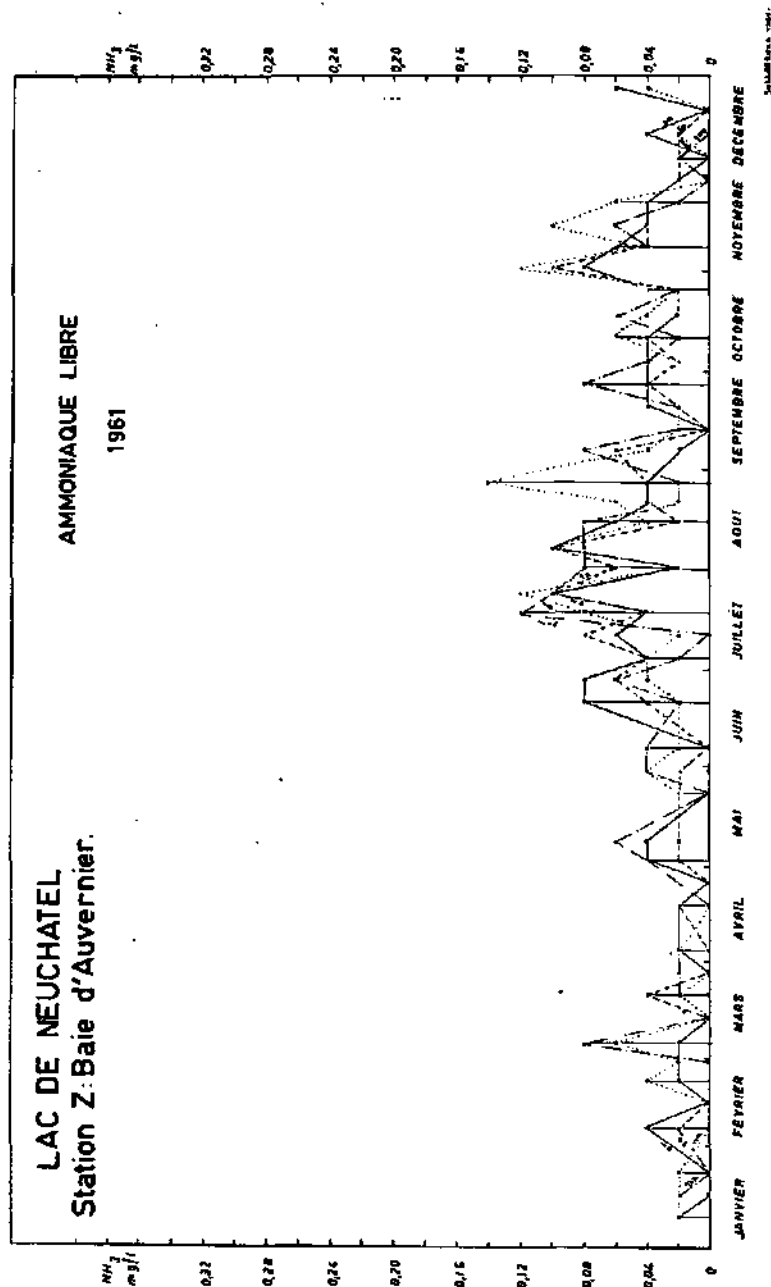


Fig. 99.

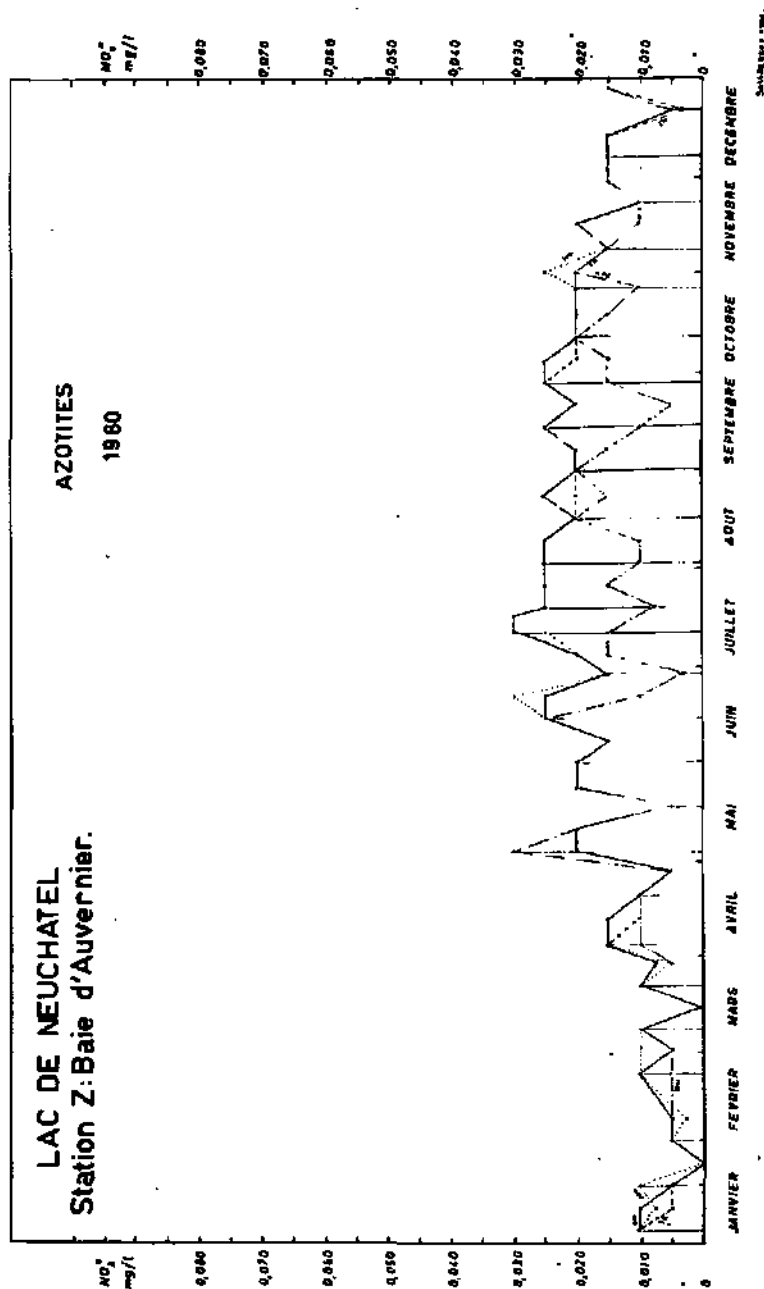


Fig.100.

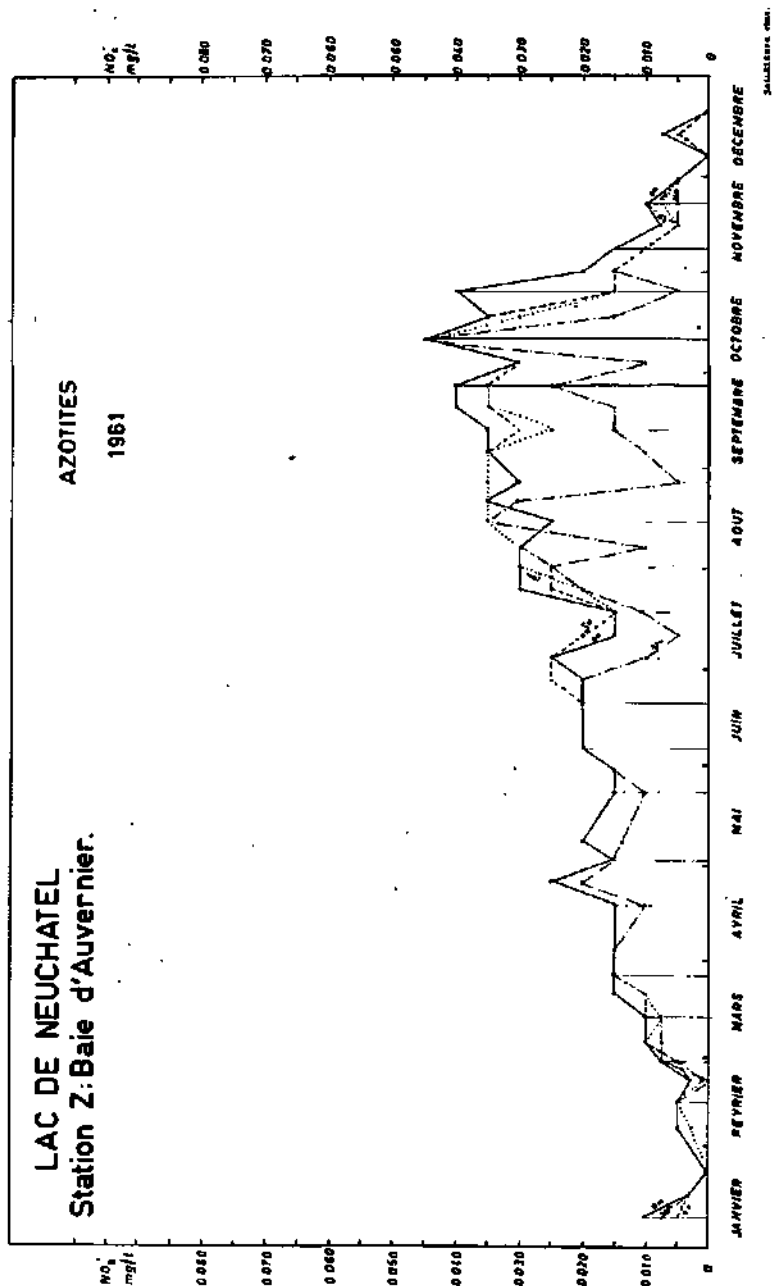


Fig.101.

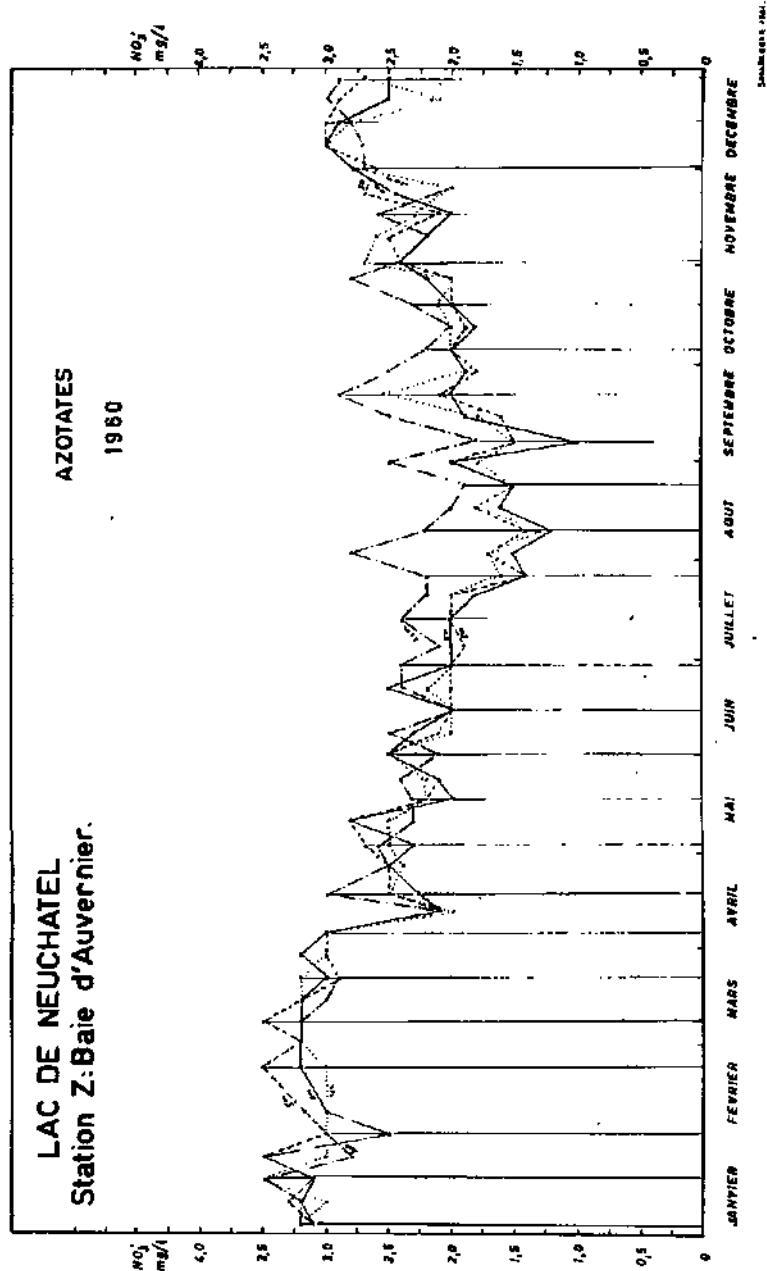
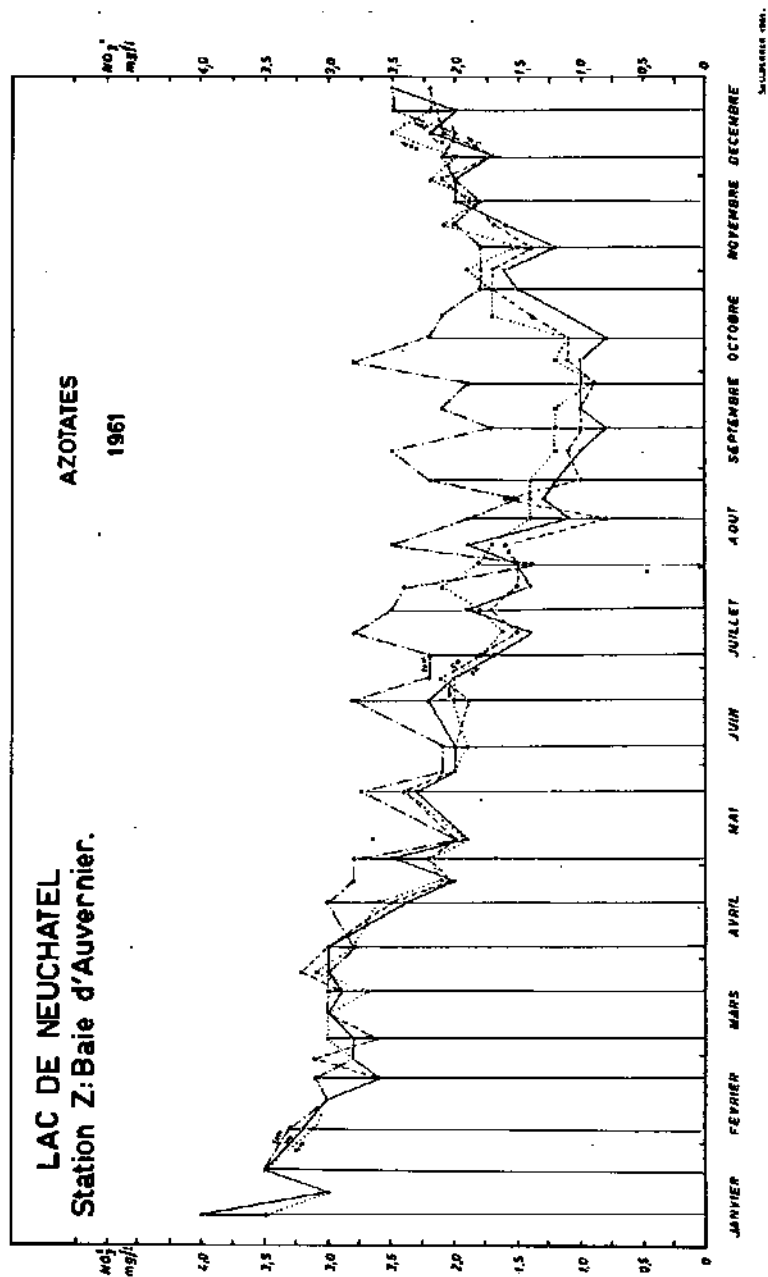


Fig.102.



lac la teneur en ammoniacque est encore faible d'une manière générale. Elle varie fortement dans les couches supérieures et y accuse des valeurs plus élevées dans la seconde moitié du printemps et en été qu'aux autres saisons. Faute de disposer de plusieurs années d'observations, nous devons nous borner à constater que l'augmentation de la teneur en ammoniacque est plus précoce en 1960 qu'en 1961, car deux années complètes seulement sont insuffisantes pour observer une corrélation avec les conditions météorologiques ou avec d'autres phénomènes. Ces graphiques montrent aussi que la teneur en ammoniacque est relativement élevée à 10 m de profondeur, autrement dit dans la partie médiane de la zone trophogène dont nous avons parlé plus haut.

Relevant les profondeurs auxquelles les extrêmes se présentent le plus fréquemment, on obtient le tableau CI pour l'ensemble des combinaisons azotées à la station Z.

TABEAU CI

Profondeurs auxquelles les teneurs extrêmes en ammoniacque, en azotites et en azotates se présentent le plus fréquemment à la station Z, de 1950 à 1961.

	Ammoniacque		Azotites		Azotates	
	1960	1961	1960	1961	1960	1961
Minimum	80	100	80	80	0	0
Maximum	10	10	0	0	100	100

Ainsi, c'est bien à 10 m de profondeur que l'on rencontre les teneurs les plus élevées en ammoniacque à la station Z durant la période biennale considérée, mais entre 80 et 100 m que se trouvent les plus faibles.

Les courbes des figures 99 et 100 se rapportent à la teneur en azotites. Dans les couches supérieures, celle-ci est faible en hiver, mais augmente au printemps et en été; toutefois, à 20 m la variation est moins marquée. Cette augmentation vernale et estivale est en relation directe avec la température de l'eau, car au manque d'insolation et au mauvais été de 1960 correspond une augmentation lente et relativement faible des azotites, tandis que durant l'année 1961 particulièrement chaude et ensoleillée, la montée des azotites est bien marquée et les fortes teneurs se maintiennent jusqu'au début de novembre.

D'après le tableau CI, les teneurs en azotites sont minimum à 80 m de profondeur et maximum en surface. L'existence du maximum en surface est facilement concevable si l'on se réfère aux nombreux travaux (Guilliermond et Mangenet, 1946, p. 416 sq) qui ont montré que les cellules vertes ou incolores sont capables de réduire l'azote

nitrique en azote nitreux, pour aboutir à des sels ammoniacaux et finalement à des amino-acides. La surface de notre lac se couvrant d'année en année d'une quantité toujours plus grande de végétation, on a de plus en plus de chances que la teneur en azotites reste maximum en surface et qu'elle continue d'augmenter.

Les courbes des figures 101 et 102 se rapportent à la teneur en azotates. Dans les couches supérieures et à partir d'avril, celle-ci diminue de plus en plus jusqu'à la fin de l'été, pour augmenter de nouveau ensuite; mais à 20 m de profondeur, la variation est moins marquée qu'à des niveaux supérieurs. La durée des faibles teneurs en azotates est en relation directe avec la température de l'eau. La fig. 102 montre en effet que l'arrière-été et l'automne particulièrement chauds de 1961 maintiennent la courbe estivale des azotates plus bas que l'année précédente dans les couches au-dessous de 20 m. La remontée en 1961 est également plus tardive qu'en 1960.

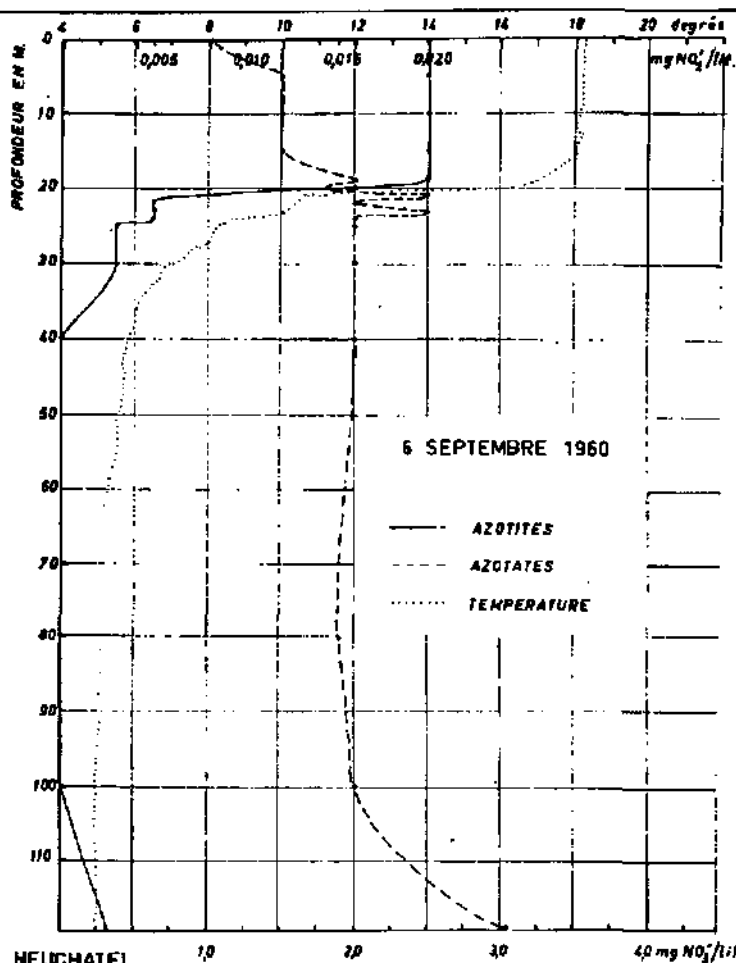
Quant au tableau CI, il permet de voir que c'est au fond que la teneur en azotates est la plus souvent maximum et en surface qu'on trouve le plus fréquemment le minimum. Cette dernière constatation est en rapport direct avec la réduction nitrique-nitreuse due à la végétation dont nous venons de parler plus haut. Au fond, par contre, la teneur en azotates reste pratiquement inchangée et, de ce fait, maximum pour l'ensemble des niveaux de 0 à 100 m.

Examinant les teneurs instantanées en combinaisons azotées en fonction de la profondeur, on constate aussi des différences lorsqu'on passe d'un niveau à un autre. C'est ce qu'illustrent les figures 103 et 104 pour la variation des teneurs en azotites et en azotates, en même temps que celle de la température, à deux dates choisies au hasard : les 6 septembre 1960 et 8 août 1961, autrement dit en période de stratification thermique du lac.

Les teneurs en azotites sont tout d'abord les mêmes quelle que soit la profondeur des couches subsuperficielles. Puis un écart de la courbe se produit sensiblement au niveau du saut thermique, (8.VIII.61); il est même considérable au niveau du thermocline (6.IX.60). La quantité d'azotites varie encore durant la traversée du métalimnion; puis tend à devenir constante de nouveau dans l'hypolimnion, sauf à l'approche du fond où la composition de l'eau doit être influencée par celui-ci ou par des courants profonds dits de retour.

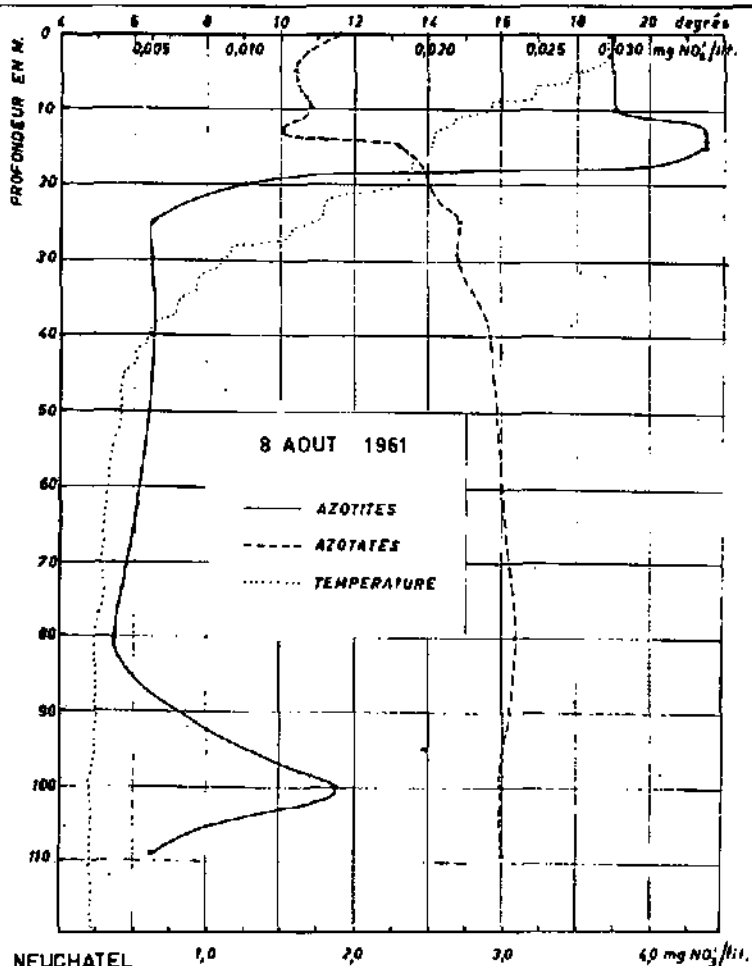
La courbe des azotates subit des fluctuations peu marquées dans l'épilimnion, plus nettes dans le métalimnion mais tend à devenir régulière dans l'hypolimnion. La réduction nitrique-nitreuse dont nous avons parlé ne doit pas être étrangère aux fluctuations épilimniques de la courbe, car l'hétérogénéité du milieu est grande à ces profondeurs du fait de la stratification thermique et, par conséquent, les teneurs en azotates varient rapidement pour de petits écarts de profondeur.

Ce que nous venons de mentionner pour les deux dates choisies se manifeste de manière semblable durant toute la stratification



LAC DE NEUCHÂTEL
STATION Z: BAIE D'AUVERNIER

Fig.103.



LAC DE NEUCHÂTEL
STATION 2: BAIE D'AUVERNIER

Fig.104.

thermique du lac et avec plus ou moins de netteté suivant que la saison est plus ou moins avancée. Dès lors, on peut envisager qu'il existe des teneurs différentes en substances azotées dans les trois zones superposées qui constituent le lac d'été. C'est ce que nous montrons par le tableau CII et la figure 105.

Il ressort clairement de cette figure que l'épilimnion est plus riche en azotites que le métalimnion et ce dernier plus que l'hypolimnion. La situation est inverse quant à la teneur en azotates.

Nous laissons de côté le cas de l'ammoniaque car, il ne présente, à notre avis, que peu d'intérêt du fait que très souvent sa teneur est nulle dans presque toutes les couches simultanées.

TABIEAU CII

Moyennes et extrêmes des teneurs en azotites et en azotates mesurées dans la baie d'Auvernier durant la stratification thermique des années 1960 et 1961 et exprimées en mg NO₂ et NO₃ par litre.

	Azotites				Azotates			
	1960		1961		1960		1961	
<u>Epilimnion</u>								
Moyenne	0,020		0,027		1,9		1,5	
Extrêmes	0,005	0,028	0,011	0,046	1,1	2,5	0,8	2,4
Dates	17.V	12.VII	7.XI	6.IX	6.IX	31.V	12.IX	18.IV
Amplitude	0,023		0,035		1,4		1,6	
<u>Métalimnion</u>								
Moyenne	0,017		0,019		2,3		1,9	
Extrêmes	0,004	0,026	0,006	0,035	1,7	2,8	1,2	2,7
Dates	4.X	14.IV	7.XI	8.VIII	23.VIII	4.X	26.IX	10.X
Amplitude	0,022		0,029		1,1		1,5	
<u>Hypolimnion</u>								
Moyenne	0,006		0,007		2,7		2,6	
Extrêmes	0,001	0,013	0,003	0,016	2,0	4,2	2,2	3,0
Dates	6.IX	31.V	11.VII	22.VIII	6.IX	4.X	25.X	18.IV
Amplitude	0,012		0,013		2,2		0,8	

Dans chacune des trois zones superposées, la teneur en azotites augmente en moyenne de 1960 à 1961, tandis que celle en

azotates diminue. L'amplitude des extrêmes augmente également de 1960 à 1961 pour les azotites dans les trois zones, mais seulement dans les deux supérieures pour les azotates. Il serait imprudent de tirer des conclusions sur la variation des combinaisons azotées des trois zones en question en se basant sur les résultats de ces deux ans seulement, d'autant plus que les caractères météorologiques de l'année 1961 sont eux-mêmes extraordinaires. Nous nous bornerons donc aux constatations ci-dessus jusqu'à ce que l'on puisse disposer de données ultérieures.

35.3. Les combinaisons azotées aux stations A à P.

Dans les tableaux CIII et CIV nous reportons simultanément les teneurs moyennes et extrêmes de l'ammoniaque, des azotites et des azotates déterminées lors des grandes expéditions de 1957 à 1960.

TABEAU CIII
(cf. page suivante)

TABLEAU CIII

Moyennes des combinaisons azotées pour les stations A à P' de 1957 à 1960 et exprimées en mg par litre.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Ammoniaque (en NH_3)</u>					
Avril	0,023	0,018	0,016	0,016	0,020
Mai	<u>0,034</u>	<u>0,030</u>	<u>0,028</u>	0,024	<u>0,025</u>
Août	<u>0,010</u>	0,013	<u>0,003</u>	<u>0,012</u>	0,013
Septembre	0,022	<u>0,007</u>	0,005	<u>0,067</u>	0,005
Octobre	0,031	0,064	0,044	0,022	<u>0,001</u>
Amplitude	0,024	0,023	0,025	0,055	0,024
<u>Azotites (en NO_2^+)</u>					
Avril	<u>0,010</u>	<u>0,011</u>	<u>0,014</u>	<u>0,007</u>	0,007
Juin	0,022	0,022	0,029	0,021	<u>0,048</u>
Août	0,033	<u>0,040</u>	0,024	0,011	0,012
Septembre	<u>0,043</u>	0,039	0,023	0,005	0,006
Octobre	0,035	0,036	<u>0,037</u>	<u>0,035</u>	<u>0,002</u>
Amplitude	0,033	0,029	0,023	0,028	0,046
<u>Azotates (en NO_3^-)</u>					
Avril	<u>2,9</u>	<u>2,9</u>	<u>3,1</u>	3,1	3,3
Juin	2,6	2,7	2,3	3,0	<u>3,6</u>
Août	2,1	<u>2,1</u>	2,8	<u>3,4</u>	3,4
Septembre	<u>1,9</u>	<u>2,1</u>	2,7	3,3	3,1
Octobre	2,2	2,2	<u>2,2</u>	<u>2,5</u>	<u>2,8</u>
Amplitude	1,0	0,8	0,9	0,9	0,8

A part les moyennes se rapportant aux azotites et dont l'amplitude passe par un minimum à 20 m de profondeur, toutes les autres varient de manière apparemment désordonnée et qui peut être le fait des courants sous-lacustres. L'étude simultanée d'un plus grand nombre de stations serait nécessaire cependant pour vérifier cette dernière hypothèse.

TABLEAU CIV

Teneurs extrêmes en combinaisons azotées pour les stations A à P'
de 1957 à 1960 et exprimées en mg par litre.

	0 m .	10 m .	20 m	30 m	40 m
<u>Ammoniaque</u> <u>(en NH_3)</u>					
Minimum	0	0	0	0	0
Maximum	0,30	0,40	0,40	0,20	0,14
Station	A	E	C	A	C
Date	29.X.57	29.X.57	26.XII.57	27.X.59	29.IV.58
Amplitude	0,30	0,40	0,40	0,20	0,14
<u>Azotites</u> <u>(en NO_2^1)</u>					
Minimum	0	0	0	0	0
Maximum	0,100	0,180	0,100	0,100	0,100
Station	A	A	N	B'	partout
Date	26.VIII.58	26.VIII.58	26.VIII.58	24.VI.58	souvent
Amplitude	0,100	0,180	0,100	0,100	0,100
<u>Azotates</u> <u>(en NO_3^1)</u>					
Minimum	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Station	K	K	N	P'	N
Date	25.VIII.59	27.X.59	27.X.59	27.X.59	27.X.59
Maximum	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5
Station	F	E	D	D	B'
Date	25.VI.57	25.VI.57	27.VIII.57	27.VIII.57	27.VIII.57
Amplitude	3,8	3,8	3,8	4,3	4,3

Les minima pour l'ammoniaque et les azotites se produisent à toutes les stations et très souvent; c'est pourquoi nous n'en donnons pas explicitement les dates et les stations correspondantes dans le présent tableau; il en est de même pour les maxima des azotites à 40 m de profondeur.

L'amplitude des extrêmes est maximum à 10 et 20 m de profondeur pour l'ammoniaque, ainsi qu'à 10 m pour les azotites. Quant aux extrêmes eux-mêmes, ils se rencontrent à n'importe quelle station indifféremment. Il est permis de supposer qu'en poursuivant les recherches plusieurs années encore et à d'autres stations simultanément, il sera possible de déceler une corrélation entre les extrêmes et les divers niveaux, à moins que l'augmentation de la pollution à laquelle les teneurs en matières azotées sont sensibles ne contribue à brouiller davantage le problème.

35.4. Les combinaisons azotées dans l'eau des affluents du lac.

Comme pour les déterminations précédentes, nous nous occupons tout d'abord du canal de la Broye.

TABLÉAU CV

Matières azotées de l'eau du canal de la Broye, déterminées à la Saugue pour la période 1957-1960 et exprimées en mg par litre.

	Ammoniaque (en NH_3)	Azotites (en NO_2')	Azotates (en NO_3')
Moyenne	0,31	0,029	4,0
Minimum	0	0	0,4
Date	30.X.57	26.VI.57	1.X.58
Maximum	1,75	0,800	20,0
Date	2.XI.59	28.VIII.57	18.V.60
Amplitude	1,45	0,800	19,6

En moyenne, les teneurs en ammoniaque et en azotates de l'eau du canal de la Broye sont plus élevées que celles de l'eau du lac; par contre, celles des azotites sont du même ordre de grandeur. Si les minima sont les mêmes pour l'ammoniaque et les azotites dans les deux cas, les maxima sont nettement plus élevés pour la Broye que pour le lac. Quant aux extrêmes des azotates, ceux de la Broye englobent ceux du lac.

Pour les autres affluents, nous ne disposons que des résultats de 1960 dont nous ne classons toutefois que les moyennes dans le tableau CVI.

TABLÉAU CVI

Teneurs moyennes en ammoniacque, en azotites et en azotates de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960, exprimées en mg par litre.

	Ammoniacque (en NH_3)	Azotites (en NO_2')	Azotates (en NO_3')
La Broye	0,14	0,063	5,5
Le Seyon	1,95	0,381	11,6
La Serrière	0,11	0,055	5,2
L'Arause	0,21	0,020	<u>3,3</u>
La Raisse	<u>0,04</u>	<u>0,002</u>	3,4
L'Arnon	0,08	0,061	13,8
La Brine	0,13	0,109	19,4
Le Bey	0,23	0,196	17,5
Le Mujon	<u>25,53</u>	0,174	-
L'Orbe-Thielle	0,12	0,077	8,0
Le Canal oriental	1,53	<u>0,428</u>	20,5
Le Buron	3,51	0,259	12,2
La Mentue	0,15	0,097	<u>21,0</u>

La Raisse est celui des affluents dont l'eau est la moins chargée en matières azotées, les affluents de l'extrémité amont étant les plus riches au contraire.

35.5. Comparaison avec d'autres lacs.

Pour le lac de Morat, Rivier (1936) avait déterminé 0 à 0,194 mg NO_2' /lit, soit 0 à 0,059 mg N/lit. durant les années 1934-1935 et l'EAWAG (1960), pour les années 1954 à 1955, 0,003 mg N/lit.

L'ensemble $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ déterminé par l'EAWAG pour le lac de Morat correspond à 1,16 mg N/lit. Nous obtenons, pour l'ensemble correspondant dans le lac de Neuchâtel: 0,78 mg N/lit, soit les 2/3 de la valeur enregistrée pour Morat.

Notre lac est donc moins riche en combinaisons oxygénées de l'azote que celui de Morat.

Dans l'Untersee, Elster et Einsele (1938) n'ont pas dosé exactement les azotites et les azotates se contentant d'en noter la pré-

sence du haut en bas des profils verticaux.

Enfin, dans le Léman, Monod (1960b) signale qu'entre 1953 où l'ammoniaque est apparu pour la première fois et 1960, la teneur en cette combinaison a décuplé; quant aux azotites, ils étaient absents jusqu'en 1950.

Rapportée à nos travaux antérieurs, la teneur en ammoniaque semble être du même ordre de grandeur qu'en 1944-1945 dans le lac de Neuchâtel, mais les azotites sont maintenant présentes en permanence et en quantités décelables alors qu'auparavant ils n'existaient que sporadiquement et à l'état de traces. La continuation de nos recherches plusieurs années encore permettra vraisemblablement de se rendre compte de l'évolution des matières azotées en fonction de la pollution croissante des eaux de notre région.

36. L'oxygène dissous dans l'eau.

La quantité d'oxygène dissous dans l'eau d'un lac dépend, en dehors de la période de stratification, de la pression atmosphérique et de l'altitude essentiellement. L'équilibre avec l'air atmosphérique est vite atteint, mais la quantité d'oxygène dissous dépend surtout de la température de l'eau car à pression égale, l'eau froide est capable de dissoudre davantage d'oxygène que l'eau plus chaude.

La quantité d'oxygène dissous existant réellement dans l'eau et dosée comme nous l'avons indiqué précédemment (paragraphe 22) ne correspond pas nécessairement à la quantité qui pourrait théoriquement se dissoudre dans l'eau à la même température et sous la pression correspondant à la pression barométrique existant simultanément à la surface du lac. La quantité dosée s'exprime alors en % de la quantité théorique correspondante et ce rapport porte alors le nom de degré de saturation en oxygène ou plus simplement de "saturation en oxygène". Lorsque la saturation dépasse 100 %, on parle de sursaturation; lorsqu'elle est inférieure à cette valeur, la différence à 100 % est appelée le déficit actuel en oxygène. Le déficit absolu en oxygène est la différence entre la saturation théorique à 4 degrés sous une pression égale à celle régnant à la surface du lac et la quantité d'oxygène dosée. On appelle déficit relatif la différence entre deux déterminations d'oxygène à des dates différentes; le déficit relatif mesure en quelque sorte la productivité biologique du lac entre ces deux dates.

En dehors de la période de stratification thermique, la teneur en oxygène de l'eau de la plupart des lacs est presque constante de la surface au fond, car elle résulte du brassage qui a donné naissance à la période dite de circulation (automne ou vernal). En période de stratification thermique au contraire, la quantité d'oxygène dissous varie avec la profondeur, augmentant en valeur absolue avec cette dernière lorsque la température baisse. Dans le premier cas, la distribution de l'oxygène dissous est dite orthograde; dans le second, elle est dite clinoграde.

Tenant compte de la production d'oxygène par photosynthèse chlorophyllienne, Åberg et Rodhe (Hutchinson, 1957, p. 604) appellent hétérograde positive la courbe de la teneur en oxygène qui représente un maximum de gaz dissous dans le métalimnion, ce qui se produit lorsque l'épilimnion étant suffisamment peu épais et transparent, la photosynthèse se produit alors notablement dans le métalimnion. Lorsque la courbe représentant la teneur en oxygène dissous en fonction de la profondeur indique une diminution du gaz à partir de la surface, passe par un minimum situé dans le métalimnion généralement, puis croît à nouveau, on a affaire à une courbe hétérograde négative.

La répartition de l'oxygène dissous dans l'eau est un des phénomènes physico-chimiques les plus étudiés en limnologie. C'est Juday (1916) qui, un des premiers, a révélé les inégalités dans la répartition de l'oxygène en profondeur du fait non seulement des conditions de température, mais, en période de stratification tout spécialement, du fait de la production de gaz due à la photosynthèse chlorophyllienne d'une part, du fait de l'appauvrissement des couches profondes en oxygène parce que ces couches ne participent plus à la circulation totale qui réoxygène l'eau, dès que la stratification est commencée d'autre part.

Dans les couches en contact avec le fond, la teneur en oxygène dissous est tributaire de la consommation due au benthos⁴¹⁾; il y a donc là aussi une inégalité dans la répartition de l'oxygène dissous en fonction de la profondeur. Nous ne nous en occuperons pas pour le moment.

Carlin-Nilsson (1938) révèle l'existence, dans certains lacs suédois, d'inégalités dans la répartition horizontale de l'oxygène dissous à certaines profondeurs, tandis que Findenegg (1936) arrive à la conclusion que, pour une même profondeur, les grands lacs ont toujours une teneur en oxygène supérieure à celle des petits lacs.

Quant aux variations horaires de la teneur en oxygène dans l'eau de lac, Csegezy (1938b) puis Entz et Sebestyén (1946) de même qu'Alabaster et Robertson (1961) ont observé dans de nombreux lacs un maximum en fin d'après-midi et un minimum nocturne, peu avant l'aube; ces écarts sont en relation directe avec la photosynthèse chlorophyllienne, mais nous ne nous en occupons pas dans nos recherches actuelles.

Etudiant de manière suivie plusieurs stations différentes, Auerbach et Rottengatter (1960) sur le Bodan constatent que les courbes de la teneur aussi bien que celles de la saturation en oxygène ne varient pas de la même manière à toutes les stations simultanément. Il existe donc des différences instantanées entre stations différentes d'un même lac.

Maucha (1936) montre qu'en période de stratification

41) benthos = ensemble de ce qui vit sur le fond.

tout spécialement, ce n'est pas tant la quantité absolue d'oxygène dissous qui est importante pour le biotope lacustre, que la valeur relative, autrement dit la saturation. C'est pourquoi nous traiterons la question de l'oxygène sous ces deux aspects.

En résumé, la teneur en oxygène dissous varie en fonction de la profondeur, dans l'espace ainsi qu'au cours de la saison. Comme Thomas (1955b) l'a relevé déjà, les causes de consommation de l'oxygène dissous dans l'eau dépendent de la teneur en eaux usées, de la vie planctonique ainsi que de la décomposition des cadavres des algues mortes.

36.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle.

Il n'existe, pour Neuchâtel, que nos déterminations de la campagne 1944-1945 à Champ Bougin (Sollberger, 1946) comme données antérieures aux recherches actuelles.

Durant cette période biennale, la teneur en oxygène est élevée au printemps, diminue rapidement en été et augmente de nouveau à l'approche de l'automne. Quant à la teneur en gaz dissous, on enregistra 11,5 mg O₂ par litre en moyenne, avec des extrêmes de 9,4 et 13,2; la saturation est, en moyenne de 91,8% avec des extrêmes de 78,8 et 101,8 %.

36.2. L'oxygène dissous à la station Z.

Les dosages hebdomadaires à la station Z montrent que la quantité d'oxygène dissous dans l'eau varie au cours de la saison en fonction de l'activité du biotope lacustre. La quantité de gaz présente dans l'eau à un instant et une profondeur donnée dépend de la température et de la pression régnant à cet endroit. Aussi est-il plus pratique de comparer les déterminations de l'oxygène entre elles en calculant, à partir de la teneur en gaz dissous, le taux de saturation instantané correspondant. Quelle que soit la profondeur d'où provienne l'échantillon, on rapporte la quantité d'oxygène déterminée à la quantité du même gaz qui serait en équilibre avec l'eau du lac à la même température et sous la pression régnant simultanément à la surface du lac. Le taux de saturation s'exprime alors en pour-cent. Dans ce paragraphe et les suivants, nous exprimerons la teneur en oxygène dissous des deux manières à la fois.

36.2.1. la teneur globale en oxygène à Z.

TABLEAU CVII

(cf. page suivante)

TABLEAU CVII

Moyennes et extrêmes de la teneur et de la saturation en oxygène dans la baie d'Auvergnier, de la surface au fond, pour la période 1958-1961, exprimées en mg par litre et en pour-cent respectivement.

	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Teneur moyenne</u> (0-100 m)					
Moyenne	10,08	10,41	10,46	10,18	10,31
Minimum	8,47	8,74	8,71	7,84	7,84
Date	14.X	30.IX	20.IX	17.X	17.X.61
Maximum	12,80	12,67	12,33	12,30	12,80
Date	27.V	12.V	12.IV	18.IV	27.V.58
<u>Extrêmes instantanés</u>					
Minimum	6,55	6,60	7,55	5,70	5,70
Date	7.X	13.X	20.IX	10.X	10.X.61
Profondeur	20	25	25	20	20
Maximum	15,70	15,00	12,75	14,50	15,70
Date	27.V	12.V	29.III	18.IV	27.V.58
Profondeur	0	0	5	5	0
<u>Saturation moyenne</u> (0-100 m)					
Moyenne	98,6	97,5	97,3	95,4	97,1
Minimum	86,3	84,9	88,4	78,4	78,4
Date	14.X	8.XII	26.X	17.X	17.X.61
Maximum	119,9	117,3	111,7	111,4	119,9
Date	27.V	12.V	12.IV	18.IV	27.V.58
<u>Extrêmes instantanés</u>					
Minimum	62,7	62,5	76,5	56,4	56,4
Date	1.X	13.X	27.XII	17.X	17.X.61
Profondeur	80	25	100	25	25
Maximum	162,0	159,3	132,5	145,9	162,0
Date	27.V	12.V	21.VI	29.VIII	27.V.58
Profondeur	0	0	0	5	0

* = année incomplète.

La teneur moyenne en oxygène dissous entre la surface et le fond varie sans ordre apparent et de moins de 4% durant la période considérée, avec une amplitude de 4,96 mg/lit représentant 48,1% de la valeur moyenne de la période. Les minima instantanés se rencontrent fin septembre-début octobre, à l'époque durant laquelle la température moyenne de la surface au fond est la plus élevée de l'année, ce qui correspond à un minimum de solubilité de l'oxygène. Quant aux maxima, ils se trouvent au printemps, en avril et mai, tout au début de la stratification thermique.

La moyenne de la saturation en oxygène accuse une diminution lente, mais régulière, chaque année, atteignant 3,2% au total pour la période considérée. L'amplitude de la moyenne est de 41,5% et représente 42,7% de la valeur moyenne de la période.

Les minima instantanés se produisent en octobre, à l'exception de celui de 1960 qui se présente le 27 décembre seulement; cette exception est due au mauvais temps particulièrement marqué du second semestre de cette année. Quant aux maxima instantanés, on les rencontre en mai et juin, au moment où la production d'oxygène par l'assimilation chlorophyllienne est la plus élevée; mais en 1961, ce maximum n'apparaît que le 28 août seulement à cause du caractère exceptionnellement chaud de cette année. Les extrêmes instantanés de la saturation en oxygène subissent donc l'influence des conditions météorologiques annuelles.

Le tableau CVIII indique, en pour-cent des déterminations effectuées, la fréquence avec laquelle les extrêmes se rencontrent à diverses profondeurs; les maxima de fréquence sont alignés par année et pour la période.

TABLEAU CVIII
(cf. page suivante)

TABLERAU CVIII

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés de la teneur et de la saturation en oxygène se rencontrent à diverses profondeurs et à la station Z, exprimée en % des déterminations.

<u>Teneur en oxygène</u>						
	Profondeur en m.	1958	1959	1960	1961	1958-1961
Minima :	0	3	0	11	0	3,5
	15	<u>25</u>	14	9	0	12,0
	20	22	12	18	<u>31</u>	<u>20,8</u>
	25	13	18	7	28	16,5
	30	13	4	7	14	9,5
	40	9	18	5	0	4,0
	80	6	10	11	7	8,5
	100	0	<u>22</u>	<u>27</u>	21	17,5
Maxima :	0	5	24	<u>24</u>	<u>25</u>	19,5
	5	23	18	17	<u>25</u>	<u>20,8</u>
	10	8	16	6	13	10,8
	80	23	<u>25</u>	21	9	19,5
	100	<u>26</u>	5	10	3	11,0
<u>Saturation en oxygène</u>						
Minima :	20	19	4	7	16	11,5
	25	15	26	11	<u>28</u>	20,0
	30	15	6	13	20	13,5
	40	19	15	9	12	13,8
	80	<u>22</u>	13	15	4	13,5
	100	11	<u>34</u>	<u>44</u>	20	<u>27,3</u>
Maxima :	0	<u>52</u>	<u>63</u>	<u>48</u>	<u>38</u>	<u>50,3</u>
	5	37	20	23	35	28,8
	10	7	7	11	8	8,3
	15	4	2	5	12	5,8

Fig.105.

LAC DE NEUCHÂTEL

Station Z: Baie d'Auvernier.

EVOLUTION DE L'ÉPILIMNION, DU MÉTALIMNION ET DE L'HYPOLIMNION

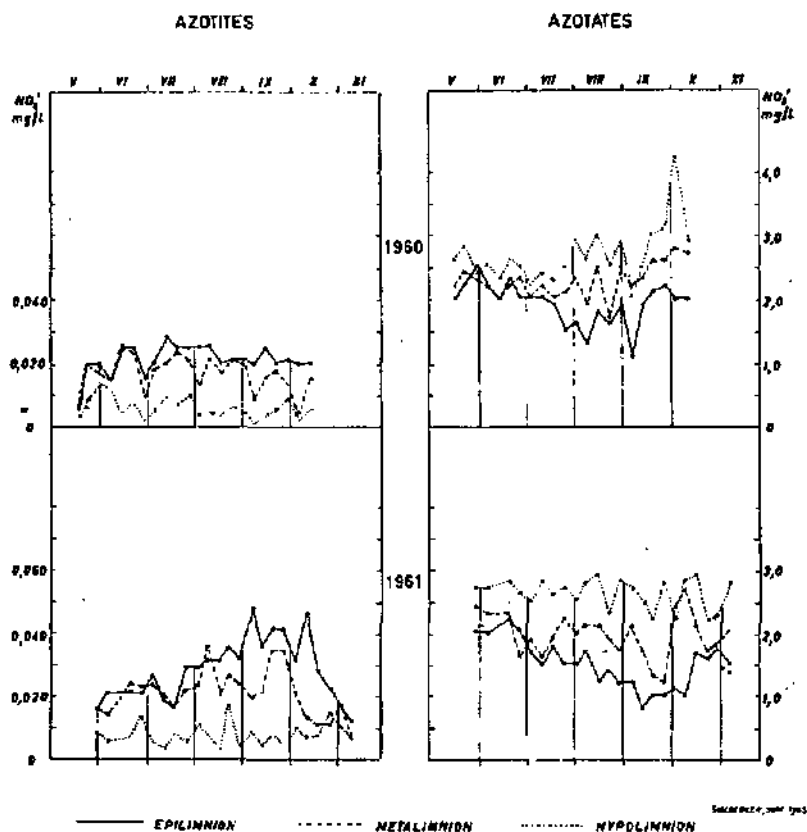


Fig.106.

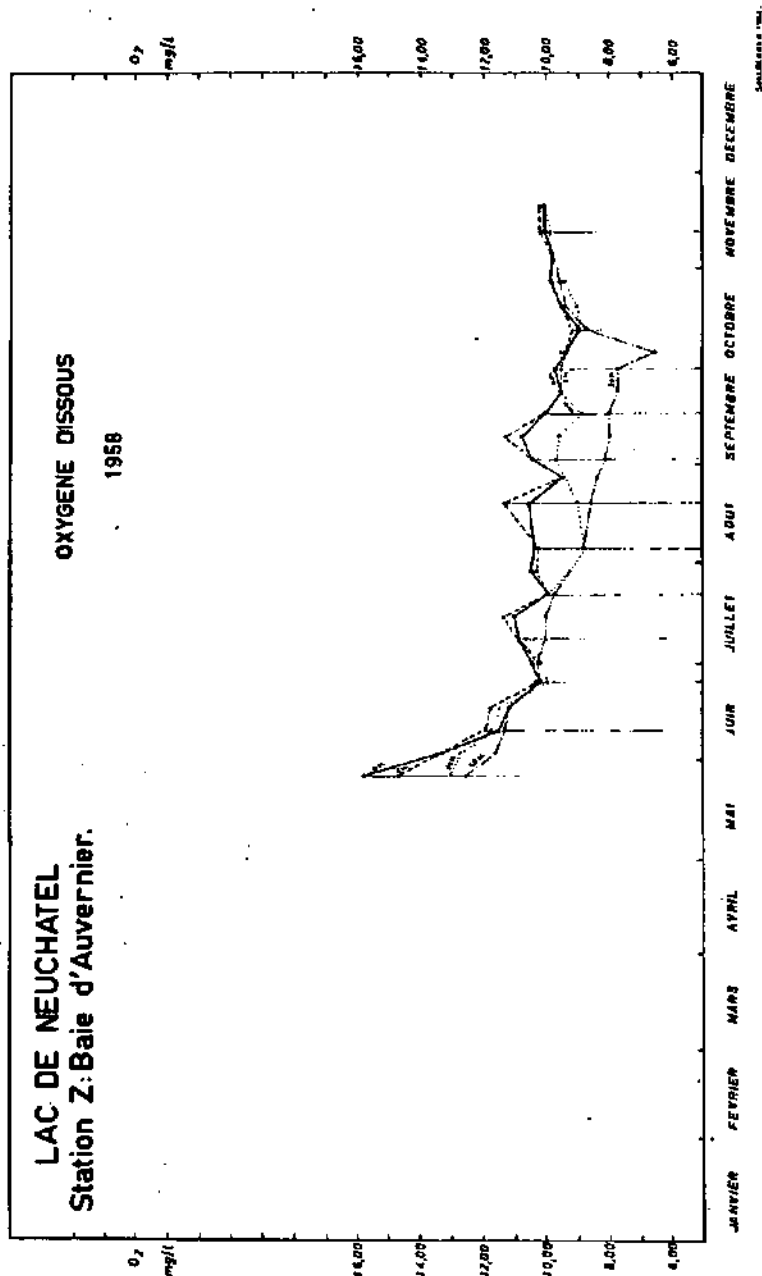


Fig.107.

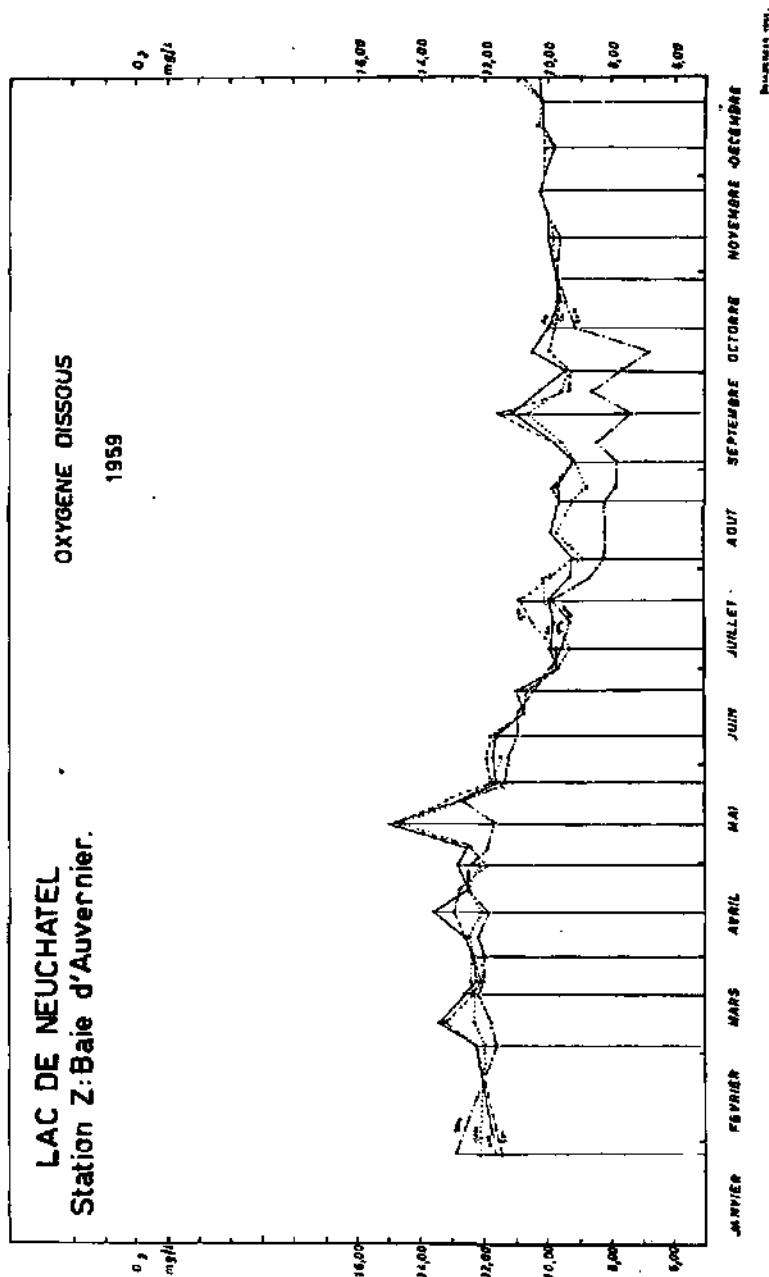
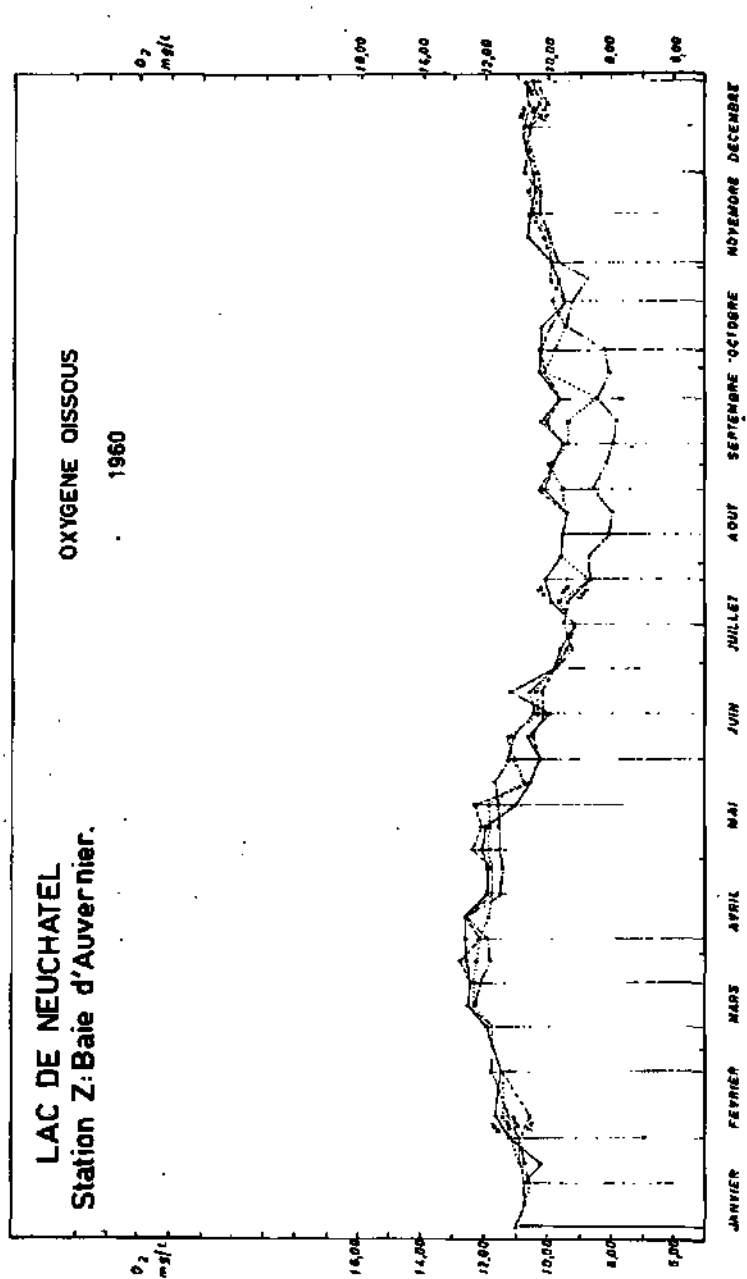


Fig. 108.



SCHEIDT 1961.

Fig.109.

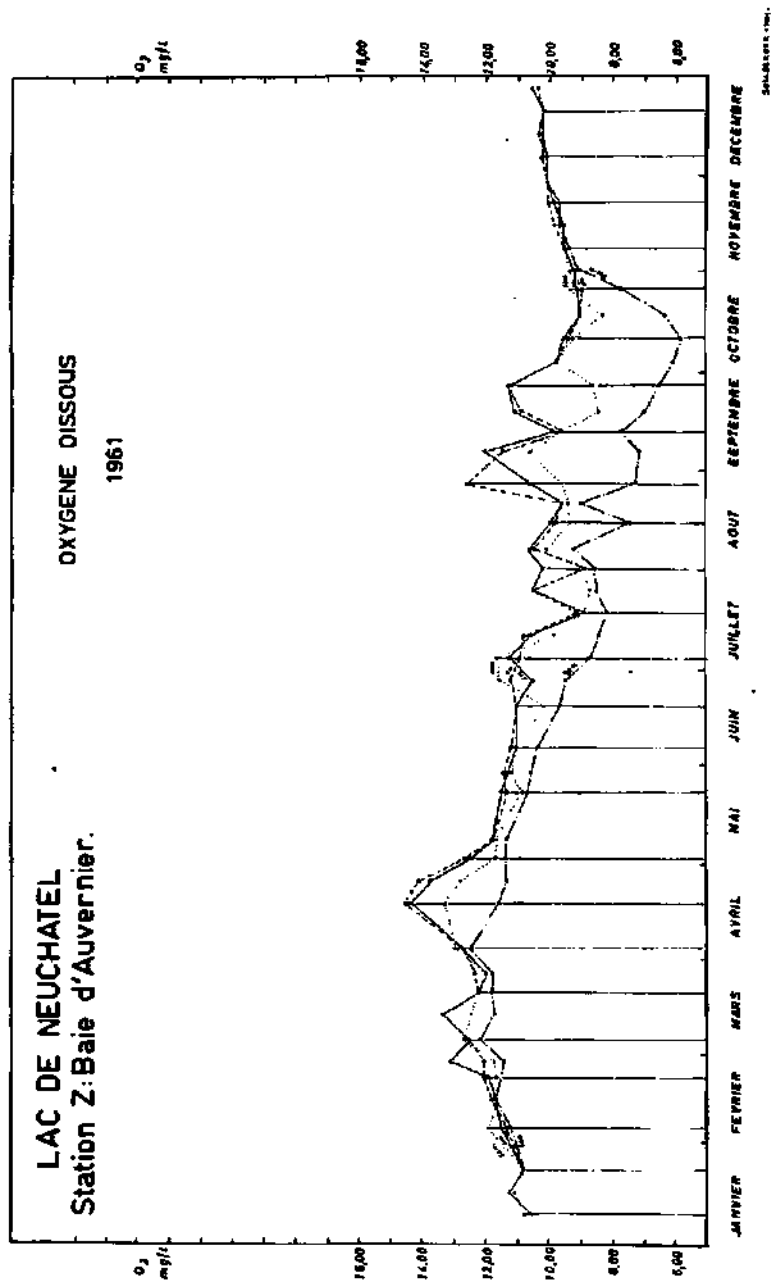


Fig.110.

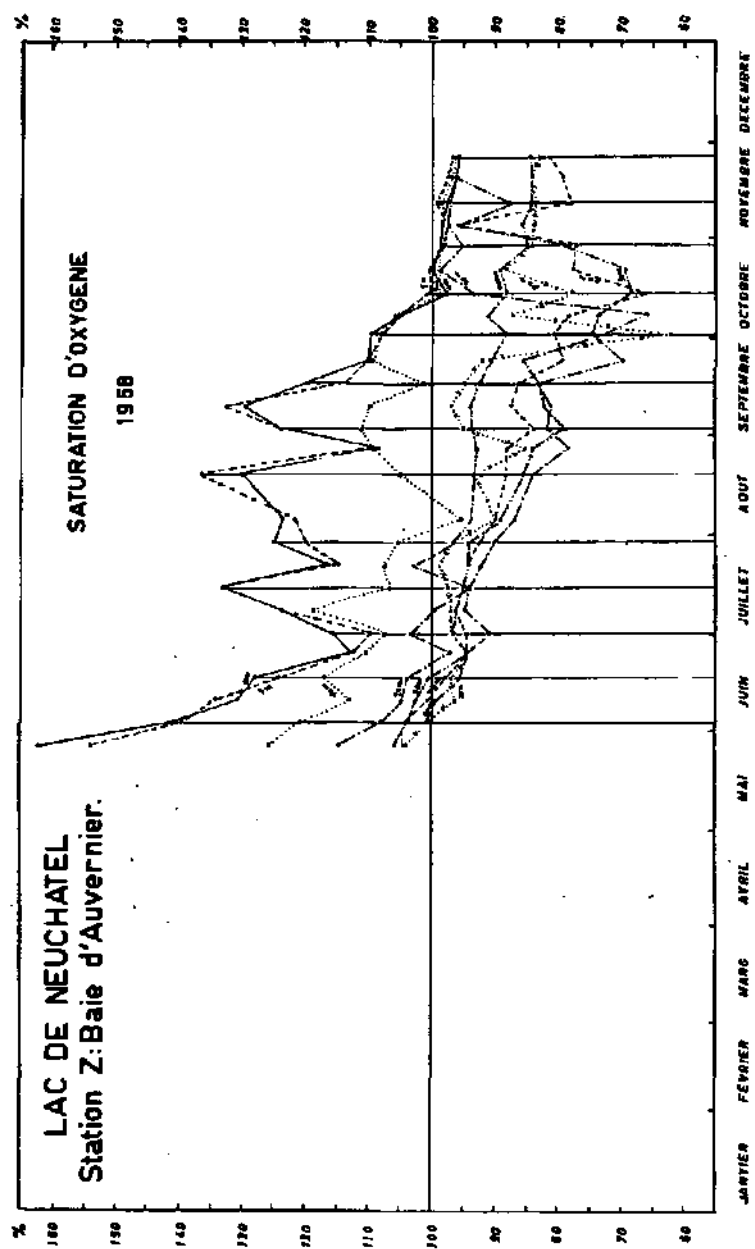


Fig.111.

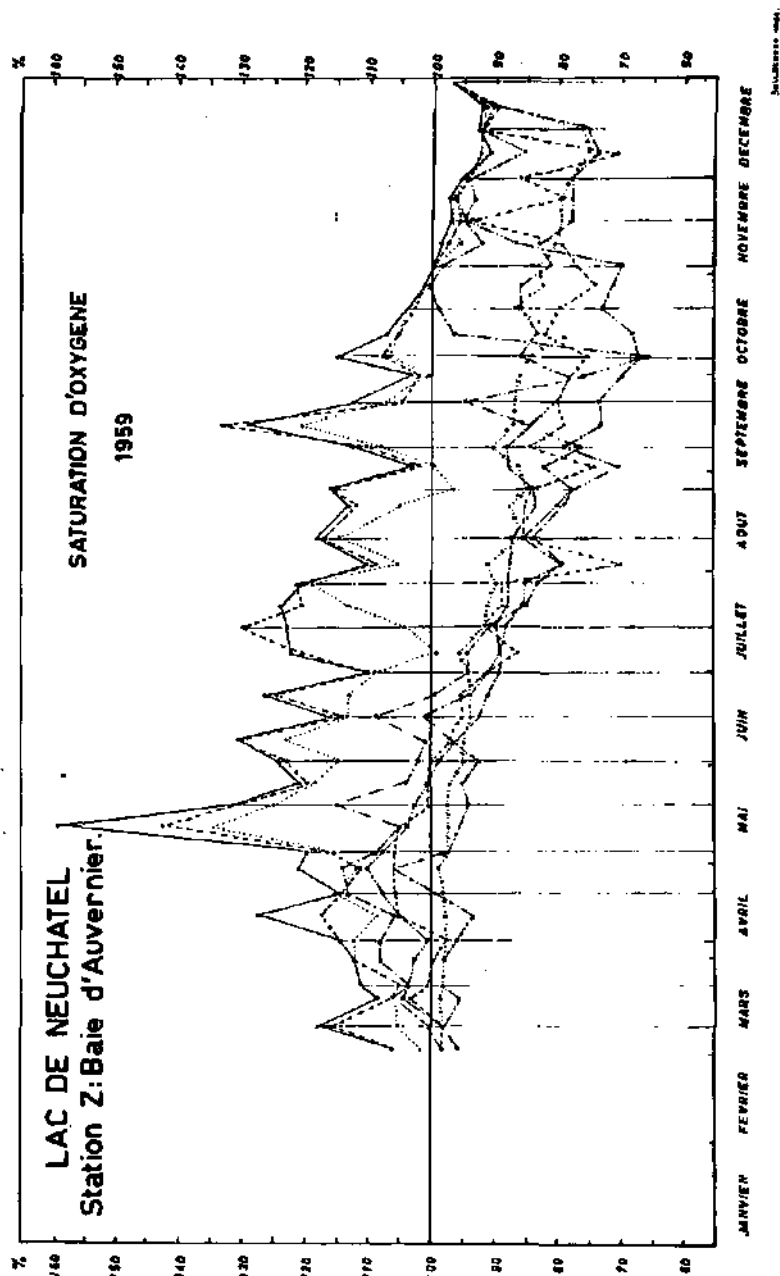
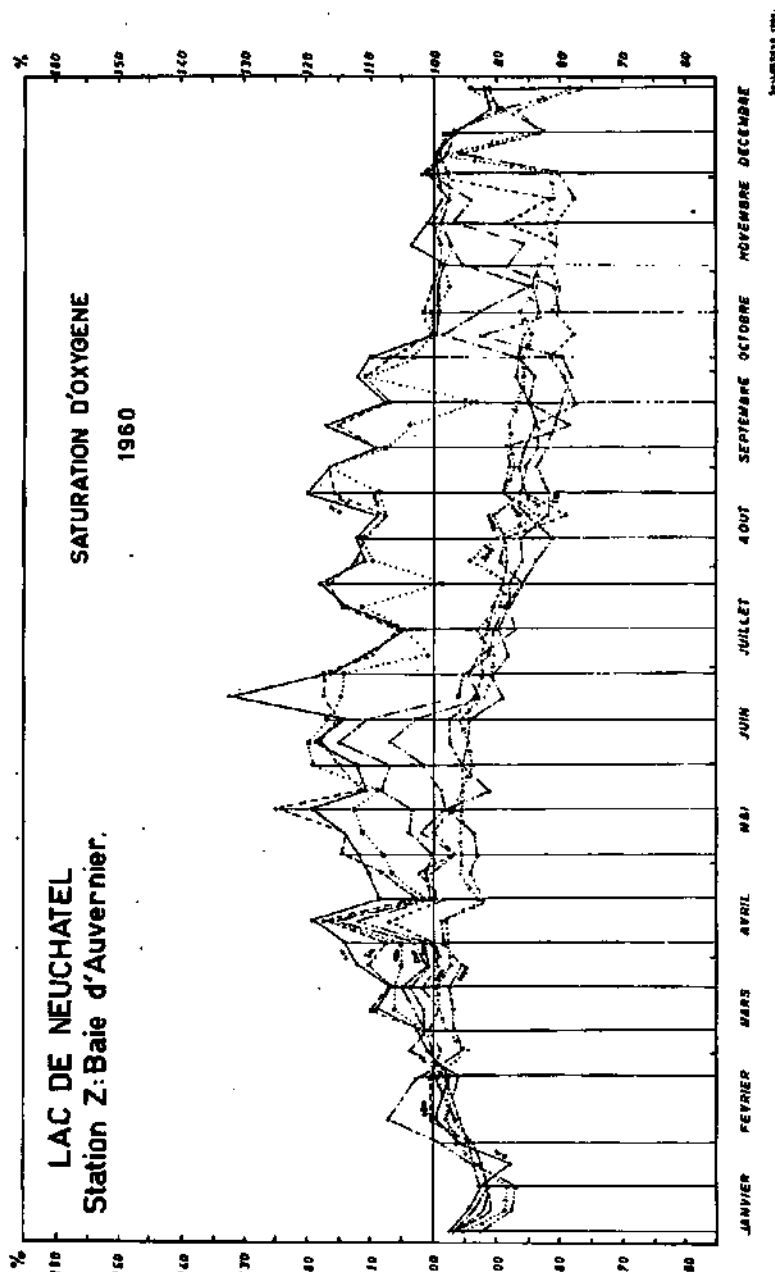


Fig.112.



Dans ce tableau, on n'a pas reporté les profondeurs pour lesquelles la fréquence des extrêmes ne dépasse jamais 10% chacune des années de la période. Durant cette dernière, c'est à 20 m de profondeur, que se rencontrent les minima instantanés de la teneur en oxygène. Les maxima se trouvent à 5 m de profondeur, dans l'épilimnion, au milieu de la zone trophogène. D'après ce même tableau, les minima de la saturation instantanée existent à 100 m de profondeur, tandis que les maxima se situent le plus souvent à la surface du lac.

36.2.2. L'évolution de l'oxygène au cours de l'année.

On peut suivre sur les figures 106 à 109 l'évolution annuelle de la teneur en oxygène sur profondeurs 0, 5, 10 et 20 m. Dans les figures 110 à 113, la distance qui sépare la droite passant par 100%, de chacune des courbes représentatives de la saturation réelle, exprime le déficit actuel de l'eau en oxygène. Chaque année, seules les couches de 0 à 20 m de profondeur accusent une sursaturation jusqu'en octobre, tandis qu'au-delà de cette date elles présentent un déficit jusqu'en février. Par contre, à partir de 20 m et jusqu'au fond, les couches accusent un déficit et depuis la fin de l'hiver, chaque année, ce déficit va croissant jusqu'à la fin de la stratification thermique, sans pouvoir être comblé par l'eutrophisation de cette région du lac est trop avancée et parce que le métabolisme des couches profondes continue, d'année en année, toujours davantage d'oxygène dissous.

Le manque d'oxygène des couches subsuperficielles en automne et en hiver peut paraître surprenant alors que cette partie de l'année débute par l'"overturn" dit d'automne. Or, l'homogénéisation des couches d'eau sous l'effet de ce phénomène dépend à la fois du refroidissement diurne et nocturne qui fait augmenter la densité des couches d'eau et de l'action du vent qui les brasse au moyen des vagues qu'il soulève. Les vagues augmentent bien le contact entre l'eau et l'air et on peut s'attendre alors à ce que la dissolution de l'oxygène ambiant dans l'eau en soit favorisée. Mais, en l'absence de vent en suffisance, malgré l'homogénéisation thermique de l'eau, l'apport d'oxygène nécessaire fait défaut pour combler le déficit existant. C'est ce qui s'est produit en particulier en 1960 et 1961 où l'anomalie constatée doit être attribuée au fait que seul le refroidissement de l'eau s'est manifesté de manière importante et l'a emporté, dans la création de l'"overturn" sur l'action du vent. Il en est résulté que le déficit en oxygène n'a pu se combler durant l'hiver de ces deux ans.

36.2.3. La variation de l'oxygène en fonction de la profondeur.

En janvier et février, la teneur en oxygène est constante, à peu de chose près, sur toute la hauteur de l'eau à la station Z. Aux autres moments de l'année, la quantité d'oxygène dissous varie

avec la profondeur et d'autant plus que la stratification thermique est plus marquée et plus ancienne. C'est ce qui ressort des déterminations de cette teneur à Z les 6 septembre 1960 et 8 août 1961. Les figures 114 et 115 traduisant en courbes la teneur et la saturation en oxygène dissous, en même temps que la température de l'eau.

Le 6 septembre 1960, la teneur en oxygène dissous accuse une diminution à partir de 14 m de profondeur, passe par un minimum à 20 m, puis augmente à nouveau plus bas. Le point d'inflexion de la courbe de l'oxygène correspond à celui de la courbe des températures. La valeur minimum de l'oxygène correspond au thermocline. Si l'on considère la courbe de la saturation, la concordance est encore plus marquée entre la variation de la température et celle de l'oxygène. Celle-ci est représentée par une courbe hétérograde négative au sens donné par Berg et Rodhe (Hutchinson, 1957). A l'approche du fond (vers 100 m) les quantités d'oxygène présentent diminuent de nouveau car le benthos abyssal⁽⁴²⁾ est un gros consommateur d'oxygène.

Le 8 août 1961, l'allure générale des courbes de la température et de l'oxygène est la même, mais l'existence de plusieurs sauts thermiques superposés complique légèrement le phénomène en augmentant le nombre des zig-zags des courbes d'oxygène.

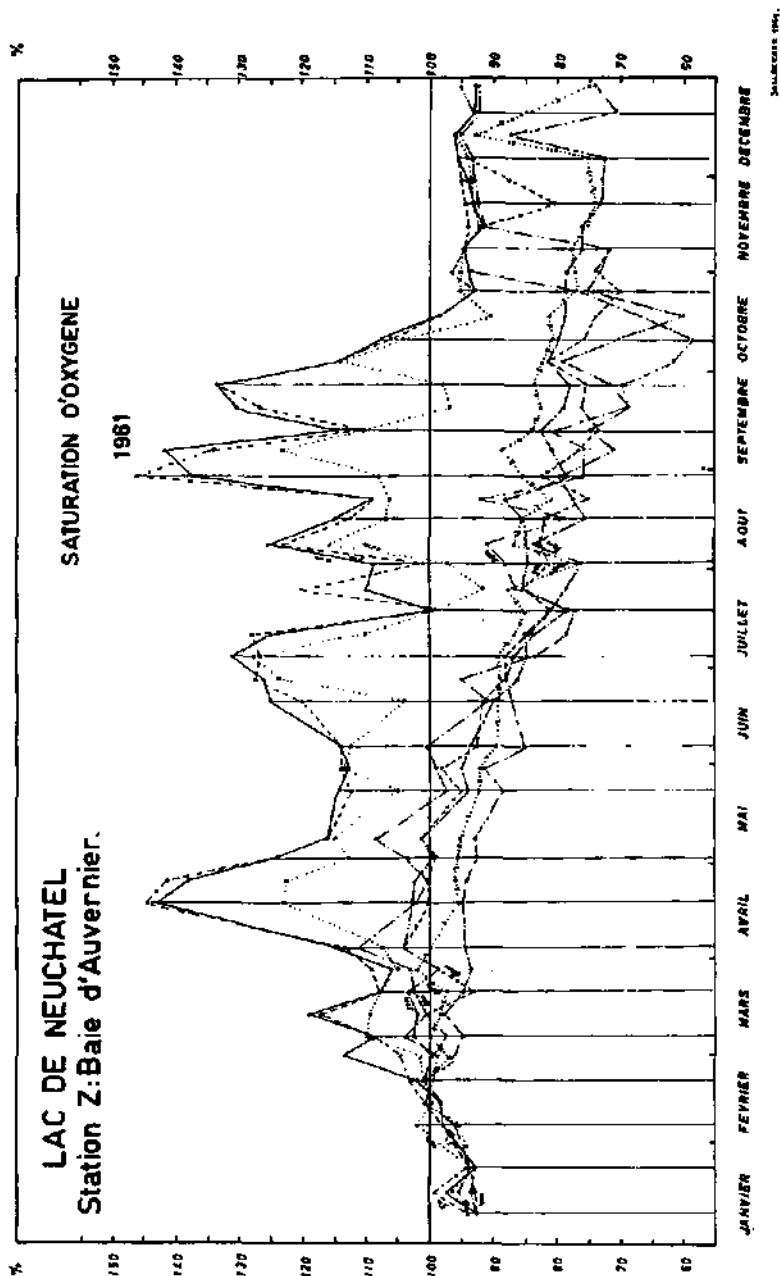
En résumé, les variations de l'oxygène en fonction de la profondeur sont influencées par celles de la température et aux sauts thermiques correspondant des "sauts" de la teneur en oxygène. Ces variations brusques et importantes de la quantité d'oxygène contenue dans l'eau du lac correspond à la "Sprungschicht chimique" mentionnée par Portner (1951a) et au chimocline d'autres auteurs.

36.2.4. La stratification de l'oxygène dissous.

Ces différences dans la teneur en oxygène suivant la profondeur se maintiennent durant toute la période de stratification thermique, mais la teneur à chacune des profondeurs ne cesse de diminuer durant toute cette période. La courbe représentative de l'oxygène en fonction de la profondeur se déplace donc au cours des saisons. Nous représentons dans la figure 116 et pour chacune des années 1959 à 1961, la position de cette courbe au début et à la fin de la période de stratification thermique. L'espace compris entre les deux courbes de chaque année représente alors le déficit relatif dû à la consommation d'oxygène durant la stratification thermique. Ce déficit relatif varie d'une année à l'autre suivant les caractéristiques météorologiques annuelles, très peu dans l'hypolimnion (au-dessous de 45 m), davantage dans l'épilimnion et dans le métalimnion. Pour les trois ans en question, ce déficit présente des valeurs qui sont dans le rapport 1,35 : 1,00 : 1,29, ce qui revient à dire que la consommation d'oxygène due à la productivité biologique durant la période de stratification thermique a été sensiblement égale en 1959 et 1961, tandis qu'elle a été un quart plus faible en 1960 ce qui peut s'expliquer par le caractère météorologique déficitaire et en particulier par le manque d'insolation de cette année.

42) ensemble de ce qui vit sur les fonds profonds.

Fig.113.



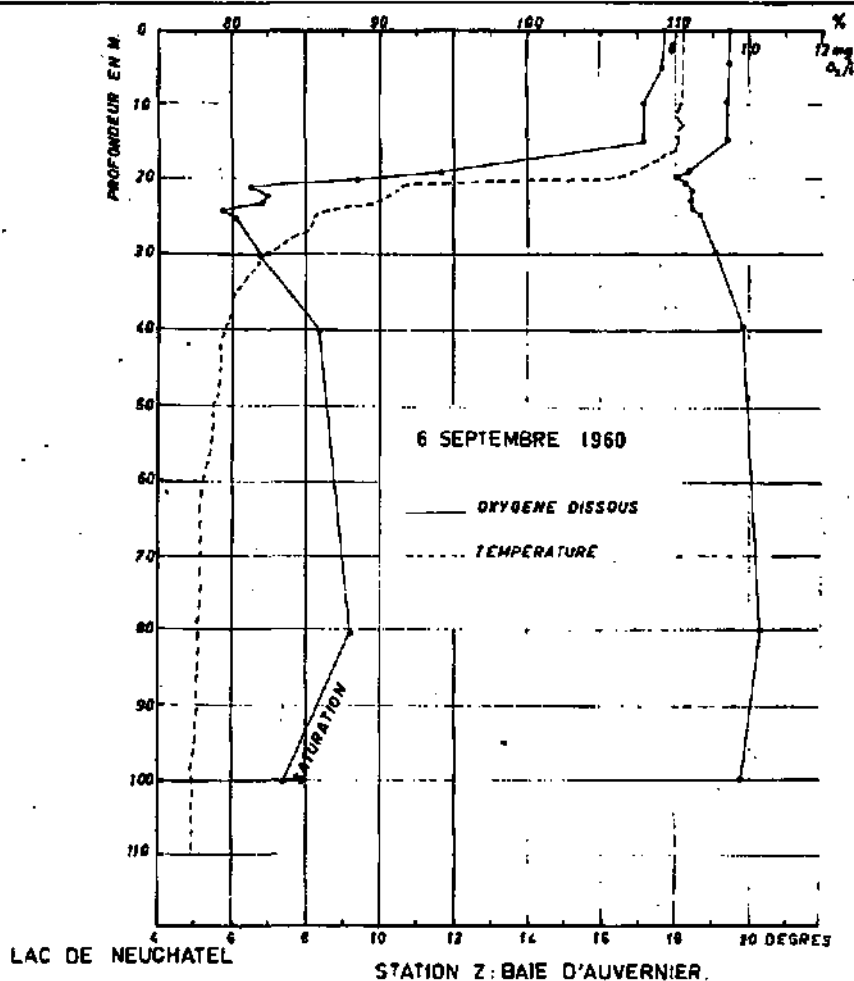


Fig.114.

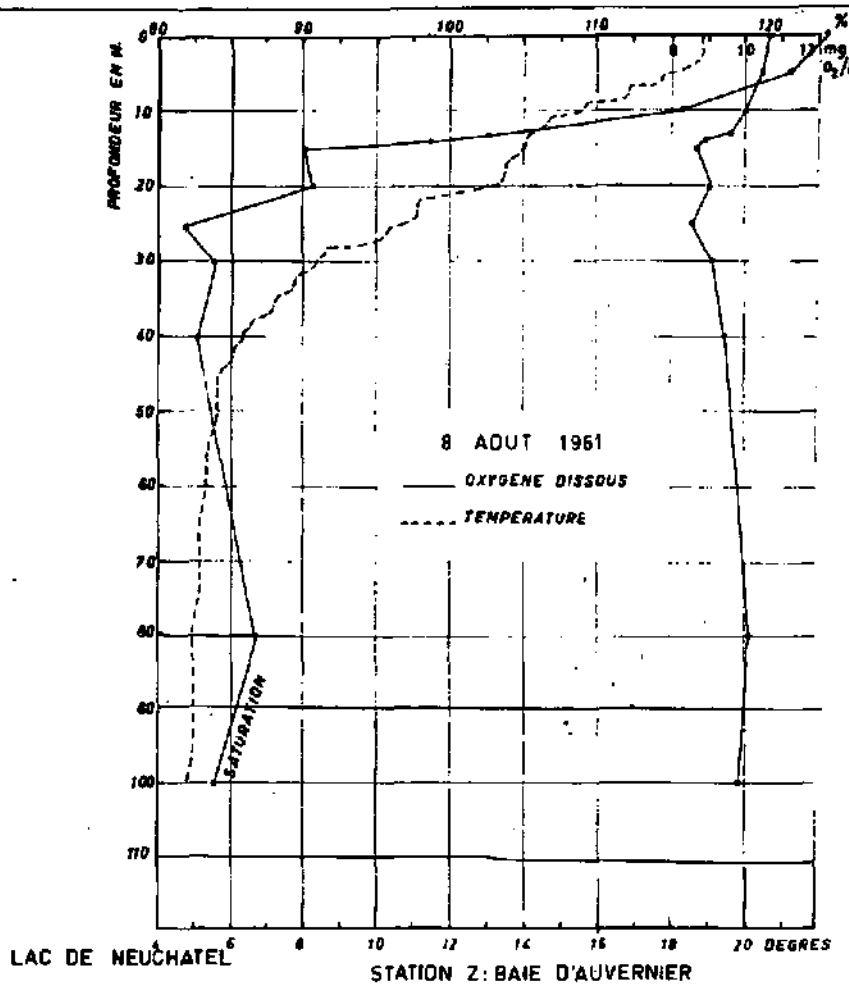
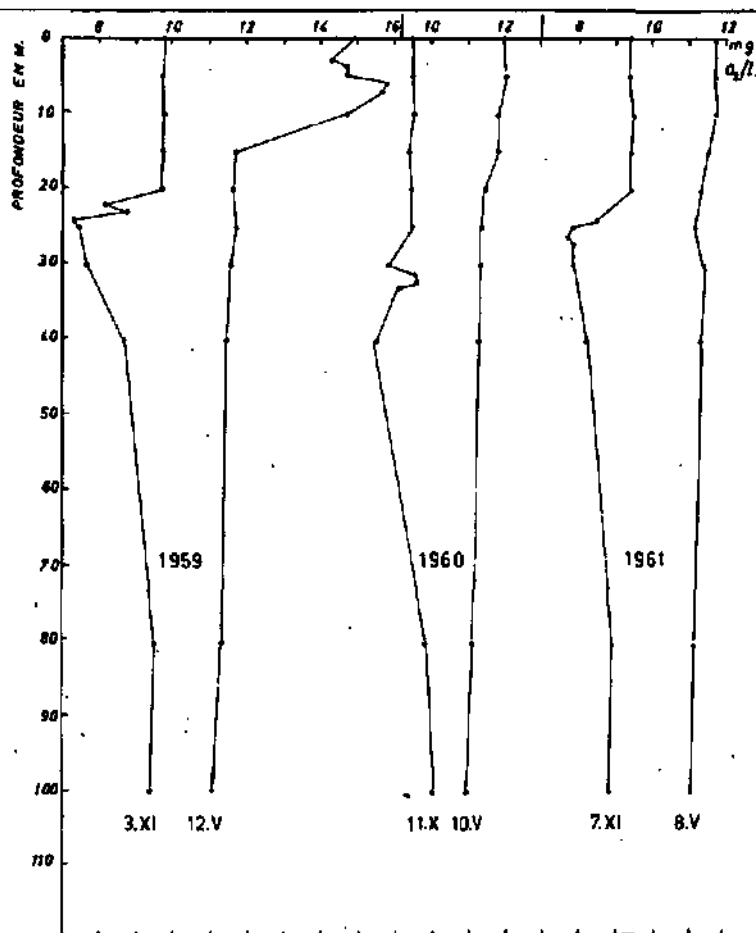


Fig. 115.



LAC DE NEUCHÂTEL

STATION Z: BAIE D'AUVERNIER

DEFICIT RELATIF EN OXYGÈNE DÙ À LA STRATIFICATION THERMIQUE

Fig.116.

SAUTERGER S.A.

Il résulte de ce que nous venons de dire que la teneur moyenne en oxygène n'est pas la même dans chacune des trois zones superposées qui composent la masse lacustre durant la période de stratification thermique. Dans chacune de ces zones, d'ailleurs, elle subit des fluctuations au cours de la saison; c'est ce que nous allons montrer par le tableau CIX et la figure 117.

TABLEAU CIX
(cf. page suivante)

TABLEAU CIX

Moyennes et extrêmes de la teneur, ainsi que de la saturation en oxygène de l'eau de la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961.

Teneur en oxygène (mg/lit)	1958	1959	1960	1961	1958-1961
<u>Epilimnion</u>					
Moyenne	10,54	10,26	9,93	10,30	10,26
Extrêmes	8,72 15,18	9,01 15,00	9,17 11,80	7,96 14,40	7,96 15,18
Dates	1.X 27.V	30.IX 12.V	12.VII 19.IV	17.X 18.IV	17.X.61 27.V.58
Amplitude	6,46	5,99	2,63	6,44	7,22
<u>Métalimnion</u>					
Moyenne	9,34	8,99	9,18	9,00	9,13
Extrêmes	7,05 11,60	6,70 14,70	7,98 12,05	5,90 14,05	5,90 14,70
Dates	23.IX 17.VI	21.X 12.V	13.IX 17.V	17.X 18.IV	17.X.61 12.V.59
Amplitude	4,55	8,00	4,07	8,15	8,80
<u>Hypolimnion</u>					
Moyenne	10,18	9,80	10,11	9,20	9,82
Extrêmes	8,28 12,22	8,57 12,07	8,53 11,40	7,90 11,75	7,90 12,22
Dates	1.X 27.V	6.X 19.V	20.IX 19.IV	25.X 18.IV	25.X.61 27.V.58
Amplitude	3,94	3,50	2,87	3,85	4,32
<u>Saturation en oxygène (%)</u>					
<u>Epilimnion</u>					
Moyenne	119,8	114,7	110,8	115,1	115,1
Extrêmes	97,1 158,0	97,8 159,3	97,1 125,0	86,6 143,3	86,6 159,3
Dates	1.X 27.V	30.IX 12.V	11.X 21.VI	17.X 18.IV	17.X.61 12.V.59
Amplitude	60,9	61,5	27,9	56,7	72,7
<u>Métalimnion</u>					
Moyenne	100,8	92,8	94,8	93,8	95,6
Extrêmes	76,2 121,0	65,1 142,3	77,8 122,0	59,8 136,3	59,8 142,3
Dates	23.IX 17.VI	21.X 12.V	28.IX 17.V	17.X 18.IV	17.X.61 12.V.59
Amplitude	44,8	77,2	44,2	76,5	82,5
<u>Hypolimnion</u>					
Moyenne	92,1	86,9	90,3	82,4	87,9
Extrêmes	75,6 110,4	75,3 110,9	81,5 106,8	74,1 103,3	74,1 110,9
Dates	1.X 27.V	6.X 19.V	20.IX 7.VI	7.XI 18.IV	7.XI.61 19.V.59
Amplitude	34,8	35,6	25,3	29,2	36,8

Pour la période 1958-1961, le rapport épilimnion:métalimnion: hypolimnion a les valeurs suivantes :

	<u>pour la teneur en oxygène</u>	<u>pour la saturation</u>
en ce qui concerne les moyennes	1,12 : 1,00 : 1,08	1,31 : 1,09 : 1,00
en ce qui concerne les amplitudes	1,67 : 2,04 : 1,00	1,98 : 2,24 : 1,00

Seul l'épilimnion accuse, en moyenne, une euresaturation d'oxygène durant toute la période de stratification thermique. Le métalimnion présente un faible déficit en moyenne et l'hypolimnion un déficit plus marqué. Compte-tenu des fluctuations annuelles dues aux conditions météorologiques, la saturation en oxygène de l'hypolimnion semble accuser une tendance à la diminution. Celle-ci serait en rapport avec la pollution croissante de l'esu. Cependant, nous estimons nécessaire de prolonger les observations quelques années encore pour faire mieux ressortir cette baisse de la saturation en oxygène des couches profondes de notre lac. Quant aux amplitudes des extrêmes instantanés de chacune de ces zones, elles apparaissent désordonnées d'une année à l'autre. Seule une longue durée d'observation pourra, peut-être, dévoiler une fluctuation générale quelque peu régulière.

La figure 117 met particulièrement bien en évidence la diminution régulière de la saturation en oxygène dans l'épilimnion, le métalimnion et l'hypolimnion au cours de la stratification thermique. Dans chacune des zones, cette saturation diminue plus ou moins régulièrement de mai à octobre chaque année, à l'exception de 1961 où l'épilimnion et le métalimnion accusent tous deux une resaturation au cours de l'été particulièrement chaud qui caractérise cette année.

36.3. L'oxygène dissous aux stations A à F.

Pour alléger nos tableaux, nous ne nous occuperons que de la saturation en oxygène et reportons, dans le tableau CX les résultats de la surface, ainsi que de 10, 20, 30 et 40 m de profondeur seulement, car ce sont ceux pour lesquels les fluctuations sont les plus intéressantes.

TABLEAU CX
(cf. page suivante)

TABLÉAU CX

Moyennes et extrêmes de la saturation en oxygène aux stations A à P'
pendant les années 1957 à 1960 et exprimés en pour-cents.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	111,4	<u>108,4</u>	<u>106,8</u>	<u>104,4</u>	<u>103,2</u>
Juin	110,7	107,5	102,8	98,7	96,4
Août	<u>112,6</u>	104,5	85,7	81,3	82,6
Septembre	107,7	<u>96,1</u>	<u>80,5</u>	<u>76,2</u>	81,5
Octobre	<u>101,6</u>	100,6	97,5	88,7	<u>80,4</u>
Amplitude	11,0	12,3	26,3	28,2	22,8
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	82,6	72,0	65,0	62,3	64,9
Station	D	X	A	C	C
Date	29.X.57	30.IX.58	29.IX.59	27.X.59	27.VIII.57
Maximum	126,0	131,0	118,1	115,0	110,6
Station	K	A	A	A	8'
Date	29.IX.59	25.VI.57	29.IV.58	25.VI.57	29.IV.58
Amplitude	43,4	59,0	53,1	52,7	45,7

Les extrêmes des moyennes par profondeur sont soulignés.

Les fluctuations les plus marquées sont liées à l'existence du métalimnion, puisque les amplitudes les plus élevées, aussi bien en ce qui concerne les moyennes que les extrêmes, se trouvent à 20, et 30 m de profondeur. Quant à la répartition des extrêmes parmi les diverses stations, elle est désordonnée pour la période quadriennale considérée.

Les extrêmes absolus pour les moyennes de toutes les stations sont de 76,2 et 112,6 %, autrement dit approximativement les mêmes qu'à la station Z (tabl. CVII). Ceux des extrêmes: 62,3 et 131,0 % sont compris entre ceux de la station Z.

Pour l'ensemble des stations A à P', les minima aux diverses profondeurs se répartissent entre septembre et octobre, mais les maxima en avril, sauf en surface où on constate un maximum en août.

En séparant des résultats précédents ceux relatifs à la station D, on peut comparer la saturation actuelle à celle qui existait

lors de la campagne 1944-1945. Utilisant les déterminations de la saturation d'oxygène de 1957 à 1960 pour l'ensemble des niveaux 0, 10, 20, 30 et 40 m, nous obtenons les moyennes annuelles suivantes :

1957 : 94,8 % ; 1958 : 100,3 % ; 1959 : 93,7 % ; 1960 : 94,9 %

soit, pour la période quadriennale : 95,9 %. Par rapport aux valeurs mentionnées au paragraphe 36.1 ci-dessus, la moyenne de 1957-1960 est supérieure de 4,1 % en valeur absolue et de 4,5 % en valeur relative à la moyenne de 1944-1945. Les extrêmes de nos travaux actuels sont de 71,4 et de 122,2 %, dépassant de part et d'autre ceux de la campagne précédente. L'amplitude de ces dernières était de 23,0 %; celle des recherches actuelles de 50,8 %.

Si, dans l'ensemble des couches profondes la saturation d'oxygène diminue par l'accroissement de la pollution comme nous l'avons montré précédemment, il n'est pas surprenant que dans les couches supérieures (épilimnion et métalimnion ensemble) l'eutrophication conduise à une augmentation de la saturation d'oxygène. De même, l'augmentation de l'écart entre les extrêmes est liée à une plus forte fluctuation planctonique qu'auparavant, comme on peut le constater à partir de 1959 en particulier.

En fournissant davantage de matière nutritive à cette zone lacustre supérieure, la pollution de l'eau augmente la productivité biologique et, du même coup, la saturation en oxygène par l'augmentation de l'assimilation chlorophyllienne. Ainsi, l'augmentation de la saturation par rapport à 1944-1945 dans les couches supérieures au large de Champ Bougin est une preuve nette de la dégradation du lac et un signe préliminaire manifeste de l'eutrophication du biotope lacustre à cet endroit.

36.4. L'oxygène dissous des affluents du lac.

Comme précédemment, nous examinons séparément l'eau du canal de la Broye et celle des autres affluents.

TABLEAU CXI

(cf. page suivante)

TABLEAU CXI

Saturation en oxygène de l'eau du canal de la Broye, déterminée à la Sauge pour la période 1957-1960 et exprimée en pour-cent.

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	93,6	95,4	93,6	98,1	95,2
Minimum	78,5	57,7	67,2	82,4	57,7
Date	27.XII	4.XII	26.VIII	27.X	4.XII.58
Maximum	105,0	116,6	157,3	109,9	157,3
Date	26.VI	25.VI	21.V	27.IV	21.V.59

Les extrêmes de la saturation en oxygène de l'eau de la Broye chevauchent ceux de l'eau du lac, en atteignant même un minimum plus bas, ce qui ne surprend pas, étant donné le caractère fortement pollué de la Broye.

Pour les autres affluents du lac, par contre, les moyennes et les extrêmes sont beaucoup plus différents comme le tableau CXII va le montrer, car le caractère de collecteur d'égout de certains de ces affluents n'est plus à démontrer, ce qui se traduit par une consommation extraordinairement élevée d'oxygène pour oxyder une partie des matières polluantes que ces eaux contiennent.

TABLEAU CXII

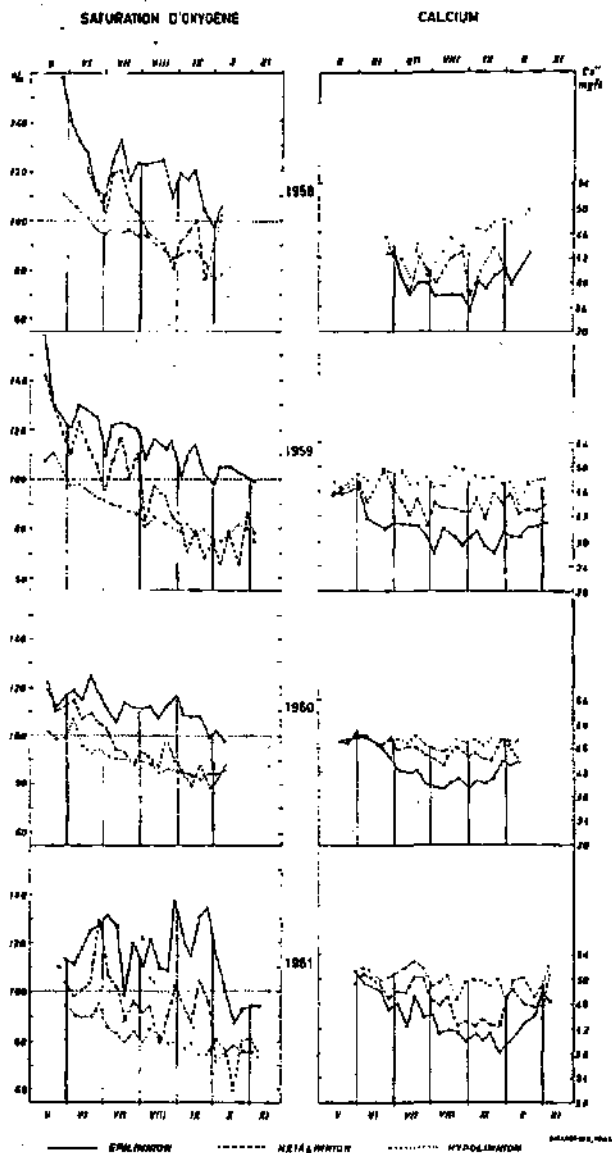
Saturation en oxygène de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960 exprimée en pour-cent.

Affluent	Moyenne	Minimum	Date	Maximum	Date
La Broye	98,1	82,4	27.X	109,9	27.IV
Le Seyon	90,5	62,1	18.V	104,8	23.III
La Serrière	99,5	96,1	18.V	102,9	27.X
L'Areuse	112,3	109,1	27.X	115,0	20.VII
La Raisse	103,5	97,1	18.V	111,5	20.VII
L'Arnon	111,3	106,0	24.VIII	137,0	20.VII
La Brine	116,7	107,0	27.X	136,0	17.VI
Le Bey	84,9	52,0	14.IX	117,0	23.III
Le Majon	27,8	4,5	18.V	109,0	16.XII
L'Orbe-Thiellie	89,3	71,0	18.V	105,0	23.III
Le Canal oriental	41,2	22,0	17.VI	89,0	23.III
Le Buron	78,5	5,4	18.V	109,0	23.III
La Mentue	111,3	101,0	16.XII	145,0	25.IV

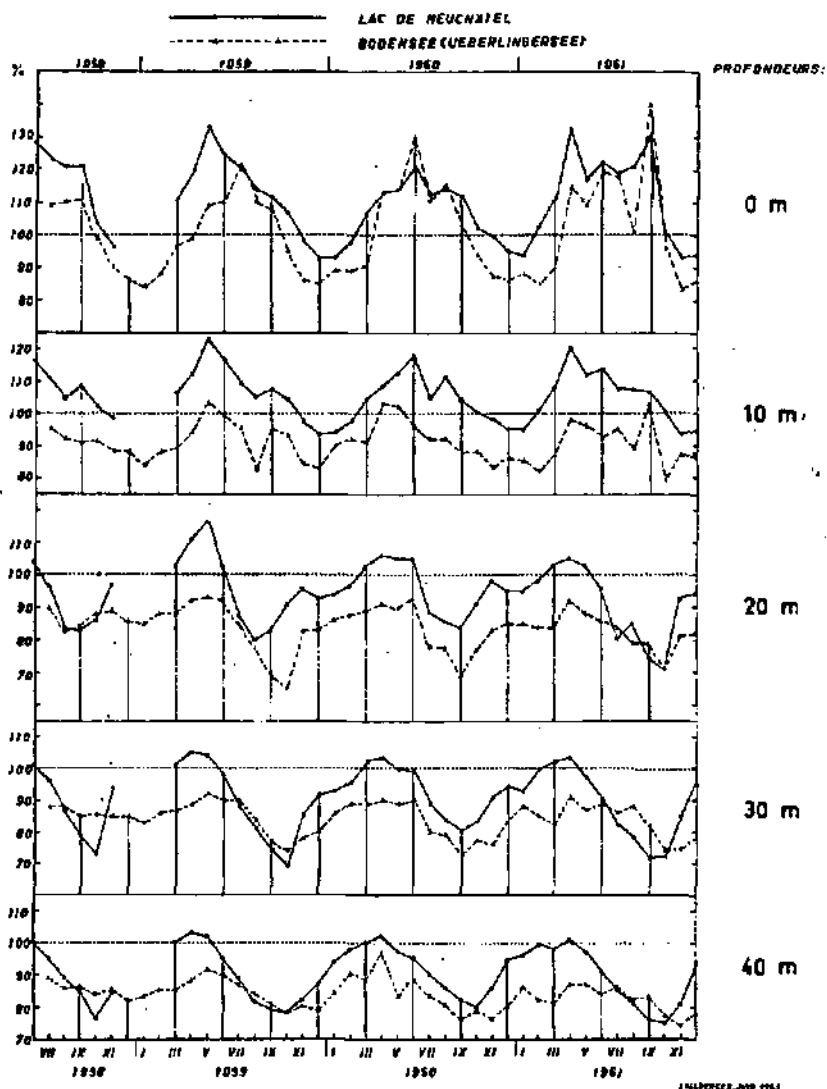
LAC DE NEUCHÂTEL

Station Z: Baie d'Auvergnier.

EVOLUTION DE L'EPI-LIMNION, DU METALIMNION ET DE L'HYPOLIMNION



VARIATION MENSUELLE DE LA SATURATION D'OXYGENE, 1958-1961



36.5. Comparaison avec d'autres lacs.

Selon Rivier (1936), le lac de Morat en 1934-1935 est saturé d'oxygène dans les couches superficielles de mai à octobre, tandis que ce gaz fait presque complètement défaut dans les couches profondes (vers 40 m) de juin à décembre. Nydegger (1957) mentionne aussi un maximum de 146,1 % à 5 m de profondeur le 10.VI.1954 et la disparition totale de l'oxygène à 25 m de profondeur le 18.X.1954. Les résultats obtenus en 1954-1955 par l'EAUAG (1960) montrent que la situation est restée identique à quelques pour-cents près.

Rivier relève aussi qu'à l'époque de ses recherches, à une diminution rapide de l'oxygène de la surface au fond pour Morat, correspondait, simultanément, une variation insignifiante de l'oxygène pour Neuchâtel. Or, nos propres mesures montrent qu'il n'en est rien durant toute la période de stratification thermique en particulier. A en croire Rivier, il faudrait donc en déduire que l'eutrophisation du lac de Neuchâtel a considérablement augmenté depuis 1934-35. En effet, comme nous venons de le voir, à un enrichissement en oxygène dissous des couches subsuperficielles dû à la prolifération des algues, correspond un appauvrissement de plus en plus marqué et durable des couches profondes.

Utilisant les données de l'EAUAG (1960) pour les profondeurs 0, 15, 20, 30 et 40 seulement, qui sont les seules communes aux deux séries de recherches, nous calculons la moyenne de la teneur en oxygène dissous pour l'ensemble de 13 observations mensuelles à chacune de ces profondeurs et à des dates correspondantes pour Morat et pour Neuchâtel. C'est ainsi qu'on obtient 7,75 mg O₂/lit pour Morat pour la période 1934-1935 et 10,33 mg O₂/lit pour Neuchâtel pour la période 1959-1961.

Notre lac est donc, actuellement encore, plus riche en oxygène, en moyenne, que celui de Morat et pour les raisons que nous avons mentionné plus haut.

Il nous paraît intéressant de comparer les saturations en oxygène de l'Ueberlingerssee (Bodan) et de notre lac, les observations ayant pu se faire durant la même période. Les courbes représentatives de l'évolution de la saturation en oxygène des deux lacs constituent la figure 118. Elles sont très sensiblement parallèles, sauf en surface où les maxima de l'Ueberlingerssee dépassent ceux de Neuchâtel. A partir de 10 m déjà, la saturation de l'Ueberlingerssee n'est plus atteinte qu'en de rares occasions au cours de l'année, ce qui n'est pas le cas pour notre lac où c'est seulement à 40 m de profondeur que le même phénomène se manifeste. Quant aux extrêmes absolus de la période, on enregistre les maxima avec 132,7 % en surface en mai 1959 pour Neuchâtel et 140,0 % en surface en septembre 1961 pour l'Ueberlingerssee. Les minima sont respectivement de 69,4 % à 30 m en octobre 1959 et de 65 % à 20 m en octobre 1959. Les amplitudes sont donc de 63,3 % pour Neuchâtel et de 75 % pour l'Ueberlingerssee. En résumé et malgré que les extrêmes soient situés plus haut pour l'Ueberlingerssee, notre lac enregistre des saturations mensuelles moyennes plus élevées

que la partie NW du Bodan. On peut en déduire que la consommation d'oxygène par les matières provenant du métabolisme lacustre est plus grande dans le Bodan que chez nous; or, ces matières sont en relation très étroite avec la pollution des eaux. Il en résulte que le Bodan, par cette détermination d'oxygène, apparaît plus pollué que Neuchâtel. Mucke (1956) en apporte une preuve supplémentaire en comparant les dosages d'oxygène réalisés en 1920-1925 à ceux de 1952-1955; ces derniers révèlent alors une forte aggravation de la situation dans le métalimnion.

Même constatation par Elster (1960) à propos de l'Untersee dans lequel les cadavres de plancton s'accrurent et se décomposent d'autant plus vite que la profondeur est moindre. C'est le cas tout particulièrement dans le Markelfinger-Winkel.

Nydegger (1957) donne plusieurs tableaux de résultats concernant divers lacs suisses; nous en extrayons les extrêmes suivants, intéressant la saturation en oxygène et auxquels nous comparons les nôtres :

<u>Lacs</u>		<u>Minima</u>		<u>Maxima</u>	
Bienne	26,0 %	75m	21.X.54	147,2 %	0m 10.VI.54
Brien	64,7	50	6.VIII.53	112,7	0 19.VI.54
Lugano	31,4	19	8.VIII.53	163,0	0 2.VIII.54
Thoune	77,3	80	22.VIII.54	109,2	0 11.VIII.53
Zurich	16,7	70	14.X.54	154,5	0 11.VI.54

Ainsi, avec 56,4% et 162,0%, notre lac atteint des déficits plus importants que les lacs de Brien et de Thoune, mais arrive à une production d'oxygène qui sature l'eau aussi fortement que dans le lac de Lugano, dépassant nettement les maxima enregistrés en 1953-1954 dans les autres lacs.

Le passage d'une zone saturée en oxygène à une zone sous-jacente non saturée correspond à la présence d'un saut thermique et constitue un phénomène général; il dure aussi longtemps que la stratification thermique et contribue à l'appauvrissement des couches profondes en oxygène. C'est ainsi que Zorell (1954) signale que la saturation au bas de l'hypolimnion du Ohlensee, lac relativement peu profond, ne dépasse guère 63 % depuis 1952. Ce même taux qui était celui de la partie profonde du Léman jusqu'en 1937, est tombé ces dernières années à moins de 45 % (Monod, 1960). Le lac de Neuchâtel pour lequel nous n'avons pu déceler jusqu'ici une saturation en oxygène inférieure à 79 % dans sa partie la plus profonde, en fin de stratification, n'a donc pas encore atteint dans l'hypolimnion l'appauvrissement des autres lacs dont nous venons de parler; cependant, il semble s'y acheminer à plus ou moins brève échéance, lentement mais sûrement.

37. Matières en suspension, matières oxydables et demande biochimique en oxygène.

Il est nécessaire de commencer par rappeler quelques définitions.

L'ensemble des substances filtrables contenues dans l'eau est le seston, terme introduit en limnologie par Kolkwitz (Sernow, 1958, p.45). On distingue le bioseston s'il s'agit d'organismes vivants de l'eau libre (plancton) ou de la pellicule superficielle (neuston) et l'abioseston s'il s'agit d'éléments figurés non vivants. On réserve plus particulièrement le nom de tripton à l'ensemble des débris organiques et inorganiques qui se trouvent dans l'eau et qui, avec le plancton, constituent le seston.

Par matières oxydables, il faut entendre l'ensemble des matières, solubles et insolubles dans l'eau, capables d'être oxydées par un réactif approprié qui est presque toujours le permanganate de potassium en milieu acide ou alcalin.

La demande biochimique en oxygène ou D.B.O. est la quantité d'oxygène consommée par les germes aérobies pour décomposer les matières organiques contenues dans l'eau.

37.1. Matières en suspension.

La quantité de seston se détermine par filtration comme nous l'avons décrit au paragraphe 22, lettre X ci-dessus; elle s'exprime en mg de matière sèche par litre d'eau.

Nos déterminations se limitent à la station 2 et à 14 mois discontinus des années 1958 et 1959. Elles ont été interrompues ensuite, au profit d'autres dosages.

C'est pourquoi nous renonçons à en tirer des moyennes annuelles et périodiques, nous bornant à rassembler les extrêmes comme suit:

minimum : 0,3 mg/lit à 100 m de profondeur en août 1958

maximum : 3,7 mg/lit à 5 m de profondeur en avril 1959.

D'après les moyennes mensuelles établies pour chacun des 14 mois considérés et aux 10 niveaux habituels de la station 2, on constate qu'à toutes les profondeurs les minima se présentent en juillet et août et les maxima en avril et mai.

Le seston comprenant aussi bien les matières organiques que le carbonate de calcium en suspension, la moyenne obtenue pour ce dernier par Portner (1951a) pour 1949 : 0,78 mg/lit est bien comprise entre nos deux extrêmes. Il n'est pas possible de serrer le problème de plus près, car les déterminations de la matière organique n'ont pu se faire à l'époque, faute de méthode adéquate.

Nos observations couvrent sensiblement les deux périodes de stratification thermique des années 1958 et 1959. Aussi avons-nous calculé les moyennes de la teneur en seston de chacune des trois zones thermiques superposées pour cette période. Ces moyennes ainsi que les extrêmes correspondants figureront dans le tableau CXIV plus bas,

37.2. Matières oxydables.

Il s'agit essentiellement de matières organiques oxydables dans des conditions déterminées. Comme nous l'avons montré déjà, l'oxydation a lieu à chaud par le permanganate de potassium en milieu acide. Du fait des conditions bien particulières dans lesquelles l'opération est réalisée, il est pratiquement impossible de calculer le poids de matière organique correspondant. C'est pourquoi nous nous contentons, comme chacun le fait jusqu'à présent, d'exprimer la teneur en matières oxydables en mg MnO_4K par litre ou en mg O_2 par litre.

En dosant les matières oxydables dans l'eau brute, on obtient le total de ces matières. Mais en les dosant dans le seston retenu sur filtre en verre, on détermine l'oxydabilité des matières en suspension. La différence d'avec la première détermination donne l'oxydabilité des matières dissoutes.

Comme pour le dosage du seston, nous ne disposons que des déterminations à la station Z et pour une courte durée. Nous nous contenterons donc aussi de rassembler dans le tableau CXIII les extrêmes des déterminations des matières oxydables.

TABLEAU CXIII

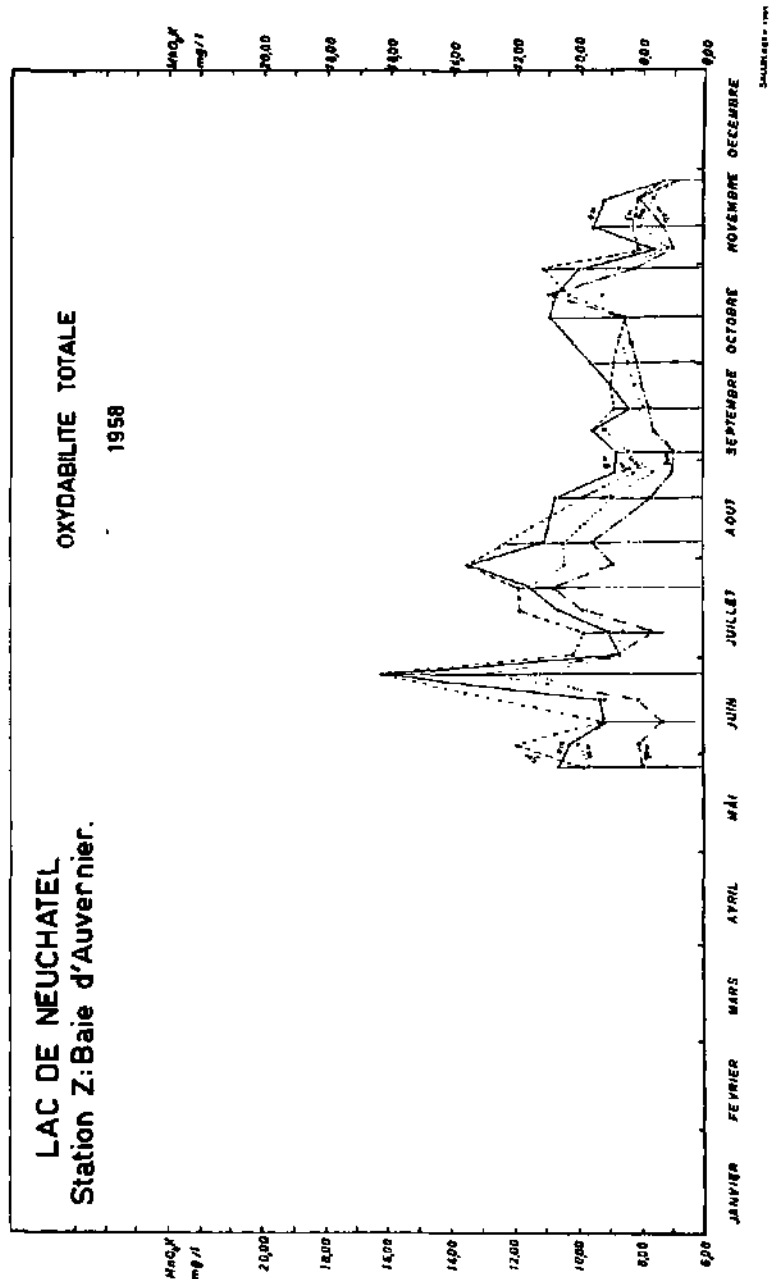
Valeurs extrêmes de l'oxydabilité des matières organiques contenues dans l'eau à la station Z durant les années 1958 et 1959 et exprimées en mg O_2 par litre.

	Minimum	Date	Profondeur	Maximum	Date	Profondeur
Matières organiques totales	1,58	III.59	80 m	2,93	VI.58	5 m
Matières en suspension	0,02	VII.59	100 m	6,93	VIII.59	0 m
Matières dissoutes	1,50	IV.59	80 m	2,61	VI.58	5 m

Durant la période à laquelle ce tableau se rapporte, à chaque profondeur considérée de la station Z le minimum de l'oxydabilité totale se présente en mars et le maximum de juin à août. Par contre, il n'y a aucun ordre apparent dans la répartition des extrêmes pour l'oxydabilité du seston, ni pour celle des matières dissoutes.

En convertissant en oxygène l'oxydabilité totale exprimée par

Fig.119.



Portner (1951a) en mg MnO_4K /lit, on obtient : 0,64 mg O_2 /lit en moyenne pour la teneur totale en matières oxydables à diverses stations en 1949. Cette valeur est inférieure au minimum et à la moyenne de nos recherches actuelles, la moyenne pour 1958 étant de 2,18 et celle de 1959 de 1,95 mg O_2 /lit. La teneur totale en matières oxydables a donc eu tendance à augmenter depuis 1949.

Portner a obtenu, pour l'oxydabilité du seston : 0,12 mg O_2 /lit, valeur qui est comprise entre nos extrêmes.

En rapportant l'oxydabilité du seston au total des matières oxydables, nous obtenons pour ce rapport: 1 % à 25 m de profondeur en juin 1959, 26 % à la surface en août de la même année, ainsi que 8 % pour la moyenne de nos déterminations de 1958 et 11 % pour celle de 1959. Pour l'été 1949, Portner arrive à une moyenne de 18 %. Cette différence entre nos moyennes et celle de Portner ne surprend pas car ce dernier ayant obtenu une oxydabilité du seston du même ordre de grandeur que nous et le total des matières oxydables étant plus faible en 1949 que maintenant, le rapport oxydabilité du seston : oxydabilité totale devient forcément plus grand.

Enfin, rapportant l'oxydabilité du seston, exprimée en oxygène, à la teneur en oxygène dissous, nous obtenons, pour 1958-1959 un minimum de ce rapport de 0,1 % à 80 m de profondeur en juin 1958 et un maximum de 7,4 % à la surface en août 1959.

La durée de nos observations est insuffisante pour pouvoir tirer des conclusions générales sur les déterminations de l'oxydabilité de l'eau ainsi que des matières en suspension. Aussi l'exposé des résultats ci-dessus, de même que la tentative de comparaison avec nos propres résultats de 1944-1945 et avec ceux de Portner pour 1949 ne peuvent-ils avoir qu'un but d'orientation.

Mais pour fixer les résultats obtenus jusqu'ici, nous jugeons nécessaire de reporter tout de même en figures 119 et 120 les déterminations de l'oxydabilité totale en fonction de la saison. Les courbes obtenues, se rapportent aux couches de 0 à 20 m de profondeur mais ne présentent rien de particulièrement caractéristique, à l'exception de deux "poussées" fin juin et fin juillet en 1958 et 1959. Comme pour les tableaux de résultats, une prolongation des observations serait nécessaire pour tirer des conclusions quant aux variations de l'oxydabilité en fonction de la saison.

Enfin, durant la période de stratification thermique de chacune de ces deux années, on enregistre une diminution générale de l'oxydabilité totale en passant de l'épilimnion au métalimnion et à l'hypolimnion. C'est ce que montrent les courbes de la figure 121 par lesquelles il apparaît que l'oxydabilité totale de chacune des trois zones thermiques du lac est différente des deux autres et que celle de l'épilimnion présente les plus fortes variations au cours de la saison.

Nos déterminations couvrent sensiblement les deux périodes de stratification thermique des années 1958 et 1959. C'est pourquoi nous

pouvons dresser un tableau des valeurs moyennes et extrêmes atteintes par les diverses oxydabilités dans les trois zones thermiques superposées. Nous joignons à ce tableau les valeurs correspondantes de la teneur en seston.

TABLEAU CXIV

Moyennes et extrêmes des matières oxydables exprimées en mg O₂/lit. ainsi que des matières en suspension en mg/lit de l'eau dans la baie d'Auvergnier durant les stratifications thermiques de la période 58/59

	O x y d a b i l i t é			Matières en suspension
	totale	du seston	des matières dissoutes	
<u>Epilimnion</u>				
Moyenne	2,40	0,28	2,13	1,65
Minimum	1,86	0,08	1,58	0,4
Date	12.V	14.VII	12.V	22.VII
Maximum	3,65	0,76	3,34	4,4
Date	25.VI	6.VIII	25.VI	27.V
Amplitude	1,79	0,68	1,76	4,0
<u>Métalimnion</u>				
Moyenne	2,14	0,22	1,93	1,35
Minimum	1,78	0,04	1,44	0,2
Date	2.IX	2.IX	2.IX	28.VII
Maximum	2,86	0,44	2,66	4,8
Date	22.VII	6.X	22.VII	12.V
Amplitude	1,08	0,40	1,22	4,6
<u>Hypolimnion</u>				
Moyenne	1,97	0,21	1,78	1,10
Minimum	1,62	0,06	1,29	0,4
Date	28.VII	2.VI	28.VII	29.VII
Maximum	2,45	1,02	2,25	3,4
Date	22.VII	15.VII	5.VIII	12.V
Amplitude	0,83	0,96	0,96	3,0

L'oxydabilité des matières dissoutes diminue, ainsi que l'amplitude des extrêmes lorsqu'on passe de l'épilimnion au métalimnion et à l'hypolimnion. Par contre, s'il en est de même pour les

moyennes de l'oxydabilité du seston et de la teneur en matières en suspension, l'amplitude des extrêmes correspondants ne varie pas régulièrement dans l'hypolimnion en particulier; il faut en rechercher la cause dans l'effet des courants sous-lacustres qui enrichissent ou appauvrissent momentanément certains niveaux de l'hypolimnion; or cette zone n'est représentée que par deux points dans nos calculs, ce qui augmente l'importance relative des fluctuations de l'amplitude.

En recalculant l'oxydabilité totale mentionnée par Nydegger (1957) pour le lac de Thoue et en l'exprimant en $\text{mg O}_2/\text{lit}$, on obtient les extrêmes suivants pour la période 1953-1954: 0,60 à 1,63; le maximum pour Thoue correspond donc au minimum de nos mesures pour Neuchâtel en 1958-1959.

37.3. Demande biochimique en oxygène.

Toutes les déterminations qui s'y rapportent sont faites sur l'eau brute du lac et sans dilutions, après 5 jours d'incubation à 20 degrés. Elles se représentent par le sigle DBO 5 que nous simplifions en DBO, tous les dosages étant faits après 5 jours.

37.3.1. La demande biochimique en oxygène à la station 2.

Des dosages hebdomadaires à la station 2, on tire la moyenne de la DBO pour l'ensemble des 10 niveaux habituellement considérés à Z. Mais il est intéressant de voir quelle proportion de la quantité d'oxygène présent au moment du prélèvement est susceptible d'être utilisée biochimiquement. C'est pourquoi on calcule aussi le rapport $\text{DBO}:\text{O}_2$ dissous qui s'exprime en %.

TABLEAU CXV

(cf. page suivante)

TABEAU CXV

Moyennes et extrêmes de la DBO ainsi que du rapport DBO/O₂ dissous dans la baie d'Auvernier, de la surface au fond pour la période 1958-1961, exprimées en mg O₂/lit et en pour-cents respectivement.

<u>DBO (0-100m)</u>	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Moyenne	1,00	1,00	0,84	0,94	0,94
Minimum	0,56	0,23	0,31	0,36	0,23
Date	25.XI	8.XII	27.XII	14.XI	8.XII.59
Maximum	2,50	2,08	1,68	1,74	2,50
Date	27.V	21.IV	12.IV	20.VI	27.V.58
<u>Extrêmes ins-</u> <u>stantanés</u>					
Minimum	0,20	0,01	0,10	0	0
Date	1.X	8.XII	13.IX	25.X	25.X.61
Profondeur	20	80	10	30	30
Maximum	5,30	3,45	2,25	3,90	5,30
Date	27.V	12.V	21.VI	18.IV	27.V.58
Profondeur	10	0	0	0	10
Rapport $\frac{DBO}{O_2 \text{ diss.}}$					
Moyenne	8,6	9,4	7,8	9,1	8,7
Minimum	1,2	2,4	3,0	3,7	1,2
Date	3.VI	8.XII	27.XII	10.X	3.VI.58
Maximum	13,8	16,6	13,5	16,7	16,7
Date	8.VII	21.IV	12.IV	20.VI	20.VI.61
<u>Extrêmes ins-</u> <u>stantanés</u>					
Minimum	0,5	0,1	0,8	0	0
Date	3.VI	8.XII	12.I	25.X	25.X.61
Profondeur	40	80	40	30	30
Maximum	28,6	25,9	20,2	27,2	28,6
Date	29.VII	6.VII	21.VI	18.IV	29.VII.58
Profondeur	10	0	0	0	10

* = année incomplète.

La DBO varie de 17% durant la période de 1958 à 1961, avec une amplitude de 2,27 mg O_2 /lit ce qui représente 242% de la valeur moyenne de la période. Les minima instantanés se rencontrent dès la fin de l'été et en automne, tandis que les maxima se présentent dans la seconde moitié du printemps, précisément à l'époque où le plancton se développe fortement.

Le rapport de la DBO à l'oxygène dissous varie, en moyenne, de manière semblable à la DBO seule, la valeur la plus basse se trouvant comme pour cette dernière, en 1960 qui est l'année la moins ensoleillée de la période avec un été particulièrement froid et humide. La moyenne de ce rapport varie de 1,6 % avec une amplitude de 15,5 % représentant 178 % de la valeur moyenne de la période considérée. Sauf en 1958 qui est une année incomplète les minima instantanés du rapport se rencontrent dans la seconde moitié de l'automne et au début de l'hiver, tandis que les maxima instantanés se trouvent au printemps.

Nous rassemblons dans le tableau CXVI les fréquences avec lesquelles les extrêmes se rencontrent à diverses profondeurs, aussi bien en ce qui concerne la DBO que le rapport $DBO:O_2$ dissous. Ces fréquences sont exprimées en pour-cents des déterminations effectuées et les maxima sont soulignées par année ainsi que pour la période.

TABLEAU CXVI
(cf. page suivante)

TABEAU CXVI

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés de la DBO et du rapport DBO:O₂ dissous se rencontrent à diverses profondeurs à la station Z. en %.

DBO	Profon- deur en mètres	1958	1959	1960	1961	1958-1961
Minimum	15	12	4	4	10	7,5
	20	18	6	6	13	10,8
	25	6	11	10	13	10,0
	30	15	17	<u>16</u>	<u>26</u>	<u>18,5</u>
	40	<u>24</u>	13	15	13	16,3
	80	12	9	15	16	13,0
	100	15	<u>32</u>	15	10	18,0
Maximum	0	25	<u>31</u>	<u>19</u>	26	25,3
	5	<u>32</u>	27	16	<u>29</u>	<u>26,0</u>
	10	11	8	14	10	10,8
	15	11	8	12	10	10,3
	80	11	4	7	3	6,3
<u>Rapport $\frac{DBO}{O_2 \text{ diss.}}$</u>						
Minimum	20	14	7	5	11	9,3
	25	7	9	13	11	10,0
	30	11	13	<u>16</u>	<u>22</u>	15,5
	40	<u>25</u>	16	15	21	19,3
	80	21	11	<u>16</u>	18	16,5
	100	18	<u>33</u>	<u>16</u>	11	<u>19,5</u>
Maximum	0	21	<u>36</u>	<u>19</u>	23	<u>24,8</u>
	5	<u>25</u>	20	12	<u>31</u>	22,0
	10	7	5	15	4	7,8
	15	14	9	13	4	10,0
	20	0	9	12	8	7,3
	40	7	5	4	19	8,8
	80	11	5	8	4	7,0

Fig.121.

LAC DE NEUCHÂTEL

Station Z: Baie d'Auvernier

EVOLUTION DE L'EPIPLANKTON, DU METALIMNION ET DE L'HYPOLIMNION

TOTAL DES MATIERES OXYDABLES

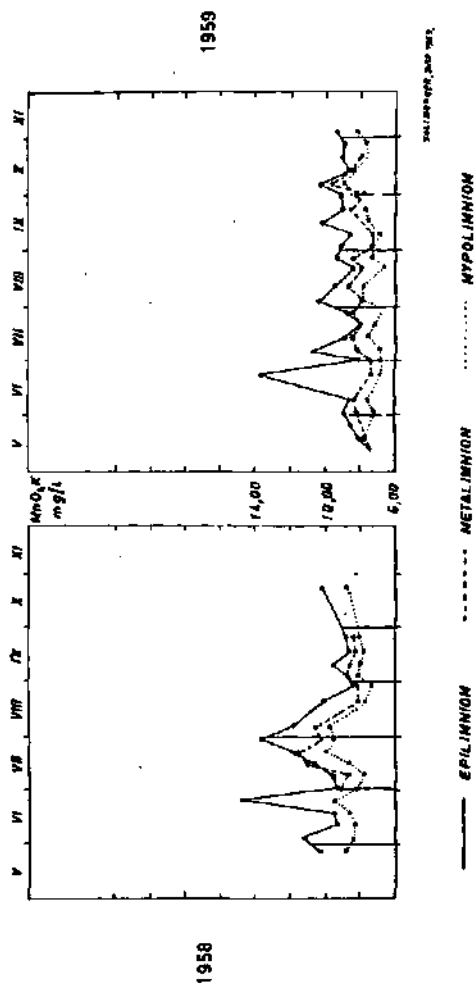


Fig. 122.

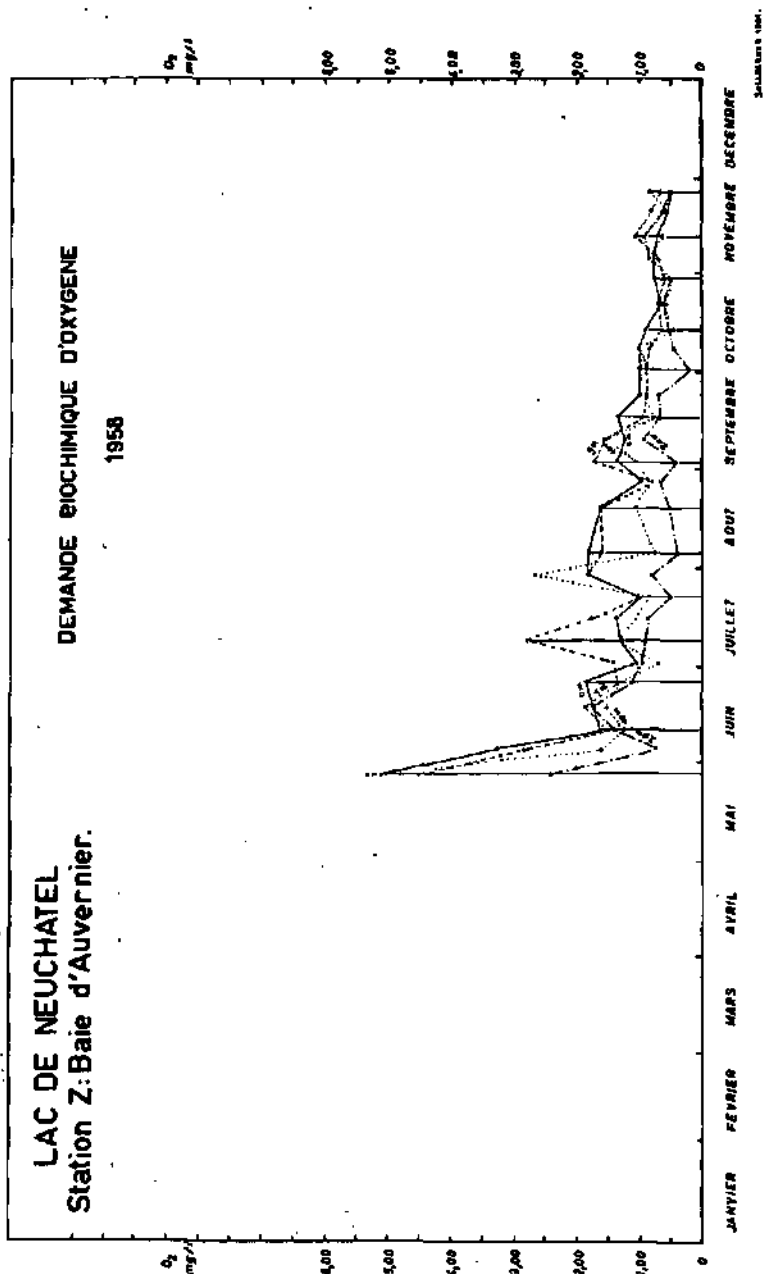


Fig.123.

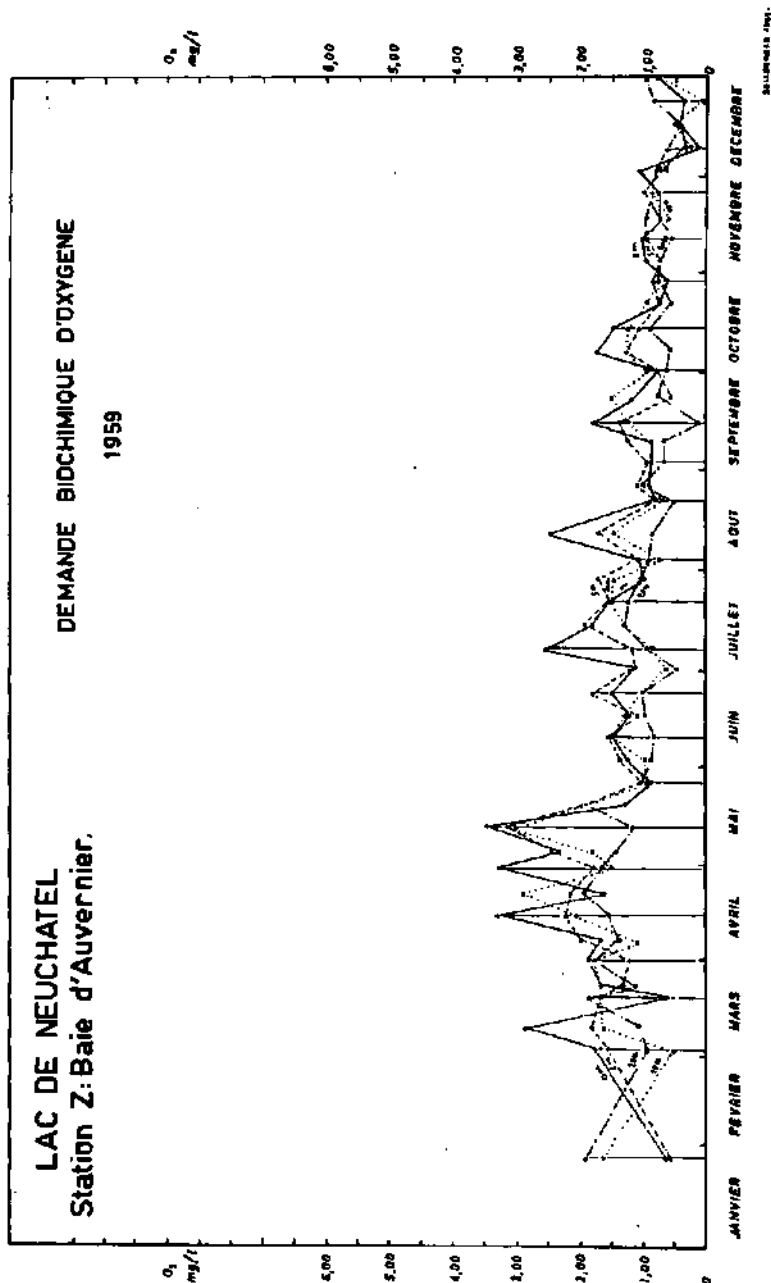


Fig. 124.

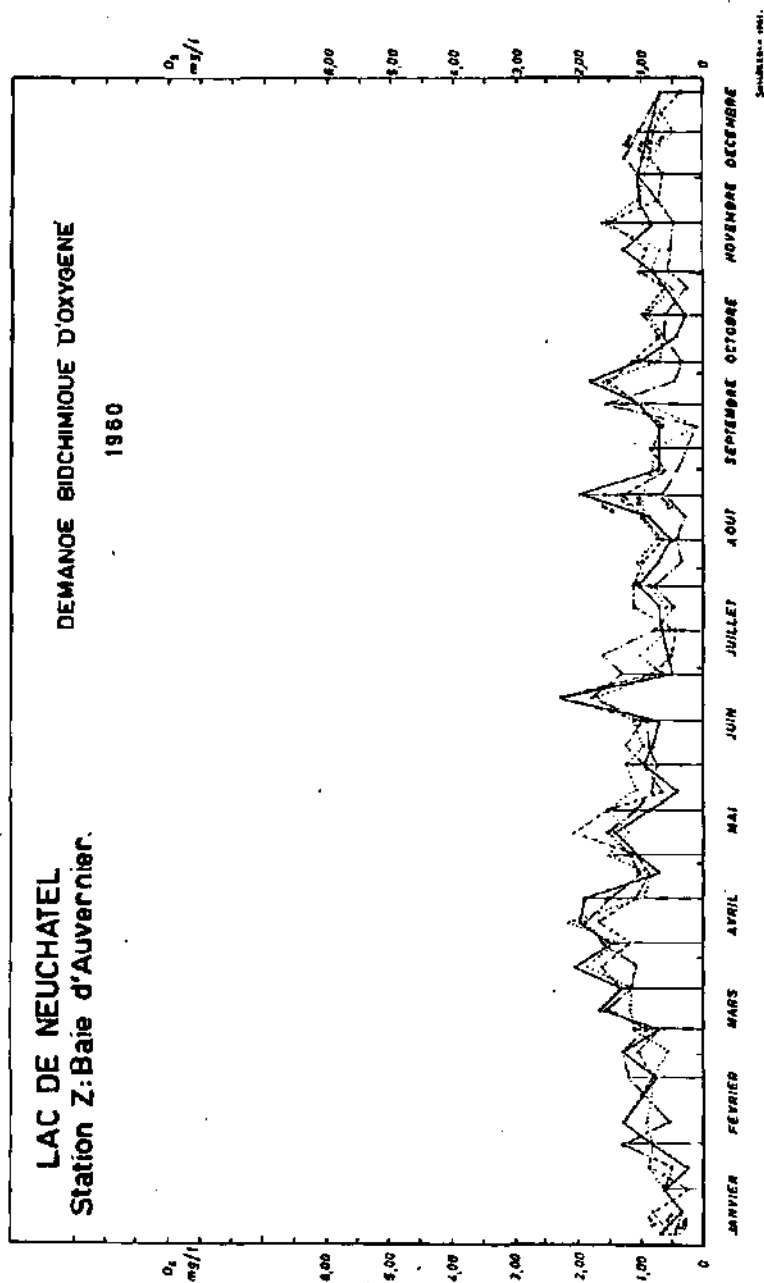
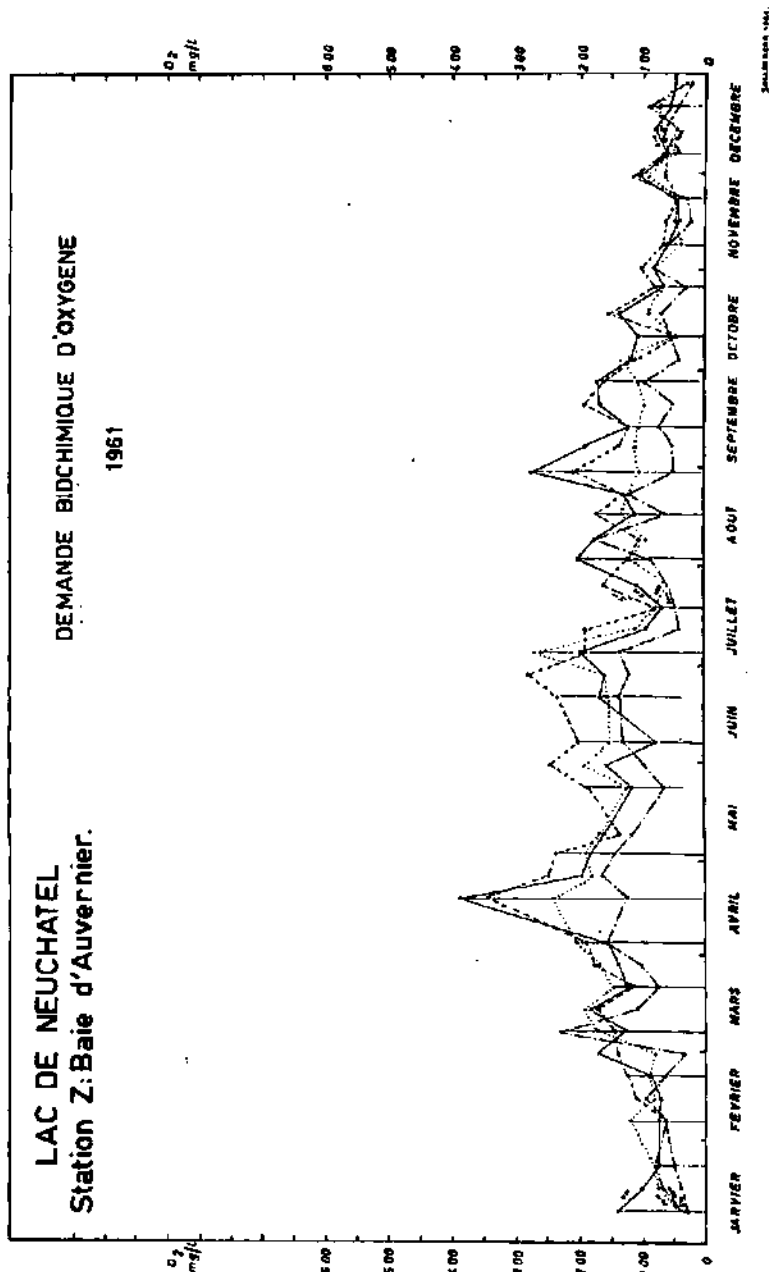
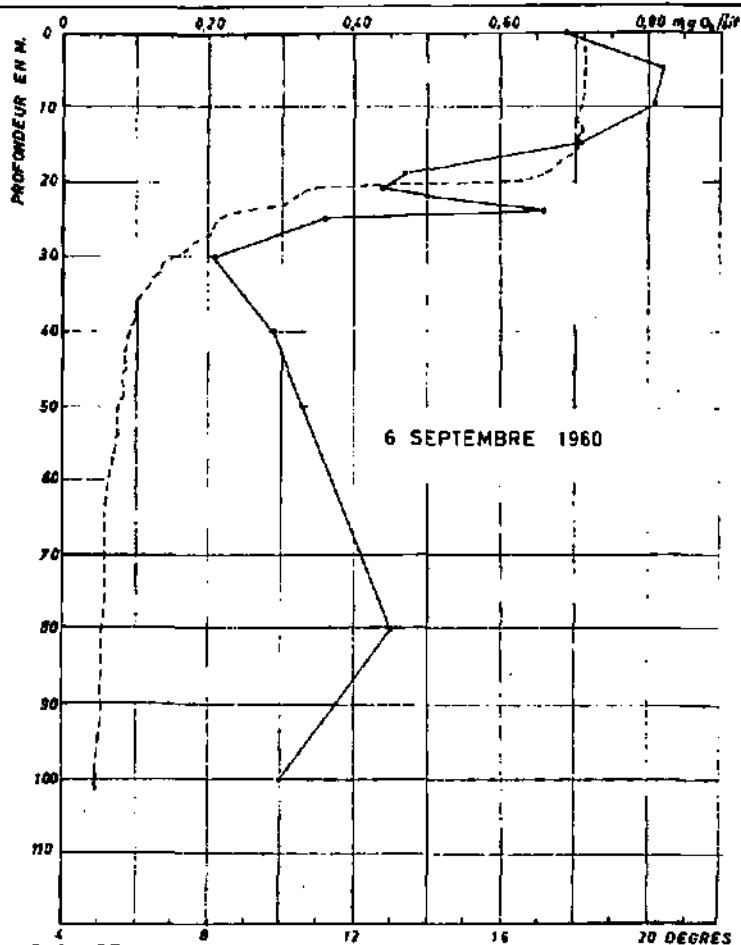


Fig.125.





LAC DE NEUCHÂTEL

STATION Z : BAIE D'AUVERNIER

DBO₅ ET TEMPÉRATURE DE L'EAU

Fig.126.

Dans ce tableau, on n'a pas reporté les profondeurs pour lesquelles la fréquence des extrêmes ne dépasse jamais 10% chacune des années de la période. Durant celle-ci, c'est donc à 30 m de profondeur que se rencontrent le plus souvent les minima de la DBO, autrement dit à la profondeur où, durant la plus grande partie de la période de stratification thermique, se trouve la limite inférieure du métalimnion. Quant aux maxima, on les rencontre à 5 m de profondeur le plus souvent, autrement dit au centre de la zone trophogène. Pour le rapport DBO:O, disons, c'est à 100 m que se trouvent le plus souvent les minima, car la quantité de matière oxydable qui parvient jusqu'à cette profondeur est relativement faible, tandis que, du fait de la basse température, la quantité d'oxygène y est relativement grande; il est vraisemblable que la valeur de ce rapport est appelée à changer lorsque, par l'accroissement de la pollution, la teneur en oxygène de la partie inférieure de l'hypolimnion tendra à diminuer. Les maxima du rapport se rencontrent à la surface où les matières oxydables de toutes sortes (seston + neuston⁴³) sont abondantes et où, durant la plus grande partie de l'année, la teneur en oxygène dissous est relativement faible à cause de la température élevée.

Les figures 122 à 125 permettent de suivre l'évolution de la DBO au cours de l'année pour les couches de 0, 5, 10 et 20 m. En 1958, 1959 et 1961, un maximum apparaît en avril-mai pour les couches supérieures à 20 m. Par contre, cette dernière n'accuse pratiquement pas de fluctuation plus importante que durant le reste de l'année. On peut donc dire que l'influence de la saison sur la DBO ne s'exerce pas au-delà d'une quinzaine de mètres qui est la profondeur moyenne du métalimnion. En 1960, le maximum d'avril-mai fait défaut, ce que l'on est obligé d'attribuer au manque d'insolation de cette année pour laquelle l'ensemble des courbes se trouve plus bas que les autres années, ce qui confirme les valeurs plus faibles de la moyenne et des maxima de la DBO, révélées déjà par le tableau CXV.

Durant toute l'année, la DBO présente des différences d'une profondeur à l'autre en un même endroit. Relativement faibles en hiver, ces différences augmentent notablement en période de stratification thermique. C'est ce que montre la figure 126 choisie comme exemple-type de ce cas. Le 6 septembre 1960, la DBO subit une forte régression à la profondeur où commencent les sauts thermiques, mais avec des fluctuations correspondant à la stratification. Par contre, l'allure de la courbe change à l'entrée dans l'hypolimnion. Les deux maxima relatifs vers 5 et 22 m de profondeur correspondent : le premier au centre de la zone trophogène où la concentration du plancton est la plus grande et le second à la partie centrale du métalimnion, où, comme Kusnetzov et Karsinkin (Lastockin, 1945) l'ont montré, la chute du plancton mort est fortement retardée par l'augmentation marquée de la viscosité de l'eau due à l'abaissement de température, ce qui provoque à cet endroit une abondance de bactéries saprophytes fortes consommatrices d'oxygène.

Aux sauts thermiques correspondent donc des "sauts de la DBO". Ces variations se manifestent durant toute la période de stratification, de sorte qu'il est possible de dresser le tableau CXVII donnant les valeurs de la DBO et de son rapport à l'oxygène dissous pour les trois zones thermiques superposées du lac.

43) matières vivantes flottant à la surface du lac.

TABLÉAU CXVII

Moyennes et extrêmes de la DBO, ainsi que du rapport DBO:O₂, dissous de l'eau de la baie d'Auvergnier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961.

DBO(mg O ₂ /lit. <u>Epilimnion</u>	1958		1959		1960		1961		1958-1961	
Moyenne	1,56		1,30		0,91		1,43		1,30	
Extrêmes	0,61	4,80	0,61	3,45	0,40	2,01	0,50	3,90	0,40	4,80
Dates	21.X	27.V	26.X	12.V	13.IX	21.VI.	10.X	18.IV	13.IX .60	27.V.58
Amplitude	4,19		2,84		1,61		3,40		4,40	
<u>Métalimnion</u>										
Moyenne	1,06		1,03		0,79		1,04		0,98	
Extrêmes	0,55	1,68	0,48	3,00	0,31	1,55	0,26	2,90	0,26	3,00
Dates	27.VIII	29.VIII	1.VII	12.VI	13.IX	17.V	10.X	18.IV	10.X.61	12.V.59
Amplitude	1,13		2,52		1,24		2,64		2,74	
<u>Hypolimnies</u>										
Moyenne	0,97		0,83		0,76		0,82		0,85	
Extrêmes	0,54	2,00	0,28	1,57	0,32	1,18	0,26	1,43	0,26	2,00
Dates	1.X	27.V	28.X	12.V	6.IX	17.V	10.X	20.VI	10.X.61	27.V.58
Amplitude	1,46		1,29		0,86		1,17		1,74	
<u>Rapport DBO O₂ diss.</u>										
<u>Epilimnion</u>										
Moyenne	11,5		12,4		9,0		13,4		11,6	
Extrêmes	2,4	18,8	6,3	25,9	4,0	18,8	5,3	27,2	2,4	27,2
Dates	3.VI	8.VII	28.X	5.VII	13.IX	21.VI	10.X	18.IV	3.VI.58	18.IV.61
Amplitude	16,4		19,6		14,8		21,9		24,8	
<u>Métalimnion</u>										
Moyenne	11,2		11,0		8,4		11,0		10,4	
Extrêmes	6,5	18,1	5,1	20,2	3,9	13,5	3,4	20,5	3,4	20,5
Dates	27.VIII	29.VII	1.VII	12.V	13.IX	21.VI	10.X	18.IV	10.X.61	18.IV.61
Amplitude	11,6		15,1		9,6		17,1		17,1	
<u>Hypolimnion</u>										
Moyenne	8,3		8,3		7,5		8,8		8,2	
Extrêmes	0,9	12,6	3,3	12,6	3,4	10,3	3,0	14,1	0,9	14,1
Dates	3.VI	8.VII	28.X	28.VII	6.IX	17.V	10.X	20.VI	3.VI.58	20.VI.61
Amplitude	11,7		9,3		6,9		11,1		13,2	

Pour la période 1958-1961, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion a les valeurs suivantes :

	pour la DBO	pour le rapport $\frac{DBO}{O_2 \text{ dissous}}$
moyennes	1,53:1,15:1,00	1,42:1,27:1,00
amplitudes	2,53:1,57:1,00	1,88:1,30:1,00

Pour l'ensemble de la période, la DBO diminue en moyenne lorsqu'on passe de l'épilimnion au métalimnion et à l'hypolimnion; la valeur de l'épilimnion est, en moyenne, une fois et demie celle de l'hypolimnion. La différence des moyennes entre les trois zones thermiques superposées est la plus faible en 1960, année où l'insolation a été particulièrement déficiente. L'amplitude des écarts instantanés diminue encore plus rapidement lorsqu'on passe de la zone superficielle à la zone profonde. Quant au rapport de la DBO à l'oxygène dissous correspondant, il diminue aussi lorsqu'on passe d'une zone thermique à l'autre de la surface vers la profondeur.

37.3.2. La demande biochimique en oxygène aux stations A à P'

Comme nous l'avons fait pour les déterminations précédentes, nous ne nous occuperons que des résultats concernant les couches 0, 10, 20, 30 et 40 m.

TABLEAU CXVIII
(cf. page suivante)

TABLÉAU CXVIII

Moyennes et extrêmes de la DBO et du rapport DBO:O₂ dissous aux stations A à F pendant les années 1957 à 1960 et exprimées en mg O₂/lit et en % respectivement.

<u>DBO</u>	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	<u>1,47</u>	<u>1,31</u>	1,15	1,05	1,08
Juin	1,23	1,23	<u>1,28</u>	<u>1,26</u>	<u>1,11</u>
Août	1,21	1,07	0,87	0,90	0,83
Septembre	1,06	0,91	0,79	0,67	0,75
Octobre	<u>0,90</u>	<u>0,82</u>	<u>0,71</u>	<u>0,63</u>	<u>0,50</u>
Amplitude	0,57	0,49	0,57	0,63	0,61
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	0,10	0	0,15	0,10	0,20
Station	D	C	B'	C	B'
Date	29.X.57	29.X.57	26.XII.57	27.X.59	29.X.57
Maximum	2,80	4,60	2,90	2,85	2,10
Station	A	A	B'	A	N
Date	25.VI.57	25.VI.57	25.VI.57	25.VIII.59	26.VIII.58
Amplitude	2,70	4,60	2,75	2,75	1,90
<u>Rapport DBO:O₂diss.</u>					
<u>Moyennes</u>					
Avril	12,1	<u>11,8</u>	9,6	8,8	9,0
Juin	11,6	11,7	11,8	<u>11,1</u>	<u>9,9</u>
Août	<u>12,5</u>	11,4	10,6	10,3	8,9
Septembre	10,7	10,1	9,9	8,0	8,1
Octobre	<u>9,0</u>	<u>8,2</u>	<u>7,4</u>	<u>6,7</u>	<u>6,0</u>
Amplitude	3,5	3,6	4,4	4,4	3,9
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	1,0	0	1,0	1,7	2,0
Station	D	C	B'	C	B'
Date	29.X.57	29.X.57	26.XII.57	27.X.59	29.X.57
Maximum	25,0	36,0	28,0	32,8	19,0
Station	B'	A	B'	A	D
Date	25.VI.57	25.VI.57	25.VI.57	25.VIII.59	26.VIII.58
Amplitude	24,0	36,0	27,0	31,1	17,0

Les extrêmes des moyennes par profondeur sont soulignées.

Les maxima de la DBO moyenne pour l'ensemble du lac se trouvent en avril à 0 et 10 m de profondeur, en juin plus bas. Ce décalage est en relation avec le réchauffement du lac qui se propage de la surface vers le fond au cours du printemps. Quant aux minima de la DBO moyenne, on les rencontre en octobre à toutes les profondeurs de ce tableau, à la fin de la stratification thermique.

La répartition des extrêmes parmi les diverses stations d'observation est désordonnée; il serait nécessaire de procéder à des mesures à un plus grand nombre de stations simultanément et à des intervalles de temps plus petits pour constater probablement une sélection dans la répartition des extrêmes entre les stations. Cela fera l'objet de travaux ultérieurs.

37.3.3. La demande biochimique en oxygène des affluents du lac.

Pour la Broye d'une part et pour les autres affluents du lac d'autre part, nous groupons dans les tableaux suivants les valeurs du rapport DBO:O₂ dissous seulement qui sont, à notre avis, plus caractéristiques que celles de la DBO seule.

TABEAU CXIX

Valeur du rapport DBO:O₂ dissous déterminée à la Sauge pour l'eau du canal de la Broye durant la période 1957-1960 et exprimée en pour-cent

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	20,0	26,6	32,7	23,1	25,6
Minimum	13,0	14,3	17,1	13,9	13,0
Date	27.XII	29.X	2.XI	23.III	27.XII.57
Maximum	26,0	40,2	51,5	50,8	51,5
Date	26.VI	4.XII	26.VIII	18.V	26.VIII.59

Les moyennes annuelles sont plus élevées que celles du lac. Les maxima sont nettement plus élevés mais les minima compris entre ceux du lac.

TABEAU CXX

(cf. page suivante)

TABLÉAU CXX

Valeur du rapport DBO:O₂ dissous de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel, en 1960, exprimée en pour-cent.

Affluent	Moyenne	Minimum	Date	Maximum	Date
La Broye	23,1	13,9	27.X	50,8	18.V
Le Seyon	88,0	55,9	27.X	100,0	18.V
La Serrière	49,2	30,2	27.X	83,9	18.V
L'Arause	10,0	6,1	14.IX	15,7	18.V
La Raisse	5,4	3,0	14.IX	7,6	27.X
L'Arnon	29,9	19,3	16.XII	51,1	17.VI
La Brine	32,1	21,2	24.XI	55,0	17.VI
Le Bey	36,4	19,9	16.XII	76,2	20.VII
Le Mujon	100,0	-	-	-	-
L'Orbe-Thièle	36,8	19,3	27.X	55,6	17.VI
Le Canal-oriental	88,4	66,6	23.III	100,0	17.VI
Le Buron	92,6	72,5	24.VIII	100,0	25.IV
La Mentue	33,7	20,7	27.X	52,8	24.VIII

Il n'est pas possible d'établir une comparaison avec la DBO d'autres lacs, ni avec des données antérieures concernant notre région, car ces recherches ont un caractère relativement nouveau du fait qu'elles s'appliquent, en principe, aux eaux polluées. Quoiqu'il en soit, il ressort des valeurs que nous avons obtenues, que notre lac accuse les signes d'une eutrophisation pas trop développée encore.

38. Calcium et magnésium.

Ces deux ions se rencontrent en quantité notable dans les lacs de terrains sédimentaires, essentiellement sous forme de bicarbonates.

La transformation des bicarbonates en carbonates se produit à certains moments de l'année, en particulier lors de l'utilisation de CO₂ par l'assimilation chlorophyllienne. Par contre, le départ de CO₂ dans l'atmosphère au contact de l'eau est insuffisant pour provoquer à lui seul la précipitation du carbonate de calcium comme Saunders (1927) l'a montré.

Le calcium est indispensable au biotope lacustre: il entre pour une notable proportion dans l'élaboration et le renforcement des

coquilles des mollusques, par exemple. C'est ce qu'a démontré Yoshimura (1932c) pour les lacs japonais, pauvres en Ca par rapport aux lacs de notre région et dans lesquels la coquille des mollusques est très mince et beaucoup plus friable que chez nous. C'est ce que Favre (1941) a mis en évidence aussi à propos des coquilles de *Pisidium* qui sont particulièrement renforcées dans la région littorale de notre lac où l'eau libère facilement du calcium car la température y est relativement élevée.

Si Lastockin (1931) prouve aussi que le calcium est un facteur de la productivité lacustre, Vollenweider (1950) par contre, n'a pu mettre en évidence, de façon nette, la corrélation qu'il a cru entrevoir entre la teneur en Ca et le développement d'*Oscillatoria rubescens*. Cependant, il n'est pas exclu, a priori, que la teneur en Ca soit totalement indépendante du développement et de l'évolution de certaines algues ou exerce une influence sur les changements d'associations d'algues.

Les travaux sur la teneur en Mg dans les lacs sont très peu nombreux et nous ne pouvons guère citer que le travail de Ohle (1934) qui démontre qu'il n'est pas possible, à l'époque, de constater une stratification du Mg à cause de la trop grande solubilité du CO_2Mg . Quant à Szabo (1930), il a fait voir, en étudiant le Balaton, que le rapport Ca:Mg peut présenter d'énormes différences d'un endroit du lac à l'autre, même après les brassages dus à la tempête, mais sans donner d'explications sur ce phénomène.

38.1. Le calcium dans l'eau du lac.

A partir des sondages hebdomadaires à la station Z, on calcule la teneur moyenne en Ca pour toute la tranche d'eau comprise entre la surface et 100 m de profondeur. Ceci nous donne le tableau CXXI.

TABLEAU CXXI
(cf. page suivante)

TABEAU CXXI

Moyennes et extrêmes de la teneur en calcium dans la baie d'Auvernier, de la surface au fond pour la période 1958-1961, exprimés en mg Ca par litre.

Valeurs moyennes. (0-100 m)	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Moyenne	43,3	46,1	46,3	48,5	46,4
Minimum	31,1	41,7	43,2	44,1	38,1
Date	15.VII	13.X	9.VIII	21.XI	15.VII.58
Maximum	47,1	50,7	49,3	51,7	51,7
Date	19.XI	31.III	27.XII	30.V	30.V.61
<u>Extrêmes ins- tatanés</u>					
Minimum	32,0	34,1	38,3	38,1	32,0
Date	2.IX	3.VIII	2.VIII	26.IX	2.IX.58
Profondeur	0	10	0	0	0
Maximum	51,5	53,1	51,1	55,3	55,3
Date	21.X	6.IV	27.XII	25.IV	25.IV.61
Profondeur	80	0	100	25	25

* = année incomplète,

La teneur moyenne en Ca varie de 13,4% de la valeur moyenne de la période, augmentant chaque année et de 6,2 mg/lit en quatre ans. L'amplitude des moyennes est de 13,6 mg Ca/lit., ce qui représente 29,3% de la moyenne quadriennale. Les minima instantanés se rencontrent en août et septembre. En faisant abstraction de l'année 1958 qui est incomplète, les maxima se trouvent en avril, exception faite de 1960, année extraordinaire du point de vue météorologique et où le maximum (relatif) n'a été atteint que le 27 décembre.

Les minima instantanés correspondent à l'époque la plus marquée de la décalcification estivale due à l'assimilation chlorophyllienne dont nous avons parlé déjà au paragraphe 31.1 plus haut. C'est à cette époque également qu'apparaissent les plus gros cristaux de calcite en suspension dans l'eau. Signalons, à ce propos, que le nombre des cristaux qui sont observables dans les préparations microscopiques de diatomées ne sont pas nécessairement les plus nombreux à ce moment, mais les plus volumineux par contre (diamètre 3 à 5 μ). Leur présence à petit diamètre (0,5 à 1 μ en général) mais en grand nombre se manifeste, par contre, déjà dans les semaines qui précèdent

immédiatement les variations du pH et du nombre des distomées au début de la décalcification. C'est ainsi qu'ils sont apparus en avril 1959, année normale du point de vue météorologique, mais en mars 1961 déjà, année caractérisée par la température anormalement élevée de son avant-printemps.

Dans le tableau CXXII nous rassemblons les fréquences avec lesquelles les extrêmes instantanés se rencontrent aux divers niveaux observés à la station Z; ces fréquences sont exprimées en pour-cents du nombre d'observations et les maxima des fréquences sont soulignés par an et pour la période. Seules entrent en ligne de compte pour l'établissement du tableau, les profondeurs pour lesquelles la fréquence en question atteint une fois au moins 10% durant la période considérés.

TABLEAU CXXII

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés de la teneur en calcium se rencontrent à diverses profondeurs à la station Z, exprimée en pour-cents.

Profondeur en mètres		1958	1959	1960	1961	1958-1961
Minimum	0	<u>33</u>	<u>27</u>	<u>32</u>	<u>45</u>	<u>33,8</u>
	5	24	25	14	21	21,0
	10	12	8	12	11	10,8
	15	3	10	12	0	6,3
	20	3	8	5	11	6,8
	25	6	2	10	3	5,3
Maximum	0	2	13	8	3	6,5
	30	10	11	20	8	12,3
	40	20	21	10	10	15,3
	80	<u>27</u>	16	8	15	16,5
	100	20	<u>23</u>	<u>25</u>	<u>46</u>	<u>28,5</u>

C'est donc en surface que se rencontrent le plus souvent les minima de la teneur en Ca, car c'est entre 0 et 5 m de profondeur que la décalcification est la plus active; dans le tableau ci-dessus, les fréquences enregistrées pour le niveau 5 m sont d'ailleurs nettement plus élevées aussi qu'aux profondeurs plus grandes. Le CO_2Ca libéré tend à s'enfoncer dans le lac en entraînant les matières en suspension. C'est pourquoi la surface est la couche où la teneur en Ca restant en solution est la plus pauvre durant une bonne partie de l'année, d'où la fréquence des minima enregistrés à cet endroit.

Quant aux maxima, il est facile de comprendre qu'on les rencontre aux grandes profondeurs, à quelques mètres au-dessus du fond. Le CO_2 Ca tombe au fond avec les matières qu'il entraîne; dans les couches profondes la présence du CO_2 dissous en plus grande quantité qu'au-dessus tend à former le bicarbonate soluble aux dépens du carbonate, de même que, plus près du fond, les bactéries ont tendance à solubiliser également le Ca en transformant le carbonate en d'autres sels solubles.

Les figures 127 à 130 permettent de suivre l'évolution de la teneur en Ca au cours de l'année dans les couches de 0, 5, 10 et 20 m. D'une manière générale, et ainsi que nous l'avons exposé au paragraphe 31 ci-dessus, les courbes représentent bien la baisse de la teneur en Ca au cours de l'été, la courbe de 20 m accusant une diminution moindre que les autres, mais avec des fluctuations très marquées parfois et dues à des changements de composition de l'eau sous l'effet de courants sous-lacustres comme nous l'avons montré pour d'autres déterminations déjà. L'influence du caractère météorologique de l'année sur la variation de la teneur en Ca se manifeste sur la figure 79 où la courbe relative à la surface accuse en 1960 des variations moins marquées qu'en 1959 et 1961.

Durant la période de circulation, autrement dit de la fin de l'automne jusqu'à la fin de l'hiver, la teneur en calcium varie extrêmement peu de la surface au fond. Par contre, en période de stratification thermique, cette teneur varie avec la profondeur. C'est ce que montrent les figures 131 et 132 qui donnent, entre autres, la teneur en Ca en fonction de la profondeur à la station Z, les 6 septembre 1960 et 8 août 1961, dates choisies parce qu'elles sont intéressantes du fait de l'existence de sauts thermiques bien marqués et multiples.

Sur la figure 131, au décrochement de la courbe de température correspond un décrochement de celle du calcium; immédiatement au-dessous, plusieurs points d'inflexion de cette dernière correspondent à des variations semblables de la température. Plus bas, enfin, les deux courbes plongent presque verticalement attestant une uniformité presque parfaite dans l'hypolimnion. Par contre, dans la partie supérieure, qui correspond à l'épilimnion, la teneur en calcium varie davantage, cette zone étant soumise à des courants dus aux conditions atmosphériques.

La figure 132 présente des variations analogues bien que le métalimnion soit plus prononcé que dans la figure précédente. On peut donc dire qu'au saut thermique correspond, en période de stratification, un "saut de la teneur en calcium" sensiblement à la même profondeur et d'autant plus accentué que le métalimnion est plus puissant.

Il est possible, dès lors, de dresser le tableau des valeurs du calcium dans les trois zones thermiques superposées durant la stratification; c'est ce qui constitue le tableau CXXIII.

Fig.127.

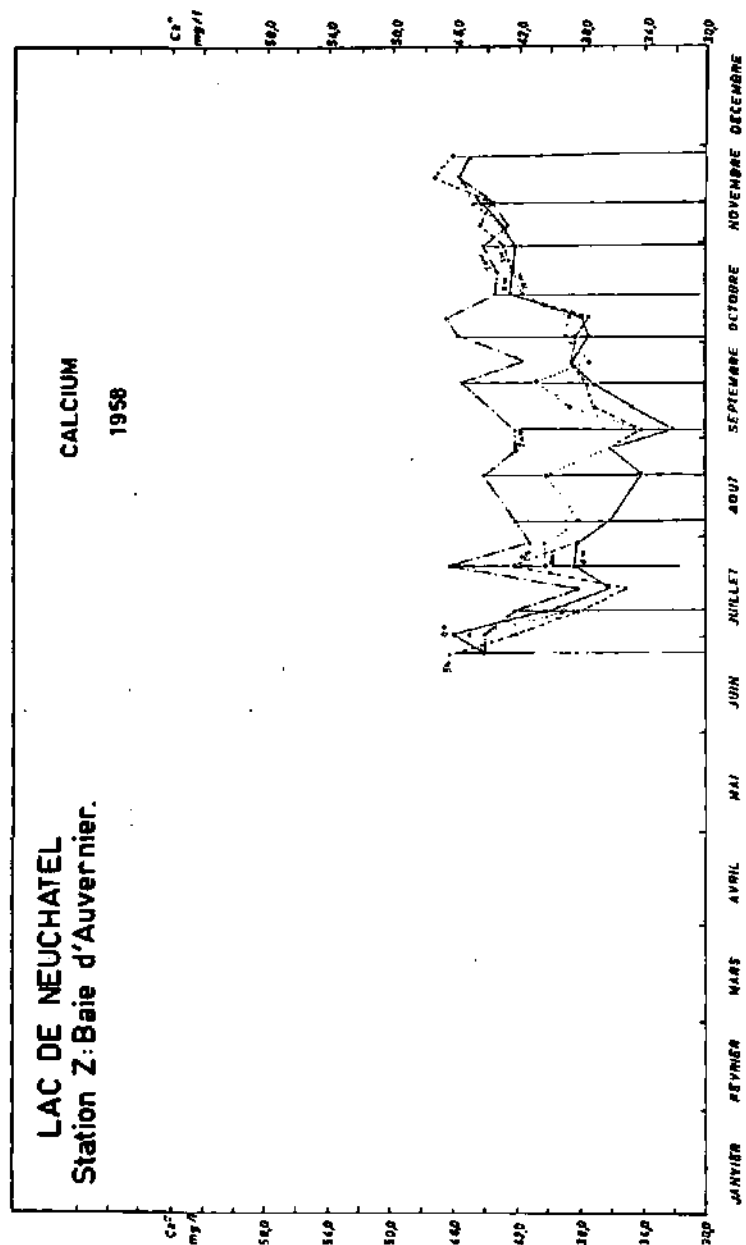


Fig.128.

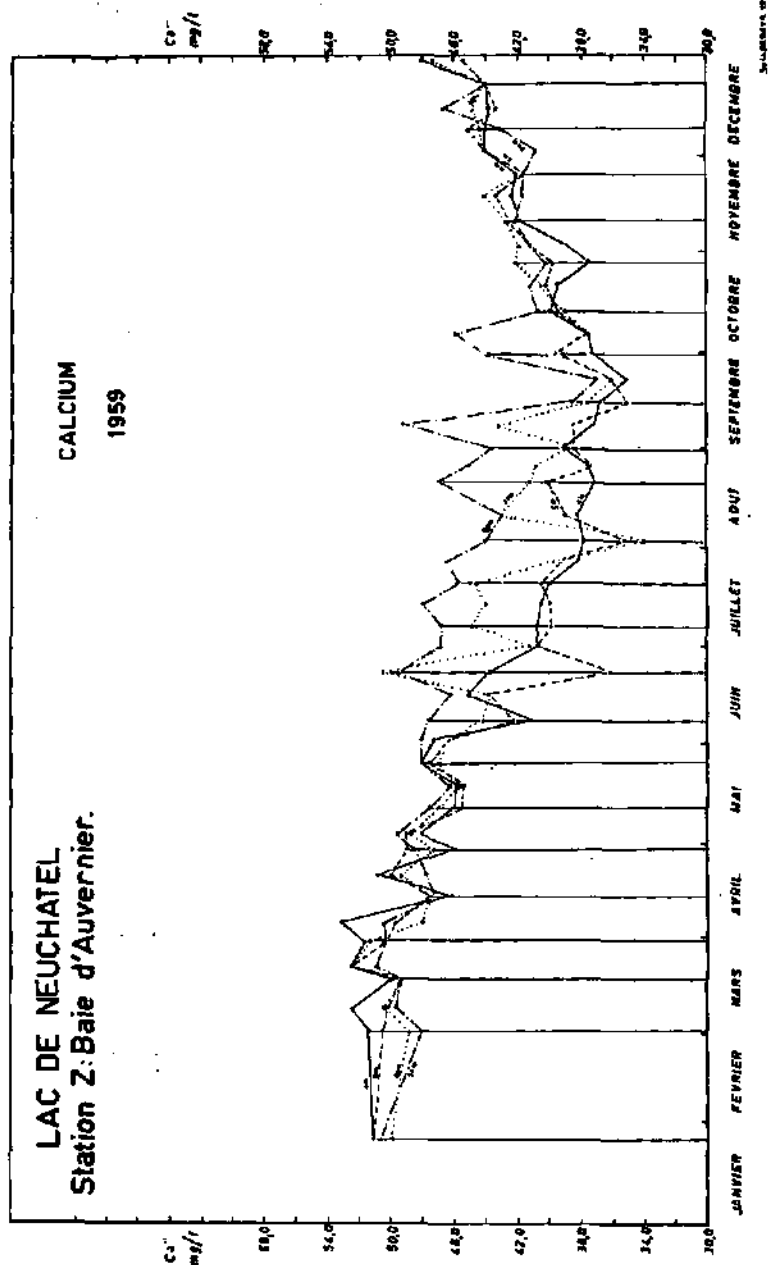


Fig.129.

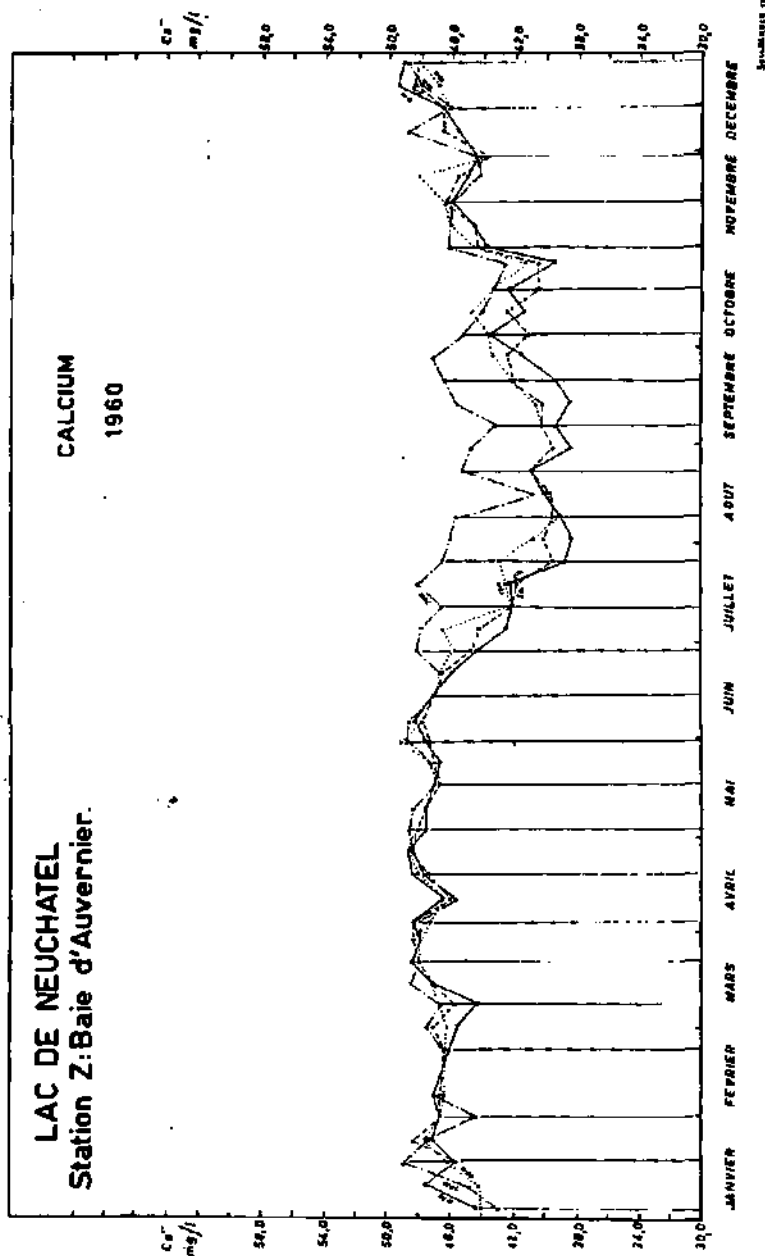
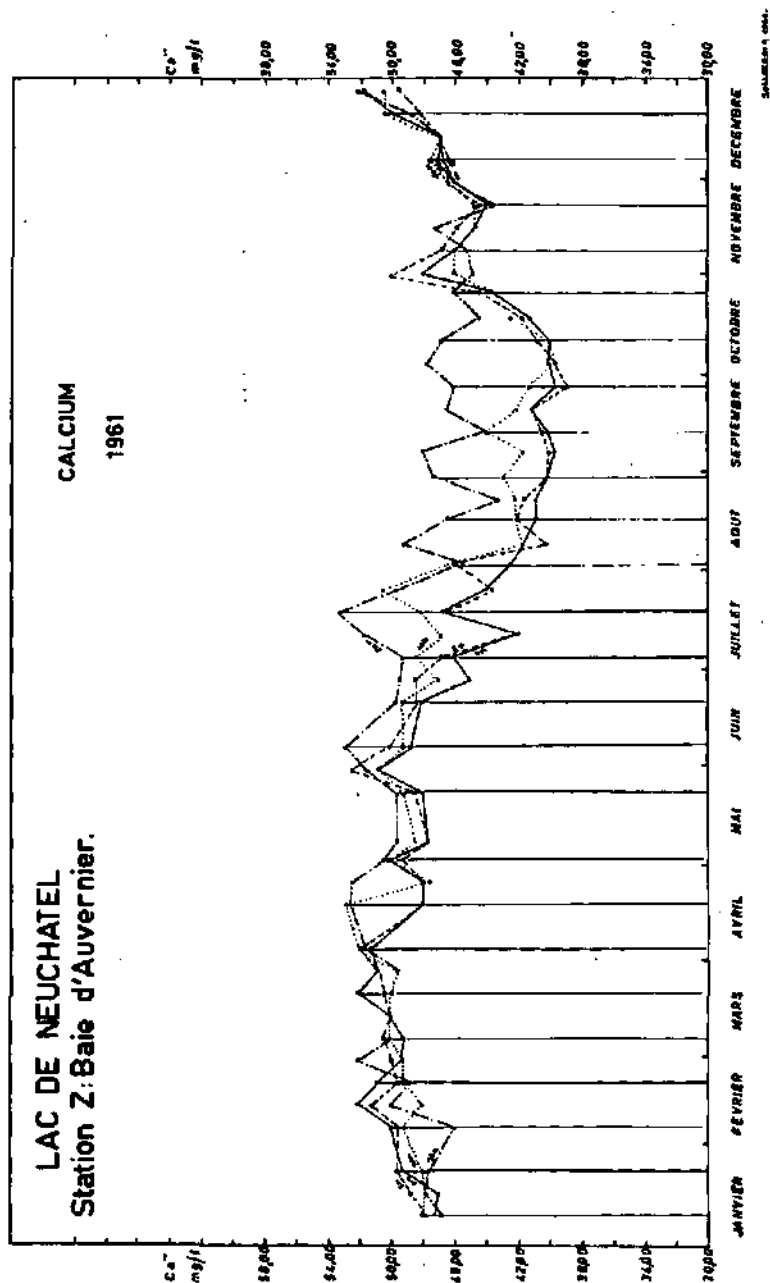
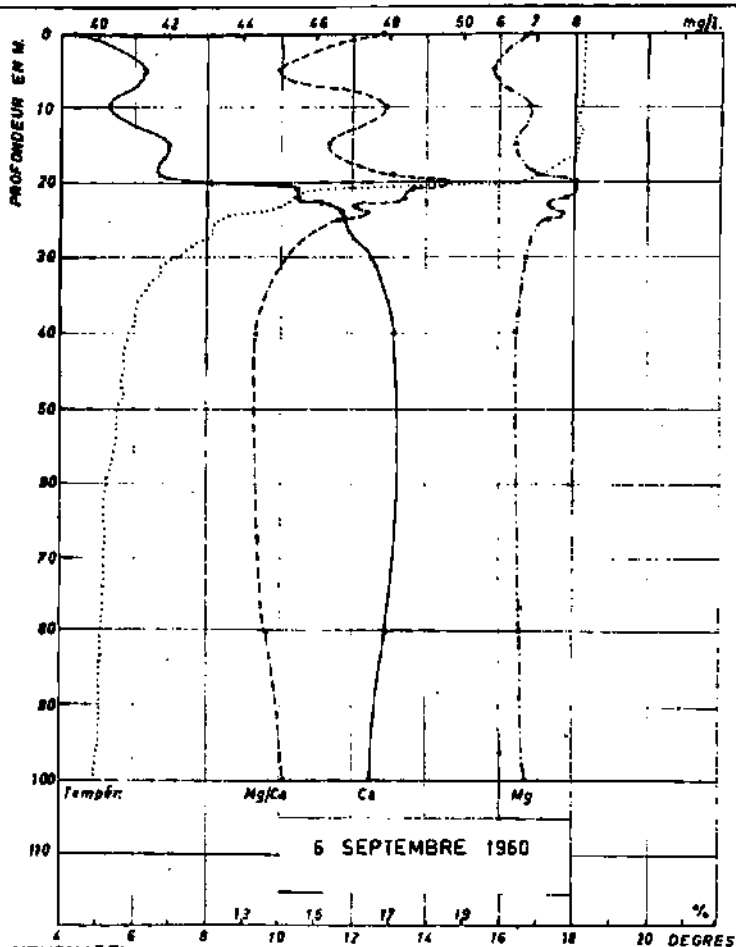


Fig.130.



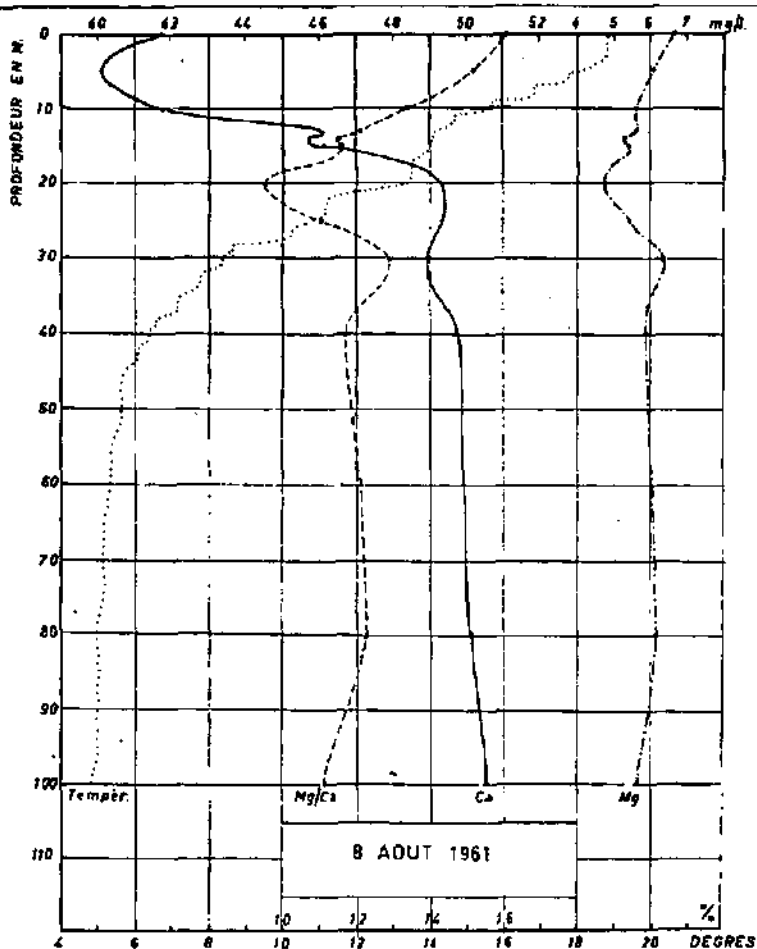


LAC DE NEUCHÂTEL

STATION Z: BAIE D'AUVERNIER

TEMPÉRATURE DE L'EAU, CALCIUM ET MAGNÉSIUM.

Fig.131.



LAC DE NEUCHÂTEL

STATION Z: BAIE D'AUVERNIER.

TEMPÉRATURE DE L'EAU, CALCIUM ET MAGNÉSIMUM.

Fig.132.

TABLEAU CXXIII

Moyennes et extrêmes de la teneur en calcium de l'eau de la baie d'Auvergnier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961

	1958		1959		1960		1961		1958-1961	
<u>Épilimnion</u>										
Moyenne	38,4		40,7		43,3		43,9		41,6	
Extrêmes	33,3	43,3	35,8	52,5	39,4	48,5	38,1	51,8	33,3	52,5
Dates	2.IX	25.VI	3.VIII	23.III	9.VIII	19.IV	26.IX	30.V	2.IX.58	23.III.59
Amplitude	10,0		16,7		9,1		13,7		19,2	
<u>Métalimnion</u>										
Moyenne	40,4		44,5		45,9		46,9		44,4	
Extrêmes	36,0	44,0	40,5	49,6	43,1	48,2	42,3	52,3	36,0	52,3
Dates	2.IX	1.VII	28.VII	23.VI	9.VIII	7.VI	26.IX	6.VI	2.IX.58	6.VI.61
Amplitudes	8,0		9,1		5,1		10,0		16,3	
<u>Hypolimnion</u>										
Moyenne	44,6		48,1		47,2		50,2		47,5	
Extrêmes	39,0	49,8	43,8	50,3	45,4	48,9	46,6	53,0	39,0	53,0
Dates	15.VII	21.X	13.X	23.III	9.VIII	31.V	22.VIII	18.VII	15.VII.58	18.VII.61
Amplitudes	10,8		6,5		3,5		6,4		14,0	

La teneur moyenne en calcium augmente chaque année dans l'épilimnion et le métalimnion, mais subit un léger recul en 1960 dans l'hypolimnion, probablement dû au caractère météorologique extraordinaire de cette année. Les minima se rencontrent en août et septembre dans l'épilimnion, s'échelonnent de juillet à septembre dans le métalimnion et de juillet à octobre dans l'hypolimnion. Quant aux maxima, ils s'étalent de fin mars à fin juin dans l'épilimnion, mais se limitent au mois de juin pour le métalimnion tandis qu'ils se présentent en toute saison dans l'hypolimnion.

La figure 117 illustre le comportement des trois zones thermiques superposées; durant la stratification, chaque zone se comporte presque pour elle-même et les courbes représentatives de la teneur en calcium divergent dès le début de juin et de plus en plus à mesure que la saison avance.

Pour la période 1958-1961, le rapport épilimnion:métalimnion:

hypolimnion accuse les valeurs suivantes :

moyennes: 1,00 : 1,07 : 1,14 ;

amplitudes: 1,37 : 1,16 : 1,00

autrement dit, l'amplitude des extrêmes diminue plus rapidement en passant de l'épilimnion à l'hypolimnion que les moyennes ne croissent en passant d'une zone à l'autre dans le même sens.

Nous renonçons à établir un tableau des teneurs en calcium de l'eau aux stations A à F, car les déterminations ne portent pas sur une période assez longue pour en tirer des moyennes valables; elles ne concernent que quatre séries de mesures seulement.

Les déterminations dans les affluents ne comportent pas non plus de mesures en nombre suffisant pour élaborer un tableau.

Au vu des résultats obtenus ci-dessus, et selon la classification établie par Naumann en 1927 (Hubault, 1943) le lac de Neuchâtel rentre dans la catégorie mésotype alcalitrophe, à teneur en calcium égale ou supérieure à 17,9 mg/lit. (soit 25 mg CaO/lit.).

Hutchinson (1957, p.555), citant les travaux de Clarke (1924, The data of geochemistry, 5th.ed., Bull.US geol.Surv.) indique une teneur en Ca de 53,2 mg/lit comme moyenne mondiale et de 68,2 mg/lit pour les lacs d'Europe centrale. Avec ses 46,4 mg Ca/lit obtenus comme moyenne de 1958 à 1961 pour toute la hauteur de l'eau à la station Z, notre lac se trouve donc au-dessous de la moyenne européenne citée par les auteurs précédents. Par contre, il est très proche du résultat obtenu par Zender (1908) à 70 m de profondeur et qui, converti en Ca, vaut 45,3 mg/lit. Cette valeur est un résultat isolé, donc pas absolument comparable à notre moyenne; elle a été obtenue aussi par une autre méthode de dosage que la nôtre. Cependant, on peut admettre qu'en cinquante ans la teneur en calcium de l'eau de notre lac est restée du même ordre de grandeur. Il reste à déterminer si la différence entre le résultat de Zender et notre moyenne dépend réellement d'un accroissement récent de la teneur en Ca de l'eau ou si la variation de nos moyennes dépend de fluctuations pluriannuelles cycliques ou acycliques.

38.2. Le magnésium dans l'eau du lac.

Reprenant, comme pour le calcium, les données hebdomadaires obtenues à la station Z, nous les groupons dans le tableau CXXIV.

TABLEAU CXXIV
(cf. page suivante)

TABEAU CXXIV

Moyennes et extrêmes de la teneur en magnésium dans la baie d'Auver-
nier, de la surface au fond pour la période 1958-1961, exprimés en
mg Mg par litre.

Valeurs moyennes (0-100 m)	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Moyenne	6,9	6,4	6,3	5,3	6,1
Minimum	5,2	4,3	5,2	3,1	3,1
Date	14.X	28.I	27.XII	18.VII	18.VII.61
Maximum	10,5	7,9	8,2	7,3	10,5
Date	2.IX	16.VI	26.X	21.XI	2.IX.58
<u>Extrêmes instantanés</u>					
Minimum	4,3	1,9	4,1	0,2	0,2
Date	14.X	23.VI	1.XI	18.VII	18.VII.61
Profondeur	15	10	20	100	100
Maximum	12,2	10,4	11,3	9,5	12,2
Date	2.IX	13.X	26.VII	21.XI	2.IX.58
Profondeur	10	80	0	100	10

* = année incomplète.

La teneur moyenne en magnésium varie de 26,2% de la valeur moyenne de la période, diminuant chaque année et de 1,6 mg/lit en quatre ans. L'amplitude des moyennes est de 7,4 mg/lit, ce qui représente 121% de la moyenne quadriennale. En faisant abstraction des années 1958 incomplète et 1960 anormale du point de vue météorologique, on voit apparaître les minima instantanés en juin et juillet, mais les maxima en octobre et novembre. La situation est pratiquement retournée en 1960 où le minimum ne se présente qu'au début de novembre et le maximum fin juillet-déjà.

Quant à la fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés apparaissent aux divers niveaux de la station Z, nous en donnons le tableau CXXV ci-après.

TABEAU CXXV
(cf. page suivante)

TABLEAU CXXV

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanées de la teneur en magnésium se rencontrent à diverses profondeurs à la station Z, durant la période 1958-1961, exprimée en pour-cents.

Profondeur en mètres	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Minimum 0	0	<u>17</u>	10	3	7,5
5	0	8	14	7	7,3
10	7	6	12	<u>17</u>	10,5
15	<u>43</u>	6	14	10	<u>18,3</u>
20	29	10	<u>15</u>	6	15,0
30	0	15	7	13	8,8
40	0	15	5	13	8,3
80	14	12	3	13	10,5
100	0	8	14	13	8,8
Maximum 0	11	11	<u>20</u>	<u>15</u>	14,3
5	5	4	11	9	7,3
10	<u>10</u>	9	5	12	10,5
15	5	<u>15</u>	15	9	11,0
20	5	11	8	9	8,3
25	21	13	15	12	<u>15,3</u>
30	<u>16</u>	11	3	6	9,0
40	11	2	8	9	7,5
80	0	<u>15</u>	5	6	6,5
100	11	9	11	12	10,8

* = année incomplète.

Dans la période étudiée, c'est donc à 15 m de profondeur que se rencontrent le plus souvent les minima de la teneur en magnésium et à 25 m de profondeur les maxima. Durant cette période quadriennale, la profondeur des extrêmes varie sans ordre apparent d'une année à l'autre. Il est difficile dès lors, en se basant sur une période d'observations aussi courte, de tirer des conclusions générales sur la fixité de l'emplacement de ces extrêmes dans la profondeur du lac et sur leur relation avec d'autres phénomènes. Une série d'observations portant au moins sur quelques années encore est indispensable.

Grâce aux figures 133 à 136, il est possible de suivre l'évolution de la teneur en magnésium au cours de l'année pour les couches

Fig.133.

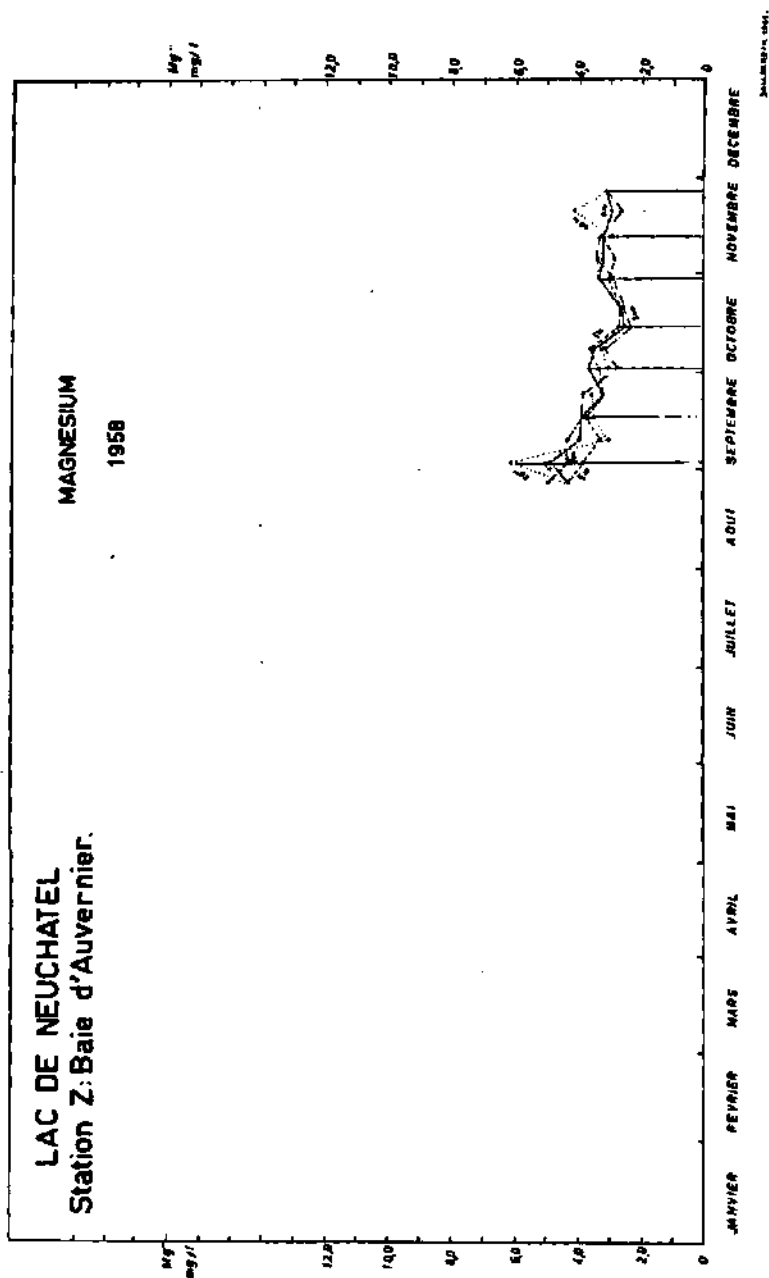


Fig.134.

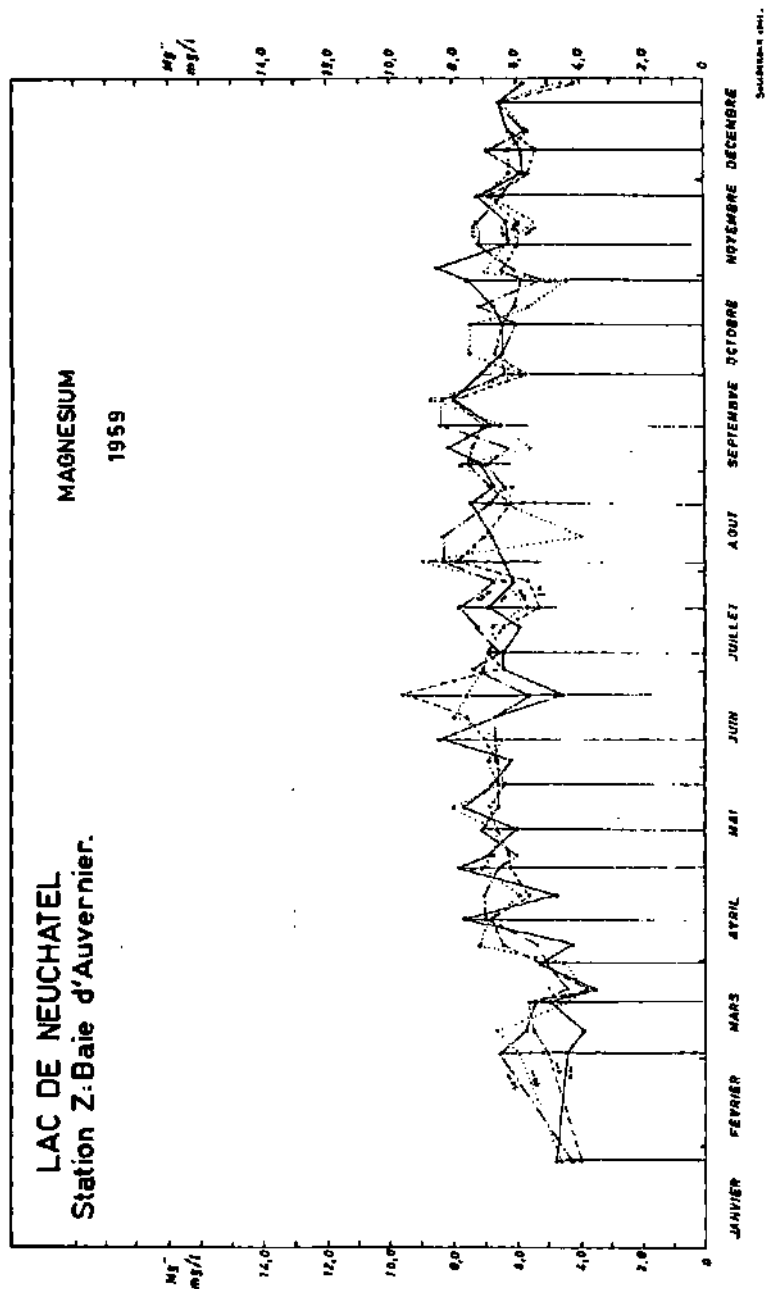
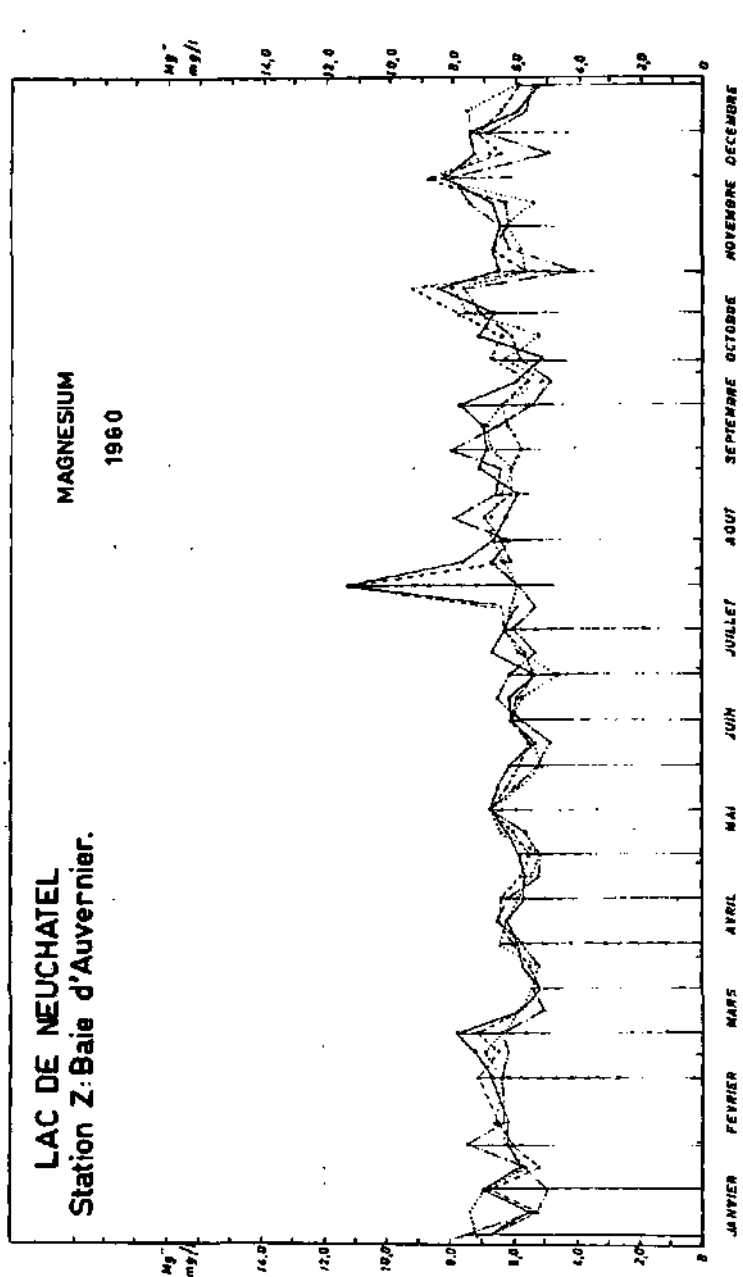
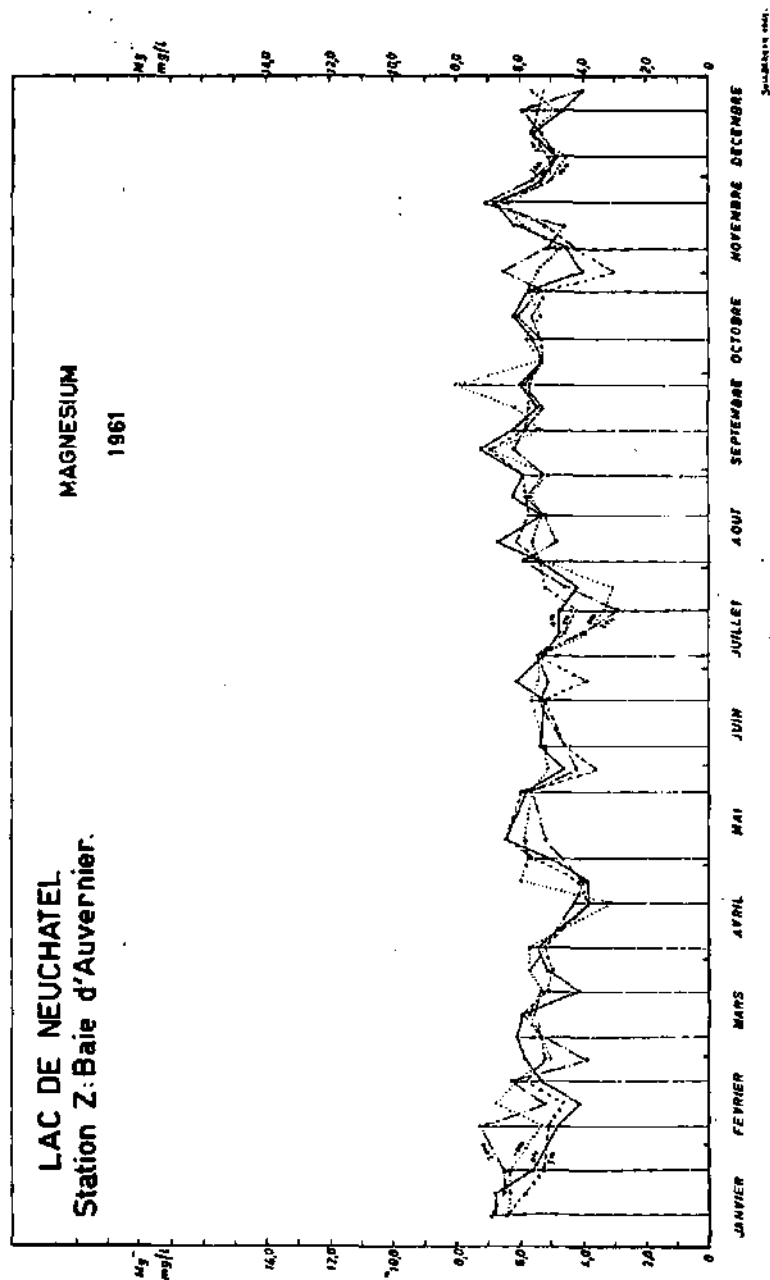


Fig.135.



DECEMBRE 1960.

Fig.136.



de 0, 5, 10 et 20 m de profondeur. A part les fluctuations instantanées et qui sont en grande majorité peu importantes, ces courbes ont une allure générale régulière, sauf en 1959 où elles accusent un léger bombement dont le point culminant est situé en été. Quant aux écarts entre les quatre couches représentées, ils sont minimes et ne trahissent rien de caractéristique.

Durant toute l'année, la teneur en magnésium varie en fonction de la profondeur en un même point du lac. Toutefois, les écarts sont moins marqués en hiver et en automne que durant la stratification thermique. Aussi avons-nous choisi deux dates de cette dernière période pour représenter le phénomène au moyen des figures 131 et 132. Le 6 septembre 1960, à l'instar de ce qui se passe pour le calcium, après quelques fluctuations dans l'épilimnion, la courbe représentative du magnésium accuse des zigzags dans le métalimnion, au niveau des décrochements enregistrés pour le calcium et la température de l'eau. Puis, dans l'hypolimnion, la courbe représentative du magnésium prend une allure uniforme et sensiblement verticale. Un phénomène tout à fait analogue se remarque le 8 août 1961. Aux sauts thermiques observés ces jours-là correspondent donc des "sauts de la teneur en magnésium" situés à la même profondeur. Toutefois, les écarts concernant le magnésium sont moins prononcés que ceux des courbes du calcium et de la température. Comme Ohle (1934) l'a déjà signalé, le carbonate de magnésium étant beaucoup plus soluble que celui de calcium, il diffuse plus rapidement parce qu'en solution et la stratification du Mg se marque beaucoup moins que celle du Ca, ce qui pourrait vraisemblablement expliquer la différence d'allure des courbes de ces deux ions sur les figures 131 et 132.

On peut aussi examiner comment se répartit le Mg dans les trois zones thermiques superposées durant la stratification annuelle. C'est ce que nous ferons à l'aide du tableau CXXVI ci-dessous.

TABLEAU CXXVI

(cf. page suivante)

TABLEAU CXXVI

Moyennes et extrêmes de la teneur en magnésium de l'eau de la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961, exprimées en mg/lit.

	1958*		1959		1960		1961		1958-1961	
<u>Epilimnion</u>										
Moyenne	7,4		6,6		6,4		5,3		6,4	
Extrêmes	5,2	11,0	3,5	8,3	5,3	9,4	3,7	6,8	3,5	11,0
Dates	21.X	2.XI	23.III	22.IX	28.VI	26.VII	18.IV	6.IX	23.III.59	2.IX.58
Amplitude	5,8		4,8		4,1		3,1		7,5	
<u>Métalimnion</u>										
Moyenne	7,9		6,7		6,3		5,4		6,6	
Extrêmes	6,6	11,0	4,1	7,9	5,2	7,8	2,9	8,1	2,9	11,0
Dates	23.IX	2.IX	23.VI	21.X	7.VI	6.IX	18.VII	6.IX	18.VII.61	2.IX.58
Amplitude	4,4		3,8		2,6		5,2		8,1	
<u>Hypolimnion</u>										
Moyenne	7,5		6,8		6,2		5,2		6,4	
Extrêmes	5,4	10,2	5,2	8,4	5,4	7,5	2,6	6,8	2,6	10,2
Dates	21.X	2.IX	23.III	13.X	31.V	9.VIII	18.VII	12.IX	18.VII.61	2.IX.58
Amplitude	4,8		3,2		2,1		4,2		7,6	

* = année incomplète.

La teneur moyenne en magnésium diminue régulièrement chaque année dans les trois zones thermiques superposées. Il n'en est de même que dans l'épilimnion pour les écarts entre les extrêmes.

Une explication satisfaisante n'a pas encore été trouvée pour justifier cette diminution régulière du magnésium en même temps que l'augmentation tout aussi régulière de la teneur en calcium durant la période quadriennale en question. Deux sont plausibles pour l'instant: il peut s'agir d'une manifestation de l'accroissement de la pollution des eaux et par conséquent de l'eutrophisation du lac, mais il peut s'agir aussi d'un changement dans la répartition des ions principaux dissous dans l'eau, consécutif aux mutations des espèces ou des associations planctoniques. Seule une plus longue série d'observations permet d'espérer pouvoir résoudre le problème.

Pour la période 1958-1961, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion accuse les valeurs suivantes :

moyennes: 1,00 : 1,03 : 1,00 ; amplitudes: 1,00 : 1,08 : 1,03

autrement dit les moyennes des trois zones ne diffèrent pas de plus de 3% et les amplitudes de plus de 8% l'une de l'autre.

Comme pour le calcium et pour les mêmes raisons, nous renonçons à établir des tableaux de la teneur en magnésium aux stations A à P, ainsi que dans les affluents du lac.

D'après les travaux de Clarke cités par Hutchinson (1957), la teneur moyenne mondiale des lacs d'eau douce serait de 34,0 mg. Mg/lit et celle des lacs d'Europe centrale de 25,4 mg/lit. La moyenne quadriennale que nous avons obtenue à la station Z, soit 6,1 mg/lit, n'est que le quart de celle indiquée par Clarke. A partir des 25,4 mg/lit donnés par cet auteur, et pour aboutir à nos chiffres, il faudrait envisager une baisse continue de la teneur en Mg au cours des 34 ans qui ont précédé nos recherches, avec une diminution qui, plusieurs années durant aurait dépassé 0,4 mg/lit et par an en moyenne, taux trouvé lors de nos observations. Cette hypothèse n'est guère plausible, tandis que le seul résultat ancien à notre disposition, le dosage effectué par Zender (1908) sur l'eau de notre lac à 70 m de profondeur, donne, après conversion en Mg, la valeur de 5,7 mg/lit. Bien qu'il s'agisse d'un résultat isolé et obtenu par une méthode de dosage différente de la nôtre, nous pouvons l'admettre contrairement à celui de Clarke, en constatant alors que la teneur actuelle en magnésium de l'eau du lac de Neuchâtel est du même ordre de grandeur que celle trouvée cinquante ans auparavant. La différence (0,4 mg/lit) est-elle due au changement de méthode de dosage, doit-elle être imputée aux écarts qui existent presque toujours entre moyennes et résultats isolés, ou bien encore doit-on envisager des fluctuations pluriannuelles cycliques ou acycliques dans la teneur en Mg de l'eau ? On ose espérer que par de nouvelles observations durant plusieurs années encore, il sera possible de résoudre ce problème.

38.3. Le rapport magnésium/calcium dans l'eau du lac.

Nous venons de voir que les variations des teneurs en ces deux ions sont, le plus souvent, discordantes. Il est intéressant, dès lors, d'examiner comment varie leur rapport, exprimé en pour-cents.

A partir des données hebdomadaires obtenues à la station Z, nous calculons le rapport en question tel qu'il figure dans le tableau CXXVII ci-dessous.

TABLEAU CXXVII
(cf. page suivante)

TABLEAU CXXVII

Moyennes et extrêmes du rapport Mg:Ca dans la baie d'Auvernier, de la surface au fond pour la période 1958-1961, exprimés en pour-cents.

Valeurs moyennes (0-100 m)	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Moyenne	15,8	14,2	13,7	10,9	13,2
Minimum	11,7	8,6	10,6	6,2	6,2
Date	14.X	28.I	27.XII	18.VII	18.VII.61
Maximum	26,9	18,6	19,0	16,7	26,9
Date	2.IX	22.IX	26.X	21.XI	2.IX.58
<u>Extrêmes instan- tanés</u>					
Minimum	8,7	3,8	8,4	0,4	0,4
Date	21.X	23.VI	19.I	18.VII	18.VII.61
Profondeur	80	10	30	100	100
Maximum	35,9	26,4	29,2	21,9	35,9
Date	2.IX	23.VI	26.VII	21.XI	2.IX.58
Profondeur	10	5	0	100	10

* = année incomplète.

La valeur moyenne du rapport varie de 37,2% de la valeur moyenne de la période, diminuant chaque année et de 4,9% au total en quatre ans. Quant à l'amplitude quadriennale des moyennes, elle est de 20,7%, représentant 157% de la moyenne de la période. Faisant abstraction des années 1958 et 1960 pour les raisons déjà indiquées, on constate que les minima instantanés se présentent, comme pour la teneur en magnésium, en juin et juillet. Par contre, les maxima surgissent de manière désordonnée au cours de l'année.

Du point de vue de la fréquence avec laquelle apparaissent les extrêmes aux diverses profondeurs de 2 au cours de l'année, nous établissons le tableau CXXVIII comme suit :

TABLEAU CXXVIII
(cf. page suivante)

TABLEAU CXXVIII

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés du rapport Mg:Ca se rencontrent à diverses profondeurs à la station 2, exprimée en pour-cents.

Profondeur en mètres		1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Minimum	0	0	17	8	0	6,3
	10	0	8	12	8	7,0
	15	27	4	10	11	13,0
	20	13	8	<u>15</u>	11	11,8
	30	7	12	13	8	10,0
	40	0	<u>19</u>	8	16	10,8
	80	<u>33</u>	12	7	18	<u>17,5</u>
	100	13	10	13	<u>22</u>	14,5
Maximum	0	27	<u>17</u>	<u>26</u>	<u>31</u>	<u>25,3</u>
	5	7	11	13	14	11,3
	10	<u>33</u>	<u>17</u>	6	21	19,3
	15	0	9	16	7	8,0
	25	13	11	13	3	10,0
	30	7	11	3	0	5,3

* = année incomplète.

Dans la période étudiée, c'est à 80 m de profondeur que le rapport Mg:Ca est le plus petit, autrement dit que les teneurs en Mg et en Ca diffèrent le plus l'une de l'autre, n'accusant qu'une relation assez lâche entre elles. Par contre, le même rapport trouve le plus souvent sa valeur maximum en surface, précisément où la teneur en calcium est minimum le plus souvent. Quoiqu'il en soit, les variations du rapport Mg:Ca dépendent davantage des fluctuations de la teneur en calcium que de celle de la teneur en magnésium. Il reste à vérifier, sur plusieurs années encore, si l'emplacement de ces extrêmes reste le même quelles que soient les conditions météorologiques successives; ce travail figure au programme de nos recherches ultérieures.

Comme la teneur en magnésium, le rapport Mg:Ca varie tout au long de l'année avec la profondeur, relativement peu durant la circulation automnale et en hiver, davantage pendant la stratification thermique du lac. C'est pourquoi nous choisissons cette dernière période pour représenter sa variation en fonction de la profondeur au moyen des courbes des figures 131 et 132.

Le 6 septembre 1960, après des fluctuations dans l'épilimnion, la courbe représentant le rapport Mg:Ca accuse un écart très marqué correspondant, en profondeur, à ceux des teneurs en Ca et en Mg, ainsi que de la température de l'eau, tous dans le métalimnion. Plus bas, dans l'hypolimnion, la courbe du rapport prend une allure régulière et sensiblement verticale, attestant que le rapport ne change pratiquement plus de valeur jusque près du fond. Le 8 août 1961, le phénomène est semblable. On peut donc conclure qu'au niveau des sauts thermiques le rapport Mg:Ca présente un "saut" analogue à celui signalé déjà pour le calcium et le magnésium.

Considérant maintenant la période de stratification lacustre, nous dressons le tableau des valeurs de ce rapport (tableau CXXIX).

TABLEAU CXXIX

Moyennes et extrêmes du rapport Mg:Ca de l'eau de la baie d'Auvergnier durant la période de stratification thermique des années 1958 à 1961, exprimés en %.

	1958*		1959		1960		1961		1958-1961	
<u>Epilimnion</u>										
Moyenne	19,8		16,5		14,8		12,2		15,8	
Extrêmes	12,2	33,1	6,7	23,1	11,3	23,6	7,7	16,5	6,7	33,1
Dates	21.X	2.IX	23.III	22.IX	7.VI	26.VII	18.IV	6.IX	23.III.59	2.IX.58
Amplitude	20,9		16,4		12,3		8,8		26,4	
<u>Métalimnion</u>										
Moyenne	19,9		15,2		13,6		11,7		15,1	
Extrêmes	15,0	30,6	8,3	18,3	10,8	17,2	5,8	18,2	5,8	30,6
Dates	23.IX	2.IX	23.VI	2.IX	7.VI	6.IX	18.VII	6.IX	18.VII.61	2.IX.58
Amplitude	15,6		10,0		6,4		12,4		24,8	
<u>Hypolimnion</u>										
Moyenne	16,1		14,2		13,2		10,7		13,6	
Extrêmes	10,9	24,3	10,3	19,6	11,0	16,5	5,0	18,4	5,0	24,3
Dates	21.X	2.IX	23.III	13.X	31.V	9.VIII	18.VII	17.X	18.VII.61	2.IX.58
Amplitude	13,4		9,3		5,5		13,4		19,3	

* = année incomplète.

La valeur du rapport Mg:Ca diminue régulièrement chaque année dans les trois zones thermiques superposées. Dans les trois zones aussi les minima sont répartis sans ordre tout au long de la période de stratification. Par contre, on rencontre une prédominance marquée pour septembre dans les maxima de l'épilimnion et du métalimnion, ceux de l'hypolimnion se répartissant entre août et la mi-octobre.

Pour la période 1958-1961, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion accuse les valeurs suivantes du rapport Mg:Ca :

moyennes: 1,16 : 1,11 : 1,00 ; amplitudes: 1,37 : 1,29 : 1,00

autrement dit les moyennes et les amplitudes diminuent plus rapidement en passant du métalimnion à l'hypolimnion que de l'épilimnion au métalimnion, la diminution des amplitudes étant plus conséquente que celle des moyennes,

N'ayant pas établi de tableau des teneurs en calcium et en magnésium, nous n'en élaborons pas pour le rapport de ces ions entre eux aux stations A à P', ni pour les affluents du lac.

D'après les indications données par Hutchinson (1957) sur la base des calculs de Clarke, le rapport Mg:Ca serait pour l'eau des lacs de l'Europe centrale de 37,3%. Juday et Birge (1933), à la suite des travaux de Ruttner, obtiennent, par leur statistique portant sur 530 lacs du Wisconsin et pour le même rapport : 66,6%. Notre moyenne quadriennale de 13,2% est donc fort éloignée des résultats que les auteurs précités prétendent appliquer aux lacs d'eau douce sédimentaires en général. Par contre, notre moyenne se rapproche très fortement de celle que les résultats obtenus par Zender (1908) permettent de calculer pour l'eau de notre lac il y a cinquante ans: 12,6%. Jusqu'à preuve du contraire, nous admettrons donc que l'eau du lac de Neuchâtel ne rentre pas, quant à ses teneurs en calcium et en magnésium, dans la catégorie des lacs dont les teneurs ont été calculées d'une manière générale par divers auteurs tels que Clarke, ainsi que Juday et Birge.

39. Le phosphore dans l'eau.

Le phosphore est un des éléments les plus importants de l'écologie lacustre; il constitue, comme l'azote, un facteur biocénétique essentiel de la majorité des lacs.

Le phosphore peut exister dans l'eau douce sous plusieurs formes, organiques et inorganiques, mais le plus souvent on l'y rencontre à l'état de phosphates. C'est pourquoi nous exprimons les résultats de son dosage en PO_4''' . Tous les résultats donnés dans ce paragraphe se rapportent au phosphore total (somme des phosphates eclusibles et insolubles).

Gessner (1939) prouve que la présence de phosphore en petites quantités est indispensable à tout biotope lacustre, mais que de trop fortes concentrations inhibent le développement normal de cer-

taines espèces d'organismes vivants. Or, on constate, avec Hayes et Coffin (1951) que la concentration naturelle de l'eau des lacs en phosphore est de 0,025 mg/lit environ, dont 9/10 sous forme organique, mais que si l'on ajoute, artificiellement du phosphore, tout excès tend à disparaître rapidement, quelle que soit la grandeur de cet excès. L'utilisation de ces excès est le fait de l'ensemble des organismes phytoplanctoniques, mais à des degrés divers suivant les espèces considérées. C'est ainsi qu'*Asterionella* est la plus capable d'assimiler et d'utiliser le phosphore en le concentrant, même dans des eaux qui en contiennent moins de 0,001 mg/lit. Aussi ne faut-il pas s'étonner que certaines eaux près de la surface, dans les lacs oligotrophes, ne contiennent plus de phosphore décelable.

Cependant, lorsque la quantité de CO_2Ca augmente dans l'eau lors de la décalcification biologique, du phosphore s'élimine par précipitation de $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ qui tombe au fond. Selon Hayes et Coffin (1951) le phosphate ferrique précipité aussi sur le fond forme, à la surface du sédiment, une couche insoluble protectrice du phosphate ferreux sous-jacent et qui est soluble; mais, en automne, lorsque les couches profondes s'appauvrissent en oxygène, le phosphate ferrique se réduit en phosphate ferreux, ce qui permet au phosphore de rentrer en dissolution.

Toutefois, ainsi que le montre Rigler (1956), les ions PO_4^{3-} sont utilisées rapidement par les bactéries qui entrent en compétition, pour cette transformation, avec les algues proprement dites. Pomeroy (1960) constate que dans les systèmes lacustres biologiquement très actifs, comme par exemple au moment de la floraison du plancton, la durée du séjour de P dans l'eau à l'état dissous est réduite à quelques minutes le plus souvent et ne dépasse que rarement une demi-heure, car les organismes vivants concentrent sans cesse et très rapidement le phosphore dans leurs tissus après s'en être emparé dans la solution environnante. Ce phénomène peut se poursuivre fort longtemps, même si la teneur en P dissous est très faible, car celle-ci tend à se renouveler par la circulation due aux courants.

Travaillant en mer, mais dans des conditions applicables aux lacs d'eau douce, Revelle et Schaefer (1961) démontrent que, lorsque la teneur en P devient par trop faible en certains endroits, l'accroissement des organismes peut s'en trouver limité plus ou moins fortement selon les espèces en cause.

Enfin, Stangenberg (1961) prouve qu'il n'existe pas de corrélation sûre entre les phosphates et la silice, bien que, parfois, ces deux composants augmentent simultanément avec la profondeur.

39.1. Les phosphates à la station 2.

A partir des dosages hebdomadaires effectués à cette station, nous dressons le tableau CXXX qui, cependant, ne se rapporte qu'aux années 1960 et 1961, les déterminations des phosphates n'ayant pas été faites précédemment.

TABEAU CXXX

Moyennes et extrêmes de la teneur totale en phosphates dans l'eau de la baie d'Auvernier, de la surface au fond, en 1960 et 1961 et exprimée en mg PO₄'''/lit.

<u>Moyennes (0-100m).</u>	1960	1961	1960-1961
Moyennes	0,040	0,038	0,039
Minimum	0,028	0,011	0,011
Date	16.VIII	29.VIII	29.VIII.61
Maximum	0,069	0,068	0,069
Date	3.V	21.II	3.V.60
<u>Extrêmes instantanés</u>			
Minimum	0,015	0,005	0,005
Date	10.V	18.VII	18.VII.61
Profondeur	80	40	40
Maximum	0,130	0,150	0,150
Date	3.V	21.II	21.II.61
Profondeur	100	0	0

La teneur moyenne en phosphates totaux varie de 0,002 mg PO₄'''/lit, soit de 5,1% de la valeur moyenne biennale. L'amplitude des moyennes est de 0,058 mg/lit, ce qui représente 149% de la moyenne des deux ans. Sous réserve de vérification ultérieure à l'aide d'observations portant sur plusieurs années encore, on peut dire que les minima instantanés se situent de mi-mai à mi-juillet et les maxima du milieu de l'hiver au début de mai.

Quant à la fréquence avec laquelle on rencontre les extrêmes aux diverses profondeurs de la station Z, elle figure sur le tableau CXXXI ci-dessous.

TABEAU CXXXI

(Cf. page suivante)

TABEAU CXXXI

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanées de la teneur en phosphates se rencontrent à diverses profondeurs de la station Z, en 1960 et 1961, exprimée en pour-cents des déterminations effectuées.

Profondeur en mètres		1960	1961	1960-1961
Minimum	0	15	12	13,5
	20	7	17	12,0
	25	8	14	11,0
	30	14	<u>19</u>	16,5
	40	<u>20</u>	17	<u>18,5</u>
	80	14	2	8,0
Maximum	0	10	12	11,0
	10	12	8	10,0
	15	<u>16</u>	12	14,0
	20	12	<u>25</u>	<u>18,5</u>
	30	12	12	12,0
	100	10	25	17,5

Durant nos deux ans d'observations, c'est à 40 m de profondeur que se rencontre le plus souvent la teneur minimum en phosphates et à 20 m la teneur maximum.

Les figures 137 et 138 permettent de suivre l'évolution annuelle de la teneur en phosphates des couches de 0, 5, 10 et 20 m de profondeur. De nombreuses fluctuations instantanées affectent ces couches; elles sont consécutives à des périodes d'agitation du lac qui déplacent, sous l'effet des courants, des masses d'eau à teneurs en phosphates différentes des autres. L'année 1960 permet de déceler une très légère diminution des phosphates du milieu de juin à la mi-août. Par contre, en 1961, la diminution est très marquée du début de juillet à la mi-septembre. Considérant le caractère anormalement froid et sans insolation de 1960, mais le fait que 1961 est excessivement chaude, on peut en conclure que la diminution des phosphates dans les couches supérieures en été est liée aux conditions météorologiques de l'année, en particulier à la thermique de celle-ci. Il y a relation aussi entre cette diminution de la teneur en phosphates et la décalcification estivale dont nous avons parlé déjà aux paragraphes 31.1 et 38.1; la teneur en ces deux ions diminue presque simultanément en été; elle s'accroît de même en automne, ce qui vérifie les conclusions du travail de Gessner (1939) : "La décalcification biologique est toujours à l'origine d'une déphosphoration non biologique".

Fig. 137.

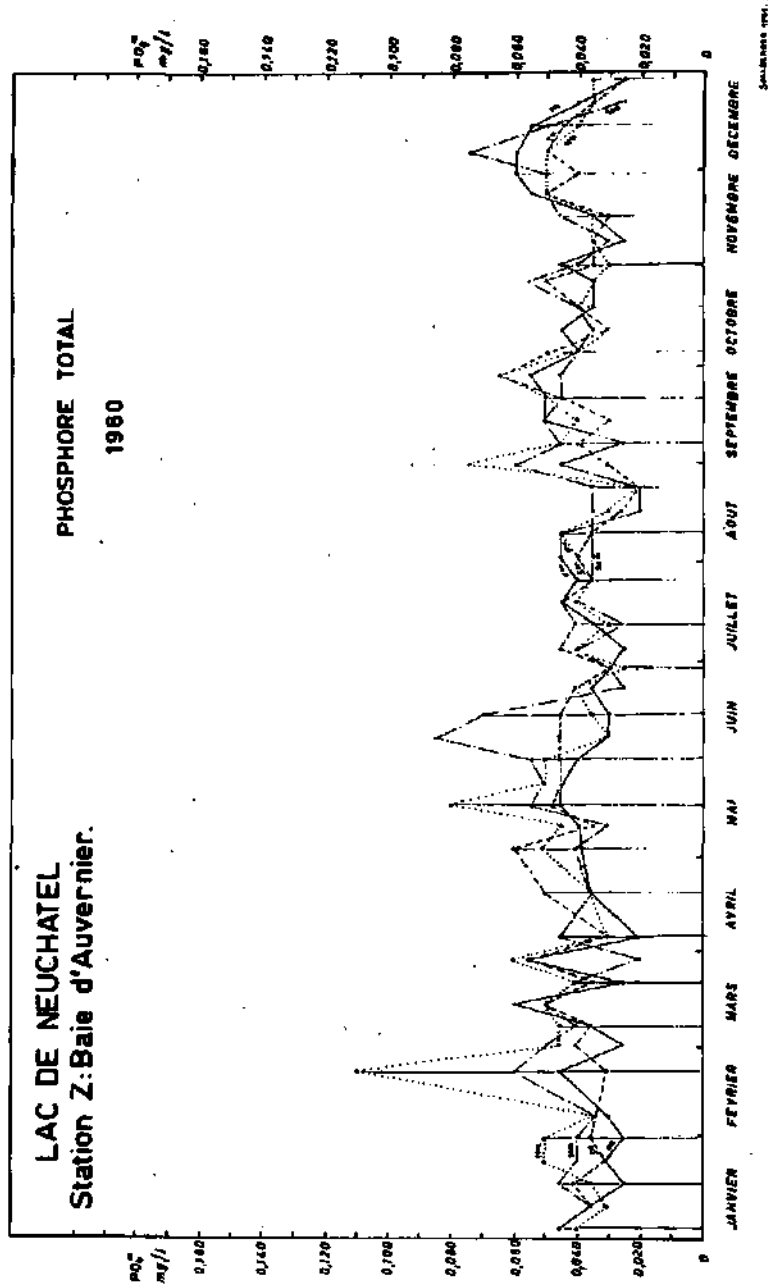
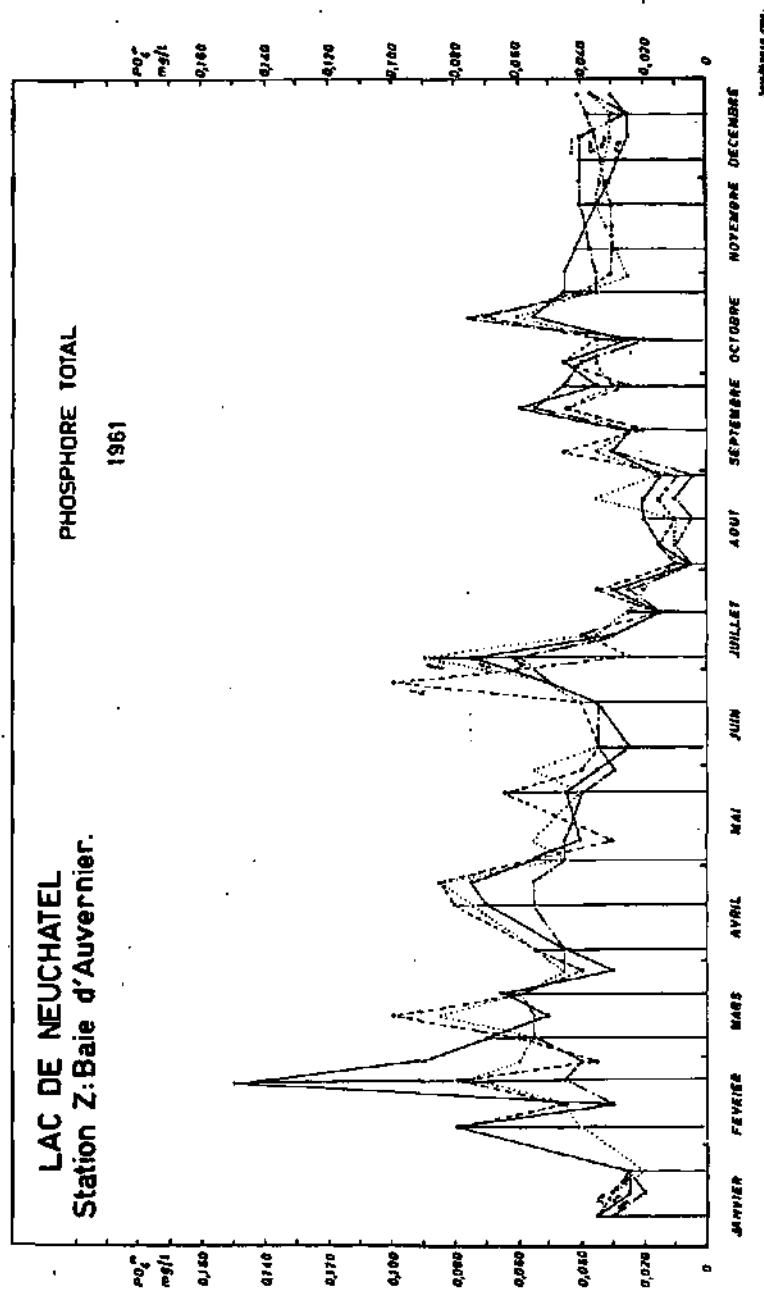


Fig.138.



Toute l'année, on observe des variations de la teneur en phosphates en fonction de la profondeur. Choisisant les sondages du 6 septembre 1960 à la station 2 comme exemple, nous reportons dans la figure 139 les dosages des phosphates en fonction de la profondeur, en même temps que la courbe des températures de l'eau. Comme nous l'avons relevé pour d'autres ions précédemment, la courbe représentative des phosphates accuse une forte variation dans l'épilimnion, des zigzags prononcés dans le métalimnion avec un décrochement important au niveau du thermocline, puis une descente sensiblement verticale dans l'hypolimnion; mais une nouvelle inflexion vers la partie profonde de celui-ci, manifeste la mise en liberté de quantités non négligeables de phosphates à l'approche du fond par solubilisation du phosphate ferreux du sédiment (nous sommes à la fin de la stagnation estivale avec, dans l'eau, une teneur affaiblie en oxygène).

On peut, dès lors, dresser le tableau de la répartition des phosphates dans les trois zones thermiques superposées durant la stratification estivale; c'est ce que nous faisons au tableau CXXXII.

TABLEAU CXXXII

Moyennes et extrêmes de la teneur en phosphates (phosphore total) de l'eau de la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1960 et 1961, exprimés en mg PO₄'''/lit.

	1960	1961	1960-1961
<u>Epilimnion</u>			
Moyenne	0,039	0,036	0,038
Extrêmes	0,025 0,054	0,008 0,075	0,008 0,075
Dates	4.VII 31.VIII	2.VIII 4.VII	2.VIII.61 4.VIII.61
Amplitude	0,029	0,067	0,067
<u>Métalimnion</u>			
Moyenne	0,040	0,034	0,037
Extrêmes	0,030 0,060	0,010 0,086	0,010 0,086
Dates	19.VII 31.VIII	29.VIII 27.VI	29.VIII.61 27.VI.61
Amplitude	0,030	0,076	0,076
<u>Hypolimnion</u>			
Moyenne	0,039	0,031	0,035
Extrêmes	0,026 0,061	0,011 0,053	0,011 0,061
Dates	12.VII 17.V	29.VIII 17.X	29.VIII.61 17.V.60
Amplitude	0,035	0,042	0,050

Nos observations ne portent que sur deux ans, période insuffisante pour tirer des conclusions générales sur la variation de la teneur en phosphates dans le lac. Aussi nous contenterons-nous d'observer que la teneur moyenne baisse de 1960 à 1961 dans chacune des trois zones superposées; or, ces deux années sont suffisamment différentes du point de vue météorologique pour qu'il soit possible d'imputer cette diminution à la différence des conditions atmosphériques d'une année à l'autre. Il faut disposer d'une plus longue série d'observations pour voir si la teneur en phosphates a tendance à varier de façon continue au cours des ans.

Pour la période 1960-1961, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion accuse les valeurs suivantes :

moyennes: 1,08 : 1,06 : 1,00 ; amplitudes: 1,34 : 1,52 : 1,00.

Ce rapport est susceptible de changer lorsqu'on disposera d'une plus longue série de dosages.

39.2. Les phosphates aux stations A à P'.

Nous ne prenons que les résultats de 0 à 40 m de profondeur pour le tableau CXXXIII, de manière à obtenir des données comparables à celles des autres ions décrits précédemment. Dans ce tableau, les extrêmes sont soulignées à chaque profondeur.

TABLEAU CXXXIII
(cf. page suivante)

TABIEAU CXXXIII

Moyennes et extrêmes de la teneur en phosphates (phosphore total) aux stations A à P' pendant les années 1957 à 1960 et exprimés en mg PO₄'''/lit.

	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
<u>Moyennes</u>					
Avril	0,041	0,047	0,048	0,042	0,044
Juin	<u>0,119</u>	<u>0,085</u>	<u>0,061</u>	<u>0,073</u>	<u>0,046</u>
Août	0,043	<u>0,034</u>	0,040	0,037	<u>0,031</u>
Septembre	<u>0,036</u>	0,036	<u>0,035</u>	<u>0,032</u>	<u>0,031</u>
Octobre	0,041	0,041	0,042	0,036	0,038
Amplitude	0,083	0,051	0,026	0,041	0,015
<u>Extrêmes</u>					
Minimum	0,007	0,010	0,015	0,008	0,015
Station	P'	B'	B'	A	-
Date	29.IV.58	27.II.58	29.IX.59	27.VIII.57	-
Maximum	0,400	0,200	0,150	0,120	0,075
Station	K	K	M	M	A
Date	25.VI.57	25.VI.57	24.VI.58	25.VI.57	29.IV.58
Amplitude	0,393	0,190	0,135	0,112	0,060

Pour les 11 stations et la période quadriennale considérée, les teneurs maxima en phosphates se présentent en juin à toutes les profondeurs jusqu'à 40 m, soit au début de la décalcification estivale, comme le montrent les figures 127 à 130 et 137 à 138. Par contre, les minima se répartissent en août et septembre, influencés par les conditions météorologiques des années en question.

Les extrêmes absolus (0,031 et 0,119) des moyennes de ce tableau encadrent ceux des moyennes à la station Z. Ceux des extrêmes coïncident avec ceux de Z pour les minima, mais les dépassent pour les maxima.

Il n'y a pas de station préférentielle quant à la répartition des extrêmes de A à P'.

39.3. Les phosphates des affluents du lac.

Pour examiner séparément l'eau amenée par le canal de la Broys, nous établissons le tableau CXXXIV ci-dessous.

TABIEAU CXXXIV

Teneur en phosphates (phosphore total) de l'eau du canal de la Broye, déterminée à la Sauge pour la période 1957-1960 et exprimée en $\text{mg PO}_4^{'''}/\text{lit.}$

	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	0,095	0,174	0,190	0,146	0,151
Minimum	0,070	0,080	0,070	0,050	0,050
Date	28.VIII	29.X	21.V	27.X	27.X.60
Maximum	0,140	0,300	0,480	0,400	0,480
Date	30.X	1.X	26.VIII	18.V	26.VIII.59

Les extrêmes de la teneur en phosphates de l'eau du canal de la Broye chevauchent partiellement ceux de l'eau du lac, le maximum de cette dernière étant compris entre les extrêmes de la Broye.

Le tableau suivant (CXXXV) se rapporte aux phosphates de l'eau des autres affluents du lac.

TABIEAU CXXXV

Teneur en phosphates (phosphore total) de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960, exprimée en $\text{mg PO}_4^{'''}/\text{lit.}$

Affluent	Moyenne	Minimum	Date	Maximum	Date
Le Broye	0,146	0,050	27.X	0,400	18.V
Le Seyon	0,930	0,250	27.X	1,300	20.VII
La Serrière	0,193	0,045	27.X	0,325	18.V
L'Arsuse	0,148	<u>0,020</u>	23.III	0,425	14.IX
La Raisse	<u>0,090</u>	<u>0,020</u>	23.III	0,250	14.IX
L'Arnon	0,503	0,240	23.III	1,025	14.IX
La Brine	0,441	0,140	25.IV	1,230	27.X
Le Bey	0,508	0,118	23.III	0,896	14.IX
Le Muijon	15,680	0,204	25.IV	<u>29,400</u>	20.VII
L'Orbe-Thièle	0,306	0,170	23.III	0,440	18.V
Le Canal oriental	1,277	0,150	25.IV	2,780	17.VI
Le Buron	2,739	0,240	23.III	9,000	18.V
La Mentue	0,578	0,136	23.III	0,920	27.X

Le caractère d'égout urbain apparaît nettement dans ce tableau pour le Seyon, le Muijon, le Canal oriental et le Buron, tandis qu'on peut classer dans la catégorie des affluents ruraux chargés d'engrais, l'Arnon, la Brine, le Bey, l'Orbe-Thièle et la Mentue. Le minimum de la Ralsée correspond à la teneur en phosphates considérée comme naturelle dans les eaux douces calcaïques.

Le maximum des quantités de phosphates décelées dans l'eau du lac aux stations A à P' de 1957 à 1960 est situé entre la plus basse et la plus haute des moyennes des affluents. Parmi les treize de ceux-ci qui forment le tableau CXXXV, huit accusent une moyenne qui dépasse le maximum trouvé dans le lac. Les quantités de phosphore amenées par les affluents sont considérables et seule l'absence d'indications concernant le débit de ces affluents nous empêche de calculer le tonnage de phosphates déversé chaque année dans notre lac.

39.4. Comparaison avec d'autres lacs.

Rivier (1936) trouve davantage de phosphates dans les couches profondes que dans les couches superficielles du lac de Morat, surtout à la fin de l'été, mais sans préciser ces teneurs. L'BAWAG (1960) donne pour les extrêmes de 1954-1955 : 0,031 et 0,582 mg $\text{PO}_4^{'''}$ /lit., ce qui correspond à la valeur de notre lac pour le minimum, mais la dépasse de 45% pour le maximum.

Dans le Bodan (Obersee), les phosphates ne sont pas décelables en 1934 (Fast 1960) et le sont rarement en 1935 (Grimm, 1956); de 1950 à 1952, on en trouve de 0,002 à 0,003 mg/lit en permanence entre 150 m et le fond (Grimm), mais en 1960 (Fast) jusqu'à 0,010 mg $\text{PO}_4^{'''}$ /lit. grâce à l'apport toujours plus massif de produits détersifs comportant des phosphates comme adjuvants. Il y a donc un changement quantitatif très marqué en trente ans.

Enfin, pour le Léman, Monod (1960) signale que la teneur en phosphates augmente de 50% de 1950 à 1959.

Nous avons vu déjà (Hubault, 1943) qu'en présence de phosphates autochtones, ceux-ci sont d'autant mieux et plus vite assimilés que leur teneur est plus faible et que la calcitrophie du lac est plus marquée. Or, bien que le lac de Neuchâtel soit mésotype alcalitrophe, à teneur en calcium relativement élevée, les quantités de phosphates qu'on décèle maintenant dans ses eaux dépassent nettement les teneurs naturelles auxquelles le caractère chimique du lac permettrait qu'on s'attende. Les phosphates décelables actuellement sont donc allochtones en majorité et en quantité non négligeable due, en particulier, à l'apport des affluents comme le tableau CXXXV le fait voir.

Notre lac n'étant pas situé dans une région moins habitée et cultivée que le Bodan et le Léman pour lesquels nous avons la preuve d'une augmentation de la teneur en phosphates et les affluents provoquant un apport continu de ces produits, d'une part, bien que nous ne disposions d'aucun dosage ancien de phosphates, d'autre part, nous pouvons dire que les quantités de phosphore total décelées actuellement

dans notre lac ne sont pas entièrement autochtones et témoignent d'une eutrophisation de l'eau du lac du fait de l'apport de matières polluatives.

40. Le silicium dans l'eau.

La silice tient un rôle important dans l'évolution de l'eau des lacs. Elle provient soit des terrains du bassin lacustre lessivés par l'eau de pluie dont le CO_2 est agressif, soit de la dissolution des silicates contenus dans les sédiments du lac.

Le plus important des travaux modernes montrant l'importance de la silice pour le phytoplancton est celui d'Einsele et Grim (1938). Ces auteurs arrivent, à partir de l'étude de 15 espèces de diatomées, à déterminer la quantité de Si contenue en moyenne dans chaque individu; cette quantité peut varier de 45.10^{-9} mg Si pour *Asterionella* à $15.000.10^{-9}$ mg Si pour *Cyclotella bodanica*, par exemple. Quoique ces quantités soient extrêmement faibles (le nombre d'individus nécessaires pour réunir 1 mg de Si varie, suivant les espèces, de 70'000 à 22'000'000), Einsele et Grim montrent que l'on obtient facilement 0,300 à 1,500 mg Si/lit. en zone trophogène dans des lacs contenant 48 à 100 mg Ca par litre d'eau. La silice tient un rôle primordial dans l'existence des diatomées; ayant déjà un poids spécifique supérieur à celui de l'eau, les diatomées dont la membrane absorbe de la silice s'alourdissent et leur pouvoir sustentatoire change.

D'après les travaux de Round (1960), le Si se trouve dans l'eau des lacs sous forme d'orthosilicate non dissocié, probablement SiO_4Ca_2 , utilisable directement par les diatomées. Mais Hutchinson (1957) signale que Si se rencontre également sous forme de silicoaluminates attaquables par les diatomées benthiques et que l'assimilation, par celles-ci, de la silice à l'état dissous a lieu selon un procédé aérobie nécessitant la présence de groupes sulphydryles hydrosolubles dans la membrane de l'algue.

Enfin Joergensen (1955 a, b et 1957) met en évidence les différences de solubilité de la silice suivant sous quelle forme elle est contenue dans les diatomées et suivant le pH de l'eau. Il fait voir aussi l'influence que la concentration en Si de l'eau ambiante a sur la croissance des diatomées, car, lorsque les cellules sont trop rapprochées parce que le nombre des individus est trop grand, la concentration trop élevée en Si provoque l'élaboration, par les cellules, d'une substance capable d'inhiber l'assimilation de nouvelles quantités de Si.

Quant à Stangenberg (1961), ses recherches montrent qu'il n'y a pas de corrélation entre Si et PO_4''' en général.

Tous nos résultats seront exprimés en mg Si par litre d'eau.

40.1. Le silicium à la station Z.

A partir des sondages hebdomadaires effectués à cette station, nous dressons le tableau CXXXVI donnant les teneurs moyennes et extrêmes en Si entre 0 et 100 m de profondeur.

TABLEAU CXXXVI

Moyennes et extrêmes de la teneur en Si à la station Z, de la surface au fond durant les années 1958 à 1961 et exprimés en mg Si/lit.

<u>Moyennes</u> <u>(0-100m)</u>	1958*	1959	1960	1961	1958-1961
Moyenne	0,444	0,535	0,478	0,551	0,517
Minimum	0,235	0,330	0,077	0,199	0,077
Date	29.X	28.X	2.III	2.VIII	2.III.60
Maximum	0,584	0,841	0,848	0,863	0,863
Date	25.XI	3.III	19.I	19.XII	19.XII.61
<u>Extrêmes ins-</u> <u>stantanés.</u>					
Minimum	0,196	0	0,015	0,007	0
Date	29.X	21.VIII	26.VIII	27.VI	21.VIII.59
Profondeur	5	0	0	20	0
Maximum	1,098	1,370	1,216	1,505	1,505
Date	25.XI	15.XII	27.XII	11.VII	11.VII.61
Profondeur	100	100	100	10	10

* = année incomplète.

La teneur en Si varie, en quatre ans, de 0,107 mg/lit, soit de 20,7% de la valeur moyenne quadriennale. L'amplitude des moyennes atteint 0,786 mg/lit soit 152% de la moyenne 1958-1961. L'année 1958 mise à part parce qu'incomplète, les minima se présentent fin août et les maxima dans la seconde moitié de décembre, à l'exception de 1961 où des circonstances thermiques particulièrement extraordinaires provoquent le minimum absolu de l'année le 27 juin et le maximum absolu, aussi bien de l'année que de la période, le 11 juillet. Les profondeurs correspondant à ces extrêmes sont les couches superficielles (0 et 5 m) pour les minima et le fond (100 m) pour les maxima, 1961 faisant exception avec 20 et 10 m respectivement. Nous reviendrons tantôt sur cette exception.

Voyons maintenant avec quelle fréquence les extrêmes instan-

tanés se présentent aux diverses profondeurs de la station Z; ce sera le rôle du tableau CXXXVII.

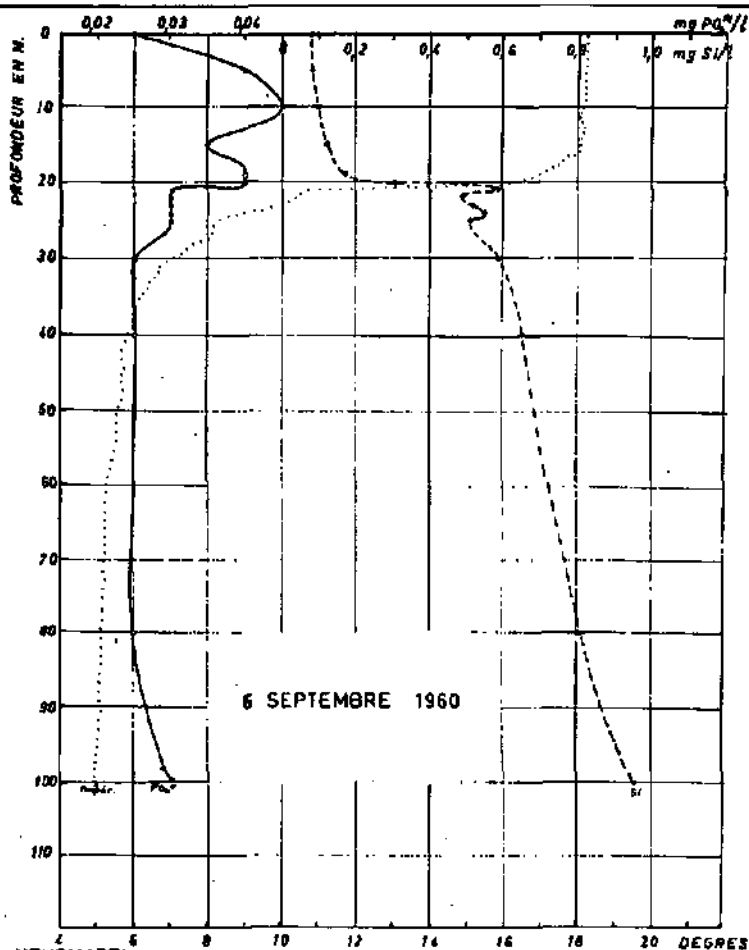
TABLEAU CXXXVII

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés de la teneur en Si se rencontrent à diverses profondeurs de la station Z, durant les années 1958 à 1961, exprimée en pour-cents des déterminations effectuées.

<u>Profondeur en mètres</u>		1958	1959	1960	1961	1958-1961
Minimum	0	0	28	40	27	23,8
	5	40	39	19	27	31,3
	10	0	15	8	8	7,8
	15	20	4	19	12	13,8
	20	20	4	6	12	10,5
	25	20	2	6	4	6,0
Maximum	20	20	0	2	0	5,5
	80	20	18	12	8	14,5
	100	60	76	75	89	75,0

Il apparaît clairement que la teneur minimum en Si se rencontre le plus souvent à 5 m de profondeur vers le milieu de la zone trophogène, mais souvent aussi près de la surface. Par contre, le maximum est toujours situé à 100 m de profondeur.

La variation de la teneur en Si au cours de l'année peut être suivie sur les figures 140 à 142 qui donnent les courbes des profondeurs 0, 5, 10, 20, 30, 40, 80 et 100 m. D'une manière générale, toutes les courbes sont très proches l'une de l'autre en janvier et février, sauf quelques minimes fluctuations accidentelles imputables à l'action de courants qui déplacent de l'eau dont la concentration en Si est un peu différente (c'est le cas à 40 m au début de février 1961). Début mars, dès que l'intensité lumineuse est suffisante, les diatomées croissent rapidement, absorbant de grosses quantités de silice, de sorte que les courbes des couches supérieures descendent fortement pour atteindre des valeurs très basses en mai; c'est le cas en 1959 et 1961, tandis qu'en 1960 le manque d'insolation retarde à fin juin le moment où ces basses valeurs sont atteintes. Les courbes de 0, 5 et 10 m sont les plus affectées par cette baisse, celles de 20 et 30 le sont nettement moins et celles de 40 m le sont très peu, tandis que celles de 80 et 100 m n'accusent qu'une faible descente fin juillet-début août. L'immobilisation de la silice par les diatomées, responsable du déplacement des courbes en question, se maintient durant tout le printemps et tout l'été. C'est seulement au début d'octobre que s'amorce la remontée qui se poursuit jusqu'à fin novembre ou début décembre, après quoi, très rapidement toutes les courbes tendent à se



LAC DE NEUCHÂTEL

STATION 2 : BAIE D'AUVERNIER

TEMPERATURE DE L'EAU, PHOSPHORE TOTAL ET SILICE

Fig.139.

Fig.140.

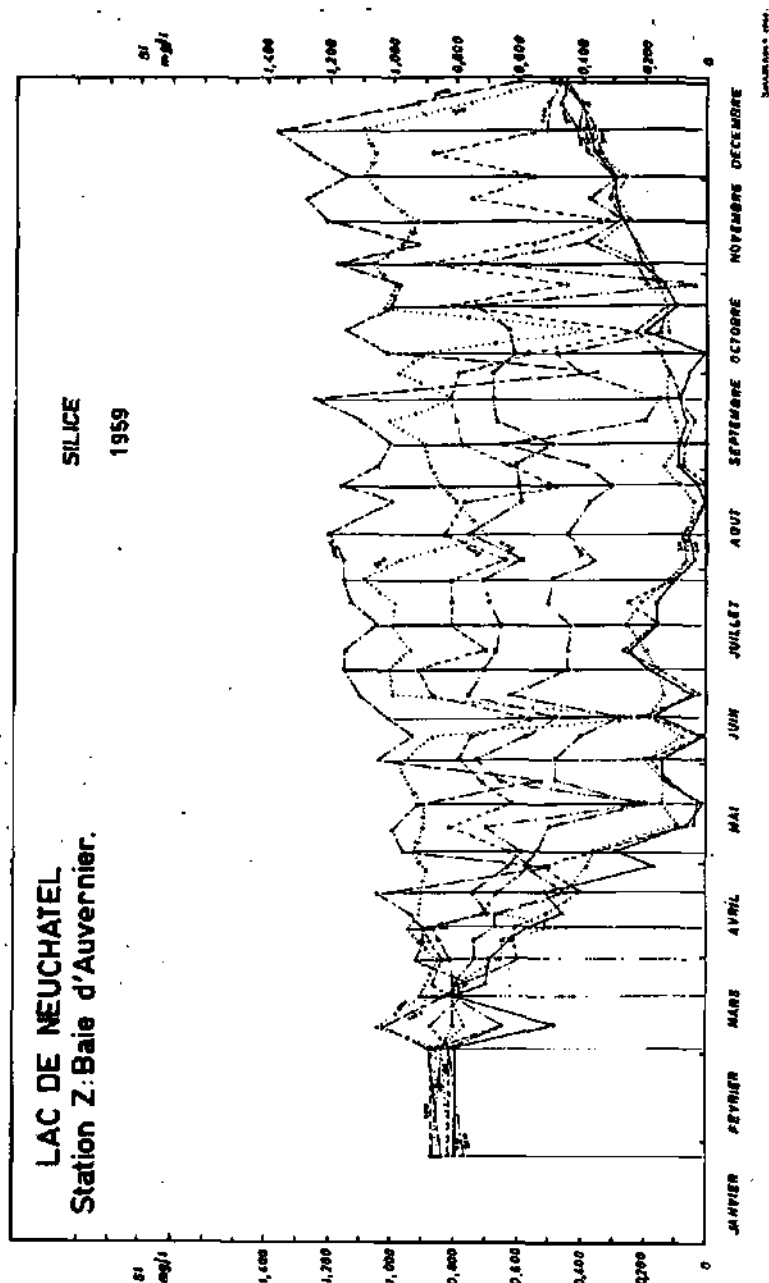


Fig.141.

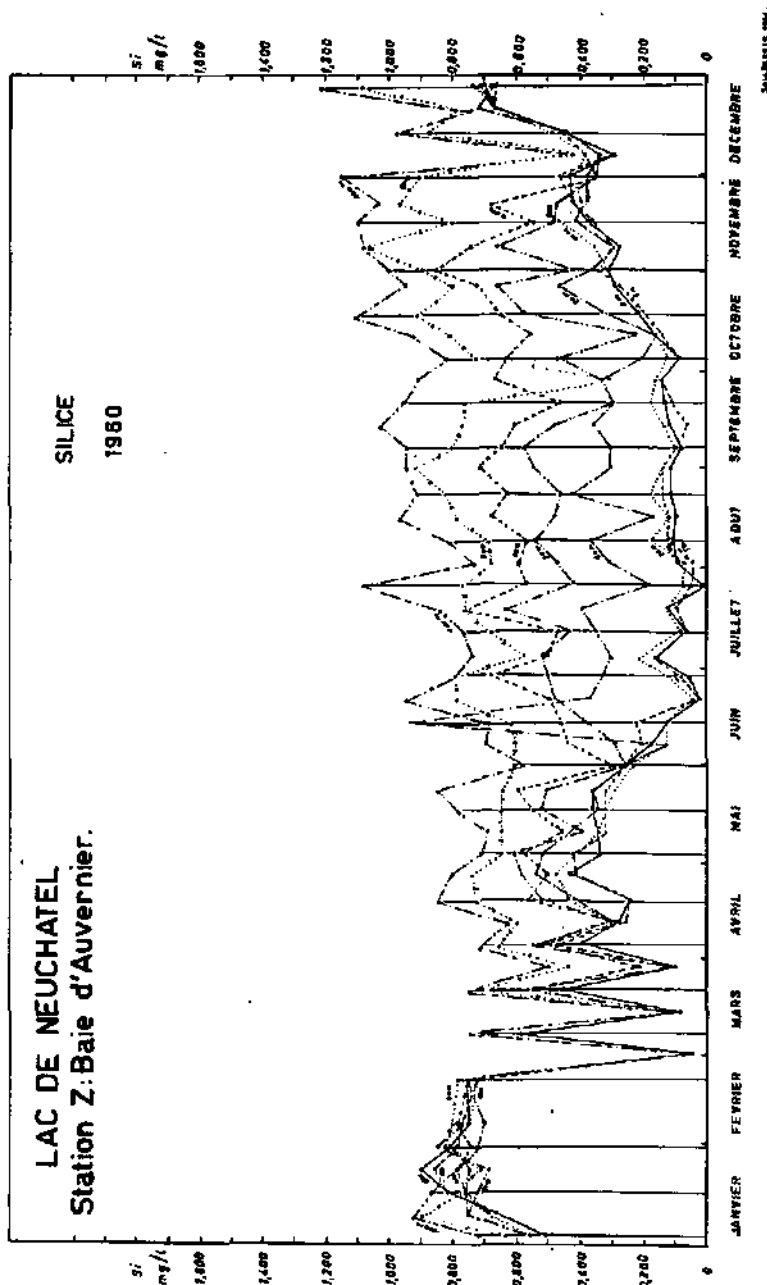
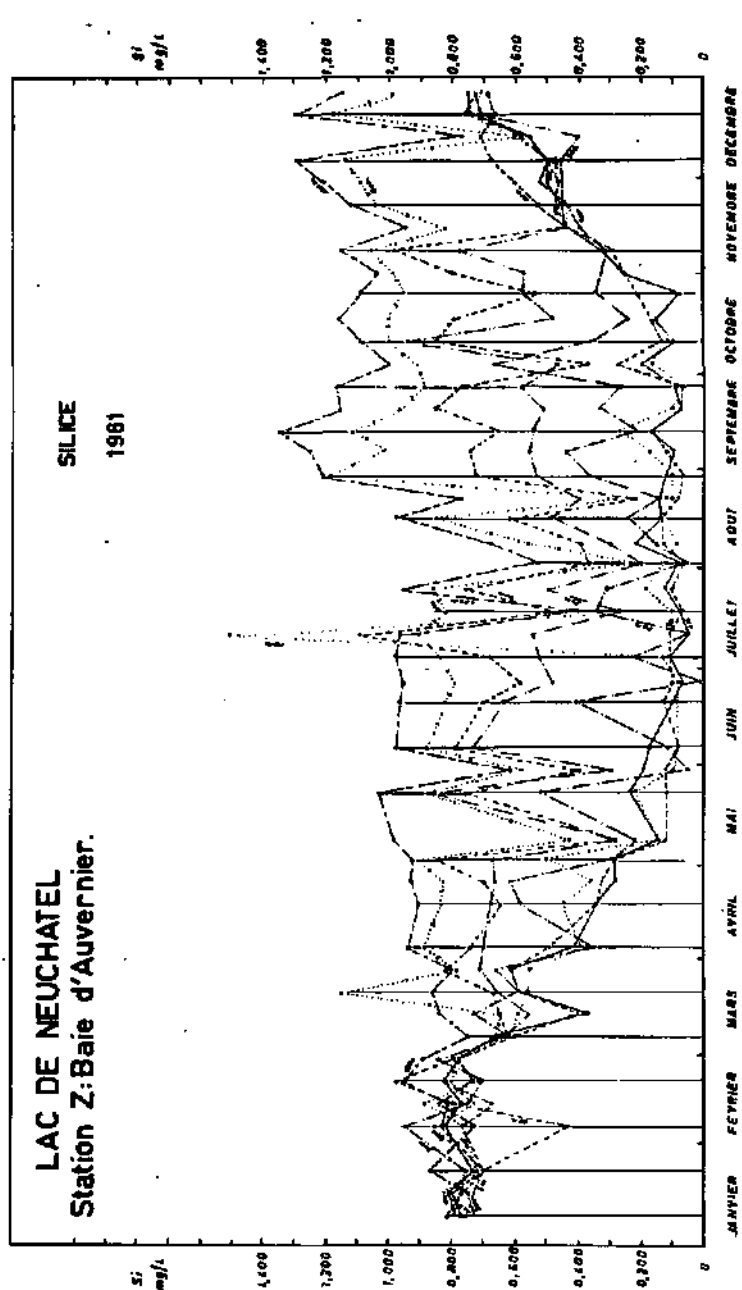


Fig.142.



rejoindre pour reprendre l'aspect qu'elles avaient en janvier et février.

Dans l'ensemble, les courbes de 1960 sont moins étalées que celles de 1959 et 1961, ce qui tient au caractère météorologique anormal de cette année. Les fluctuations particulièrement marquées de mars 1960 sont dues au brassage provoqué par plusieurs fortes tempêtes de vent d'ouest. Celles de fin mai et du début d'août 1961 résultent de l'action courte mais forte du vent d'est dans le premier cas, du vent d'ouest dans le second.

Il est évident qu'à un étalement pareil des courbes du printemps à l'automne doit correspondre une répartition variable de la teneur en Si en fonction de la profondeur. C'est ce qui apparaît bien sur la figure 139 montrant la situation le 6 septembre 1960. A une teneur peu variée dans l'épilimnion succède une brusque variation correspondant au thermocline, ainsi que des zigzags dans le métalimnion. Au-delà, dans l'hypolimnion, la variation est faible, mais régulièrement croissante en se rapprochant du fond. Cette situation choisie comme type représentatif de toute la période de stratification thermique montre qu'au saut thermique correspond et au même niveau que lui, un "saut de la teneur en silicium", attestant du même coup qu'à cet endroit la teneur en diatomées vivantes diminue brusquement, libérant du Si. Binsele et Grim (1938) montrent non seulement que la teneur des diatomées en Si est une fonction de l'âge des individus, mais qu'en eau calme toutes les diatomées tombent vers le fond, tandis que dans les couches turbulentes leur pouvoir sustentatoire est nettement augmenté.

Dans l'épilimnion, la turbulence est le résultat du réchauffement des couches d'eau, ce qui fait remonter les diatomées vers la surface, compensant plus ou moins bien le nombre de celles qui sédimentent. C'est à la profondeur où cesse cette remontée due à l'échauffement de l'eau que s'accumulent les algues les plus légères qui y forment alors un véritable barrage que seuls les individus à poids spécifique, autrement dit à teneur en Si maximum, peuvent franchir. Il en résulte une accumulation d'individus dont une partie produit la substance inhibitrice de l'assimilation silicique dont nous avons parlé déjà. Ces individus ne tardent pas alors à mourir, libérant de la silice par dissolution dans l'eau. C'est pourquoi l'écart de la courbe de Si est tellement marqué précisément au niveau du thermocline. Cette constatation matérialise une fois de plus l'effet de barrage réel que constitue l'existence du saut thermique et ses répercussions aussi bien sur le chimisme de l'eau que sur le biotope lacustre, de même que sur l'écologie hydrobiologique en général.

Le tableau CXXXVIII donne la répartition de la teneur en Si entre les trois zones thermiques superposées durant la stratification du lac.

TABLEAU CXXXVIII

Moyennes et extrêmes de la teneur en silicium de l'eau de la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique des années 1959 à 1961, exprimées en mg Si/lit.

	1959		1960		1961		1959-1961	
<u>Épilimnion</u>								
Moyenne	0,133		0,150		0,146		0,143	
Extrêmes	0	0,702	0,023	0,361	0,054	0,250	0	0,702
Dates	21.VIII	23.III	21.VI	19.V	27.VI	18.IV	21.VIII.59	23.III.59
Amplitude	0,702		0,338		0,186		0,702	
<u>Métalimnion</u>								
Moyenne	0,291		0,323		0,320		0,311	
Extrêmes	0,039	0,570	0,093	0,526	0,077	0,818	0,039	0,818
Dates	12.V	21.X	21.VI	23.VIII	27.VI	25.X	12.V.59	25.X.61
Amplitude	0,531		0,433		0,741		0,779	
<u>Hypolimnion</u>								
Moyenne	0,752		0,596		0,677		0,675	
Extrêmes	0,380	0,891	0,329	0,873	0,336	0,994	0,329	0,994
Dates	19.V	21.X	7.VI	11.X	2.VIII	7.XI	7.VI.60	7.XI.61
Amplitude	0,511		0,544		0,658		0,665	

Pour cette période, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion accuse les valeurs suivantes :

moyennes: 1,00 : 2,19 : 4,72 ; amplitudes: 1,06 : 1,17 : 1,00 ; il y a donc, dans le métalimnion, une teneur en Si double et dans l'hypolimnion une teneur presque quintuple de celle de l'épilimnion.

Les variations des moyennes et des amplitudes d'une année à l'autre ne semblent pas ordonnées; cependant, nos résultats ne sont basés que sur une période triennale et on peut s'attendre, en prolongeant les recherches plusieurs années encore, à trouver des variations plus ordonnées ou dépendant de conditions météorologiques générales annuelles.

La figure 93 illustre la différence qui existe entre les teneurs en Si des trois zones thermiques superposées, ainsi que la variation de ces teneurs au cours de l'année. Le point le plus remarquable de cette figure est la montée très rapide de la courbe du métalimnion fin septembre 1961; en cet automne extraordinairement chaud et après une reprise de leur prolifération durant l'été qui s'achève, une chute

brusque du nombre des diatomées correspond à cette hausse tout aussi brutale de la teneur en Si, conséquence d'une mort massive d'individus planctoniques comme le montre la courbe d'ensemble de ces organismes sur la figure 79. Ainsi, à des circonstances météorologiques extraordinaires, du point de vue température surtout, correspond une variation extraordinaire de la teneur en Si dans le métalimnion.

Nous ne pouvons pas dresser un tableau des teneurs en Si aux stations A à P, car toutes n'ont pas fait l'objet de cette détermination. Il en est de même des affluents du lac.

Nous ne possédons qu'une seule donnée ancienne sur la teneur de l'eau en Si: celle de Zender (1908) et qui est de 2,5 mg Si/lit. Il s'agit d'une détermination sur un échantillon d'eau profonde (70 m), mais à une date inconnue. Cette valeur correspond au maximum instantané enregistré à Z lors de nos recherches actuelles. Fais comme la précision de la méthode de dosage d'alors était moins bonne que celle utilisée dans nos travaux, en particulier en ce qui concerne l'élimination des ions PO_4^{3-} , on peut admettre que la valeur trouvée par Zender s'approche par excès de notre maximum à Z. Faute d'indications plus précises, nous nous contentons d'admettre qu'en 1908 la teneur en Si de l'eau profonde de notre lac était du même ordre de grandeur que maintenant.

40.2. Comparaison avec d'autres lacs.

Les dosages en Si dans les eaux douces naturelles ne sont pas nombreux. Rivier (1936) se borne à indiquer pour le lac de Morat qu'en fin d'été les couches profondes sont les plus riches et les superficielles les plus pauvres en Si. Par contre, pour le même lac, l'EAUAG (1960) obtient, lors de la campagne 1954-1955 les teneurs suivantes en mg Si/lit : 0,046 en surface et 1,634 à 40 m en juillet, mais 1,400 en surface et 4,200 à 40 m en décembre.

Selon Stangenberg (1961), Kubault donne comme teneur moyenne 1,63 mg Si/lit pour le Léman et 1,91 pour le lac du Bourget, soit 3 et 4 fois plus que la teneur moyenne obtenue pour Neuchâtel lors de nos recherches, tandis que Corbella obtient 0,06 à 7,1 pour le Lago Maggiore et Werescagin 0,37 pour le lac Peipus (URSS).

Ajoutons encore que nous n'avons pas trouvé jusqu'ici et dans les travaux touchant d'autres lacs, mention de dépôts de silice comme Amann (1921) en a observé au microscope sous forme de lamelles déposées sur du bois immergé longtemps dans notre lac dans la région de St-Blaise.

41. Ions divers.

41.1. Sulfates, chlorures et fer total dans l'eau.

Ces trois ions accusent des teneurs relativement faibles dans la plupart des lacs d'eau douce et semblent relativement peu affectés par l'augmentation de la pollution.

Ces ions sont peu étudiés en général et le seul travail un peu approfondi qui s'y rapporte est celui de Ohle (1934) duquel il résulte que la teneur en sulfates tend souvent à augmenter avec l'eutrophisation alors que le fer doit être considéré comme facteur minimum pour les lacs oligotrophes.

Nous ne nous occuperons, dans le présent travail, que de la teneur totale en fer, sans distinguer Fe^{II} et Fe^{III} l'un de l'autre.

41.1.1. Les sulfates, les chlorures et le fer total aux stations A à P.

Aucune détermination de ces ions n'a été faite à la station Z. C'est pourquoi nous groupons dans le tableau CXXXIX les résultats se rapportant uniquement aux stations A à P et aux niveaux habituels, tout en renonçant à reporter les moyennes mois par mois, étant donné les trop faibles variations de ces moyennes.

TABLEAU CXXXIX

(cf. page suivante)

TABLEAU CXXXIX

Moyennes et extrêmes des teneurs en sulfates, chlorures et fer total aux stations A à P' pendant les années 1957 à 1960 et exprimées en mg par li

SO ₄	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
Moyennes	12,90	13,12	12,98	13,01	12,62
Minimum	0	0	5,5	5,0	7,0
Station	B' et C	B'	A	A	B'
Date	29.X.57	29.X.57	26.XII.57	26.XII.57	26.XII.57
Maximum	27,0	34,0	31,0	29,0	26,0
Station	N	K	N	N	N
Date	27.X.59	24.VI.58	27.X.59	27.X.59	27.X.59
Amplitude	27,0	34,0	25,5	24,0	19,0
Cl'					
Moyennes	4,18	4,15	4,16	4,09	4,09
Minimum	3,0	3,0	2,5	3,0	3,0
Station	A	E'	D	A	A
Date	27.VIII.57	29.X.57	26.VIII.58	27.VIII.57	25.VI.57
Maximum	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5
Station	K	D	D	M	N
Date	28.X.58	30.VIII.60	30.VIII.60	28.X.58	28.X.58
Amplitude	2,5	2,0	2,5	2,5	2,5
Fe total					
Moyenne	0,047	0,045	0,049	0,042	0,043
Minimum	0	0	0	0	0
Maximum	0,120	0,170	0,350	0,280	0,100
Station	K	K	M	M	N
Date	27.VIII.57	27.VIII.57	26.VIII.58	26.VIII.58	28.IV.59
Amplitude	0,120	0,170	0,350	0,280	0,100

Les minima de la teneur en fer total se présentent à toutes les stations et de très nombreuses fois; c'est pourquoi ils ne sont pas mentionnés de manière plus explicite.

Entre la surface et 40 m de profondeur, l'amplitude des moyennes est de 0,50 mg $\text{SO}_4^{''}$ /lit, représentant 3,9 % de la valeur moyenne des 5 niveaux; pour les chlorures, cette amplitude est de 0,09 mg $\text{Cl}^{\prime}$ /li et pour le fer total de 0,007 mg Fe/lit, représentant 2,2% et 15,5% des valeurs moyennes respectives aux 5 niveaux considérés.

Les amplitudes des extrêmes instantanés apparaissent désordonnées, vraisemblablement parce que les observations ne portent pas sur une durée suffisante.

41.1.2. Les sulfates, les chlorures et le fer total des affluents du lac.

Par analogie avec ce qui s'est fait précédemment, nous examinons séparément les résultats concernant la Broye et ceux des autres affluents.

TABLEAU CXL
(cf. page suivante)

TABEAU CXL

Teneurs en sulfates, en chlorures et en fer total de l'eau du canal de la Broye à la Sauge pour la période 1957-1960 et exprimées en mg par lit.

<u>SO₄</u>	1957	1958	1959	1960	1957-1960
Moyenne	21,1	17,7	19,9	22,7	20,4
Minimum	19,5	10,0	10,6	19,4	10,0
Date	28.VIII	28.II	8.VII	27.IV	28.II.58
Maximum	23,5	23,1	28,2	26,5	28,2
Date	26.VI	4.XII	2.XI	23.III	2.XI.59
<u>Cl'</u>					
Moyenne	9,3	9,1	10,3	10,7	9,9
Minimum	9,0	8,0	9,5	10,0	8,0
Date	26.VI	28.II	29.IV	27.IV	28.II.58
Maximum	9,5	10,0	11,0	11,5	11,5
Date	30.X	30.IV	21.V	18.V	18.V.60
<u>Fe total</u>					
Moyenne	0,100	0,170	0,160	0,060	0,120
Minimum	0,060	0	0,020	0	0
Date	30.X	27.VIII	21.V	23.III	27.VIII.58
Maximum	0,150	0,780	0,380	0,220	0,780
Date	28.VIII	25.VI	26.VIII	18.V	25.VI.58

L'amplitude des moyennes de la période considérée est de 5,0 mg SO₄'/'lit, 1,6 mg Cl'/'lit et 0,110 mg Fe/lit représentant 24,5%, 16,2% et 91,6% de leurs moyennes quadriennales respectives.

Les moyennes enregistrées à la Broye sont supérieures à celles du lac pour les trois ions en question. L'amplitude des extrêmes instantanés de la teneur en sulfates est plus faible pour la Broye que pour le lac; par contre, elle est plus forte en ce qui concerne les chlorures et la teneur en fer total.

Dans le tableau CXLI, nous réunissons les moyennes et les extrêmes des trois ions pour les affluents principaux du lac et pour l'année 1960, sans indiquer les dates auxquelles les extrêmes se présentent,

ce qui ne présente que peu d'intérêt pour une si courte période d'observations. Dans ce tableau, les extrêmes absolus des moyennes et des extrêmes instantanés sont soulignés.

TABLEAU CXLI

Teneurs en sulfates, chlorures et fer total de l'eau des affluents principaux du lac de Neuchâtel en 1960, exprimées en mg par litre.

	Moyenne			Minimum			Maximum		
	SO ₄ ^{''}	Cl [']	Fe tot.	SO ₄ ^{''}	Cl [']	Fe tot.	SO ₄ ^{''}	Cl [']	Fe tot.
Le Broye	22,7	10,7	0,060	19,4	10,0	<u>0</u>	26,5	11,5	0,220
Le Seyon	13,7	11,3	0,090	11,0	8,5	<u>0</u>	18,2	14,5	0,210
La Serrière	17,2	2,6	0,040	11,8	<u>1,0</u>	<u>0</u>	28,2	5,0	0,110
L'Arsuse	9,7	<u>2,3</u>	<u>0</u>	7,5	1,5	<u>0</u>	11,9	3,5	0
La Raisse	<u>8,0</u>	3,5	<u>0</u>	<u>2,5</u>	1,5	<u>0</u>	9,9	5,5	0
L'Arnon	21,7	9,3	0,090	9,6	5,2	0,040	49,5	13,3	0,150
La Brine	32,3	16,1	0,220	25,6	12,4	0,060	48,0	19,2	0,480
Le Bey	51,6	14,4	0,200	42,0	12,0	0,130	70,5	18,0	0,480
Le Mujon	<u>101,2</u>	<u>32,6</u>	<u>1,100</u>	53,0	23,5	0,540	<u>163,0</u>	<u>41,5</u>	<u>1,900</u>
L'Orbe-Thièle	19,3	7,6	0,130	8,0	3,7	0,090	31,0	12,0	0,170
Le Canal-étien- tal	168,5	23,9	0,340	46,5	17,3	0,140	94,0	29,5	0,900
Le Buron	53,6	19,4	0,250	25,5	9,8	0,080	89,5	29,5	0,800
Le Mentue	21,7	18,2	0,230	14,5	11,9	0,060	34,0	37,0	0,800

Le caractère de collecteur d'égout du Mujon apparaît nettement dans ce tableau, tandis que la Raisse présente la charge la plus faible de ces 13 affluents. Les moyennes de la Raisse et de l'Arsuse pour les trois ions considérées sont les seules qui soient plus basses que celles du lac; tous les autres affluents contribuent à augmenter le taux des sulfates, des chlorures et du fer total de notre lac.

41.1.3. Comparaison avec d'autres travaux.

Lors de notre campagne précédente (Sollberger, 1946), nous n'avons pas dosé les sulfates, ni les chlorures et encore moins le fer total. Portner (1951a) ne donne pas non plus de renseignements à ce sujet.

Nous ne disposons, pour comparer nos travaux à ceux de périodes

antérieures, que des déterminations de Zender (1908) obtenues dans les conditions déjà mentionnées précédemment. Le fer, à cette époque, n'était présent qu'en traces; toutefois, cette définition peut tout aussi bien être imputable à la réalité qu'à une précision insuffisante de la méthode d'alors et pour laquelle aucun renseignement ne nous est parvenu. Quant aux sulfates, Zender en trouve à 70 m de profondeur: 9,95 mg/lit calculés en $\text{SO}_4^{''}$, alors que selon notre tableau CXXXIX il y en a 12,62 mg/lit à 40 m de profondeur et qu'à 100 m nous obtenons une moyenne de 11,9 mg/lit pour les stations A et B. Il semble donc que la quantité de sulfates contenue dans l'eau du lac a augmenté de 3,0 mg/lit, autrement dit de 30% en 52 ans, ce qui est parfaitement possible, étant donné l'accroissement de plus en plus rapide de la pollution des eaux ces dernières années.

Zender n'indique rien quant à la teneur en chlorures à l'époque de ses recherches. Nous n'avons, par conséquent, aucun point de comparaison pour nos résultats. Après avoir prolongé de plusieurs années encore nos observations pourrions-nous peut-être remarquer une tendance à l'augmentation des chlorures dans notre lac. Mais il est nécessaire aussi de se préoccuper de l'effet, sur l'eau du lac, du "salage" pratiqué par les Travaux Publics sur les routes de la région afin d'y accélérer la fonte de la neige. C'est ainsi que, par hiver, la ville de Neuchâtel épand 16 tonnes de ClNa et 14 tonnes de ClK sur les chaussées urbaines. Étant donné que l'ensemble de ces voies publiques est goudronné, on peut estimer que la presque totalité des chlorures épandus rejoint le lac lors de la fonte de la neige et par le ruissellement des pluies printanières, les quantités entraînées hors du périmètre urbain sont minimes, le trafic routier étant suffisamment restreint en hiver. Les 30 tonnes de sels utilisées correspondent à 16,4 tonnes d'ion Cl^- entraînables au lac. En divisant ces 16 tonnes par le volume du lac (13,77 km³), on obtient 0,0012 mg/lit qui représenterait l'augmentation de concentration en chlorures provoquée par le salage des voies publiques de Neuchâtel chaque hiver, si cet apport d'ions Cl^- se répartissait uniformément dans le lac. Cette valeur, à considérer comme minimum possible, est faible, mais susceptible d'être multipliée par un facteur supérieur à 1 si l'on tient compte que la pratique du salage s'étend à d'autres localités encore du bassin du lac, ainsi qu'aux routes interurbaines pour lesquelles nous ne possédons pas de renseignements précis malheureusement. Bien que l'apport au lac de chlorures allochtones par l'épandage de sel sur la voie publique paraisse minime, il n'en constitue pas moins, à la longue, une cause non négligeable d'accroissement du taux des ions Cl^- dans notre lac.

Quant à la teneur en fer, elle est très faible encore, mais tend à augmenter par l'apport des eaux usées amenées par certains affluents urbains à caractère d'égoût, dans le Haut-lac spécialement.

Nous pouvons essayer de comparer nos teneurs en sulfates, chlorures et fer total à celles mentionnées par Nydegger (1957) pour le lac de Thoun et qui figurent dans les données récentes se rapportant aux lacs suisses. C'est ainsi que cet auteur donne les valeurs extrêmes suivantes :

sulfates	6,0	et	43 mg $\text{SO}_4^{''}$ / lit
chlorures	0,1	et	1,4 mg Cl^- / lit
fer total	0	et	0,115 mg Fe / lit.

Grâce à ces résultats qui se rapportent à la période 1953-1954, le lac de Neuchâtel accuse, par rapport à celui de Thoune, des extrêmes plus bas pour les sulfates, une amplitude plus grande des extrêmes du fer et une teneur en chlorures plus élevée.

Enfin, Fast (1960) signale que dans le Bodan la teneur en chlorures n'a pas changé ces dernières années.

41.2. Sodium et potassium.

Nous avons exposé, au paragraphe 22, sous lettre Y, comment le dosage des ions alcalins est effectué dans l'eau de notre lac. Parmi les trois séries de déterminations effectuées, nous choisissons la suivante comme exemple (tableau CXLII) de dosage à la station Z.

TABLEAU CXLII

Teneurs en sodium et potassium à la station Z le 4 avril 1961, exprimées en mg par litre.

Profondeure en m.	Sodium	Potassium
0	2,80	1,57
10	2,86	1,50
20	2,86	1,52
40	3,01	1,64
80	2,73	1,43
100	2,79	1,45
Moyenne	2,84	1,52

Ces dosages sont obtenus en les comparant à une solution-étalon contenant Na^+ , K^+ et Ca^{++} en quantités à peu près correspondantes aux résultats escomptés. Le zéro est vérifié à l'aide d'une solution contenant chaque fois les deux ions non dosés.

Pour l'eau de notre lac, Zender (1908) avait obtenu: 0,3 mg Na/lit et 0,75 mg K/lit. Nous obtenons 9 fois plus de sodium et 2 fois plus de potassium que cet auteur. Cette différence peut fort bien être attribuée à la différence de précision entre les méthodes utilisées alors et celle à laquelle nous avons recours. Toutefois, un effet de la pollution croissante des eaux sur la teneur en ions alcalins n'est pas exclue non plus; seule une prolongation de ces recherches permettra peut-être de le prouver dans quelques années.

D'après les travaux de l'EAWAG (1960) pas encore publiés, la teneur en potassium de l'eau du lac de Morat se monte en moyenne à 3,3 mg K/lit, avec des extrêmes de 2,2 et 5,1 mg/lit. Ainsi, le lac de Morat serait deux fois plus riche en potassium que notre lac.

42. Récapitulation des caractéristiques chimiques et physicochimiques de l'eau à la station Z pour la période 1958-1961.

Nous réunissons dans le tableau CXLIII les moyennes et les extrêmes instantanés de toutes les déterminations faites à la station Z durant la période quadriennale de nos recherches. On a ainsi, pour cette station une vue d'ensemble des caractéristiques de l'eau du lac de Neuchâtel, basée sur un très grand nombre de données. Nous laissons de côté volontairement les résultats se rapportant aux stations A à P' répartis dans le texte précédent; nous estimons qu'une récapitulation de ces chiffres ne donne pas des valeurs suffisamment comparables à celles se rapportant à la station Z, car ils sont le résultat d'opérations bien moins nombreuses et chronologiquement bien plus espacées les unes des autres que pour la baie d'Auvernier; sans être dépourvus d'intérêt cependant, ces chiffres ne concernent aussi qu'un nombre restreint de niveaux et n'atteignent que deux fois sur douze les grandes profondeurs.

A côté des résultats relatifs à Z, nous faisons figurer dans notre tableau la liste des profondeurs auxquelles les extrêmes instantanés sont les plus fréquents, ainsi que les moyennes des différentes déterminations réparties selon les trois zones superposées durant la stratification thermique.

TABIEAU CXLIII
(cf. page suivante)

TABLEAU CXLIII

Récapitulation des mesures physico-chimiques et des dosages chimiques effectués dans l'eau de la baie d'Auvernier de 1958 à 1961.

Détermination		Minimum	Moyenne	Maximum	Profondeur		Stratification thermique		
					Min.	Max.	E	M	H
Température	1)	4,4	<u>9,0</u>	23,0	100	0	16,9	13,1	6,7
Transparence	2)	1,50	<u>5,47</u>	10,70	-	-	-	-	-
Couleur	2bis)	3	<u>6,0</u>	21	100	0	7	6	6
pH		7,10	<u>7,98</u>	8,50	100	5	8,07	7,94	7,88
Conductivité él.	3)	177	<u>222</u>	269	5	100	211	220	229
Dureté totale	4)	117,0	<u>141,7</u>	159,5	0	100	131,4	139,2	145,9
Dureté tempor.	4)	102,5	<u>124,6</u>	140,0	0	100	115,6	122,9	128,3
Dureté perman.	4)	6,5	<u>17,4</u>	29,5	20	100	15,6	16,4	17,6
Ammoniaque lib.	5)	0	<u>0,025</u>	0,20	100	10	0,04	0,035	0,03
Azotites (NO ₂ [*])	5)	0	<u>0,011</u>	0,080	80	0	0,024	0,018	0,007
Azotates (NO ₃ [*])	5)	0,8	<u>2,55</u>	4,0	0	100	1,7	2,1	2,65
Oxygène dissous	5)	5,70	<u>10,31</u>	15,70	20	5	10,26	9,13	9,82
Saturation d'O ₂	6)	56,4	<u>97,1</u>	162,0	100	0	115,1	95,6	87,9
D.B.O. (en O ₂)	5)	0	<u>0,94</u>	5,30	30	5	1,30	0,98	0,85
Rapp.DBO/O ₂ diss.	6)	0	<u>8,7</u>	28,6	100	0	11,6	10,4	8,2
Calcium (Ca ^{**})	5)	32,0	<u>46,4</u>	55,3	0	100	41,6	44,4	47,5
Magnésium (Mg ^{**})	5)	0,2	<u>6,1</u>	12,2	15	25	6,4	6,6	6,4
Rapp. Mg/Ca	6)	0,4	<u>33,2</u>	35,9	80	0	15,8	15,1	13,6
P total (PO ₄ ^{***})	5)	0,005	<u>0,039</u>	0,150	40	20	0,038	0,037	0,035
Silice (Si)	5)	0	<u>0,517</u>	1,505	5	100	0,143	0,311	0,675
Sulfates (SO ₄ ^{**})	5)	0	<u>12,69</u>	34,0	-	-	-	-	-
Chlorures (Cl [*])	5)	2,5	<u>4,095</u>	5,5	-	-	-	-	-
Fer tot. (Fe)	5)	0	<u>0,043</u>	0,350	-	-	-	-	-
Sodium (Na [*])	5)	-	<u>2,84</u>	-	-	-	-	-	-
Potassium (K [*])	5)	-	<u>1,52</u>	-	-	-	-	-	-

1) = degrés centigrades; 2)=mètres; 2bis) = mg Pt/litre; 3) = 10⁻⁶ mho.cm⁻¹ à 20°C.; 4) = mg CO₃Ca/lit; 5) = mg par litre; 6) = %.

E = épilimnion; M = métalimnion; H = hypolimnion. Par profondeur, il faut entendre la profondeur (en m.) à laquelle les minima et les maxima instantanés se rencontrent le plus souvent pour la période.

Pour comparer la composition ionique de l'eau du lac de Neuchâtel à celle d'autres lacs, nous utilisons la méthode préconisée par

Maucha (1932). Elle consiste à calculer tout d'abord les concentrations des divers ions en milliéquivalents, ce qui donne pour notre lac le tableau suivant dans lequel figurent également les proportions de chacun de ces équivalents par rapport à la somme des cations et des anions. C'est ainsi qu'est élaboré le tableau CXLIV.

TABLEAU CXLIV

Concentrations équivalentes des ions principaux de l'eau du lac de Neuchâtel à la baie d'Auvernier.

	Milliéquivalents	Proportions en %
Ca ⁺⁺	2,3200	77,72
Mg ⁺⁺	0,5008	16,78
Fe ⁺⁺	0,0015	0,05
Na ⁺	0,1235	4,14
K ⁺	0,0389	1,30
Cations	2,9847	99,99
Cl ⁻	0,1154	4,02
SO ₄ ^{''}	0,2641	9,20
CO ₃ H ⁻	2,4915	86,78
Anions	2,8710	100,00

A partir de ce tableau, la concentration relative de chacun de ces ions se représente, toujours selon Maucha de la manière suivante: Un polygone à 16 côtés, avant une aire totale de 200 mm² représente par sa surface l'ensemble des teneurs en ions de l'eau en question. La moitié gauche (= 100 mm²) est consacrée aux anions (100% = somme des anions); celle de droite aux cations (= 100 mm²). L'aire de chacune de ces moitiés est divisée à son tour en quatre secteurs égaux dont chacun représente une concentration de 25% des anions CO₃^{''}, CO₃H⁻, Cl⁻ et SO₄^{''} ainsi que des cations K⁺, Na⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺. La surface de chaque secteur se prolonge à l'extérieur du polygone si la proportion de l'ion en question dépasse 25%. Pour les détails de construction du polygone et des surfaces ioniques, nous nous permettons de renvoyer le lecteur à la description de Maucha (1932, p.83 et suiv.).

Les caractéristiques ioniques de l'eau du lac de Neuchâtel donnent la figure 143 sur laquelle nous reportons aussi les schémas se rapportant aux lacs suivants: Bodan (analyses diverses), Léman (indications analytiques de Monod, 1956, p.288), Balaton (Maucha, 1932, p.86) et Lunzer Untersee (Maucha, 1932, p. 86). D'après la figure 143, notre lac se rapproche du type du Lunzer Untersee, quoiqu'avec une teneur en Mg⁺⁺ plus marquée que ce dernier; il est moins proche du type Bodan à cause de la quantité notoire de sulfate que ce dernier accuse.

Chapitre douzième : APERÇU HYDROBIOLOGIQUE.

43. Les bactéries de l'eau.

Parmi les microorganismes contenus dans les eaux de lacs, les bactéries sont les plus répandues à tous les niveaux. Cependant, leur étude systématique est de date récente en limnologie.

Les premiers travaux complets sur ce sujet sont ceux de Kusnetsov (1939), ne rapportant aux deux lacs soviétiques Beloye (au N de Moscou) et Olubokoye (au N de Minsk) et concernant spécialement l'hypolimnion de ces lacs. Leur auteur montre que la respiration des bactéries hypolimniques est la principale consommatrice d'oxygène de ces biotopes.

On sait maintenant que la fixation de l'azote dans les eaux superficielles est due aux bactéries (Gambarian, 1958) et surtout (Rigler, 1956) que ces dernières sont responsables de la transformation et de la fixation rapides des phosphates inorganiques dissous. Dans ce dernier cas, le plancton participe également au phénomène et Pomeroy (1960) indique que la rapidité de cette fixation dépend, dans une très large mesure, du degré de développement ou de maturité de ces organismes; c'est ainsi, par exemple, qu'à l'époque de sa floraison, le plancton fixe beaucoup plus rapidement le P qu'en d'autres moments de l'année.

Si Dick, Skull et Armstrong (1960) prouvent que dans les régions de baignades, les 2/3 des bactéries sont rassemblées en un film superficiel, Corberi et Solaini (1960), grâce à une étude récente du Lago Maggiore, révèlent la présence d'une flore bactérienne à chaque niveau, même profond, mais en quantités plus grandes dans l'eau que dans les sédiments; les coliformes, eux, se répartissent irrégulièrement dans l'eau tout au long de l'année, mais se rencontrent plus fréquemment entre 0 et 50 cm de profondeur que plus bas.

Les études de Haranghy (1941) sur la flore bactérienne du Balaton prouvent l'effet inhibiteur du soleil sur le développement bactérien dans les lacs; l'action stérilisante des rayons ultra-violets à la surface contrecarre le développement des bactéries dont la plus grande quantité ne se rencontre pas à la surface elle-même, mais quelques mètres plus bas, l'absorption de l'ultra-violet étant rapide dans l'eau. Cet appauvrissement en microorganismes est combattu par l'action des vagues qui, sur le littoral tout spécialement, remettent en branle dans l'eau les bactéries déposées sur le fond.

Quant aux bactéries du sédiment lacustre, elles se trouvent à la surface de celui-ci surtout; leur quantité diminue rapidement au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans le sédiment où on atteint finalement un horizon stérile, ainsi que Lestockin (1945) le prouve par ses travaux consacrés au film de la surface des sédiments de nombreux lacs d'URSS.

Bien que le développement des études bactériologiques des eaux

douces soit récent, on constate déjà un changement considérable dans l'évolution bactérienne; Elster (1960) montre que la bactériologie limnologique actuelle n'est déjà plus celle des eaux potables, mais évolue de plus en plus rapidement vers celle des transformations naturelles d'eaux plus ou moins usées, autrement dit vers celle des phénomènes d'autoépuration des eaux.

Ceci revient à dire qu'en examinant les problèmes de la bactériologie lacustre, on touche directement à ceux de la pollution presque partout dans le monde. Parmi les travaux effectués dans ce domaine ces toutes dernières années, il faut citer ceux de Chambon et Giraud (1960, a, b, c et d) consacrés au rôle des détergents synthétiques. Ces auteurs prouvent que les alkylsulfates sont détruits relativement vite dans les eaux fluviales en stimulant, simultanément, la croissance et la respiration bactérienne, ce qui a pour effet d'augmenter la consommation d'oxygène, tandis que les alkylbenzènesulfonates sont remarquablement stables et résistants aux agents de dégradation biologique et, de ce fait, freinent l'autoépuration. De plus, ces derniers favorisent la croissance de bactéries spécifiques des eaux usées, de sorte qu'en eaux courantes comme en eaux de lacs, la persistance et même l'accroissement des germes fécaux et anaérobies se trouvent favorisés. Enfin, le caractère toxique de ces mêmes détergents n'est pas négligeable à l'égard de la flore algale.

Dans notre travail consacré essentiellement à des problèmes chimiques et physicochimiques, nous nous bornons à mentionner les recherches relativement rudimentaires auxquelles nous procédons dans le domaine bactériologique pour le lac de Neuchâtel, nous réservant de reprendre ultérieurement ce problème plus à fond. Il est nécessaire, cependant, dans l'appréciation de la qualité de l'eau de notre lac, de tenir compte des phénomènes bactériologiques qui s'y produisent.

Comme nous le mentionnons au paragraphe 23 déjà, nous traitons du nombre total de germes, ainsi que de l'identification et du nombre de coliformes. Malheureusement, nos recherches bactériologiques n'ont commencé, systématiquement, qu'en décembre 1960 à la station Z où elles se poursuivent encore chaque semaine. Dans le cadre de notre travail, nous ne disposons donc que des données de 1961 à Z, ce qui permet d'avoir un aperçu de la situation mais est insuffisant pour tirer des conclusions sur l'état bactériologique de notre lac et son évolution. En effet, il est particulièrement important de suivre durant de très nombreux mois les variations du nombre des microorganismes car, à l'encontre de dosages précis comme nous l'avons fait jusqu'ici pour les autres constituants de l'eau, nous devons nous contenter de numérations d'organismes vivants dont les règles de variations ne peuvent se dégager que de longues statistiques.

L'examen bactériologique des échantillons prélevés aux stations A à F (nous ne possédons pas de renseignements de ce genre sur les stations du secteur vaudois), bien que commencé en 1957, constitue un ensemble de données trop peu resserrées dans le temps et l'espace pour pouvoir servir de statistiques maintenant déjà; ces examens doivent être poursuivis, de manière plus systématique encore, avant que nous puissions en tirer bénéfice. Quant aux recherches sur les affluents, elles

sont encore sporadiques, faute de temps à y consacrer, à côté des travaux décrits précédemment.

43.1. Les bactéries à la station 2.

A l'aide des résultats acquis chaque semaine durant l'année 1961, nous dressons le tableau CXLV relatif à la fois au nombre total de germes et à celui des coliformes.

TABLERAU CXLV

Moyennes et extrêmes de la teneur totale en germes et de celle des coliformes dans l'eau de la baie d'Anversier, de la surface au fond en 1961, rapportés au ml.

	Total des colonies	Bact.Coli			
		Forme R	Forme S	Forme M	Total
<u>Moyennes (0-100m)</u>					
Moyennes	1326	6	5	1	4
Minimum	101	0	0	0	0
Date	18.IV	-	-	-	-
Maximum	14580	41	44	13	43
Date	14.III	21.II	27.VI	17.X	21.II
<u>Extrêmes instantanés</u>					
Minimum	2	0	0	0	0
Date	2.V	-	-	-	-
Profondeur	20	-	-	-	-
Maximum	54000	370	970	80	970
Date	14.III	21.II	7.XI	17.X	7.XI
Profondeur	5	80	26	5	26

Les minima des coliformes sont trop souvent nuls pour qu'ils soient mentionnés plus explicitement dans ce tableau; c'est pourquoi nous remplaçons les dates et les profondeurs correspondantes par des tirets.

La teneur moyenne en germes totaux varie de plus de 14000 individus au cours de l'année, ce qui représente 11 fois la teneur moyenne en ces germes. Nous renonçons à tenir compte de la situation des extrêmes instantanés, si rapprochés l'un de l'autre au printemps, et cela

pour les raisons statistiques déjà énumérées comme aussi parce que l'avant-printemps de 1961 a été anormalement chaud.

TABLEAU CXLVI

Fréquence avec laquelle les extrêmes instantanés de la teneur en germes totaux se rencontrent à diverses profondeurs de la station Z en 1961, exprimée en pour-cents des déterminations effectuées.

Profondeurs en mètres		1961
Minimum	25	12
	40	12
	80	<u>50</u>
	100	16
Maximum	0	12
	10	16
	15	<u>23</u>
	20	12
	40	16

Ainsi, en 1961 à la station Z, c'est à 80 m que le nombre total de germes est le plus souvent minimum et à 15 m le plus souvent maximum. Ceci n'est pas spécialement surprenant étant donné que 15 m est une profondeur située souvent à la partie inférieure du métalimnion, dans la zone où les bactéries abondent grâce à la présence du plancton en décomposition d'une part, étant donné qu'à 80 m, on se trouve à la partie inférieure de l'hypolimnion, suffisamment loin du fond cependant et que l'on y a le plus de chances de trouver le minimum de bactéries, d'autre part.

Enfin, bien que notre statistique ne porte que sur une année, nous pouvons tout de même établir la liste des variations de la teneur en bactéries en fonction de la stratification thermique; c'est ce qu'indique le tableau CXLVII.

TABLEAU CXLVII

(cf. page suivante)

TABLEAU CXLVII

Moyennes et extrêmes des teneurs en germes totaux et en coliformes dans l'eau de la baie d'Auvernier durant la période de stratification thermique de 1961 et rapportées au ml d'eau.

	Total des germes		Bact.coli(formes R, S et M)	
<u>Epilimnion</u>				
Moyenne	1193		15	
Extrêmes	176	3120	0	85
Dates	31.X	27.VI	-	6.IX
Amplitude	2944		85	
<u>Métalimnion</u>				
Moyenne	1296		29	
Extrêmes	145	8780	0	282
Dates	6.VI	27.VI	-	27.VI
Amplitude	8635		282	
<u>Hypolimnion</u>				
Moyenne	543		3	
Extrêmes	159	2711	0	15
Dates	7.XI	27.VI	-	3.X
Amplitude	2552		15	

Pour 1961, le rapport épilimnion:métalimnion:hypolimnion accuse les valeurs suivantes :

	<u>pour les germes totaux</u>	<u>pour les coliformes</u>
Moyennes	2,00 : 2,39 : 1,00	5,00 : 9,66 : 1,00
Amplitudes	1,15 : 3,39 : 1,00	5,66 : 18,80 : 1,00

C'est donc dans le métalimnion que se rencontrent les plus grands nombres de bactéries et de coliformes; c'est également dans cette zone que les écarts entre les valeurs enregistrées au cours de l'année sont les plus grands.

43.2. Comparaison avec d'autres travaux.

Lors de notre campagne de 1944 à 1945, nous avions obtenu (Sollberger, 1946) une moyenne de 285 colonies par ml pour le total des germes. La valeur actuelle est donc plus de 4,5 fois supérieure à celle d'il y a 20 ans. Quant au Bact.coli, il apparaissait sporadiquement et rarement, ainsi qu'en très faibles quantités à cette époque, tandis qu'actuellement il est présent tout au long de l'année, avec des extrêmes instantanés très élevés. On a ici une preuve formelle de l'aggravation de la pollution due à un apport et à un développement croissant de microorganismes issus de matières fécales.

Nydegger (1957) relève que dans le lac de Thoun le nombre total de colonies augmente, de même que le taux du colibacille qui est cependant encore absent dans ce lac en début d'année, mais présent régulièrement chaque fin de saison. Pour le Léman, Monod (1960) montre l'évolution rapide qui s'est produite ces dernières années, alors que Oienert ne signalait qu'un maximum de 287 colonies par ml dans le Petit lac en 1912, Monod en trouve une moyenne de 478 en mai sur la rive vaudoise, avec un maximum de 4640; simultanément, on dénombre 130 colonies en moyenne au centre du lac. Le colibacille passe de 18 colonies au maximum en 1912 à plus de 100 en permanence actuellement, avec un maximum instantané dépassant 1000. Pour le même lac d'ailleurs, Novel (1960) signale qu'*Escherichia* est plus fréquent durant les mois d'automne qu'en été et qu'on rencontre ces bactéries de préférence entre 30 et 40 m de profondeur. Enfin, au Bodan, Fast (1960) mentionne l'apparition de Bact.Mycoides, espèce nouvelle pour ce lac, possédant sur milieu d'Endo, non coliforme, mais qui a la particularité de bien résister à l'action du chlore gazeux et à celle de l'ozone.

44. Le plancton.

Kubler (1874) inaugure l'étude du plancton de notre lac, mais dans des conditions déplorables: il examine seulement le feutre organique développé en quelques jours à la surface du sédiment maintenant dans de l'eau et déclare, à la suite de cet examen, le lac de Neuchâtel pauvre en diatomées.

Par contre, Fuhrmann (1900b) reconnaît que la productivité planctonique de nos eaux dépasse largement celle des autres lacs suisses; il signale 28 espèces de phytoplancton, 37 de zooplancton et met en évidence, après Blanc (1898), mais avant Stingelin (1901) la leucophobie des Rotateurs et des Crustacés dont la migration verticale, le soir, est typique des eaux claires qui remplissent à cette époque les cuvettes lacustres de notre pays. Ce problème, repris et approfondi par Flew et Pennack (1949), amène ces derniers à conclure que les migrations verticales du zooplancton sont indépendantes de la saison et du chimisme de l'eau tout comme Robert (1931) l'avait montré aussi à l'égard du saut thermique, mais que l'amplitude de ces migrations varie avec la saison et avec la stratification tant thermique que chimique.

À la suite de Fuhrmann, de nombreux travaux s'élaborent :

Monard (1918) recense 350 espèces dans la faune profonde et arrive, en 1922, à la conclusion que celle de la Motte est à la fois pélagique et littorale, tandis que Mauvaie (1927) signale entre autres, la présence d'*Oscillatoria rubescens* à cette époque déjà, mais en très petite quantité.

Tout en montrant que le rapport phytoplancton:zooplancton est égal à 1:2 en moyenne dans chacun des lacs autrichiens qu'il étudie, Ruttner (1938) reconnaît aussi que le phytoplancton représente, à lui seul, 80% du volume total du plancton dans les 20 m supérieures des couches subsuperficielles et 50 % dans les 10 m supérieures de la même zone. Quant à Messikommer (1942), il affirme que les diatomées représentent 75 % des formes végétales répandues dans les eaux douces du globe.

Au vu de ce qui précède et afin de sortir le moins possible du cadre que nous imposons à notre travail, mais pour tenir compte tout de même des incidences que peuvent avoir l'un sur l'autre le plancton, la thermique (spécialement la stratification thermique), ainsi que le chimisme et la pollution des eaux, nous nous limitons à un aperçu des questions touchant le phytoplancton et les diatomées plus spécialement. Nous abandonnons volontairement les problèmes touchant le zooplancton de même que celui, très actuel, du nanoplancton.

La quantité de phytoplancton contenue dans l'eau peut s'évaluer de deux manières sur les échantillons pêchés selon la technique décrite au paragraphe 20.9 ci-dessus: par comptage des individus au microscope et par dosage de la chlorophylle. En utilisant les deux méthodes simultanément, on ne peut vérifier que l'ordre de grandeur du nombre total d'individus et non ce nombre lui-même, car d'une part le taux de chlorophylle n'est pas rigoureusement constant dans chaque espèce où il varie avec le degré de maturité des cellules et d'autre part le comptage des individus se heurte souvent à des difficultés, spécialement lorsque le plancton se présente sous forme d'amas cellulaires dont les constituants se détachent facilement les uns des autres en groupes plus ou moins fournis. Aussi, faute de temps étant donné l'ampleur des autres travaux à effectuer au cours de nos recherches, avons-nous renoncé à doser la chlorophylle dans l'eau et le plancton, nous contentant de la numération des individus au microscope.

Pearsall (1932), Patrick (1948) et Lund (1950) définissent les conditions dans lesquelles les diatomées apparaissent; ce sont essentiellement la richesse de l'eau en NO_3^- , PO_4^{3-} et SiO_2 , corps dont la teneur est atteinte de manière suffisante en hiver et au printemps et qui est égale à 0,25 mg Si par litre en ce qui concerne la silice. Pour leur développement, les diatomées ont besoin d'une insolation suffisante aussi comme le prouvent les travaux de Lehn (1956) sur le parallélisme frappant des courbes de température et de diatomées enregistrées à Sipplingen (Ueberlingersee) d'une part, ceux de Laurent (1960a) sur le Léman d'autre part. Ajoutons que dans le cas particulier d'*Oscillatoria rubescens*, Staub (1961) arrive même à fixer entre 2,0 et 2,5 mg NO_3^-/lit la concentration optimum en azotates nécessaire au début de croissance de cette algue, indépendamment du seuil de la teneur en phosphates qu'il est indispensable de dépasser simultanément.

La répartition du phytoplancton n'est pas uniforme pour tout le lac à un même niveau comme l'a prétendu Robert (1924). C'est ce que prouve Wüthrich (1960) en relevant qu'on avait l'impression, autrefois, que le lac était pauvre en diatomées alors que très souvent, ces deductions portaient sur les résultats d'une étude à une ou rarement deux stations et non pas en un grand nombre de points répartis dans l'ensemble du lac. C'est peut-être une des raisons pour lesquelles et à côté de modifications récentes imputables à l'augmentation de la pollution ces dernières années, il faut voir dans cette manière de conduire les recherches à l'époque de Fuhrmann le fait que bien des espèces n'ont pas été signalées dans notre lac au début du siècle, alors qu'elles abondent ou sont présentes à l'heure actuelle.

Dans le sens vertical, le phytoplancton se répartit de manière uniforme en hiver, mais seulement lors des tempêtes qui produisent un brassage suffisant de l'eau et qui entraînent alors du plancton dans tout l'hypolimnion. Cela est confirmé par Elster (1955) : pendant le calme qui suit la tempête, le zooplancton ne tarde pas à rejoindre son habitat normal, alors que le phytoplancton, incapable de se déplacer par ses propres moyens, meurt en masse dans l'hypolimnion et tombe dans les grandes profondeurs.

En été, par contre, une stratification du phytoplancton s'établit et Gessner (1948) prouve par ses recherches qu'il ne s'agit pas d'un phénomène statique mais dynamique. En effet, dans la zone trophogène se produisent constamment de nouvelles cellules qui, à l'exception des Myxophyceae plus légères, sont toutes plus denses que l'eau et tendent à s'enfoncer en eau calme. L'épilimnion, soumis aux vents, présente presque continuellement une turbulence qui permet aux cellules jeunes de se maintenir dans cette couche, tandis que les cellules mourantes et alourdies tendent à s'enfoncer dans le métalimnion à la partie inférieure duquel elles se rassemblent. L'hypolimnion jouit d'un calme relatif, ce qui a pour effet que les cellules s'y enfouissent non seulement plus vite que dans le métalimnion, mais dix fois plus vite en moyenne que dans l'épilimnion. La position de la partie de la couche trophogène dans laquelle se produisent les nouvelles cellules, par rapport à celle du thermocline, joue un rôle important dans la production biologique totale du lac. Si la couche produisant les nouvelles cellules se trouve au-dessus du thermocline, autrement dit dans l'épilimnion, la turbulence de celui-ci maintient longtemps et au même niveau la couche productrice dans laquelle la concentration cellulaire est maximum. Si, au contraire, le thermocline est situé près de la surface et, par conséquent au-dessus de la couche productrice, cette dernière se trouve dans l'hypolimnion calme et s'appauvrit rapidement par la chute vers le fond des cellules produites.

A notre avis, cette théorie de Gessner explique parfaitement les difficultés avec lesquelles la production du phytoplancton "démarré" au printemps même lorsque celui-ci est chaud; le thermocline est alors trop près de la surface et la perte de cellules surpasse la production durant un certain temps. Puis, la production phytoplanctonique prend le dessus par rapport aux pertes lorsque le éant thermique s'enfonce. En fin d'été et malgré qu'il fasse suffisamment chaud pour qu'un nouveau

saut thermique apparaisse près de la surface alors que l'ancien est très profond déjà ou partiellement effacé par les tempêtes, un nouvel apport tardif de chaleur ne suffit pas à remettre en branle une forte production correspondante de phytoplancton; les nouvelles cellules qui se forment alors s'enfoncent rapidement et ne tardent pas à périr car elles prennent naissance au-dessous du thermocline et sont les victimes d'un phénomène analogue à celui que nous décrivons précédemment.

44.1. Le plancton à la station 2.

C'est au cours de nos travaux hebdomadaires à cette station que se pêche le plancton grâce auquel Wüthrich effectue les recherches dont nous avons parlé déjà et qui lui permettent de démontrer que notre flore lacustre est riche puisque, pour les seules diatomées, cet auteur dénombre 408 formes réparties en 38 genres et 290 espèces. C'est sur ces résultats aussi que nous basons les commentaires qui vont suivre.

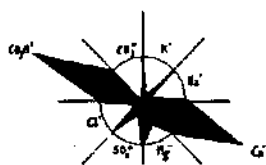
A partir des résultats obtenus par Wüthrich que nous tenons à remercier très vivement ici pour la part qu'elle a prise dans l'examen de la partie biologique de nos recherches, nous établissons la courbe inférieure de la figure 79, ainsi que celle de la figure 144. Parmi ces résultats, nous sélectionnons ceux que nous estimons les plus caractéristiques, à savoir le nombre total des diatomées, les teneurs en *Tabellaria*, *Oscillatoria* et *Aphanizomenon*. Pour le reste du problème, nous nous permettons de renvoyer le lecteur au travail de Wüthrich (sous presse).

Aux paragraphes 31.1 et 38.1 nous examinons les relations existant entre la courbe représentative de la variation du total des diatomées et celles relatives au pH et à la teneur en calcium, telles que les reproduit la figure 79.

La courbe inférieure de la figure 144 reproduit celle de la figure 79. Celle de *Tabellaria* montre que les quantités de cette algue sont plus élevées, en moyenne, en 1960 et 1961 qu'en 1959; les maxima de 1960 et 1961 sont également supérieurs et les minima correspondants aussi plus élevés qu'en 1959. Bien que la teneur en *Tabellaria* baïsse en septembre-octobre 1960 et en février ainsi qu'en octobre 1961, la forte poussée de cette algue en hiver et au printemps 1960 n'est pas en relation directe avec les conditions météorologiques, étant donné la saison et le manque d'insolation tout particulièrement anormal de 1960. A notre avis, cette prolifération est imputable à une composition de l'eau tout spécialement riche en substances nutritives. Nous ne pouvons pas non plus nous empêcher de rapprocher cette forte prolifération de *Tabellaria* dès la fin de 1959, de la poussée considérable d'*Oscillatoria rubescens* dès novembre 1960. C'est, nous semble-t-il, un cas tout à fait analogue à celui qui s'est produit à la fin du siècle passé dans le lac de Zurich: à une forte prolifération de *Tabellaria* a succédé, deux ans plus tard une sortie massive d'*Oscillatoria*. C'est un cas identique qu'Elster (1960), rappelant celui de Zurich, prévoit pour le Bodan également lorsqu'il admet que *Tabellaria* apparaissant en masse est un signe précurseur de la prolifération d'*Oscillatoria* et, indirectement, de l'eutrophisation.

COMPOSITION IONIQUE

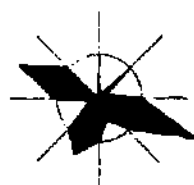
DE L'EAU DU LAC DE NEUCHÂTEL ET DE QUELQUES AUTRES LACS EUROPEENS



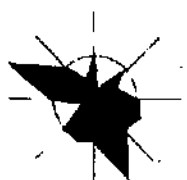
LAC DE NEUCHÂTEL



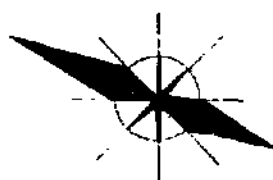
BODENSEE



LAC LEMAN



LAC BALATON

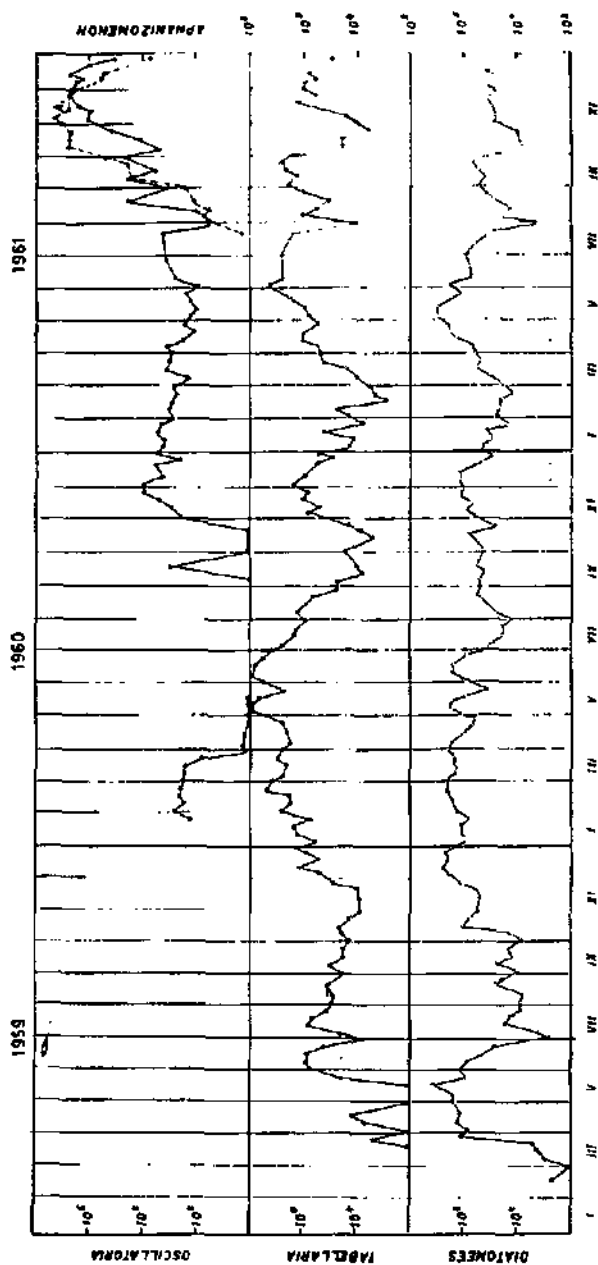


LUNZER UNTERSEE

LAC DE NEUCHÂTEL
Station Z: Baie d'Auvernier

Fig.144.

EVOLUTION D'APHANIZOMENON, D'OSCILLATORIA, DE TABELLARIA ET DU TOTAL DES DIATOMÉES.



D'après les données de Wüthrich.

Notre courbe se rapportant à *Oscillatoria* indique bien que cette *Myxophyceae* a pris pied de manière importante chez nous en novembre 1960 après avoir été présente de manière sporadique durant les années antérieures. Sa teneur augmente d'ailleurs encore une fois fortement à partir d'août 1961, probablement en raison de l'été et de l'automne particulièrement chauds de cette année. Quant à *Aphanizomenon* dont Wüthrich (1962) a signalé l'apparition explosive dans nos eaux, sans avoir été observée précédemment, elle est représentée à côté d'*Oscillatoria* dont elle suit approximativement le développement fin 1961.

Les changements d'espèces et du nombre d'individus de ces espèces en fonction directs de l'évolution de la pollution ne peuvent guère se déceler que grâce à une statistique portant sur de nombreuses années. Par contre, nous estimons que Jaernefelt (1952) a raison de préconiser l'étude des espèces dominantes du plancton pour tenter de résoudre le problème de l'évolution de la pollution qui peut se poser de la manière suivante : "Le plancton et ses associations d'espèces permettent-ils de déterminer l'état de trophie d'un lac ?" La tentative que nous venons de faire, quoique timide, en examinant les variations simultanées et successives des teneurs en *Tabellaria*, *Oscillatoria* et *Aphanizomenon* est une réponse préliminaire à cette question.

Dans les variations de la teneur en plancton en fonction de la profondeur, nous vérifions ce que Rivier (1936) rappelait déjà pour le lac de Morat et d'après Behrens qui l'écrivait à propos du lac de Sacrow : "La population planctonique varie par sauts dans le métalimnion, et il y a généralement un minimum d'individus au milieu du métalimnion, limité par deux maxima, un à la partie supérieure et l'autre à la partie inférieure de cette zone. Nous trouvons donc des accumulations de plancton à des niveaux correspondant au métalimnion, au thermocline ainsi qu'aux divers sauts thermiques. Nous laissons le soin à Wüthrich (sous presse) de traiter la question plus en détail et chiffres à l'appui, nous contentant de constater que ces différences dans la teneur en plancton à certains niveaux thermiques illustre de manière tangible l'existence de phénomènes tels que les sauts thermiques et le métalimnion et cela dès le début de la stratification.

Nous sommes aussi, entre autres, en novembre 1961, devant le fait suivant : pour plusieurs espèces, on trouve de grosses quantités de cellules en train de mourir dans le Bas lac et, le même jour, sensiblement aux mêmes profondeurs mais dans le Haut lac (à Grandson), les mêmes espèces en pleine floraison avec d'innombrables cellules jeunes. La différence de latitude n'entre pas en ligne de compte pour expliquer ces différences de croissance, bien entendu ; il peut s'agir de différences de température ou de différences d'apports nutritifs, ou bien encore des deux causes à la fois. Quoi qu'il en soit, ces constatations nous permettent d'affirmer une nouvelle fois que, contrairement à l'opinion exprimée par Robert (1924) sur l'uniformité de la répartition horizontale du plancton dans le lac de Neuchâtel, on observe d'importantes différences d'un endroit à l'autre si l'on procède à des recherches simultanées à plusieurs stations. Ceci permet aussi de déplorer le fait que les recherches du début de notre siècle n'aient eu lieu qu'à une seule station à la fois.

44.2. Comparaison avec d'autres travaux.

Fuhrmann (1900 a) pêchant dans notre lac sur une hauteur de 40 m affirme obtenir au maximum 2,3 cm³ de plancton par m³ d'eau, les maxima se situant fin mai et début décembre.

En 1959, l'Inspection de la pêche (non publié) dresse une courbe du volume de plancton récolté sur 30 m de hauteur de février à décembre. Le maximum, en mai, atteint 5,7 cm³/m³ d'eau; malheureusement, la méthode utilisée, sans centrifugation, est entachée d'une erreur moyenne de $\pm 9\%$.

Utilisant la méthode de prélèvement décrite au paragraphe 20.9.2 ci-dessus, complétée par une centrifugation de chaque échantillon de plancton pendant 10 min à 1200 tours/min à température ordinaire, nous déterminons le volume total de plancton capturé à 2 à diverses profondeurs le 25 avril 1961. Les volumes de plancton, ramenés à l'unité de volume d'eau, figurent dans le tableau CXLVIII.

TABEAU CXLVIII

Volume de plancton capturé à diverses profondeurs le 25 avril 1961 à la baie d'Auvernier, entre 9 et 11 h.

Profondeur	Volume en cm ³ /m ³	Profondeur	Volume en cm ³ /m ³
0	24	25	4
5	34	30	2
10	40	40	9
15	17	80	3
20	14	100	1,5

En extrapolant ces résultats à l'ensemble du lac, on obtient pour les 5,44 km³ d'eau comprise entre 0 et 30 m de profondeur, 100'000 m³ de plancton, soit très sensiblement 0,02 o/oo en volume. Il semblerait donc, à première vue, que le volume de plancton est actuellement bien plus important que du temps de Fuhrmann. Les investigations devraient continuer cependant et être étendues à d'autres stations encore pour pouvoir tirer des conclusions de tels résultats. Bien que notre tableau ne porte que sur une seule station, un seul jour et à un seul instant de la journée, on voit déjà que la répartition du plancton n'est pas uniforme en fonction de la profondeur; cela, les pêches au filet ne le révèlent pas, pas plus que le fait que la variation de la quantité de plancton n'est pas régulière mais passe par un maximum à 10 m de profondeur en l'occurrence.

Quatrième partie

LES MOUVEMENTS DE L'EAU

=====

Chapitre treizième : LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE LAC.

De nombreux mouvements se manifestent dans un lac: sous l'effet du vent, des vagues prennent naissance, agitant l'eau à la surface et créant peu à peu des courants dits de translation. Par l'insolation et le refroidissement de l'eau, des différences de densité se manifestent; il en résulte des courants dits de densité. Des éboulements ou glissements de terrain sous-lacustres, de même que des tremblements de terre peuvent se produire; ils créent alors une onde qui se propage dans des couches d'eau plus ou moins profondes. Les différences de pression barométrique engendrent des seiches, mouvements à caractère oscillatoire décrits pour les lacs par Forel entre autres. Enfin, des mouvements bien moins facilement décelables que ceux qui précèdent affectent la masse lacustre: les marées lunaires et solaires, considérablement moins marquées qu'en mer.

45. L'agitation du lac due aux vagues.

Dans les lacs, le phénomène n'a donné lieu jusqu'à présent à aucune recherche dont les résultats soient connus. C'est pourquoi nous estimons intéressant de l'examiner dans le cadre de nos travaux.

Rappelons tout d'abord les définitions suivantes:

Le vent soufflant à la surface de l'eau soulève des rides de plus en plus marquées et qui ne tardent pas à se transformer en vagues ou lames. Comme Lacombe (1960) l'indique clairement, hors de la zone dépressionnaire qui leur a donné naissance, les vagues divergent en direction, mais au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cette zone, la propagation devient de plus en plus parallèle en même temps que les lames deviennent de plus en plus longues. Les lames n'ont pas toutes la même longueur et on constate que les plus longues se propagent plus vite que les courtes; ces dernières subissent, par frottement, des pertes d'énergie plus considérables que les longues, ce qui tend à les amortir plus rapidement que ces dernières. Ce tri naturel fait qu'à grande distance l'agitation n'est plus constituée que par des lames longues qui tendent peu à peu vers une onde cylindrique monochromatique et à profil sinusoïdal appelée houle. Pratiquement donc, les vagues se distinguent par une crête plus ou moins aiguë, tandis que la houle est une ondulation à crête très arrondie. Souvent, sous l'effet du vent la crête de la vague est emportée ou déferle, constituant l'embrun (appelé "mouton" chez nous (EL)). La direction des vagues est donnée par la perpendiculaire à l'ensemble des lignes de crêtes et son orientation par l'azimut d'où proviennent les vagues. Ainsi, un vent soufflant du SW propage, en l'absence d'obstacles, des vagues se déplaçant du SW vers le NE; on dit alors que la direction des vagues est SW.

45.1. L'agitation à la surface du lac.

Désirant savoir comment se répartit l'agitation du lac en fonction de la saison durant la période de nos recherches, nous dressons le tableau des états du lac d'après nos observations quotidiennes. Celles-ci sont faites depuis le Laboratoire cantonal de Neuchâtel et embrassent la portion du lac comprise entre les rives gauche

et droite d'une part, l'extrémité aval et une ligne allant de l'embouchure de l'Areuse à Cheyres d'autre part. On pourrait reprocher à notre procédé de ne pas tenir compte de la partie du lac sise en amont de la ligne transversale qui vient d'être mentionnée. Cependant, si des différences de comportement des vents peuvent se produire entre les deux zones, il s'agit presque toujours de cas relevant de vents locaux peu importants, car la situation dans la zone lacustre que nous observons correspond toujours à l'état de l'ensemble du lac lorsque soufflent des vents généraux et bien établis.

Nos observations quotidiennes consistent à classer l'état du lac dans les 11 catégories suivantes inspirées à la fois de l'échelle internationale de Beaufort pour les vents (Darbre, 1943) et de l'échelle internationale de Douglas pour l'état de la mer (Rouch, 1948, p.9) mais fixées comme suit:

- 0 = calme
- 1 = ridé
- 2 = très faiblement agité
- 3 = faiblement agité
- 4 = peu agité
- 5 = moyennement agité, embruns rares et peu visibles
- 6 = agité, embruns nombreux, mais peu marqués
- 7 = fortement agité, embruns nombreux et très visibles
- 8 = très fortement agité, embruns emportés par le vent
- 9 = tempête
- 10 = coups de vent intermittents.

Les observations ont lieu deux fois par jour et donnent deux chiffres: un pour le matin, l'autre pour l'après-midi. Lors de changements intervenant dans chacune des demi-journées, seul le chiffre le plus élevé de la classification ci-dessus est conservé. En cas d'agitation durant la nuit, il est tenu compte également des changements nocturnes qui peuvent se produire.

On exprime ensuite l'agitation du lac pour chaque mois en rapportant le nombre de demi-journées de chaque catégorie au nombre de jours du mois, exprimant ainsi en pour-cents la fréquence de chaque sorte d'agitation durant la période des observations. De cette manière, nous établissons le tableau CIL donnant la fréquence de l'agitation due aux vagues.

TABLÉAU CIL

(cf. page suivante)

TABLEAU CIL

Fréquence moyenne de l'agitation due aux vagues pour la période
1959-1961 exprimée en pour-cents.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Janvier	30,5	1,5	4,5	<u>16,0</u>	8,0	<u>17,5</u>	<u>13,0</u>	3,0	3,0	1,5	0
Février	45,5	<u>0</u>	<u>3,5</u>	7,0	12,0	9,0	10,5	5,5	<u>3,5</u>	<u>3,5</u>	0
Mars	<u>56,0</u>	1,0	7,3	<u>3,0</u>	12,0	9,3	7,3	3,0	<u>0</u>	<u>0</u>	0
Avril	38,7	9,0	9,7	11,0	12,3	10,0	4,3	<u>1,0</u>	2,3	0	1,0
Mai	35,3	7,3	10,7	10,7	7,7	14,3	7,3	3,0	1,0	0	0
Juin	41,0	<u>2,3</u>	<u>15,7</u>	5,7	11,7	<u>4,3</u>	8,0	2,3	1,3	0	<u>3,3</u>
Juillet	31,3	8,3	6,3	10,7	13,0	14,0	10,7	4,0	0	1,0	0
Août	40,7	6,3	8,7	13,0	7,3	8,7	8,7	4,3	2,0	0	0
Septembre	53,3	4,3	11,0	11,0	<u>5,6</u>	<u>4,3</u>	5,7	3,3	1,0	0	0
Octobre	46,3	1,0	13,7	<u>3,0</u>	7,3	7,3	<u>13,0</u>	4,3	2,0	1,0	0
Novembre	41,3	3,3	13,3	7,7	<u>14,7</u>	10,0	<u>3,3</u>	5,7	1,0	0	0
Décembre	<u>27,7</u>	5,0	9,0	14,3	9,0	14,3	11,3	<u>6,7</u>	1,3	1,0	1,0
Hiver	<u>45,7</u>	0,9	5,4	7,9	10,9	11,6	9,9	3,7	1,9	1,4	0
Printemps	<u>38,3</u>	8,6	12,0	9,1	10,6	9,6	6,6	2,1	1,6	0	1,4
Eté	41,8	6,3	8,7	11,6	8,7	9,0	8,3	3,9	1,0	0,3	0
Automne	38,4	2,9	12,0	8,3	10,3	10,6	9,2	5,6	1,4	0,7	0,3

Il ressort de ces données que le mois de mars est le plus calme et décembre le moins calme de la période considérée; plus de la moitié de mars n'accuse aucune agitation, mais le quart de décembre seulement est dépourvu de vagues. Quant aux très mauvais temps et aux tempêtes, ils se rencontrent tous les mois, mais ne représentent en maximum que 3,5 % du mois de février.

Pour tenir compte de l'effet des vagues de manière complète, il faudrait encore classer les périodes d'agitation d'après le nombre de jours où celle-ci se poursuit de manière continue, avec ou sans variation d'intensité. Nous laissons de côté ce mode de calcul, sauf pour les jours de calme pour lesquels nous dressons le tableau CL qui donne les séries maximum de calme suivi de chaque mois pour la période 1959 - 1961.

TABLEAU CL
(cf. page suivante)

TABIEAU CL

Nombres maxima de jours de calme suivi sur le lac pendant les années
1959, 1960 et 1961, exprimés en jours.

	1959	1960	1961	1959-1961*
Janvier	-	6	4½	5
Février	-	4½	6½; 6½	5½
Mars	7	6½; 6½	4½; 4½	6
Avril	4	3½	4½	4
Mai	9	3½	2	5
Juin	3	3½	4½	4
Juillet	4½	2½	3	2
Août	7½	7	7	7
Septembre	6	4	8	6
Octobre	4½	3	5	4
Novembre	<u>12</u>	5	4	<u>7</u>
Décembre	2½	4	4½	4

* = sauf pour janvier et février.

Ainsi, mai 1961 n'a eu que 2 jours de calme ininterrompu, tandis que novembre 1959 en a eu 12; cependant, février 1961 et mars 1960 en ont compté deux fois 6 jours et demi durant chaque mois.

Nous avons tenu compte déjà de ces périodes de calme suivi au paragraphe 27.2.3 à propos de la variation des gradients de température durant la période de stratification thermique de ces années, ainsi que pour la construction de la figure 58.

Quant à la fréquence des vents ayant provoqué des vagues de la catégorie 2 et au-dessus pendant plus d'une heure, nous l'établisons en pour-cents du nombre de jours de chaque mois pour les 16 directions habituelles de la rose des vents. Toutefois, afin de ne pas trop alourdir le tableau CLI, nous n'y reportons que les fréquences se rapportant aux vents principaux de la région et désignées localement par: bise (vent d'E), uberre (vent du SSE), vent ou vent d'Estavayer (vent du SW) et joran (vent du NNW).

TABIEAU CLI

(cf. page suivante)

TABEAU CLI

Fréquence des vents ayant provoqué des vagues sur le lac de Neuchâtel
exprimée en pour-cents du nombre de jours de chaque mois des années
1959 à 1961.

	E	SSE	SW	NW
Janvier	25,8	0,8	<u>30,6</u>	<u>0</u>
Février	<u>6,1</u>	<u>0</u>	19,7	<u>0</u>
Mars	18,8	<u>0</u>	<u>5,4</u>	2,7
Avril	17,8	<u>0</u>	20,6	5,0
Mai	25,2	<u>0</u>	13,4	<u>8,1</u>
Juin	13,0	0,6	7,8	5,6
Juillet	10,8	1,6	22,7	4,3
Août	17,2	<u>2,1</u>	17,7	1,1
Septembre	25,0	0,6	11,1	1,1
Octobre	9,7	1,1	24,2	1,6
Novembre	17,2	0,5	15,0	1,1
Décembre	<u>29,9</u>	<u>0</u>	23,2	0,5
Hiver	17,2	0,2	16,7	1,2
Printemps	18,7	0,2	13,9	6,2
Eté	17,7	1,4	17,2	2,2
Automne	18,9	0,5	20,8	1,1

La plus grande quantité de jours de bise tombe en décembre, celle de vent en janvier; par contre, celle de joran en mai, alors que le lac se réchauffe fortement pendant la journée, tandis que celle d'uberre a plutôt tendance à se produire en août.

45.2. L'agitation au-dessous de la surface du lac.

Les vagues ne sont que l'aspect superficiel des mouvements imprimés à l'eau par le vent. Mais en profondeur, l'agitation se produit aussi et on a constaté, également mais surtout sur les fonds sableux, la formation de rides dues aux vagues. En étudiant en détail, sur place et sur maquettes de bassins, ces rides aussi appelées "ripplemarks", Bagnold (1946) arrive à la conclusion que les oscillations horizontales de l'eau près du fond correspondent à peu près à un mouvement harmonique simple. Quant à Tison (1949), il démontre que la formation des ripples est due à la non-permanence du mouve-

ment de l'eau ou à la turbulence de l'écoulement dans le cas d'un courant subaquatique. C'est aussi le cas dans le lac lorsque le sable, sur lequel le balancement des vagues dessine des rippelmaks, est parsemé d'obstacles: la turbulence de l'écoulement de l'eau entre ces obstacles crée des rippelmaks différents de ceux des vagues sur fond libre.

Les rippelmaks dus aux vagues attestent par leur présence l'action de ces dernières en profondeur. C'est ce qu'avait déjà affirmé Forel (1892-1904, t.2, p.250 sq) en observant les rides de sable du Léman et en attribuant à la profondeur à laquelle elles disparaissent le terme de "limite d'action des vagues". Plus bas, en effet, Forel a pu pouvoir affirmer, à l'aide des moyens en sa possession à cette époque, qu'il n'existe plus aucune ride en-dessous de cette limite. Or, les travaux plus récents exécutés en mer à l'aide de caméras de prise de vues sous-marines, telles celles utilisées par Laughton (1949), révèlent la présence de rippelmaks jusqu'à 3400 m de profondeur au moins. Il est clair qu'à ce niveau on ne peut plus parler d'action des vagues, mais qu'il s'agit de l'effet de tourbillons dans l'écoulement plus ou moins rapide de l'eau.

La série de travaux modernes entrepris par Deacon (1958) pour l'étude des vagues de l'océan révèle un problème très compliqué et difficile à résoudre. Aussi n'entrerons-nous pas davantage ici dans ses détails, nous contentant de nous intéresser à la limite d'action des vagues en profondeur dans notre lac.

Grâce à la collaboration des plongeurs autonomes du Centre de recherches et d'études subaquatiques de Neuchâtel qui ont observé le 10 janvier 1960 en particulier, par 10 m de fond devant la ville, le va et vient des débris sur le sable, nous savons que les rippelmaks dus aux vagues s'observent partout où la nature du fond s'y prête et de manière continue jusqu'à une profondeur qui varie entre 15 et 18 m, au-delà de laquelle ils sont pratiquement inexistantes. Sans préjuger de l'existence, dans les grands fonds, de rippelmaks ou rides analogues, nous admettons donc que la limite d'action des vagues ne descend pas au-dessous de 20 m de profondeur. Ceci nous permet, d'une part de dresser la carte des zones du lac de Neuchâtel où le fond est atteint par l'agitation due aux vagues et, d'autre part de calculer le volume d'eau soumis à ces mouvements, ainsi que de le rapporter à l'ensemble du volume lacustre.

La figure 145 donne l'étendue de la zone du fond soumise à l'action des vagues; l'aire de cette zone représente sensiblement 63 km² soit 29 % environ de la surface totale de la nappe. La limite inférieure de cette zone déborde à plusieurs endroits celle de la baie, mordant sur le mont qui lui succède. La figure montre aussi que cette zone affecte les extrémités du lac (tout particulièrement l'extrémité aval) et la rive droite davantage que la gauche, ainsi que le plateau sommital de la Motte. Dans la réalité, cet effet se traduit, lors des fortes tempêtes par l'aspect jaune-verdâtre et trouble qu'acquiert l'eau littorale, dans le Bas-lac tout spécialement, ainsi que dans un panache qui prend naissance à la Motte.

Le volume d'eau compris entre 20 m de profondeur et la surface est donc soumis à l'action des vagues; il représente $3,2 \text{ km}^3$ soit 23,3 % du volume total du lac.

46. Les courants lacustres.

Parmi les mouvements de l'eau autres que l'agitation due aux vagues, nous classerons les courants lacustres comme Dussart (1954 a) et Rouch (1959) l'ont fait en : a) courants en relation avec la densité de l'eau;

b) courants de turbidité;

c) courants dus aux vents;

d) courants dépendant des ondes internes telles que les seiches.

Nous ne nous occuperons pas ici de la dernière catégorie de ces courants.

Précisons, d'autre part, ainsi que Rouch (1948) le rappelle p.249 de son ouvrage, que la direction d'un courant est celle dans laquelle il coule, contrairement aux notations habituelles relatives aux vents. Ainsi, lorsque l'eau se déplace du SW au NE, on dit qu'il s'agit d'un courant du NE. Sauf indication contraire, nous exprimons toutes les vitesses en mètres par heure (m/h).

46.1. Courants en relation avec la densité de l'eau.

À une profondeur donnée, une molécule d'eau subit une pression verticale, dirigée de haut en bas, égale en poids de la colonne d'eau qui la surmonte, abstraction faite de la pression barométrique à la surface de l'eau. Le poids de cette colonne d'eau est proportionnel à sa densité moyenne. Lorsque deux molécules, distinctes l'une de l'autre, sont placées à la même profondeur et subissent la même pression, aucune force ne tendra à déplacer l'une par rapport à l'autre. Par contre, si la pression sur l'une est différente de celle sur l'autre, une force tend à rétablir une pression identique sur les deux molécules en créant un courant dit de densité. Puisque la pression verticale exercée sur chacune des molécules dépend de la densité moyenne de la colonne qui les surmonte et que celle-ci est fonction de la température de l'eau, la pression exercée sur une des molécules différera de celle exercée sur l'autre lorsqu'une différence de température se manifestera entre elles, bien qu'elles soient situées à la même profondeur simultanément; un courant tendra alors à se créer entre ces deux points.

Le problème consistant à calculer la vitesse du courant ainsi créé en fonction des densités ou plutôt de leur différence régnant simultanément à une même profondeur s'est posé aux océanographes depuis fort longtemps. Ceux-ci lui appliquent la formule de Reiland-Ransen basée sur les méthodes de mesure indirecte des courants dues à Hjerknes. Cette formule est la suivante:

$$V = \frac{E_A - E_B}{2\omega L \sin \varphi}$$

où E_A est la pression s'exerçant sur la molécule A,
 E_B celle sur la molécule B au même niveau,

ω est la vitesse de rotation de la terre,
 L la distance séparant les molécules A et B,
 φ la latitude;
 V est alors la vitesse du courant de densité.

En examinant les mesures de température à diverses stations simultanément (paragraphe 26.2.6), nous avons dressé le tableau XLVI donnant les maxima des amplitudes thermiques instantanées. Essayons, en appliquant la formule de Helland-Hansen, de calculer la vitesse du courant susceptible de prendre naissance entre les stations dont les amplitudes maxima figurent dans ce tableau et choisissons deux paires de stations correspondant aux extrêmes des écarts de température au kilomètre.

Le 16 août 1961, entre les stations 45 et 14 distantes de 12 km l'une de l'autre, l'amplitude thermique est de 11,9 à 20 m de profondeur. A la station 45, l'eau accuse une température de 19,1 en surface et de 6,5 à 20 m, tandis qu'à la station 14 on enregistre 19,2 et 18,4 respectivement. En utilisant la méthode de calcul décrite dans Rouch (1948, p. 280 sq), on obtient 430 m/h comme vitesse de courant de densité.

Le 6 avril 1960, entre les stations 71 et 14 distantes de 29 km l'une de l'autre, l'amplitude thermique est de 2,15 à 12 m de profondeur. Le calcul de la vitesse du courant susceptible de prendre naissance dans ces conditions donne 3 m/h.

Les deux exemples ainsi mentionnés ne doivent être considérés que pour l'ordre de grandeur de la vitesse des courants de densité susceptibles de se former. Ainsi, le second est pratiquement nul et le premier du même ordre que ceux que nos observations révéleront pour les courants dus aux vents. En aucun cas il ne peut s'agir de résultats concordant étroitement avec la réalité car, non seulement certains facteurs perturbants sont négligés dans l'application des calculs de Bjerknes, mais des modifications peuvent intervenir en tout temps sous l'action combinée des vents et d'autres courants en rapport avec la morphologie du fond et appelés courants de pente.

46.2. Courants de turbidité.

L'eau mélangée à des sédiments possède une densité plus élevée que l'eau claire voisine et, si la différence de température entre les deux ne contrebalance pas le phénomène, l'eau alourdie par les sédiments tend à s'écouler sur les pentes du fond pour aller s'étaler ensuite dans les parties les plus profondes du lac. De tels courants prennent naissance dans la région pélagique sous l'effet d'éboulements ou de tremblements de terre et, dans la région littorale, sous l'action des vagues remuant le fond des zones peu profondes, de même que par le déversement d'affluents dont l'eau est chargée de matériel en suspension.

Au sujet des éboulements subaquatiques, Latil (1960) indique que de longues études dues à Ewing et Heezen prouvent que des séismes arrivent à déclencher, même sur des pentes faibles, des avalanches de vase pouvant créer des courants de turbidité de 28 km/h.

Etne la turbulence du courant de turbidité est grande, plus les sédiments qu'il transporte se maintiennent longtemps en suspension et plus ils sont entraînés loin de leur lieu de départ.

Lors des tempêtes du SW, la baie de l'Évole à Neuchâtel est le siège de courants de turbidité. Les vagues, en déferlant au fond de la baie, soulèvent des sédiments qui colorent l'eau en jaune-verdâtre. Un courant de turbidité, portant à la fois à l'E et au SSE, s'établit en une à deux heures, propageant les sédiments et la couleur de l'eau le long du littoral ainsi qu'à un demi-kilomètre au coins au large, autrement dit vers les parties les plus profondes de cette région.

Enflé lors des fortes pluies, le Seyon déverse à l'W de la même baie de l'eau très chargée et de couleur brune à brun-jaune. Un courant de turbidité issu de ces déversements s'établit, se superposant au précédent; il s'incurve à l'E vers les régions plus profondes, en direction du port de Neuchâtel. Sous l'effet de l'agitation due aux vagues, ce courant plus turbulent que le précédent, doit heurter le fond à plusieurs reprises, ce qui le fait remonter plusieurs fois en surface car plusieurs tourbillons isolés d'eau brune réapparaissent à une centaine de mètres les uns des autres jusqu'au-delà du port de la ville et à une centaine de mètres au large.

46.3. Courants dus aux vents.

Nous avons vu déjà, à propos des vagues, que sous l'effet du vent un courant se crée dans l'eau du lac. Ce courant affecte tout d'abord la surface mais, suivant les densités que possèdent les couches sous-jacentes, peut se propager de proche en proche jusqu'à des couches plus profondes.

Entraînant l'eau de surface et celle des couches subsuperficielles vers la côte sous le vent, le courant tend à accumuler à cet endroit de l'eau au-dessus du niveau normal moyen. Il y a rupture d'équilibre hydrostatique et l'eau d'abord poussée vers le rivage tend à revenir ensuite au large en suivant la pente du fond, provoquant ainsi ce qu'on appelle un courant de retour. Celui-ci peut se propager fort loin. À la côte d'où vient le vent, le phénomène inverse se produit et de l'eau profonde remonte vers la surface en même temps que de l'eau superficielle est poussée vers le large.

Sur le même littoral, un phénomène semblable peut se répéter plusieurs fois en profondeur. En période de stratification thermique, il peut même se produire un voisinage des interfaces séparant les diverses zones thermiques superposées.

Ayers (1962) montre que dans les grands lacs américains et en eau peu profonde les courants de surface suivent l'action des vents avec un retard qui varie de 2 h à 1 jour, tandis qu'en bassin profond, le décalage atteint facilement 10 à 12 jours. Au paragraphe 26.2.5 ci-dessus, nous exposons les résultats de nos observations sur le littoral neuchâtelois: à 30 m de profondeur et à 500 m environ de la rive, le décalage des courants par rapport aux vents est de 4 à 5 heures.

46.3.1. Données antérieures à la campagne actuelle.

Les renseignements en notre possession jusqu'ici et touchant

les courants dus aux vents sont très peu nombreux et fragmentaires; de plus, il s'agit toujours d'observations à la surface du lac seulement.

Durant l'hiver 1880, Hirsch (1882) puis Borel (1882) notent, entre le 7 et le 11 février, alors que l'air est absolument calme devant les quais de Neuchâtel, une dérive de glaçons isolés et correspondant à un courant de 240 à 257 m/h portant à l'W.

À la même époque, Guillaume (1882 b) remarque la présence, dans la baie de St. Blaise, de taches claires à la surface du lac, à l'endroit précis où, en hiver, le lac ne se couvre pas de glace alors que tout le reste de la baie se prend. L'auteur se contente de noter que ces taches s'étendent devant Neuchâtel, sans essayer de déterminer avec quelle vitesse le phénomène se propage. Il attribue l'origine de ces taches à la remontée d'eau de composition et de température différentes de celle du lac, comme manifestation de la résurgence de sources sous-lacustres dont l'existence est plausible à proximité du décrochement géologique de Monruz, sans que ces sources aient pu être localisées de manière sûre jusqu'à ce jour.

Ritter (1882 b) fait des remarques semblables devant la ville de Neuchâtel en attribuant ces traînées claires (appelées "bandes lisses" ou "fontaines" (EL) dans la région) à de l'eau d'égout charriant des matières grasses sous forme de fils à la surface du lac. La différence existant entre l'eau de ces taches et celle avoisinante avait été démontrée par Ladame (1861 b) déjà au moyen des différences de température obtenues en effectuant des mesures dans les taches et immédiatement à côté.

Il n'y a aucun doute que ces bandes lisses matérialisent un transport d'eau d'égout car nous pouvons les observer sortant de l'extrémité des collecteurs principaux chaque fois que le vent se lève ou souffle doucement.

Ainsi, le 29 novembre 1960, en traversant à plusieurs reprises une "bande lisse" large d'une trentaine de mètres, issue du môle dit du Grand canal à Neuchâtel et partant en direction de Cudrefin, nous observons que le vent du NW qui souffle faiblement n'a aucun effet à la surface de la bande lisse alors qu'il ride fortement l'eau à côté; à l'instar de ce qui se passe en mer lorsqu'on "file" de l'huile, le vent n'a pas de prise sur le film gras dessinant la bande lisse et qui se perd à 1½ km seulement au large en direction ESE.

Le 3 mars 1961 après-midi, par vent d'E faible, des bandes lisses issues de l'embouchure de la Serrière, de celle du Seyon ainsi que des collecteurs d'égout principaux du centre de la ville de Neuchâtel partent en zigzagant faiblement en direction SW puis, à ½ km au large, s'insurgent toutes en direction S. En trois heures environ, celles venant du Seyon et des collecteurs d'égout se dispersent au large de Serrières après un parcours approximatif de 3 km, tandis que celle issue de la Serrière passe par la station 2 et se disperse sensiblement au même moment à l'E de la station C, après un parcours de 4½ km environ. Le film de ces bandes lisses est donc soumis à un courant superficiel SW puis S ayant une vitesse d'environ 1 km/h à partir de

Neuchâtel et de 1,5 km/h au départ de Serrières.

Le 11 août 1961 au matin, par un faible vent du NW dont les rides sur le lac croisent une houle allongée portant au NE, l'eau boueuse du Seyon enflé par les pluies de la veille crée un courant de turbidité jusqu'à une centaine de mètres au large de son embouchure; la tache d'eau boueuse se maintient sur place plusieurs heures, mais se prolonge par une bande lisse s'incurvant en direction ENE parallèlement à une autre bande lisse issue de l'embouchure de la Serrière. Cinq heures plus tard, après avoir accompli toutes deux un trajet d'environ 4 km, elles s'estompent entre le Nid du Crê et Monruz. La vitesse du courant de surface correspondant peut être estimée à 800 m/h environ.

Enfin, le 18 juillet 1961 au début de l'après-midi, sous l'effet du vent soufflant du SSW à l'embouchure de la Broye, l'eau très chargée et colorée du canal est rabattue, dès sa sortie des mûles, en direction N à NE et envahit toute la baie de la "Terre au poulain" sur une longueur de 2 km et une largeur de 1 km environ, matérialisant le trajet de l'eau sortant de la Broye dont le courant n'est pas assez rapide pour entraîner l'eau du canal au large. Nous n'avons pas pu mesurer ni apprécier la vitesse du courant à cette occasion.

Rappelons encore que nous avons mentionné, au paragraphe 29.2.1 ci-dessus l'existence, sur un bref trajet, d'un courant dû à l'arrivée dans le lac des eaux de l'Orbe-Thièle. Les tentatives pour mesurer la vitesse et le parcours de ce courant devant Yverdon font partie du programme de nos recherches ultérieures.

46.3.2. Mesures de vitesses au moyen de dragues à courants.

Parmi les mesures effectuées dans les 7 zones définies par le tableau XIII et la figure 35, nous choisissons comme type celles du 23 septembre 1960 seulement pour en reporter les détails dans le tableau CLII. Ceci nous évite d'encombrer notre texte par une trop grande quantité de chiffres obtenus au cours de 19 séries de mesures exécutées entre 1959 et 1962. Nous exposerons d'ailleurs, mais sous forme résumée plus loin, les résultats obtenus pour l'ensemble de ces séries.

La méthode utilisée est décrite au paragraphe 20.11 auquel nous renvoyons pour plus de détails.

Le 23 septembre 1960, dans la zone Chevroux-Portalban le vent d'E souffle très faiblement au lever du jour, atteignant au maximum 2,7 m/sec entre 9h $\frac{1}{2}$ et 10h; à 10h $\frac{1}{4}$ il ne souffle plus et le calme subsiste jusqu'à la fin de la journée. La veille, le vent d'E a soufflé faiblement toute la journée, succédant à un fort vent d'W l'avant-veille et à un très fort vent d'W le jour précédant ce dernier.

Le 23 septembre 1960, la température de l'air accuse 10 $^{\circ}$ $\frac{5}{10}$ à 8h $\frac{1}{2}$, monte régulièrement jusqu'à 17 $^{\circ}$ $\frac{0}{10}$ à 14h, puis redescend à 15 $^{\circ}$ $\frac{5}{10}$ à 17h, tandis que dans le sens des opérations, la température de l'eau en surface est de 15 $^{\circ}$ $\frac{4}{10}$ à 8h $\frac{1}{2}$, de 16 $^{\circ}$ $\frac{3}{10}$ à 12h $\frac{1}{2}$ et de 16 $^{\circ}$ $\frac{2}{10}$ à 17h. Simultanément, la transparence mesurée au disque de Secchi oscille entre 4,90

et 5,10 m suivant l'endroit considéré. Un saut thermique existe de 21 à 23 m de profondeur, délimitant un métalimnion d'une puissance de 2 m. Sept dragues à courant fonctionnent dans l'épilimnion, une dans le métalimnion et trois dans l'hypolimnion. Le lac accuse une profondeur de 50 à 110 m dans la zone des mesures.

Dans le tableau CLII les résultats concernant seulement la composante horizontale des courants lacustres examinés.

TABLEAU CLII

Vitesses moyennes et extrêmes observées entre Chevroux et Portalba
le 23 septembre 1960 et exprimées en mètres par heure.

Profondeur (m)	Vitesse minimum (m/h)	Durée en min.	Période horaire (h)	Vitesse maximum (m/h)	Durée en min.	Période horaire (h)	Vitesse moyenne (m/h)
0	57	141	12 - 14	613	62	8½ - 9½	234
3	19	60	15 - 16	553	62	8½ - 9½	279
4,5	544	56	9 - 9½	629	56	9½ - 10½	587
9	91	88	13½ - 15	663	102	12 - 13½	356
12	177	61	8½ - 9½	335	70	11 - 12	255
15	130	59	15 - 16	168	78	16 - 17½	152
18	22	61	15½ - 16½	150	77	11 - 12	99
21	41	59	15½ - 16½	130	60	9 - 10	96
24	38	146	12 - 14½	137	58	10 - 11	74
27	39	133	12 - 14½	235	27	16 - 16½	105
30	110	134	12 - 14½	221	62	8½ - 9½	145
Epilimnion							252
Métalimnion							96
Hypolimnion							108
0 - 30							192

La vitesse moyenne pour chaque niveau est la moyenne pondérée correspondant aux enregistrements de la journée pour ce niveau.

La figure 160 illustre les trajets effectués par les dragues à courant au cours des opérations.

Il ressort du tableau CLII que la vitesse moyenne la plus élevée est enregistrée non pas en surface, mais à 4,5 m de profondeur; toutefois, les mesures n'y ont eu lieu qu'une partie de la matinée, la drague ayant sombré par avarie au flotteur, ce qui explique la brièveté du trajet parcouru.

Les vitesses augmentent donc à partir de la surface, passent

par un maximum à 4,5 m, diminue ensuite, passent par un minimum immédiatement sous le métalimnion (à 24 m), puis augmentent à nouveau plus bas.

En surface, la direction du courant est d'abord WSW pendant que le vent souffle encore faiblement, change en NE lorsque le calme se rétablit, puis varie à nouveau pour revenir au SW. De 3 à 15 m de profondeur, la direction générale du mouvement est WSW; à 18 m, elle devient NEW et à 21 m ENE. Enfin, dès 24 m elle est de nouveau WSW.

L'effet du vent d'E qui soufflait la veille se fait donc encore sentir dans les couches supérieures, mais il est de moins en moins marqué à mesure que la profondeur augmente, tandis que dans le métalimnion on a affaire à un contre-courant de direction inverse qui influence mécaniquement celui de 18 m dont la direction est la résultante des mouvements à 15 et 21 m. Il s'agit des séquences de mouvements de la veille alors que le vent d'E, soufflant du rivage, chassait vers le large et en direction W, l'eau de l'épilimnion; simultanément, cette eau ayant tendance à s'accumuler vers la Motte, a chassé celle du métalimnion en sens inverse; or, cette dernière, revenant vers la rive de Portalban, y augmente la puissance du métalimnion et tend à s'enfoncer en suivant la pente du fond pour repartir au large dans l'hypolimnion.

46.3.3. Résultats obtenus quant à la direction des courants dans les diverses zones étudiées.

A. Baie d'Anvernier.

Deux séries de mesures avec vent et trois par temps calme.

Le 9 juin 1959, après 3 jours de calme entrecoupés chaque soir de 2 h environ de joran du NNW: le matin (figure 148), vent du NW faible. Métalimnion de 8 à 14 m. A toutes les profondeurs sauf en surface, la direction est S au début de la matinée, s'incurvant pour revenir au NW vers midi. Les vitesses augmentent de la surface à 6 m, diminuent fortement dans le métalimnion, passent par un minimum à 18 m et augmentent à nouveau. Le vent s'étant levé le matin, chasse d'abord l'eau vers le large, mais celle-ci tend à revenir en profondeur et 5 heures plus tard environ vers la rive après s'être heurtée à des masses d'eau inertes parce que situées plus au large.

Le même jour, mais l'après-midi (figure 149), le vent ayant tourné au SW incurve le courant de surface vers l'E tandis qu'en profondeur l'eau à chaque niveau cherche à poursuivre sa route tant bien que mal en se fanfiant de manière presque désordonnée entre les masses d'eau avoisinantes en place.

Le 14 juillet 1959 (figure 150), journée sans vent jusqu'au milieu de l'après-midi après plus de 3 jours de calme. Métalimnion de 4 à 12 m. Vitesse des courants très variable de la surface jusqu'au milieu du métalimnion (9m) où elle passe par un maximum. Dans la partie inférieure du métalimnion, ainsi que juste en-dessous (minimum à 15 m) puis dans l'hypolimnion, les vitesses varient peu et sans ordre,

LAC DE NEUCHÂTEL ZONE D'ACTION DES VAGUES

1957-1962

ECHELLE: 1:100000.

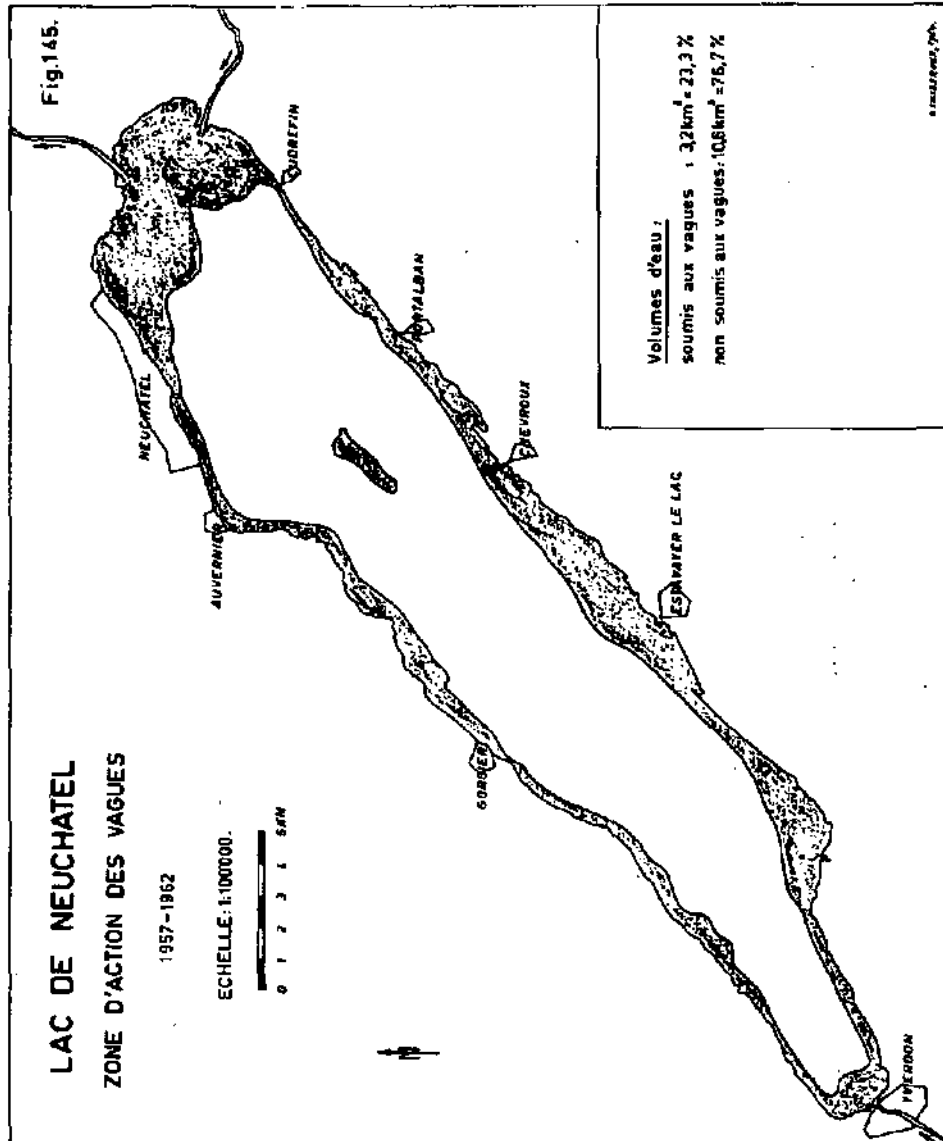
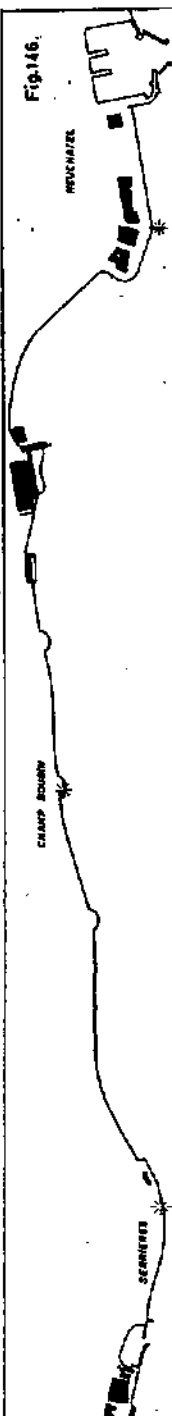


Fig. 145.

Volumes d'eau:
soumis aux vagues : $32 \text{ km}^3 = 23,3 \%$
non soumis aux vagues : $108 \text{ km}^3 = 76,7 \%$

Fig.146.



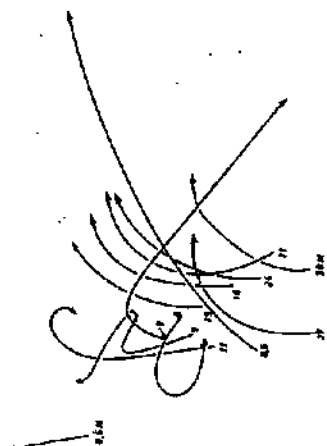
LAC DE NEUCHÂTEL

Champ Bougin

COURANTS LACUSTRES

16 avril 1959

de 11 à 18 h.



ÉCHELLE: 1:5000.

0 50 100 150 200 250 M

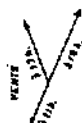


Fig. 147.

NEUCHÂTEL

CHAMP ROUGE

SECHERES

LAC DE NEUCHÂTEL

Champ Bougin

COURANTS LACUSTRES

13 mai 1959

de 7 à 18 h.

22.11.1959

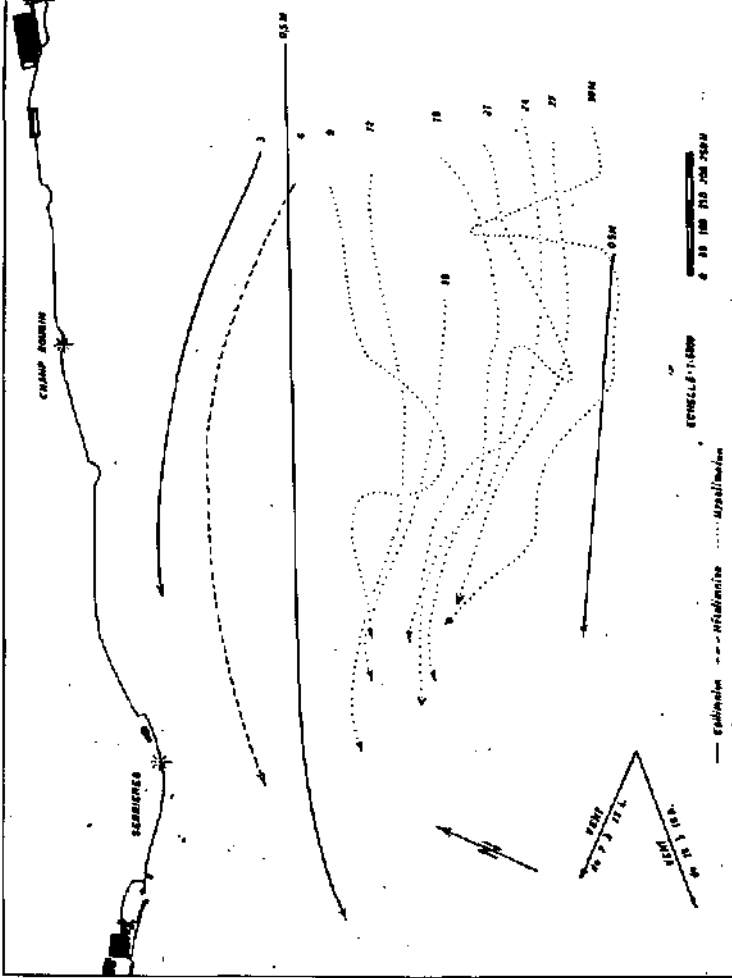


Fig.168.

LE BIED

AUVERNIER

LAC DE NEUCHÂTEL

Baie d'Auvernier
COURANTS LACUSTRES

9 juin 1959

de 7 à 12 h.

— Epilimnion ——— Mésolimnion Hypolimnion

ÉCHELLE: 1:5000

0 50 100 150 200 250 M

Fig. 149.

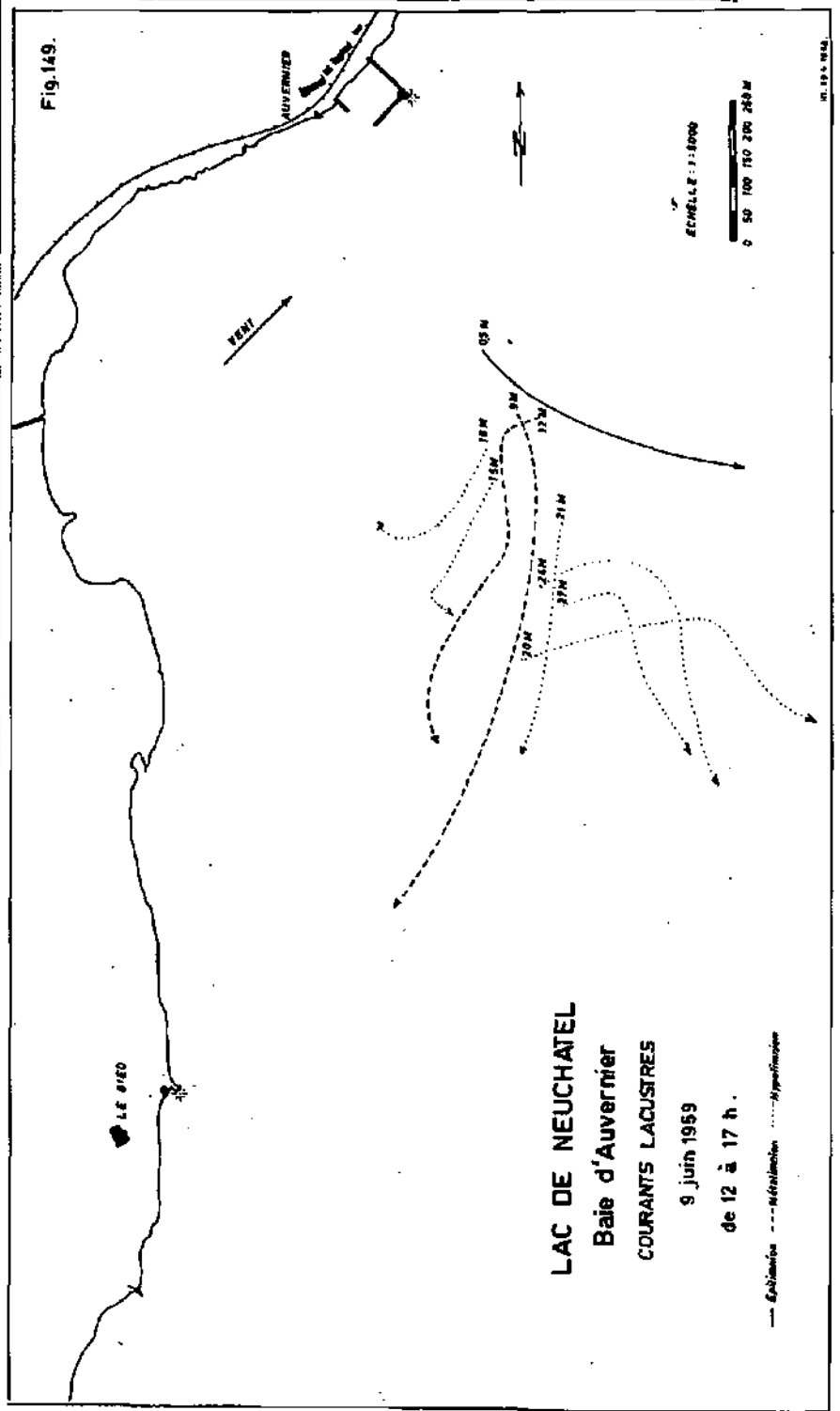


Fig.150.

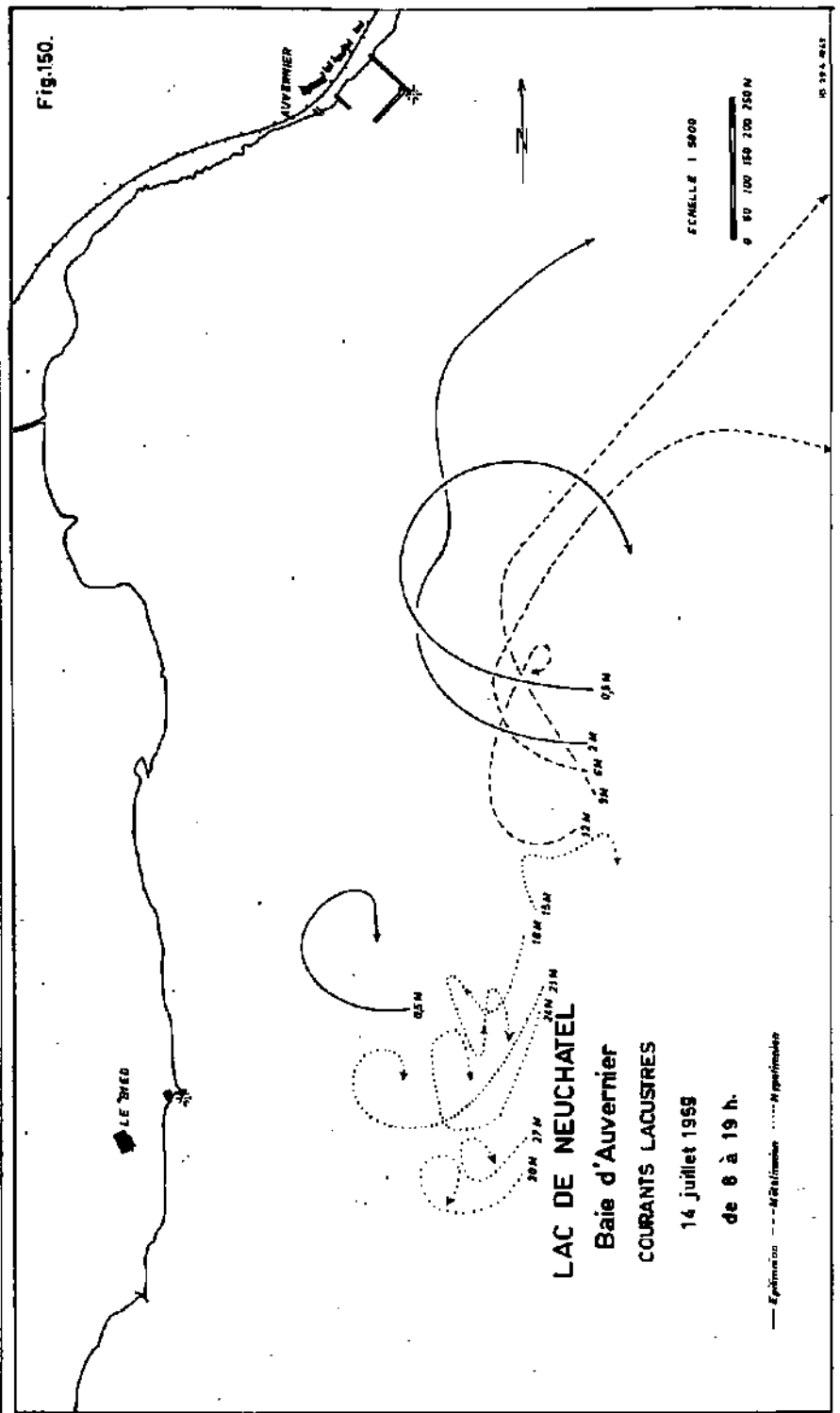


Fig. 151

NEUCHÂTEL



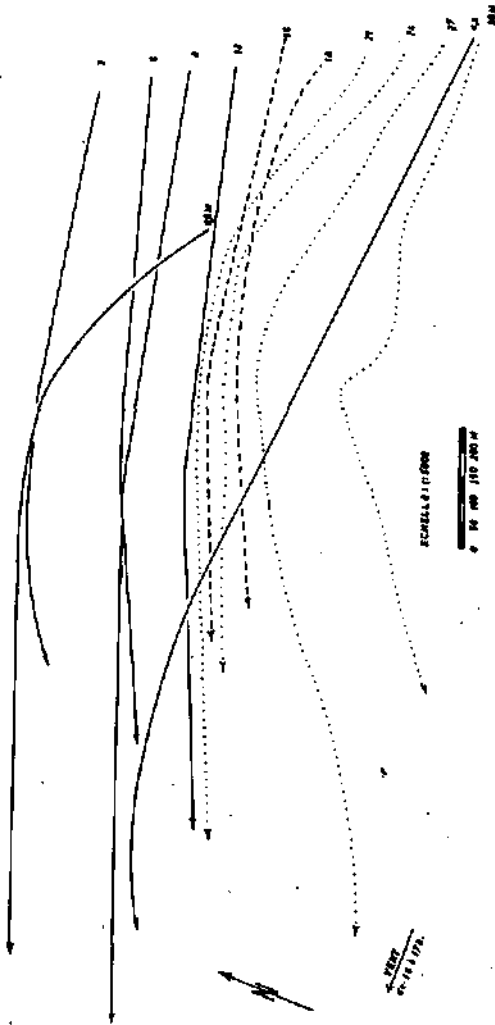
LAC DE NEUCHÂTEL

Champ Bouquin

COURANTS LACUSTRES

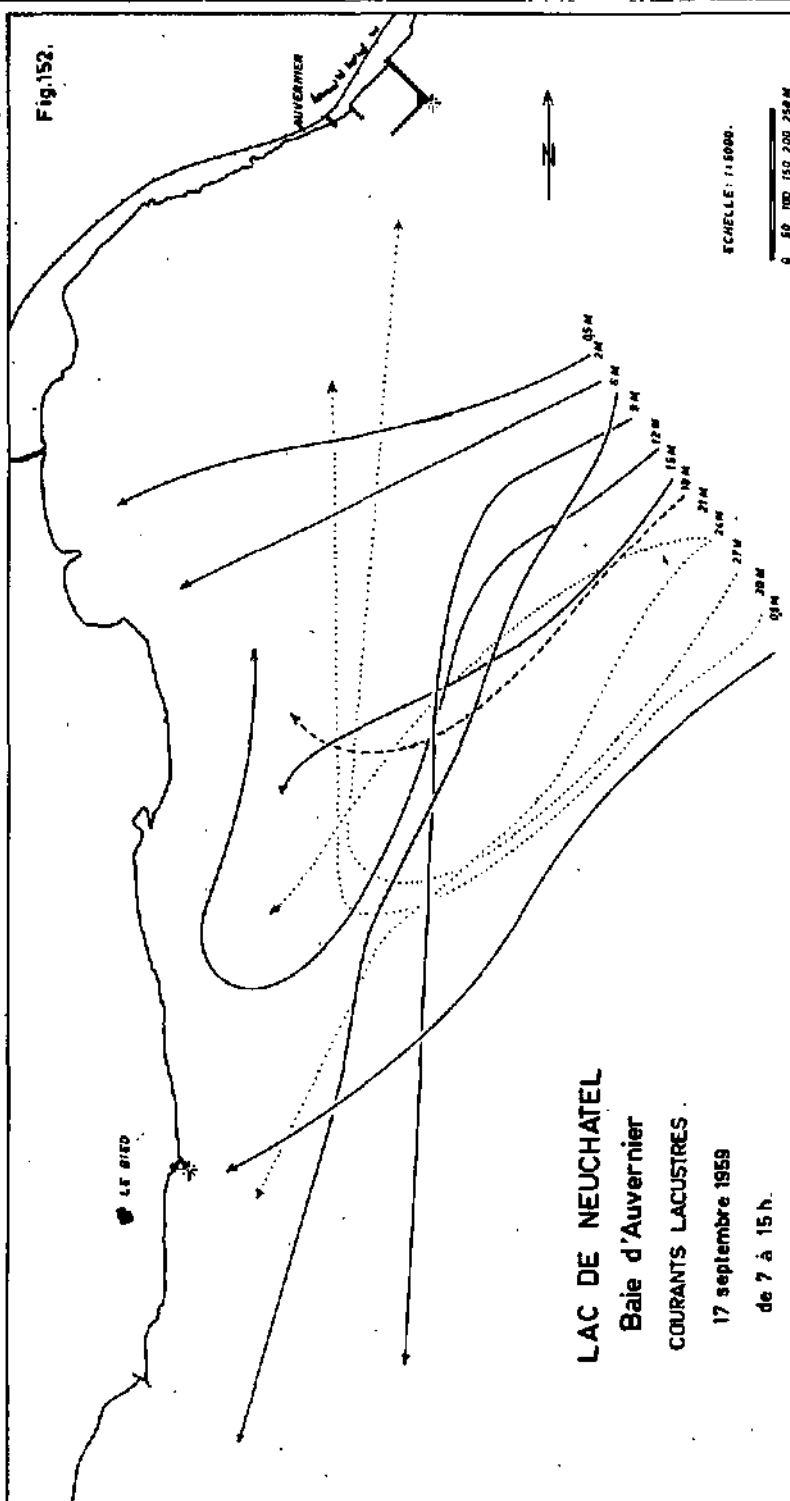
20 août 1959

de 7 à 18 h.



— Expérimental — de l'Observatoire — de l'Observatoire

Fig. 152.



LAC DE NEUCHÂTEL
Baie d'Auvernier
COURANTS LACUSTRES

17 septembre 1959

de 7 à 15 h.

— Epilimnion - - - - - Hypolimnion

ECHELLE: 1:5000.

0 50 100 150 200 250 M

Fig. 153.

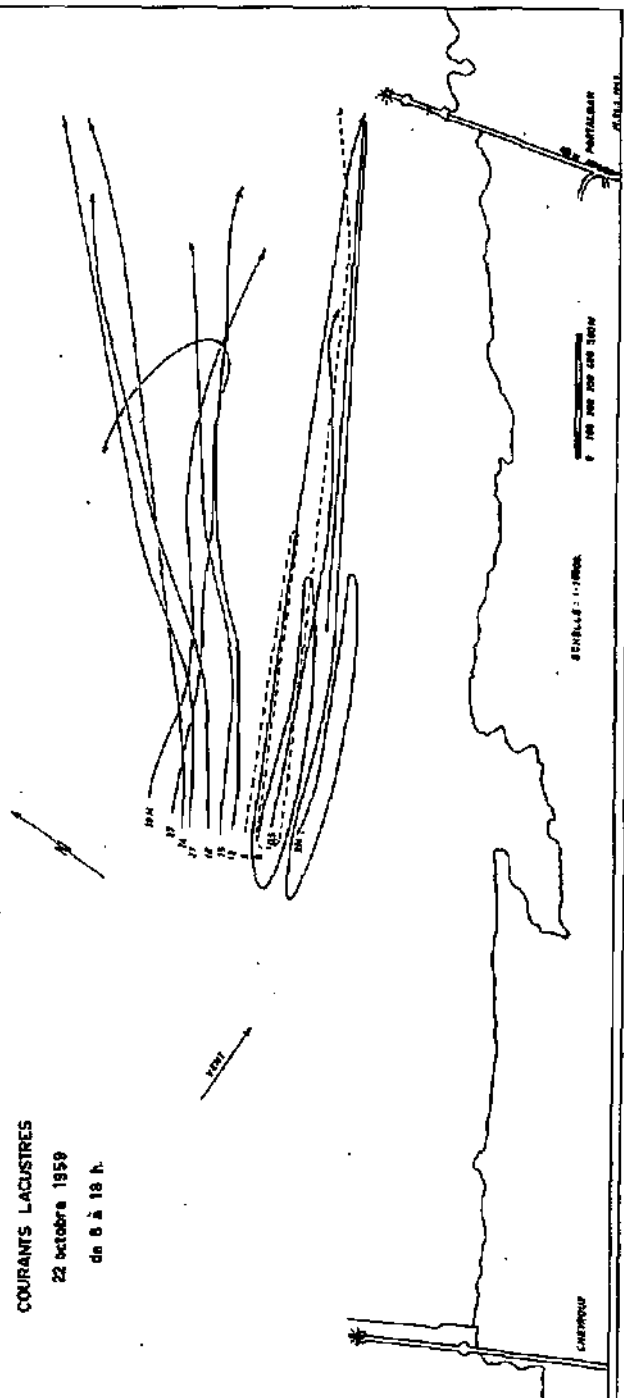
LAC DE NEUCHÂTEL

Chevroux - Portailban

COURANTS LACUSTRES

22 octobre 1959

de 6 à 18 h.



CHAMP BOUGIN

PORT DE NEUCHÂTEL

VENT

LAC DE NEUCHÂTEL

Champ Bougin

COURANTS LACUSTRES

8 décembre
1959

de 8 à 12 h.

ÉCHELLE : 1:5000

0 50 100 150 200 250 M

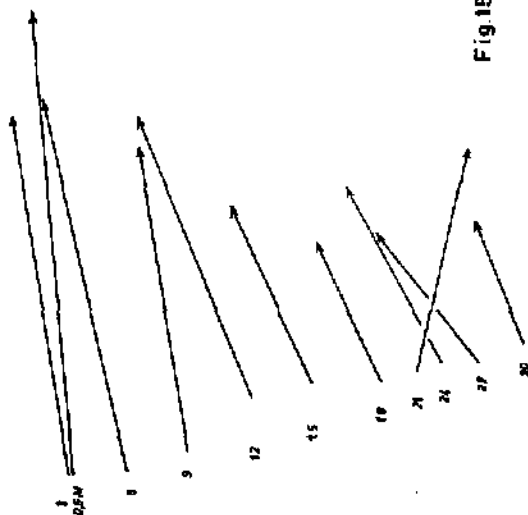


Fig. 154.

Fig. 155.

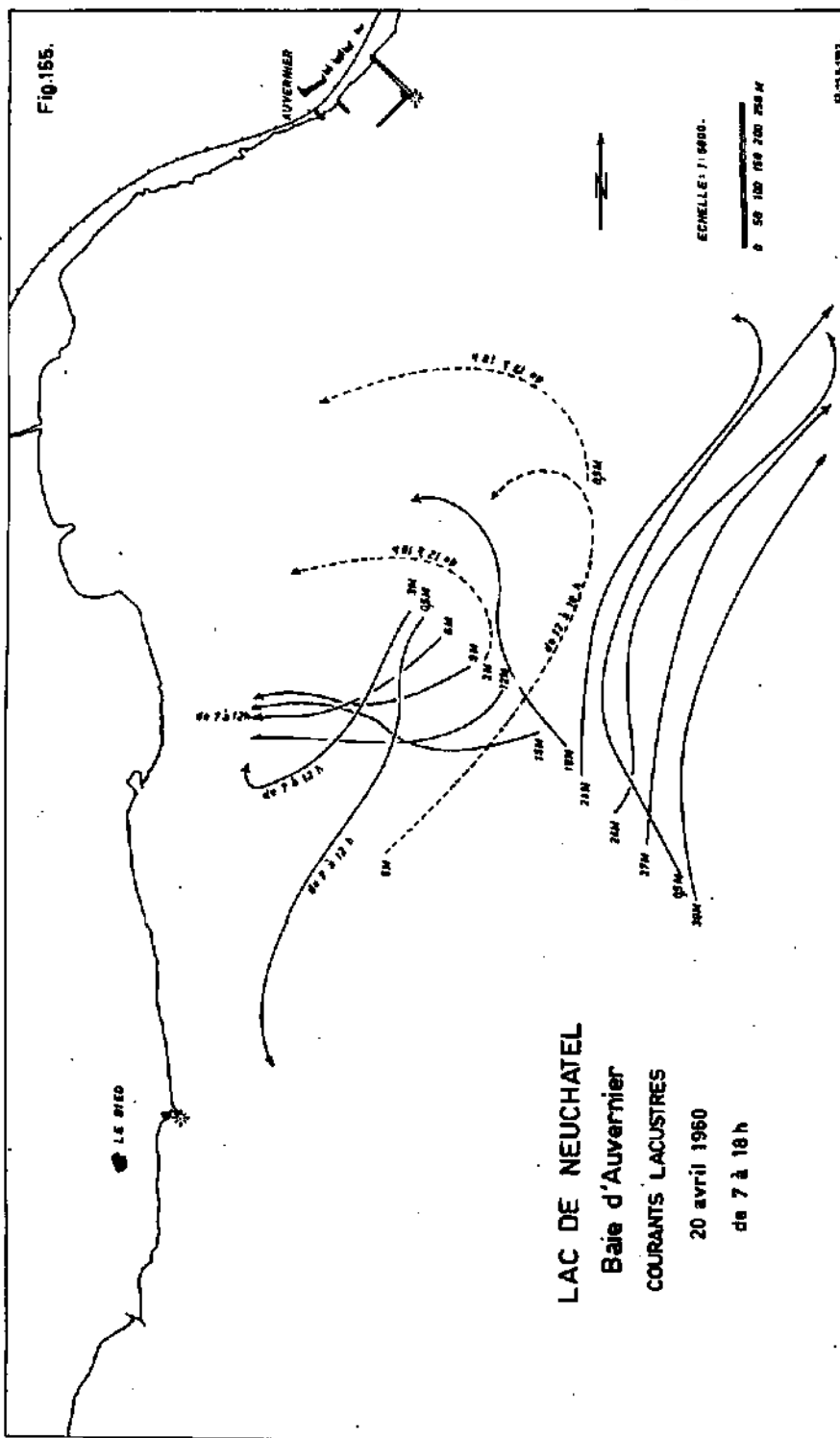
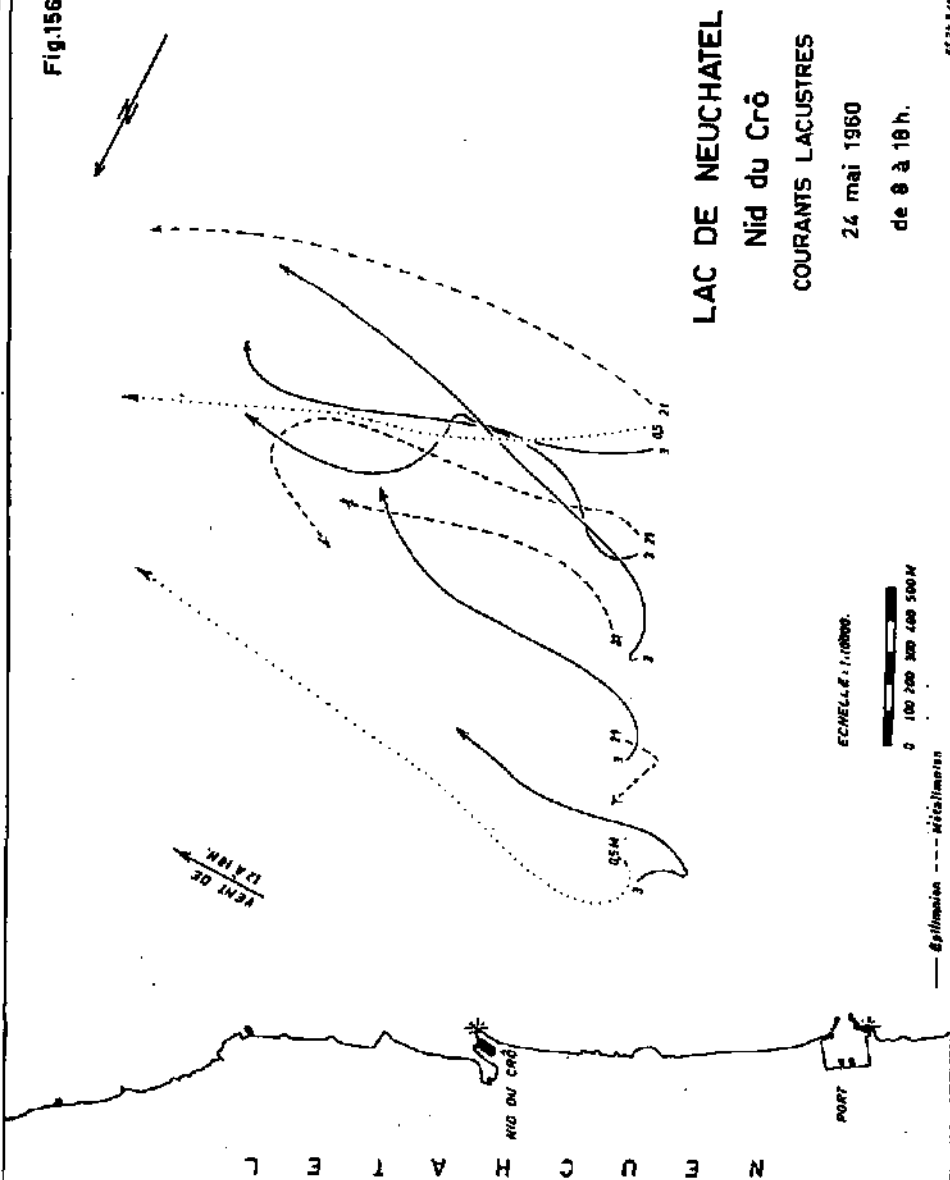


Fig.156.



ne dépassent pas les 2/3 de celles observées dans l'épilimnion. Les courants ont tous une allure tourbillonnaire dans le sens des aiguilles d'une montre, vraisemblablement sous l'influence de la force de Coriolis. Sont-ils tous des restes de courants ayant régné il y a plus de 3 jours, ou simplement la résultante de petits courants locaux plus ou moins éloignés ? Il est impossible de le dire.

Le 17 septembre 1959 (figure 152), jour calme sauf une petite brise d'E un moment au début de la matinée, puis orage et pluie, le tout succédant à un très fort vent d'W la veille. Métalimnion de 17 à 20 m. En surface, sous l'effet de la brise faible, l'eau s'écoule vers l'WSW. En profondeur, quel que soit le niveau, toute la masse se déplace dans la même direction, vraisemblablement à la suite des courants de retour créés la veille. À l'approche de la rive W de la baie, la proximité du fond a un effet déviateur sur les courants qui s'éparpillent en E ou en S. Les vitesses se succèdent du haut en bas de manière désordonnée, le maximum en surface, le minimum à 18 m dans le métalimnion.

Le 20 avril 1960 (figure 155), calme le matin, puis vent d'E très faible l'après-midi, calme la veille après deux jours de vent d'E faiblissant. Pas de stratification thermique. Le matin, de 3 à 15 m le courant porte à l'W, à 18 m au NW puis à l'W et de 21 à 30 m au NNE; il s'agit vraisemblablement de séquelles des courants engendrés deux jours auparavant par le vent d'E. Deux dragues de surface placées simultanément à 300 m de distance l'une de l'autre en milieu du champ de mesure dérivent, l'une au N et l'autre au S sensiblement avec la même vitesse. L'après-midi, sous l'effet du vent d'E qui se lève faiblement, un courant d'W s'établit en fin de journée, mais de la surface à 9 m seulement, rien n'étant changé plus bas. Les vitesses diminuent presque régulièrement de la surface (maximum) à 18 m (minimum), puis augmentent à nouveau plus bas.

B. Embouchure de la Broye.

Le 20 juin 1960 (figure 157) des dragues sont lâchées à 1,2 m de profondeur dans le courant de la Broye, au milieu du canal, à 200 m en amont de l'extrémité du môle E. D'autres sont placées à 3 m de profondeur en divers endroits du lac au large de l'embouchure. À un faible vent d'E succède un vent plus fort et variable de E à NW. La veille était calme après 2 jours de vent d'E modéré. À 200 m de l'extrémité du môle S, tout au long de la journée le courant issu du canal s'incurve au S en direction de Cudrefin et sa vitesse double durant la journée, vraisemblablement sous l'effet du vent, car l'eau peu profonde à l'embouchure du canal aspire partiellement celle de celui-ci en l'accélérant. Au large, à 3 m de profondeur, le courant suit la direction du vent.

C. Champ Bongin.

Quatre séries de mesures: trois par vent d'E et une par vent d'W.

Le 16 avril 1939 (figure 146) vent d'E faible, puis de directions variables après 3 jours de calme. Pas de stratification thermi-

que. A toutes les profondeurs, courants à allure tourbillonnaire comme à la baie d'Auvernier le 14.VII.59. Tous les courants tournent dans le même sens, sauf à 6 m où il y a une inversion. La vitesse diminue de la surface (maximum) à 6 m de profondeur (minimum), puis varie peu en restant faible.

Le 13 mai 1959 (figure 147), après trois jours de calme, vent d'E à NE modéré. Métalimnion de 4 à 7 m. Dans l'épilimnion et le métalimnion, les courants suivent le trajet du vent. Dans l'hypolimnion aussi, mais avec des écarts de route auxquels la morphologie du fond n'est pas étrangère. Les vitesses diminuent à partir de la surface (maximum), rapidement dans le métalimnion et sont presque semblablement plus faibles dans l'hypolimnion.

Le 20 août 1959 (figure 151), vent d'E faible, mais établi depuis plus de 3 jours. Métalimnion de 13 à 19 m. A toutes les profondeurs les courants suivent le trajet du vent. Les vitesses augmentent de la surface jusqu'à 9 m de profondeur, puis diminuent, en particulier très rapidement de la partie supérieure à la partie inférieure du métalimnion et continuent à décroître dans l'hypolimnion.

Le 8 décembre 1959 (figure 154), vent du SW modéré à fort, après 3 jours de calme. Pas de stratification thermique. A toutes les profondeurs, les courants suivent le trajet du vent sauf à 21 m où se produit un changement d'orientation resté inexpliqué. Les vitesses se succèdent de manière désordonnée de haut en bas. Les mesures doivent être interrompues à midi devant l'amplification du vent.

B. Chevreux-Portaban.

Trois séries de mesures, 1 par vent d'W, 1 par temps calme et 1 par bise faible puis calme.

Le 22 octobre 1959 (figure 153): vent d'W irrégulier après un jour de vents faibles et variables succédant à 2 jours de calme. Pas de stratification thermique. La direction générale des courants suit celle du vent, à l'exception de 3 et 6 m de profondeur où a lieu, d'abord un mouvement de va-et-vient sur 1 km dans la matinée et parallèlement à la côte; à 27 m, le courant s'incurve brusquement vers le milieu de l'après-midi pour rebrousser chemin ensuite. Ces rebroussements restent encore sans explication. Les vitesses à 3, 6 et à 9 m sont doubles des autres.

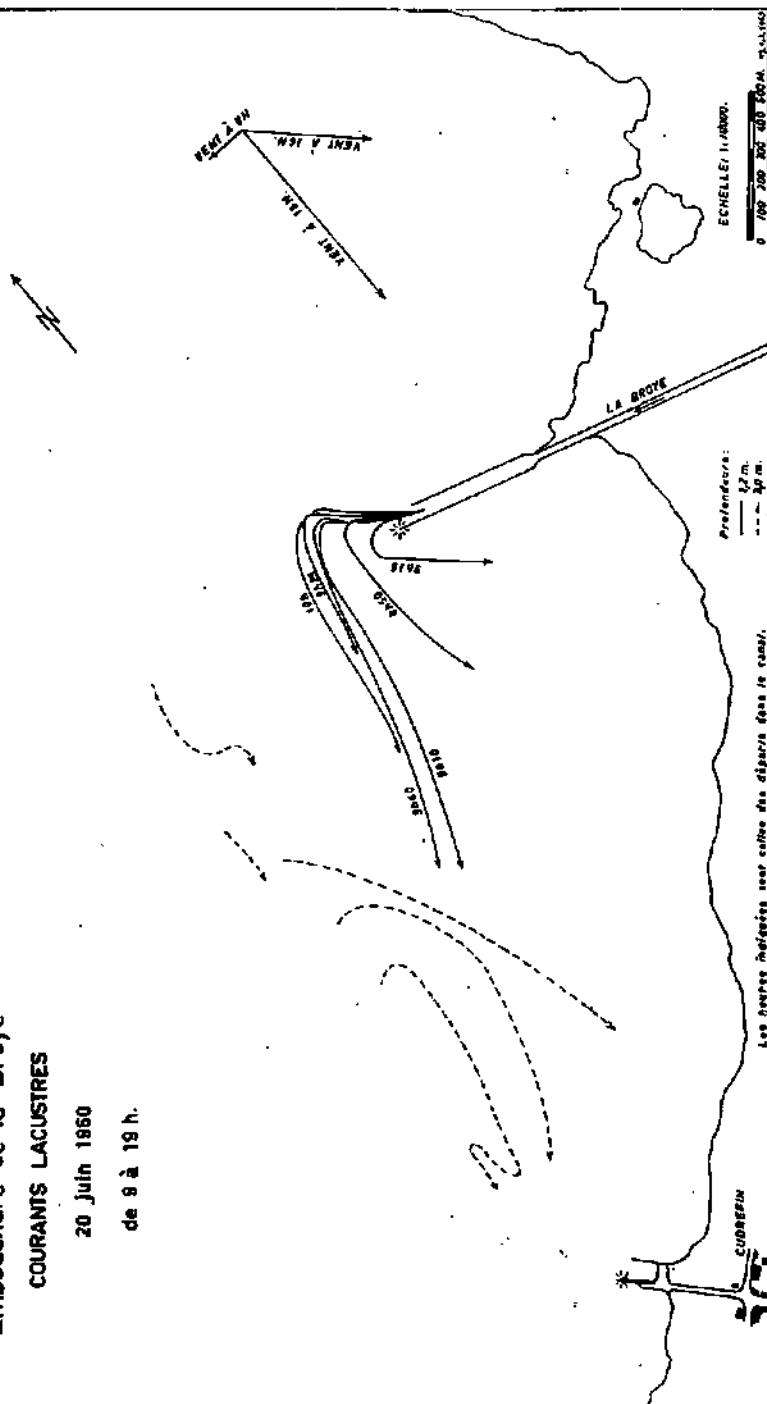
Le 24 août 1960 (figure 159): calme sauf un "coup de joran" vers midi, succédant à 3 jours de calme au moins. Métalimnion de 12 à 25 m, se réduisant en cours de journée de 15 à 25 m. Dans l'épilimnion et le métalimnion, les courants portent au NE, parallèlement à la côte, mais avec des vitesses décroissant de la surface à 24 m. Dans l'hypolimnion, les courants sont inversés et la vitesse est plus grande à 30 m qu'à 27 m. On a affaire, vraisemblablement, à des courants résultant d'autres plus anciens ou participant à un mouvement plus général des eaux dans la vallée S de la Motte.

Nous avons traité le cas du 23 septembre 1960 au paragraphe 46.3.2 déjà.

LAC DE NEUCHÂTEL Embouchure de la Broye COURANTS LACUSTRES

20 Juin 1960
 de 8 à 19 h.

Fig. 157.



LAC DE NEUCHÂTEL

Nid du Crô

COURANTS LACUSTRES

13 juillet 1980

de 8 à 19 h.

N E U C H Â T E L

NID DU CRÔ

PORT

ECHELLE 1:10000.

0 100 200 300 400 500 M

— Epilimnion — Méliomnion

Fig.158.

Fig. 169.

LAC DE NEUCHÂTEL

Chevroux - Portailban

COURANTS LACUSTRES

24 août 1960

de 6 à 18 h.

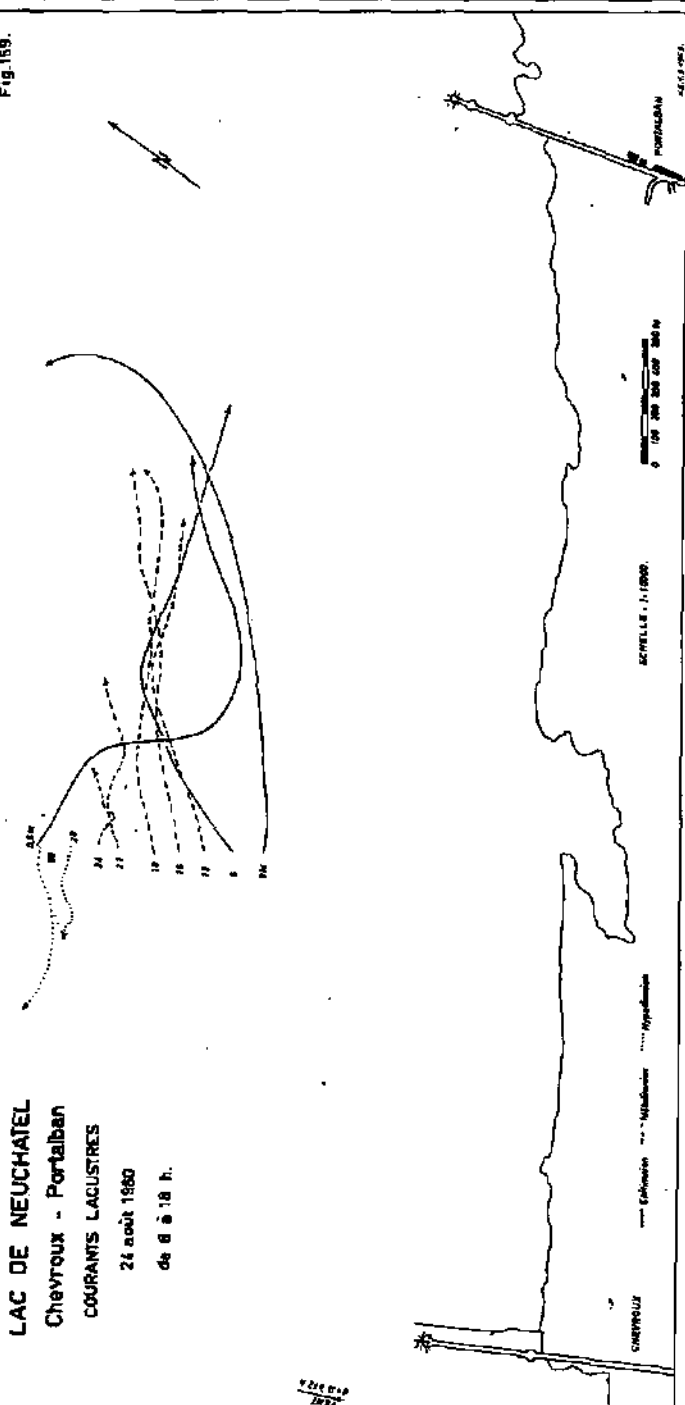


Fig.160.

LAC DE NEUCHÂTEL

Chevroux - Portauban

COURANTS LACUSTRES

23 septembre 1960

de 8 à 18 h.

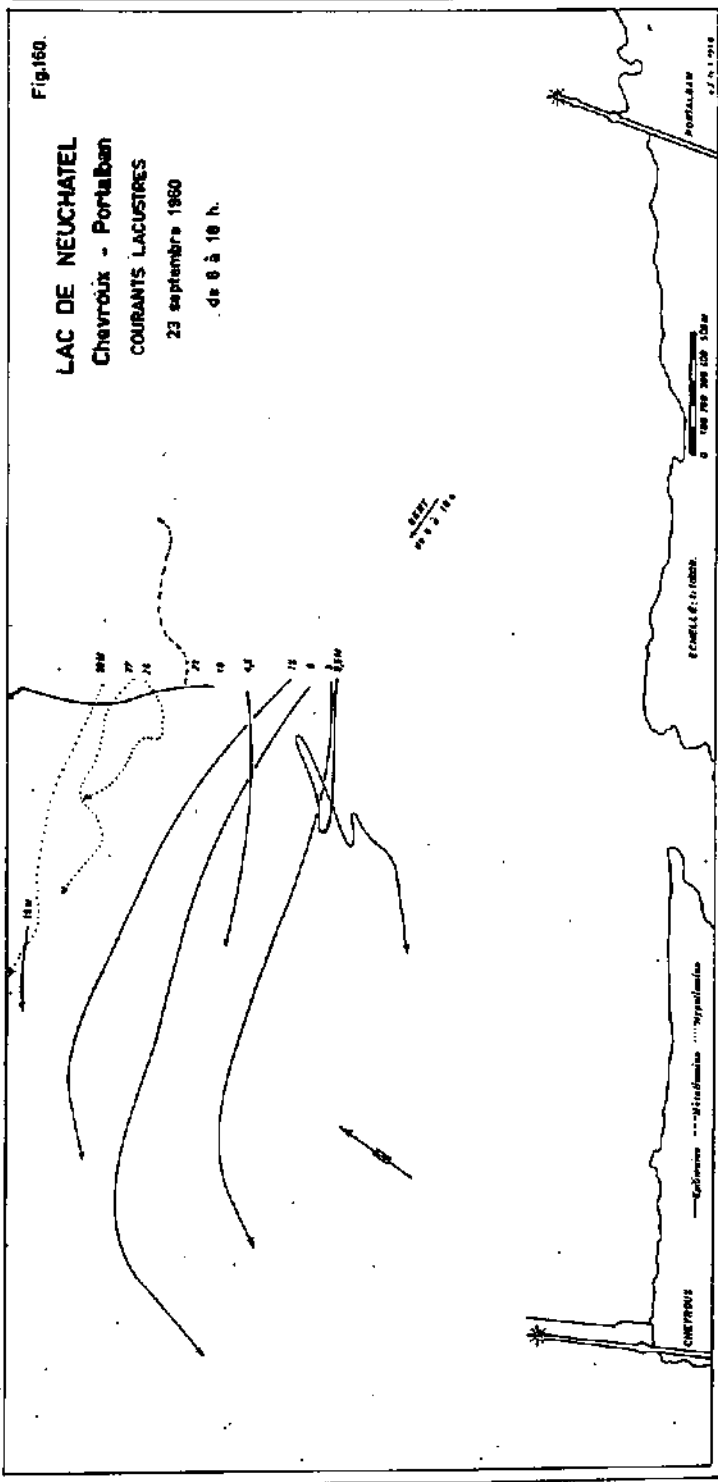


Fig. 161

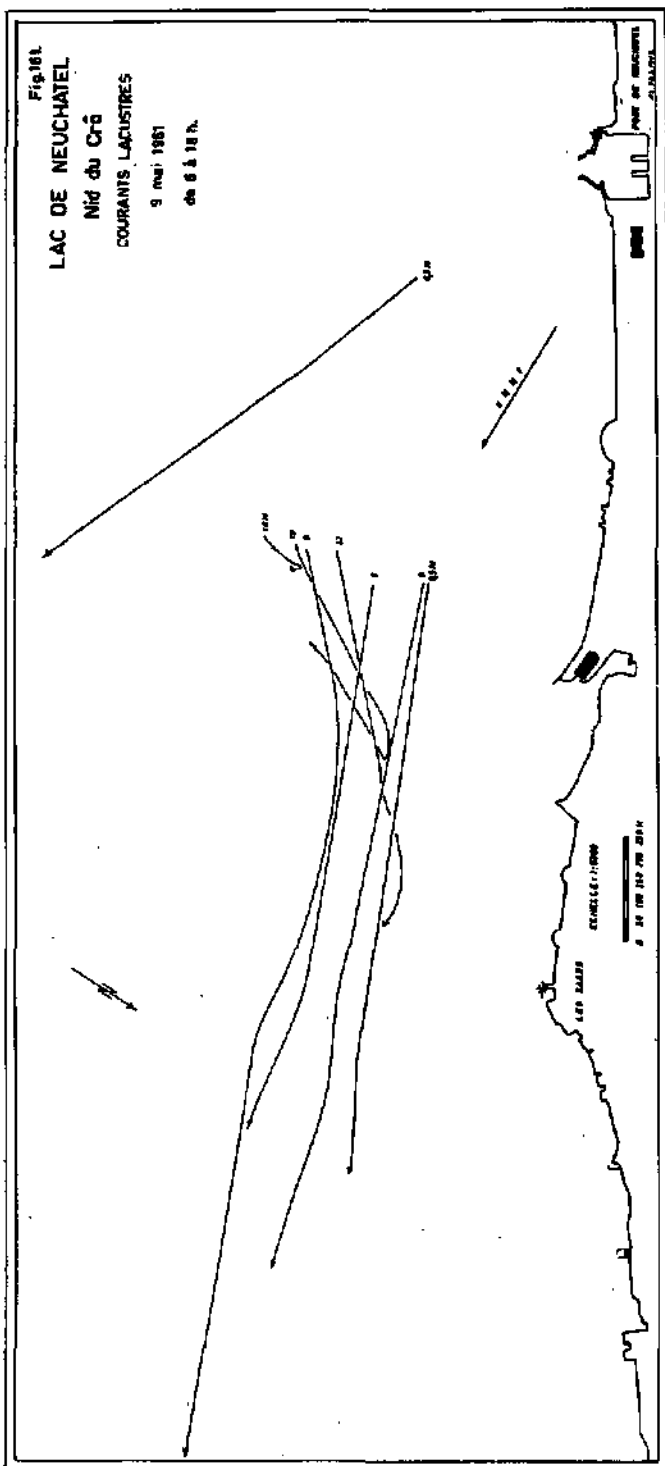
LAC DE NEUCHÂTEL

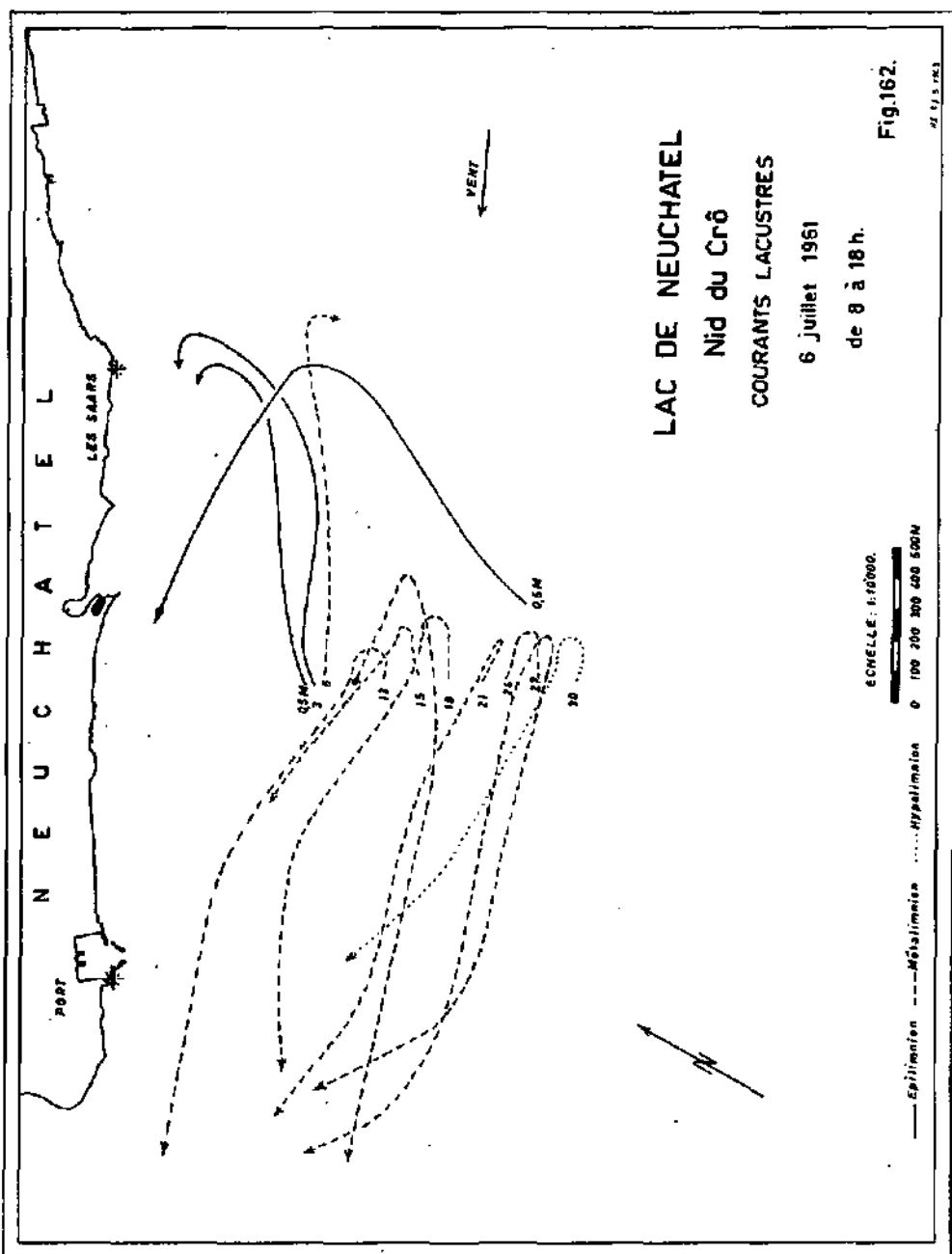
Nid du Crê

COURANTS LACUSTRES

9 mai 1961

de 6 à 18 h.





E. Mid du Crô.

Six séries de mesures, dont 3 par vent d'W, 1 par vent d'E et 2 par temps calme.

Le 24 mai 1960 (figure 156): vent d'W fraîchissant après un jour de calme ayant succédé à deux jours de vent d'W modéré. Métalimnion de 12 à 14 m. D'une manière générale, les courants portent à l'E et subissent une déflexion vers le SE au moment où ils se rapprochent du fond car la pente sous-lacustre est orientée SSW. Toutefois, deux dragues à 21 m trahissent l'amorce d'un courant de retour au contact du fond. La vitesse, maximum en surface, est plus faible à 21 m qu'à 3m.

Le 13 juillet 1960 (figure 158): temps calme après 3 jours de fort vent d'W. Métalimnion de 14 à 30 m. De la rive jusqu'à 1½ km au large, les courants de surface et à 3 m de profondeur portent à l'E, tandis qu'en-deà ils se dirigent vers le S. A 21 m par contre, on a un courant d'E jusqu'à 1 km au large et, plus loin, de faibles tourbillons sur place. Cette situation est vraisemblablement une séquelle des courants superficiels et des courants de retour engendrés les jours précédents. La vitesse est la plus élevée à 3 m et minimum à 21 m.

Le 9 mai 1961 (figure 161): vent du SW à W irrégulier, après trois jours identiques. Métalimnion de 17 à 22 m. L'ensemble des courants porte à l'EHE le long de la côte, tendant à diverger vers le large, mais à partir de 12 m le frottement sur le fond tend à créer un courant de retour de plus en plus marqué à mesure que la profondeur augmente. La vitesse est maximum en surface et baisse régulièrement jusqu'à 15 m.

Le 6 juillet 1961 (figure 162): vent d'E modéré à faible, après 3 jours de vents variables faibles. Métalimnion de 6 à 27 m. Dans l'épilimnion les courants se dirigent d'abord vers le NNE, puis sont déviés vers l'W aux approches de la côte. L'interface épilimnion-métalimnion se déplace en direction NNE puis SSE. Plus bas, tous les courants vont à l'WSW après avoir marqué un tourbillon au début de la matinée: dans le sens des aiguilles de la montre à 9, à 24 et à 27 m, dans le sens contraire à 12, 15, 18, 21 et 30 m de profondeur. Les vitesses sont très faibles aux entrées dans l'épilimnion et le métalimnion, nettement plus faibles dans l'hypolimnion.

Le 9 mai 1962 (figure 163): vent du SW modéré succédant à 2 jours de calme. Métalimnion de 4 à 7 m. Le vent n'ayant commencé que durant la nuit et faiblement, l'épilimnion et le métalimnion accusent des courants tourbillonnaires dans le sens contraire des aiguilles de la montre. Dans l'hypolimnion, tous les courants portent à l'E avec, parfois, des écarts de trajet dus à la proximité du fond. La vitesse est minimum dans le métalimnion, mais varie sans ordre entre les autres profondeurs.

Le 14 juin 1962 (figures 164 et 165): calme depuis 3 jours. Métalimnion de 4 à 7 m. Devant le port de Neuchâtel, tous les courants portent à l'WSW, sauf à 9, à 27 et à 30 m où ils se dirigent vers le large; devant le Mid du Crô, direction WSW parallèle à la côte à toutes les profondeurs. Vitesses croissantes de la surface à 3 m, lentement

décoroïssantes au-dessous. Durant la période considérée, la Thièle coule normalement. Il doit donc s'agir de courants participant à un mouvement général des eaux dans cette partie du lac.

F. Treytel.

Le 19 septembre 1962 (figure 166): calme depuis plus de 3 jours. Métalimnion de 18 à 22 m. En surface: courant zigzagant en direction du fond de la baie. A 6, 12 et 21 m, courants tourbillonnaires portant vers le NE et le NNE, tournant à droite à 6 et 21 m, à gauche à 12 m. A 30, 50, 100 et 140 m: courants faibles et zigzagants. La vitesse baisse régulièrement de la surface en fond.

46.3.4. Les vitesses des courants mesurées de 1959 à 1962.

Nous donnons sous forme de tableaux les moyennes et les extrêmes des vitesses observées durant les années 1959 à 1962 dans les zones 1 à 6 de la figure 35. Les premières opérations dans la zone 7 ayant échoué pour des raisons techniques, elles sont reportées dans le programme ultérieur de nos recherches.

46.3.4.1. Les vitesses en fonction de la profondeur.

TABLEAU CLIII

Vitesses moyennes des courants lacustres dûs aux vents, mesurées à diverses profondeurs et exprimées en mètres par heure.

Profondeur en m.	Baie d'Anvernier	Champ-Bougin	Chevroux-Portalban	Nid du Grê	Ensemble des régions*
0	<u>216</u>	<u>561</u>	260	267	<u>302</u>
3	179	320	345	210	218
6	210	284	<u>661</u>	<u>281</u>	277
9	161	283	393	278	267
12	128	267	250	212	198
15	89	267	218	237	191
18	<u>78</u>	193	186	225	161
21	99	167	173	<u>144</u>	<u>139</u>
24	110	139	<u>150</u>	240	155
27	131	<u>128</u>	153	199	144
30	129	146	167	169	143
0 - 30	142	253	248	218	201

* dans cette colonne sont comprises aussi les mesures isolées de l'embouchure de la Broye et de Treytel. Les extrêmes des moyennes sont soulignés dans chaque colonne.

D'une manière générale, les vitesses moyennes sont les plus élevées entre 0 et 6 m, diminuant lorsque la profondeur augmente,

passent par un minimum entre 18 et 24 m, puis ont une légère tendance à augmenter à nouveau. Dans l'ensemble, la vitesse moyenne est plus élevée à Champ Bougin et entre Chevroix et Portalban où la côte submergée est rectiligne, un peu plus faible au Nid du Crê où le fond est incurvé et plus faible encore dans la baie d'Auvernier du fait de la morphologie sous-lacustre plus fermée.

TABIEAU CLIV

Valeurs extrêmes des vitesses moyennes des courants lacustres dus aux vents, mesurées à diverses profondeurs et exprimées en mètres par heure

Profondeur	Minima			Maxima		
	Vitesse	Date et lieu		Vitesse	Date et lieu	
0	98	13.VII .60 NC		<u>946</u>	13.V .59 CB	
3	123	24.V .60 NC		791	22.X .59 CH	
6	56	16.IV .59 CB		661	22.X .59 CH	
9	70	16.IV .59 CB		667	20.VIII.59 CB	
12	77	14.VII .59 BA		594	20.VIII.59 CB	
15	41	14.VII .59 BA		557	20.VIII.59 CB	
18	58	20.IV .60 BA		357	20.VIII.59 CB	
21	<u>22</u>	13.VII .60 NC		347	22.X .59 CH	
24	45	24.VIII.60 CH		337	22.X .59 CH	
27	46	24.VIII.60 CH		306	22.X .59 CH	
30	64	14.VII .59 BA		271	22.X .59 CH	
BA = Baie d'Auvernier; CB = Champ Bougin; CH = Chevroix-Portalban; NC = Nid du Crê.						

Les mesures isolées à l'embouchure de la Broye et à Treytel ne figurent pas dans ce tableau.

TABIEAU CLV

(cf. page suivante)

TABIEAU CLV

Vitesses moyennes des courants lacustres dûs aux vents, mesurées à diverses profondeurs dans l'ensemble des zones étudiées et exprimées en mètres par heure.

Profondeur	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Printemps	Été	1959	1960	1961	1962
0	236	421	273	199	374	313	330	279	368	214	309	321
3	139	193	180	188	344	276	182	236	308	169	262	369
6	145	232	371	193	502	212	239	255	313	195	279	230
9	91	171	258	241	428	278	178	316	283	217	271	284
12	80	126	185	188	381	194	134	244	217	176	196	178
15	70	195	181	104	353	145	158	221	192	122	131	318
18	65	172	156	146	254	97	136	165	161	102	225	224
21	95	158	182	96	160	97	152	109	162	101	200	190
24	96	172	188	147	126	111	156	128	134	75	231	245
27	99	140	160	133	121	133	135	129	157	88	210	145
30	97	189	139	112	137	136	141	129	159	112	159	131
0 - 30	116	207	204	159	280	171	184	202	226	149	236	235

Il ressort de ce tableau que les moyennes les plus élevées se rencontrent de plus en plus profondément au fur et à mesure que la saison avance, passant de la surface en avril à 9 m de profondeur en juillet, puis qu'elles remontent durant l'été. Quant aux minima de ces moyennes, ils varient de profondeur de manière désordonnée. Les extrêmes des moyennes sont donc placés plus haut au printemps qu'en été.

TABIEAU CLVI

(cf. page suivante)

N E U C H A T E L

LES SAARES

PORT

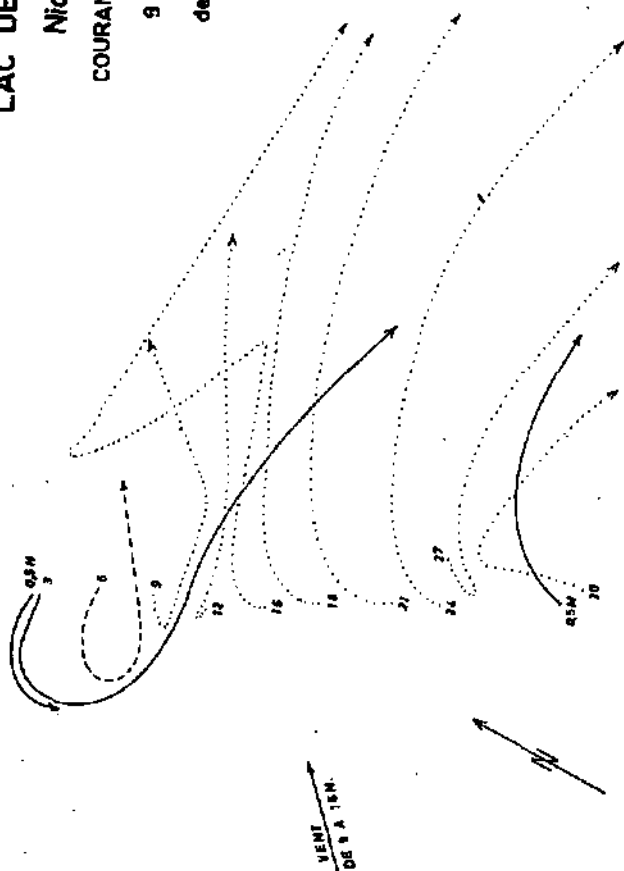
LAC DE NEUCHÂTEL

Nid du Grê

COURANTS LACUSTRES

9 mai 1962

de 7 à 16 h.



ECHELLE: 1:10000

0 100 200 300 400 500 M

— Epilimnion - - - - - Mégalimnion Hypolimnion

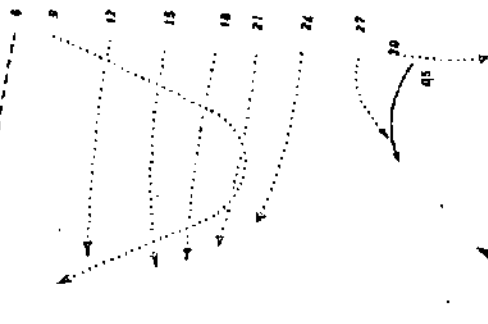
Fig. 163.

EF 56.3.0063

N E U C H A T E L

LES SAARS

PORT



LAC DE NEUCHÂTEL Nid du Crô COURANTS LACUSTRES

14 juin 1962
de 7 à 10h.

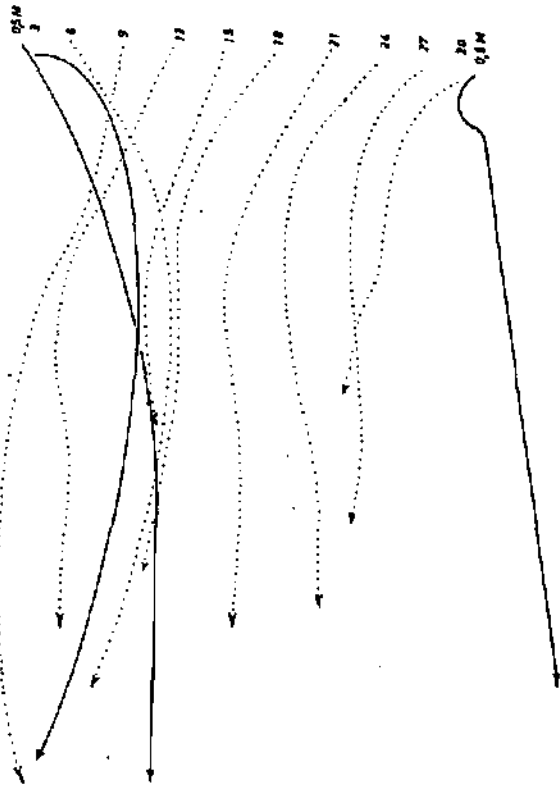
ECHELLE: 1:10000
0 100 200 300 400 500 M.

Fig.164.

N E U C H A T E L

LES SAIRS

PORT



LAC DE NEUCHÂTEL

Nid du Crô

COURANTS LACUSTRES

14 juin 1962

de 10 à 18 h.

ECHELLE : 1:10000

0 100 200 300 400 500 M

— Epilimnion Hypolimnion

Fig. 165.

N. 10. 1965

TABIEAU CLVI

Extrêmes instantanées des vitesses des courants lacustres dus aux vents :
mesurées à diverses profondeurs de 1959 à 1962 et exprimées en m/h.

Profondeur	Minima		Maxima	
	Vitesse	Date et lieu	Vitesse	Date et lieu
0	4	15.VII .60 NC	1170	15.V .59 OB
3	6	24.V .60 NC	3260	22.X .59 CH
6	51	16.IV .59 CB	2888	22.X .59 CH
9	9	16.IV .59 CB	2450	22.X .59 CH
12	4	9.V .61 NC	907	17.IX .59 BA
15	4	9.V .61 NC	1130	9.V .62 NC
18	8	9.VI .59 BA	538	6.VII .61 NC
21	8	17.IX .59 BA	458	22.X .59 CH
24	2	14.VII .59 BA	530	22.X .59 CH
27	21	20.IV .60 BA	555	17.IX .59 BA
30	18	14.VII .59 BA	587	13.V .59 OB

BA = Baie d'Anvernier ; CB = Champ Bougin ; CH = Chevreux-Portalban ; NC = Nid du Crê.

Les mesures isolées à l'embouchure de la Broye et à Treytel ne sont pas comprises dans ce tableau.

Les extrêmes absolus de nos recherches se trouvent donc à la baie d'Anvernier par 24 m de profondeur et à 5 m entre Chevreux et Portalban.

46.3.4.2. Les vitesses en fonction de la saison.

TABIEAU CLVII

Vitesses des courants lacustres dus aux vents, exprimées en m/h.

Mois	Extrêmes des moyennes						Extrêmes instantanées					
	Minima			Maxima			Minima			Maxima		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Avril	56	CB	6	407	CB	0	9	CB	9	807	BA	6
Mai	58	NC	21	946	CB	0	4	NC	12	1170	CB	0
Juin	83	BA	18	445	NC	3	8	BA	18	838	NC	9
Juillet	22	NC	21	352	NC	0	3	BA	24	622	NC	9
Août	45	CH	24	667	CB	9	17	CH	24	802	CB	9
Septembre	74	CH	24	556	CH	9	8	BA	21	907	BA	12

a = vitesse en m/h ; b = zone de mesure ; c = profondeur en m.

Dans ce tableau ne figurent pas les mesures isolées des 22.X et 8. XII.59.

C'est en mai que se rencontrent les vitesses maximales, aussi bien instantanées que moyennes et en juillet les vitesses minimales.

46.3.4.3. Les vitesses en fonction de la zone étudiée.

TABLÉAU CLVIII

Vitesses des courants lacustres dus aux vents, réparties par zones étudiées et exprimées en mètres par heure.

Zone étudiée	Extrêmes des moyennes			Extrêmes instantanées.		
	Minima			Maxima		
	Vitesse	Date	Prof.	Vit.	Date	Prof.
<u>Extrêmes des moyennes.</u>						
Baie d'Anvernier	41	14.VII .59	15	345	17.IX .59	0
Champ Bougin	56	16.IV .59	6	246	13.V .59	0
Chevreux-Portalban	45	24.VIII.60	24	791	22.X .59	3
Nid du Crê	29	13.VII .60	21	443	14.VI .62	
<u>Extrêmes instantanées.</u>						
Baie d'Anvernier	3	14.VII .59	24	907	17.IX .59	12
Champ Bougin	9	16.IV .59	9	1170	13.V .59	0
Chevreux-Portalban	17	24.VIII.60	24	3260	22.X .39	3
Nid du Crê	4	13.VII .60	0	1130	9.V .62	15

Les vitesses moyennes les plus grandes se rencontrent à la surface du lac à Champ Bougin et les plus petites au Nid du Crê à 21 m de profondeur. Quant aux vitesses instantanées, les plus grandes se trouvent à 3 m de profondeur entre Chevreux et Portalban et les plus petites à 24 m dans la baie d'Anvernier.

46.3.4.4. Classement des vitesses instantanées.

En classant toutes les mesures instantanées de la période 1959-1962 dans l'ordre croissant, on obtient la répartition suivante exprimée en pour-cents:

Vitesse en m/h.	Fréquence en %.
0 - 50	10,6
51 - 100	20,2
101 - 150	18,3
151 - 200	14,5
201 - 250	10,4
251 - 300	7,1
au-delà	18,9

46.3.4.3. Récapitulation des résultats obtenus de 1959 à 1962.

Par temps calme, la vitesse des courants peut être aussi bien minimum que maximum dans le métalimnion et cela tant à la baie d'Auvernier qu'entre Chevroux et Portalbañ d'une part et au Nid du Crê d'autre part. On enregistre ainsi bien des courants tourbillonnaires dans la baie d'Auvernier qu'à Champ Bougin.

Lorsque le vent d'E s'établit, la vitesse augmente de la surface jusqu'à une certaine profondeur comprise dans l'épilimnion généralement, puis diminue fortement dans le métalimnion. Ceci est valable aussi bien à Champ Bougin qu'entre Chevroux et Portalbañ.

Lorsque le vent du SW s'établit, la vitesse des courants devient minimum dans le métalimnion au Nid du Crê et maximum entre Chevroux et Portalbañ; elle tend à augmenter régulièrement à partir de la surface dans la baie d'Auvernier.

Lorsque les vents faiblissent, on constate, aussi bien à Champ Bougin qu'en Nid du Crê, que la vitesse augmente en surface, mais en-dessous elle varie de manière déordonnée lorsque la profondeur augmente.

La vitesse horizontale mesurée varie de quelques mètres à plus de 3 km à l'heure sa valeur instantanée; elle est, en moyenne pour l'ensemble de la période de nos observations, de 200 mètres à l'heure. Les vitesses entre 50 et 150 m/h sont les plus fréquentes en valeurs instantanées.

46.3.5. Comparaison avec d'autres travaux.

Pour le lac de Neuchâtel, Quartier (1959 b) donne, dans une note préliminaire, les résultats de mesures effectuées par la méthode dite "des filets". Il s'agit de 500 mesures basées sur les déplacements de filets immergés en 1958 et laissés au lac très souvent plusieurs jours de suite. Au cours de ces mesures, toutes les conditions météorologiques possibles ont également des chances de se produire, autrement dit le nombre de chances que des vents plus ou moins violents agissent sur les courants lacustres est nettement plus grand que lors de nos mesures de courte durée et effectuées la plus souvent par temps calme ou vent faible. On est en droit de s'attendre à trouver des vitesses plus grandes dans les mesures de Quartier de juin à septembre que dans les nôtres pour avril à septembre.

Les vitesses les plus fréquentes pour nous sont comprises entre 50 et 100 m/h, suivies par celles de 100 à 150 et ensuite 150 à 200 m/h, alors que Quartier indique 100 à 200, puis 200 à 300 et 0 à 100 m/h. Cette différence correspond à ce que nous venons de prévoir. De même, la fréquence des vitesses entre 100 et 300 m/h représente 61 % chez Quartier et 50,3 % chez nous.

Par contre, en déclarant que plus on avance dans la saison, plus les vitesses diminuent, Quartier se trouve en contradiction avec les résultats de notre tableau CLV dont les moyennes globales montrent des valeurs dont la variation est moins ordonnée avec tendance à une augmentation lorsque la saison avance. Nous estimons que cette discordance provient essentiellement des défauts inhérents à la méthode di-

te "des filets".

Nos mesures montrent qu'on ne peut être aussi affirmatif que Quartier lorsqu'il affirme que les courants les plus violents, en période de stratification thermique se produisent entre l'épilimnion et l'hypolimnion, autrement dit dans le métalimnion. En effet, le métalimnion accuse souvent aussi l'existence de vitesses minimum et de vitesses maximum et cela aussi bien par temps calme que lorsque les vents soufflent modérément.

Dans le Léman, Kreitmam (1931) observe des vitesses de 17 à 630 m/h avec des filets et jusqu'à 1040 m/h avec des dragues à courants. Les mesures de Bétant et Perrenoud (1932) avec un courantomètre et des dragues à courants vont de 55 à 692 m/h en moyenne dans le Petit Lac, avec un maximum de 802 m/h. Pour ce lac, les valeurs ainsi obtenues se classent entre les extrêmes de nos moyennes (29 et 946 m/h) et entre ceux de nos valeurs instantanées (3 et 3260 m/h).

Dans le lac de Zurich, Städler (1934) relève, à l'aide de dragues à courants et pour la période 1929-1953, des vitesses moyennes de 5 à 343 m/h entre la surface et 50 m de profondeur, avec un maximum instantané de 329 m/h en surface. Ces mesures chevauchent les plus basses des nôtres en ce qui concerne les moyennes, mais sont comprises dans notre intervalle de valeurs extrêmes.

Dans le Bodan, plus précisément dans la baie de Bregenz, Auerbach et Schnalz (1927) mesurent 150 à 300 m/h en moyenne pour les courants dus aux vents, avec des extrêmes instantanés de 70 et 1011 m/h. Toutes ces valeurs sont comprises entre les nôtres pour le lac de Neuchâtel.

Dans l'Untersee, Auerbach et Rettengatter (1960) opérant avec un courantomètre, n'ont pas eu assez de mesures en nombre suffisant pour tirer des conclusions sur la vitesse des courants due aux vents. Par contre, ils obtiennent pour la vitesse de ceux dus au Rhin: dans le courant principal le long de la rive suisse: 269 à 750 m/h; dans le courant secondaire du Radolfzellersee: 83 à 152 m/h et dans les courants tourbillonnaires près de Berlingen: 87 à 147 m/h. Ici aussi et bien qu'il ne s'agisse pas de la même sorte de courants, ces valeurs sont comprises entre les nôtres pour Neuchâtel.

Signalons enfin que dans le lac de Sacrew, Möller (1936) mesure une vitesse de courant dû au vent de 360 m/h.

* * * *

Cinquième partie

LES SEDIMENTS DU LAC

=====

Chapitre quatorzième : GENERALITES ET METHODES D'ANALYSE.

Dans le cinquième partis de notre travail, il n'est question, sous le nom de sédiments, que des dépôts qui se produisent dans la cuvette lacustre depuis qu'elle est remplie d'eau douce, c'est-à-dire pas des terrains constituant le bassin lacustre.

Il ne s'agit ici que des questions chimiques et physico-chimiques touchant les sédiments. Nous laissons de côté l'étude de la biologie de ces dépôts, nous permettant de renvoyer le lecteur aux travaux relativement nombreux parus tant sur la faune que sur la flore de notre lac, ainsi qu'au travail qui se rapproche le plus de nos recherches actuelles, celui de Wüthrich (1961) sur les Diatomées des sédiments du lac de Neuchâtel.

47. Les sédiments lacustres en général.

Les sédiments lacustres doivent leur origine au plancton en suspension dans l'eau, aux débris de toutes sortes allant du floccin le plus léger au matériau le plus lourd, aux poussières entraînées par le vent au-dessus du lac, à toute la gamme des matériaux amenés par les cours d'eau et les collecteurs d'égout, aux produits de la décalcification estivale de l'eau, etc. Tous ces corps finissent par tomber au fond. Celui-ci est composé finalement de matériaux plus ou moins grossiers et qui, mécaniquement aussi bien que chimiquement, répondent aux dénominations de boue, vase, sable, limon, argile, etc. Ces divers types de sédiments sont bien définis dans l'ouvrage de Bourcart et Francis-Boeuf (1942) auquel nous nous permettons de renvoyer le lecteur pour plus de détails sur cette question.

Si Alsterberg (1924) a pu écrire que le plancton est le principal facteur concourant à la formation du sédiment, c'est que cette constatation devait correspondre à la réalité à cette époque. Il n'en est plus de même aujourd'hui où les nombreux facteurs polluifs des eaux participent dans une très forte proportion, eux aussi, à la formation des sédiments dont l'aspect a considérablement changé ces dernières années; nous reviendrons à cette question ultérieurement.

Thoulet (1923) arrive à la conclusion que la limite du dépôt de la vase dépend de la turbulence de l'eau. Ce phénomène qu'il est possible de contrôler actuellement par les prises de vue sous-lacustres doit être rapproché de celui des rippelmars auquel nous avons fait allusion plus haut et que les plongeurs autonomes ont vérifié dans notre lac. Ceci implique que la disposition des sédiments sur le fond dépend dans une large mesure des courants subséquentiels, ce que Lundqvist (1942) mentionne aussi.

De manière plus restreinte encore, Tutin (1955) étudie spécialement le comportement de l'hypolimnion à l'égard des sédiments. L'action des courants dans l'hypolimnion des lacs stratifiés bouleverse le rythme du dépôt normal des matériaux par gravité, ce qui corrobore les résultats obtenus à la même époque par Mortimer. Il en résulte que l'épaisseur du dépôt par unité de temps n'est pas constante à un même endroit, ce qui fausse les calculs basés sur la chronologie des dépôts sédimentaires récents. On a découvert récemment que cette action

des courants n'est pas seulement plus générale, mais qu'elle s'exerce aussi à des profondeurs auxquelles on ne le supposait pas auparavant; c'est ainsi que Langhton (1959) obtient des photos de ripples jusqu'à 3400 m dans l'océan, montrant des tourbillons autour d'obstacles et attestant par là la force des courants à cette profondeur.

48. Méthodes d'analyse des sédiments.

Sauf avis contraire, tous les résultats obtenus par ces méthodes sont exprimés en ppm (parts par million) ou en pour-cents en poids.

A. Couleur.

Le sédiment est examiné à l'état frais et humide. Le couleur s'exprime par le nombre désignant la couleur correspondante dans le Code universel des couleurs (CUC) (E. SEGUY. - Code universel des couleurs, Coll. Encyclopédie pratique du naturaliste, t. XXX, Paris, Lechevalier, (1936), 68 p., 48 pl.).

B. pH.

Il se détermine à la température qu'a le sédiment dans le lac et au moyen d'un pH-mètre électrode; on utilise une électrode combinée verre-salomel plongée dans le sédiment frais et humide. Les résultats sont exprimés à 0,01 unité de pH près.

C. Sulfures.

Au maximum dans les 24 heures qui suivent le prélèvement, le sédiment est attaqué par SO_4H_2 à 50 % dans un ballon à trois tubulures et en atmosphère de CO_2 . L'attaque terminée, le ballon est chauffé à 80° et le SH_2 dégagé entraîné par un courant de CO_2 jusqu'à un tube de Pélignet qui le retient par une solution d'acétate de cuivre. SH_2 est dosé ensuite en retour par iodométrie dans le tube de Pélignet même. Le résultat s'exprime en ppm de S dans la matière instantanée (brute).

Cette méthode donne de bien meilleurs résultats que celle utilisée par Corbella, Della Croce et Ravera (1956) pour le Lago Maggiore: ces auteurs mettent SH_2 en liberté par ClH qui, malheureusement n'attaque pas complètement les sulfures.

D. Humidité.

Le sédiment est desséché à 110° à l'étuve jusqu'à poids constant. A l'état frais, il est prélevé pour la pesée après repos d'une heure dans le flacon bouché qui a servi à le transporter et auquel l'excédent d'eau est éliminé par simple décantation.

La perte de poids par séchage à l'étuve, rapportée au poids de sédiment humide, donne l'humidité en %.

Le poids de 110° pour le sédiment est préféré à celui de 103° pour la résidu sec de l'eau parce qu'il permet mieux d'obtenir un poids constant étant donné la nature de la matière à sécher.

E. Carbonates.

La méthode utilisée est une combinaison de celles préconisées

par Biltz et Biltz (1947)⁴⁴⁾ et par Correns (1937)⁴⁵⁾. Elle consiste à attaquer le sédiment par un acide fort et à absorber puis peser le CO_2 dégagé. On passe le sédiment sec et pulvérisé dans un ballon s'adaptant à l'appareil de Gangl (conçu pour le dosage de traces d'arsenic); on l'attaque par du ClH (1+1) à chaud qui dissout tous les carbonates mais n'attaque pratiquement pas les autres sels inorganiques. Le CO_2 dégagé est entraîné par un courant d'air sec et exempt de gaz carbonique. Après passage à travers un tube rempli de pierre ponce imprégnée de sulfate de cuivre déshydraté destinée à retenir les traces de ClH entraînées, le gaz carbonique dégagé est desséché sur Cl_2Ca saturé de CO_2 , puis absorbé dans des tubes en U tarés et remplis de chaux sodée. Les résultats sont exprimés en pour-cents de CO_2Ca par rapport à la matière sèche, avec une précision qui oscille de $\pm 0,4 \%$ à $\pm 0,05 \%$ suivant le soin apporté aux opérations. C'est presque toujours cette dernière précision qui a été obtenue.

F. Matière organique.

Ce dosage se rapporte au total des matières humiques (végétales) et organiques d'origine animale, sans discrimination de la part revenant à chacun de ces deux règnes. Il repose sur l'oxydation à chaud et en milieu humide de la matière organique par le bichromate de potassium.

L'échantillon de sédiment sec et pulvérulent est tout d'abord débarrassé de ses carbonates par ClH (1+1), puis filtré sur membrane; le résidu lavé est transvasé puis desséché en-dessous de 100° dans un erlenmeyer adaptable à l'appareil à absorption. Après avoir ajouté du bichromate de potassium finement pulvérisé, ainsi que SO_2H_2 conc., l'erlenmeyer est adapté à l'appareil à absorption. Celui-ci comprend une série de tubes à la suite les uns des autres, le premier droit et contenant du CuO chauffé au rouge clair, les autres en U et contenant Cl_2Ca et de la chaux sodée. De l'air sec et débarrassé de CO_2 est aspiré à travers l'appareillage en entraînant le CO_2 provenant de l'oxydation des matières organiques et qui se fixe sur la chaux sodée. Par pesée, on détermine la quantité de CO_2 produite et, du même coup la teneur en matières organiques qu'on exprime en pour-cent de carbone élémentaire dans la matière sèche. La précision de la méthode est de $\pm 0,02 \%$.

L'expression des résultats en matières humiques étant liée à l'emploi d'un facteur arbitraire, nous préférons exprimer les matières organiques en carbone élémentaire.

G. Azote.

La méthode préconisée par Brajnikov, François-Bocuf et Romanovsky (1943, p. 41) convient parfaitement à ce dosage dans les sédiments. Elle consiste à traiter à chaud, dans un matras de Kjeldahl, du sédiment sec et finement pulvérisé par de l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur formé d'un mélange à parties égales

44) H. Biltz und W. Biltz.- Ausführung quantitativer Analysen, 5te. Aufl. Zürich, (1947), p. 162.

45) G. W. Correns.- Wiss. Ergeb. Deutsch. Atlant. Expedit. "Meteor", 2. Fl. 3, (1937), p. 34.

de sulfate de cuivre et d'oxalate de potassium. Une fois le contenu du matras éclairci (il est alors de couleur beige-verdâtre) et refroidi, il est transvasé dans un ballon jaugé. Une partie aliquote du contenu de ce dernier, placée dans l'appareil à distiller de Parnas et Wagner est alcalinisée par de l'hydroxyde de sodium en présence de l'indicateur de Fashiro⁴⁶, puis l'ammoniaque mise en liberté est recueillie par distillation dans une solution acide titrée et finalement dosée en retour. Le résultat s'exprime en % de N dans la matière sèche.

H. Phosphates.

Il s'agit de doser le phosphore total, sans faire la distinction entre celui d'origine organique et celui d'origine minérale. C'est la méthode de Kitson et Mellon (1944) qui s'applique ici. Elle consiste tout d'abord à se débarrasser de Si par attaque du sédiment sec et finement pulvérisé dans un creuset en Pt par HF en présence de SO_3H_2 conc. Après 12 heures d'attaque, on réduit le volume du liquide à quelques ml, chasse l'excès de SO_3 par HNO_3 dilué, filtre et amène à un volume connu. Le dosage proprement dit s'exécute sur une partie aliquote de ce dernier, par colorimétrie en molybdivanadate pour une longueur d'onde de 420 mμ. On doit utiliser une courbe d'étalonnage préparée à l'aide d'une solution standard de phosphates contenant du carbonate. Le résultat s'exprime en % de P_2O_5 dans la matière sèche.

I. Silice.

L'attaque du sédiment a lieu par fusion alcaline dans un creuset en Pt et en employant un mélange à parties égales de carbonate de sodium et de carbonate de potassium. Une fois la fusion terminée (1 h environ), la masse est transférée dans un réceptacle en polyéthylène, attaquée par ClH conc. puis amenée à un volume donné avec de l'eau bidistillée exempte de Si. Dans cette solution, la silice est dosée par colorimétrie au moyen de la méthode Orbach-Zimmermann mentionnée déjà pour l'eau du lac au paragraphe 22 ci-dessus. Le résultat s'exprime en % de Si dans la matière sèche avec une précision de $\pm 0,01$ %.

J. Fer total.

Le sédiment sec et pulvérisé est dissous dans ClH moyennement concentré et les sels ferriques sont réduits par l'acide ascorbique. Ils sont ensuite dosés par oxydimétrie en milieu acide et le résultat est exprimé en % de Fe dans la matière sèche.

K. Granulométrie.

On utilise ici la méthode par tamisage humide appliquée au sédiment frais. Celui-ci est agité, en flacon de polyéthylène, avec de l'eau ammoniacale n/100, puis le liquide trouble obtenu est tamisé par trois tamis superposés simultanément. On obtient ainsi les quatre fractions suivantes: > 630 μ, de 630 à 200 μ, de 200 à 60 μ et < 60 μ. Après lavage, la fraction restée sur le tamis est transvasée dans une capsule en porcelaine, séchée à 110° et pesée. Les résultats s'expriment en % de la matière sèche.

La dernière fraction peut encore être subdivisée à son tour

46) 26 mg de bleu de méthylène et 32 mg de rouge de méthyle dans 100 ml d'éthanol.

au moyen de la méthode de séparation hydropondérale d'Atterberg et à l'aide des tubes du même nom. La fraction 60μ se divise alors en trois nouvelles: $>20 \mu$, de 20 à $6,3 \mu$ et $<6,3 \mu$.

Chapitre quinième : LES SEDIMENTS DU LAC DE NEUCHÂTEL.

49. Recherches antérieures.

On ne possède des analyses du sédiment que pour trois périodes précédant nos recherches seulement, car nous ne nous sommes pas occupé de ce problème lors de la campagne 1943-1944.

La première analyse connue est due à Risler et Walther (1877) et porte sur un échantillon prélevé le 22 août 1873 devant Neuchâtel, par 65 m de fond. On doit la suivante à Zender (1908) qui a analysé un échantillon prélevé le 23 mai 1906 devant Neuchâtel, par 70 m de fond. Enfin, Portner (1951 a) donne un tableau de 10 analyses de sédiment effectuées sur des échantillons datant de 1948 et 1949 et prélevés à divers endroits du lac.

Nous ne reproduirons pas ici tous ces résultats, car ils figurent en détail dans le travail de Portner (1951 a, p.78-79) auquel nous nous permettons de renvoyer le lecteur. Par contre, nous groupons dans le tableau CLIX quelques-unes des données communes aux trois séries et recalculées de manière à les exprimer sous la forme que nous utilisons pour transcrire nos propres résultats.

TABIEAU CLIX

Résultats anciens obtenus lors de l'analyse du sédiment du lac de Neuchâtel.

	Risler et Walther	Zender	Portner	
Année du prélèvement	1873	1906	1948 - 1949	
Carbonates (% CO_2Ca)	66,5	68,9	72,6	63,9 - 90,9
P total (% P_2O_5)	-	-	0,082	0,078 - 0,087
Silice (% Si)	13,6	9,4	-	-
Fer total (% Fe)	1,5	5,3	-	-

Les % sont rapportés à la matière sèche et les chiffres de la deuxième colonne des résultats de Portner sont les extrêmes observés; les résultats se rapportant au sommet de la Motte ont été écartés.

50. Les recherches actuelles.

Dans ce paragraphe, il s'agit seulement de l'étude des sédiments déjà déposés au fond du lac; les matières en cours de dépôt seront étudiées ultérieurement.

Deux raisons nous poussent à attribuer de l'importance à l'examen des sédiments de notre lac et à en détailler passablement l'étude; ce sont l'importance des échanges eau-sédiment révélée par de nombreux auteurs d'une part, l'ampleur prise par les changements visibles à l'œil nu, survenus ces dernières années tout particulièrement, d'autre part.

C'est ainsi que Hayes et Coffin (1951), utilisant le phosphore radioactif comme indicateur, mettent en évidence les échanges de matières nutritives dans les lacs, décrivant en particulier le rôle joué par la couche oxydée qu'on observe très fréquemment à la surface du sédiment. Au printemps, l'eau est saturée d'oxygène jusqu'au fond dans les lacs qui ne sont pas méromictiques ⁴⁷⁾ et cela pendant une période qui varie suivant les lacs et les années. Durant ce laps de temps, la couche sédimentaire supérieure oxydée contient du phosphate ferrique insoluble, tandis que les couches sous-jacentes contiennent du phosphate ferreux soluble. La couche oxydée barre ainsi l'accès à l'eau au phosphate ferreux, empêchant le phosphore de se dissoudre. En fin d'été, lorsque la quantité d'oxygène dissous a suffisamment diminué dans l'eau, le phosphate ferrique se réduit en sel ferreux et se dissout, permettant aux ions PO_4^{3-} et Fe^{2+} de se répandre dans l'eau jusqu'à ce qu'ils rencontrent suffisamment d'oxygène pour que Fe^{2+} soit réoxydé en Fe^{3+} et que le phosphate ferrique reprécipite. Mais si, indépendamment de cette réduction chimique touchant le phosphate ferrique, du SH_2 prend naissance dans le sédiment lorsque les conditions anaérobies du milieu sont suffisantes, SFe précipite, libérant les ions PO_4^{3-} qui parviennent facilement alors dans la zone trophogène et jusqu'à la surface du lac où ils contribuent à fertiliser l'eau et à la rendre propice à la prolifération des algues. Les auteurs montrent, en outre, que la diffusion des ions dans un lac est très rapide, jusqu'à 100 fois plus qu'on ne l'avait cru auparavant.

Du point de vue bactériologique, Lastockin (1945) montre que cette couche est aussi le siège d'échanges intenses et qu'à partir d'une certaine profondeur, variable suivant les endroits et les lacs considérés, les bactéries disparaissent en même temps qu'un horizon stérile apparaît.

La richesse en matières organiques de cette zone tient un rôle primordial pour la faune du fond, ainsi que le fait voir Jugst (1958) pour le Léman et le lac d'Anneoy.

Etant donné que la couche superficielle des sédiments participe aux échanges avec l'eau sous-jacente, les premiers centimètres de celle-ci au-dessus du sédiment jouent aussi le même rôle. C'est pourquoi la limnologie moderne porte intérêt à cette microcouche d'eau de fond. A la suite d'Alsterberg (1930), de Brouardel et Vernst (1958), de Callens (1960 et 1961), ainsi que de Mortimer (1941 et 1942), nous nous occupons également de l'examen de cette couche, au moyen de l'appareil à prélèvement de Liepolt (1960) mentionné au paragraphe 20.8.3 ci-dessus. Mais les opérations avec cet appareil sont assez délicates et nécessitent des conditions de calme qui ne peuvent se rencontrer toutes les semaines sur notre lac. Aussi le nombre de nos résultats jusqu'ici ne suffit-il pas encore à établir une statistique dont on puisse tirer des moyennes sûres; c'est pourquoi nous rennons à rapporter ici les données déjà acquises, les réservant à une publication ultérieure à l'issue d'une plus longue période de recherches.

47) lac méromictique - lac à circulation partielle; les eaux de fond sont en état de stratification à peu près permanente et échappent, de ce fait, à la circulation générale; elles sont donc très pauvres en oxygène, exactement comme si elles subissaient une très grande entrophisation.

Décrivant l'aspect des sédiments du fond du lac, Monard (1920) mentionne, comme ses prédécesseurs du 19^e. siècle, une vase impalpable, blanchâtre, entrecoupée de veines argilleuses bleuâtres. Les rares échantillons que nous avons vu ramener du fond en 1944 avaient sensiblement le même aspect, mais Wegmann (communication personnelle) a attiré l'attention, à cette époque déjà, sur l'aspect des sédiments littoraux de plus en plus fonceés devant Colombier, jusqu'à noirâtres devant Neuchâtel.

En 1957, le sédiment de fond avait encore l'aspect d'une masse pâteuse et lisse, de couleur sauto, sans odeur caractéristique, avec quelques intrusions bleu-noires parfois. En 1960, il se présente presque partout déjà sous forme plus ou moins gramineuse, de couleur gris-bleutée à noire, très souvent à odeur fétide, surmontées durant une partie de l'année d'une couche gris-beige à brun clair, également gramineuse.

Depuis lors, cet aspect a gagné même les plus grands fonds, aussi bien au nord qu'au sud de la Motte et les Tubificidés qui y abondaient sauf sur le littoral urbain, ont presque complètement disparu depuis 1961-1962.

Ces changements apparents sont la conséquence de la dégradation du lac sous l'effet de la pollution toujours croissante; plus nettement encore que l'eau, les sédiments enregistrent de manière durable l'eutrophisation du lac.

50.1. Les sédiments du bassin de Neuchâtel.

Il s'agit de ceux prélevés aux diverses stations comprises dans ce bassin tel qu'il est défini au paragraphe 3.3 plus haut, autrement dit dans la majorité des stations qui se trouvent au NE de la ligne 31-36 de la figure 34. Toutefois les stations Z (baie d'Auvernier) ainsi que D à F (grandes expéditions) seront examinées pour elles-mêmes aux paragraphes 50.2 et 50.3 ci-après.

Les bennages permettent d'examiner les sédiments les plus récents tandis que par les carottages il est possible de remonter à des sédiments déposés depuis beaucoup plus longtemps. Pour suivre l'aire d'épandage des eaux usées sur le littoral, des bennages sont exécutés perpendiculairement à la rive le long de tracés passant par les stations D et E, ainsi que H (au droit de l'église catholique de Neuchâtel) et S (au large de Monruz). Il en est de même sur la prolongation de la frontière vandoise-fribourgeoise à l'E de Portalban, en passant par la station I, ainsi que pour une série de stations réparties "en quadrillage" sur les transversales Q, T, U et V.

Nous groupons dans le tableau CLX les résultats des divers dosages effectués en fonction de la profondeur sur les tracés qui viennent d'être mentionnés.

TABLEAU CLX
(cf. page suivante)

TABEAU CIX

Teneurs en humidité, en carbonates, en matières organiques et en sulfures des sédiments prélevés par bennage dans le bassin de Neuchâtel et exprimées en fonction de la profondeur.

<u>Humidité</u>	10m	15m	20m	30m	40m
D	-	57,2	63,4	51,7	-
E	41,8	47,4	53,2	74,9	62,3
Cr	27,2	28,8	28,4	26,9	-
R	-	53,2	52,5	52,0	59,2
S	-	53,3	48,4	-	-
<u>Carbonates</u>					
D	-	66,0	49,7	67,1	-
E	35,5	37,4	35,9	34,5	61,9
Cr	51,9	53,0	49,6	47,3	-
R	-	80,7	39,7	81,0	93,4
S	-	56,8	39,7	-	-
<u>Matière organique</u>					
I	0,59	0,40	0,25	0,18	0,18
<u>Sulfures</u>					
D	-	24	190	44	-
E	58	56	116	86	255
R	41	26	55	39	164
S	-	19	128	-	-
I	27	23	10	33	30
Beaulac	40	-	-	-	-
Rue Coulon	37	-	-	-	-

Les teneurs en matière organique sont exprimées ici en % de C élémentaire.

Rappelons que la quantité d'eau contenue dans les sédiments dépend de la nature chimique des composants aussi bien que de leur forme, de leurs dimensions et de leur entassement. Les sables en contiennent le moins, 30 % environ, la craie lacustre de 50 à 60 % et les argiles davantage, pouvant arriver à 90 %. Or, sous l'action des vagues, un tri des matériaux s'établit sur le littoral; on peut donc s'attendre à une répartition de la teneur en eau variant avec la profondeur. Tel semble être le cas pour la série E dans le tableau CIX: en passant de la zone sableuse peu profonde à la zone vaseuse plus profonde, la teneur en eau augmente.

La grosseur des matériaux amenée au lac par les égouts est

très variable, de sorte que l'on peut distinguer deux zones de pollution qui en dépendent : une à pollution grossière, peu profonde, de caractère sableux, proche de l'embouchure des égouts et dans laquelle se déposent les débris les plus grossiers; l'autre, à pollution fine, s'étendant plus au large, dans la région des vases et où se déposent les matériaux fins qui sont emportés d'autant plus loin qu'ils sont plus ténus. Ce tri des matériaux suivant leur grosseur s'effectue par les vagues et les courants. La limite entre les deux zones est comprise entre 12 et 18 m de profondeur généralement, comme l'ont observé et confirmé les plongeurs autonymes.

Dans la zone à pollution grossière, la teneur en carbonates semble être inférieure à 50 % ou voisine de cette valeur (exemples: E, Cr, S à 10 et 15m), mais la situation est bouleversée dès qu'on se trouve à proximité d'un égout (D et R à 15m). Dans la zone de transition où la pollution grossière est nulle et où la pollution fine commence à peine, soit vers 15 m de profondeur, la teneur en carbonates passe par un maximum; c'est le cas pour les séries E et Cr.

Dans la série I qui a l'avantage d'être éloignée de tout déversement d'égout, on se rend compte que la teneur en matière organique diminue au fur et à mesure que la profondeur augmente, autrement dit à mesure qu'on s'éloigne de la zone des roseaux.

Quant aux sulfures, ils trahissent dans les séries examinées, une augmentation avec la profondeur, la série I accusant dans l'ensemble les valeurs les plus faibles, car elle est la plus éloignée de l'influence des égouts. On observe aussi que la teneur en sulfures augmente à mesure qu'on se rapproche de Neuchâtel et, en particulier de son centre pollutif l'égout du Grand canal (série E); les teneurs augmentent en effet dans l'ordre S, R, D, E. Les eaux usées exercent donc une influence directe sur la teneur en soufre des sédiments.

TABIEAU OLXI

Teneurs en humidité (en % de la matière humide) et en sulfures (en ppm de S dans la matière sèche) des sédiments prélevés par bennage dans le bassin de Neuchâtel et exprimées en fonction de l'éloignement de la rive gauche.

<u>Humidité</u>	1 km		3 km		5 km	
	valeur	prof.	valeur	prof.	valeur	prof.
Q	59,1	109	65,2	134	63,3	121
T	60,2	100	63,0	124	59,1	122
U	53,2	18	51,3	31	58,2	102
V	50,5	7	40,3	10	30,4	5
<u>Sulfures</u>						
Q	157	109	127	134	220	121
T	198	100	159	124	136	122
U	25	18	84	31	218	102
V	24	7	43	10	10	5

Dans chacune des séries, on observe en général que l'humidité est la plus forte au point le plus profond, quelle que soit la distance à la rive. Cependant les profils les plus saillants, relativement, (V en entier, U à 1 et 3 km) accusent une humidité nettement plus faible que les autres.

Les sulfures, en liaison avec la pollution fine qui s'étend au loin, se retrouvent en quantités maximes dans les régions les plus éloignées de la rive gauche en ce qui concerne les profils Q, U et V relativement distants du centre polluant de Neuchâtel; dans le profil T, c'est le contraire car le début du profil est situé très près de l'embouchure du Grand canal dont l'apport en matières contenant du soufre inverse complètement la répartition de S' sur ce profil. Le long du profil V, le maximum se rencontre à 3 km au lieu de 5 km, car à ce dernier point la profondeur est trop faible pour que la pollution fine puisse se manifester en présence des vagues et des courants de surface. La proportionnalité de la teneur en soufre et de la distance s'exprime très clairement par les moyennes prises chaque fois sur l'ensemble des 4 profils et qui sont: à 1 km, 101 ppm; à 3 km, 103 ppm et à 5 km, 146 ppm.

50.2. Les sédiments à la station 2.

Nous disposons de 33 prélèvements tous effectués en 1961 à une profondeur moyenne de 110 m et par une température moyenne de 5,1 (les extrêmes sont de 4,8 et de 5,8). Presque toute l'année, le sédiment prélevé à la benne accuse la présence de 2 couches superposées: une supérieure oxydée et une inférieure réduite.

La couche supérieure a une puissance oscillant entre 3 et 6 mm au printemps (mars-avril); elle diminue jusqu'à moins d'un mm en août, mais reprend de l'épaisseur en automne et atteint plus de 20 mm en novembre.

Sans être grande, la dispersion des coups de benne successifs à la même station, répartit cependant les prises d'échantillons sur une aire d'une vingtaine de mètres de rayon autour du point 2 et avec des écarts verticaux de 5 m. Indépendamment des variations saisonnières de la puissance de la couche oxydée, on constate des variations dans l'aspect de cette couche: parfois régulière et homogène, elle est souvent remplacée par des flots de matière oxydée, répartis inégalement sur la surface du sédiment; d'autres fois, la couche oxydée fait défaut, mais réapparaît la fois suivante. Ces constatations sont corroborées par les observations directes "in situ" faites par les plongeurs autonomes à des profondeurs moindres; les ondulations du terrain, jointes à l'action irrégulière mais non négligeable des courants de fond contribue à cette répartition inégale de la zone oxydée à la surface des sédiments.

La diminution de la puissance de la couche oxydée durant l'été est donc bien le signe d'un appauvrissement en oxygène dissous lent mais non négligeable, des couches d'eau en contact avec le sédiment, alors que le brassage dû à l'"overturn" d'automne redresse la situation en novembre.

La couleur de la zone oxydée varie de beige à brun clair, correspond dans 28,6 % des cas au numéro 253 du Code universel des couleurs, pouvant atteindre cependant 209 et 515. Celle de la zone réduite varie de gris bleuté à noirâtre, correspond dans 60,9 % des cas au numéro 434 du CUC en atteignant parfois aussi bien 315 que 522.

Pour la variation des autres données, nous nous reportons au tableau CLXII qui concerne les deux zones simultanément.

TAB. CLXII

Caractéristiques moyennes et extrêmes du sédiment du lac de Neuchâtel dans la baie d'Auvernier, par 110 m de fond et durant l'année 1961.

	Zone oxydée			Zone réduite		
	Minim.	Moyen.	Maxim.	Minim.	Moyen.	Maxim.
pH	7,02	<u>7,31</u>	7,50	6,98	<u>7,24</u>	7,46
Humidité en % du sédiment naturel	62,2	<u>72,7</u>	78,0	57,9	<u>67,1</u>	72,1
Humidité en % du sédiment desséché	164,4	-	354,0	137,4	-	257,7
Sulfures en ppm de S du sédiment naturel	10	<u>42</u>	117	74	<u>140</u>	201
Sulfures en ppm de S du sédiment desséché	32	<u>149</u>	418	191	<u>445</u>	600
Azote total en % de N du sédiment desséché	0,07	<u>0,17</u>	0,26	0,06	<u>0,14</u>	0,22
Matière organique en % de C du sédiment desséché	0,88	<u>1,56</u>	1,90	0,92	<u>1,31</u>	1,64

Les moyennes sont soulignées.

L'écart des pH est de 0,48 unités dans les deux zones, correspondant à 6,6 % de la valeur moyenne dans chaque cas. Celui des teneurs en humidité de 15,8 % en poids pour la zone oxydée, soit 21,8 % de la valeur moyenne et de 14,2 % en poids pour la zone réduite, soit 21,2 % de la valeur moyenne. Celui des teneurs en sulfures de 107 ppm pour la couche supérieure, soit 255 % de la valeur moyenne rapportée au sédiment humide et 127 ppm pour la couche inférieure, soit 90,7 % de la valeur moyenne. L'azote varie de 0,19 % en poids dans la couche oxydée soit 112 % de la valeur moyenne et de 0,16 % en poids dans la couche réduite, soit 114 % de la valeur moyenne. Enfin, le carbone des matières organiques accuse un écart de 1,02 % en poids dans la couche supérieure, soit 65,4 % de la valeur moyenne et de 0,72 % en poids dans la couche inférieure, soit 55,0 % de la valeur moyenne.

Il ressort de ce tableau que la couche réduite est moins alcaline en moyenne que la couche oxydée, pouvant même devenir très lé-

gèrement acide, les extrêmes étant plus bas dans la couche inférieure que dans la couche supérieure. La teneur en humidité est plus basse dans la couche profonde que dans la couche superficielle, ce qui se conçoit facilement étant donné le tassement de plus en plus important qui se manifeste lorsqu'on s'enfonce dans le sédiment. Quant à la teneur en sulfures, elle est plus de trois fois plus grande, en moyenne dans la zone réduite que dans la zone oxydée, ce qui se comprend facilement, l'oxydation ayant tendance à solubiliser S qui diffuse ensuite dans l'eau sus-jacente. Enfin, la richesse de la zone oxydée est supérieure de 18 % à celle de la zone réduite pour l'azote total, mais de 16 % seulement pour la teneur en C élémentaire. Cette différence est attribuable à la présence de matières organiques en plus grandes quantités dans les couches supérieures d'où elles peuvent encore participer, à certains moments de l'année, aux échanges sédiment-eau, tandis que plus bas, ces matières sont en plus faibles quantités, car elles caractérisent un état d'équilibre plus ancien et qui s'est établi par une minéralisation plus poussée des substances qui, maintenant, ne peuvent plus diffuser dans l'eau.

30.3. Les sédiments aux stations A à N.

Nous disposons de résultats datant de 1957 et de 1958, obtenus aussi bien par bennage que par carottage. Trois prises d'essai ont lieu dans chaque carotte, une supérieure entre 0 et 4 cm de profondeur une inférieure entre 30 et 35 cm et une intermédiaire entre 10 et 20 cm.

Les moyennes des résultats obtenus par les deux modes de prélèvement figurent dans le tableau CIXIII ci-dessous.

TABIEAU CIXIII

Caractéristiques moyennes du sédiment aux stations A à N.

Station	Prof. m.	Humidité.		Carbonates		Mat. organ.		Phosphates		Sulfures
		benn.	car.	benn.	car.	benn.	car.	benn.	car.	benn.
A	146	62,0	53,8	69,3	69,1	0,64	0,91	0,087	0,077	150
B	101	59,5	55,6	78,6	73,5	0,59	0,87	0,080	0,064	161
B'	48	56,0	51,4	74,7	73,8	0,61	0,47	0,075	0,056	70
C	56	60,6	47,0	69,7	67,9	1,22	0,80	0,070	0,073	170
D	47	58,6	53,3	64,8	66,7	1,15	0,86	0,084	0,095	150
E	16	49,5	40,8	47,7	46,9	3,41	2,71	0,126	0,110	94
F	19	51,1	46,4	49,1	50,8	0,81	0,79	0,085	0,086	92
K	11	56,5	34,4	31,9	-	-	0,64	0,125	0,084	58
L	11	31,0	29,6	20,5	-	-	0,45	0,055	0,094	43
M	31	58,2	52,8	72,1	-	-	0,32	0,090	0,092	54
N	82	63,0	49,9	53,8	-	-	0,58	0,140	0,139	91

benn. = bennage ; car. = carottage.

Rappelons que, rapportées au sédiment naturel (humide), les moyennes de l'humidité sont exprimées en % en poids et celles des sulfures en ppm (ou gr/tonne); rapportées au sédiment desséché, les moyennes des carbonates expriment des % en poids de CO_2 , celles de la matière organique des % en poids de carbone élémentaire et celles des phosphates des % en poids de P_2O_5 .

L'humidité augmente grosso modo avec la profondeur, passant de 30 % environ à L (11 m de profondeur) à plus de 50 % à A et B (plus de 100 m). Par contre, la teneur en matières organiques ne subit apparemment pas de variation en fonction de la profondeur, mais diminue nettement à mesure qu'on s'éloigne des centres pollutifs de Neuchâtel et d'Yverdon dont la contribution à l'eutrophisation du lac est mise ainsi en évidence. En effet, classant les résultats exprimés en % de C élémentaire en fonction de la distance croissante des stations à chacun des foyers d'émission de matières organiques, on obtient les séries suivantes: pour Yverdon: K=0,64; N=0,58; L=0,45 et M=0,32, pour Neuchâtel: E=2,71; D=0,86; F=0,79.

Pour les teneurs moyennes en phosphates, ces deux villes jouent un rôle analogue et, au moyen d'un classement semblable, on obtient les séries suivantes dans lesquelles la teneur en phosphates est exprimée en % en poids de P_2O_5 :

pour Neuchâtel: E=110; D=95; F=86

pour Yverdon: K=105; N=139; M=91; L=75.

L'anomalie apparente de K devant vraisemblablement être imputée à l'influence de l'Orbe-Thière dont le courant transporte au-delà de K la pollution fine contenant des phosphates.

50.4. Les sédiments isobathes.

Il est intéressant de voir si, à une profondeur constante, la composition du sédiment accuse des variations en fonction de l'emplacement de la station, par rapport soit à la morphologie sous-lacustre, soit à sa distance des centres pollutifs.

Le 14 novembre 1961, 6 bennages sont effectués à 115 m de profondeur chacun et répartis sur les flancs gauche et droit du bassin de Neuchâtel (stations 91 et 92), sur le flanc NW de la Motte (station 93), dans le thalweg de la vallée S (94), sur les flancs gauche et droit du bassin de Treytel (95 et 96). La couche oxydée a une puissance de 0,5 mm aux stations 91 et 92 où elle est irrégulièrement répartie à la surface du sédiment, de 1 mm aux stations 93 et 96, de 2 mm à la station 95 et de 6 mm à la station 94. Le tableau CLXIV donne les résultats des analyses effectuées sur la couche inférieure seulement de chaque sédiment, mais aussi les couleurs observées pour les deux couches séparément.

TABIEAU CLXIV

(cf. page suivante)

TABLEAU CLXIV

Caractéristiques du sédiment prélevé à 115 m de profondeur à diverses stations isobathes du lac le 14 novembre 1961

Station	Couleur zone		pH	Sulfures	Azote total	Humidité	Mat.org.
	oxyd.	réd.					
91	219	434	7,36	133	0,15	68,9	0,92
92	339	519	7,41	117	0,16	66,9	1,25
93	339	514	7,54	52	0,11	60,9	1,07
94	338	515	7,46	205	0,12	64,1	0,80
95	339	552	7,42	181	0,13	64,0	1,12
96	219	514	7,42	169	0,17	67,0	1,36
Moyenne	-	-	7,44	143	0,14	65,3	1,09

Les écarts sont considérables entre les diverses stations, spécialement pour l'azote total, les matières organiques et les sulfures pour lesquels l'amplitude des extrêmes par rapport aux moyennes correspondantes représentent 43, 51 et 107 % respectivement. Ces variations, ainsi que le désordre par rapport à l'éloignement de Neuchâtel, sont dus au trop petit nombre de mesures et de prélèvements. Une seule remarque peut être faite : pour la même profondeur le même jour, il existe une différence très nette dans les teneurs en sulfures et en matières organiques de part et d'autre de la Motte (stations 95 et 94). Pour le reste, il est nécessaire de répéter les opérations de nombreuses fois encore pour établir une statistique dont on pourrait tenter de tirer des moyennes valables.

50.5. Les sédiments en profile transversaux.

Pour obtenir une image de l'état du sédiment dans l'ensemble du lac, nous opérons des bennages simultanés à 39 stations réparties en profile transversaux tels qu'ils sont décrits en paragraphe 14.2.1. Ces prélèvements, exécutés deux fois en 1961, donnent des résultats dont nous extrayons le tableau CLXV dans lequel aucune discrimination n'est faite entre les couches oxydées et réduites, les analyses portant sur l'ensemble du sédiment récolté.

TABLEAU CLXV

(cf. page suivante)

TABLEAU CLXV

Moyennes et extrêmes de la composition des sédiments lacustres prélevés en profils transversaux durant l'année 1961.

Moyennes	pH	Sulfures	Azote tot.	Humidité	Carbonates	Mat.org	Silice
Janvier	7,43	76	0,12	60,7	64,43	-	6,56
Fin août	7,37	92	0,07	60,4	63,56	1,22	5,27
Extrêmes							
Minima							
Janvier	6,94	5	0,02	29,0	10,69	-	1,93
Station	81	53	65	65	65	-	53
Fin août	7,09	19	0	27,3	14,27	0,53	1,13
Station	81	11	-	11	65	56	33
Maxima							
Janvier	7,87	217	0,19	72,7	90,86	-	10,06
Station	65	71	31	53	33	-	81
Fin août	7,54	208	0,16	73,2	91,65	2,08	9,36
Station	35	71	21	25	33	24	12

Comme précédemment, le S en ppm et l'humidité en % sont rapportés au sédiment humide, tandis que l'azote total (en %), les carbonates (en % CO_2Ca), la matière organique (en % de C) et la silice (en % de Si) sont rapportés au sédiment sec.

Dans l'ensemble, le lac accuse une très légère tendance à devenir moins alcalin de janvier à fin août; par contre, en moyenne, la teneur en sulfures augmente de 21 % de janvier à fin août et il faut voir dans ce phénomène un signe de l'épuisement de l'hypolimnion en oxygène avec augmentation de la teneur en sulfures due à des manifestations anaérobies. La teneur en azote diminue fortement parce qu'au cours de cette même période, de la matière azotée contenue dans les sédiments s'est dissoute et est rentrée dans le circuit purement aqueux.

Les pH les plus bas se rencontrent devant Grandson (station 81) où le fond est déjà bien eutrophisé et subit fortement les effets de l'appauvrissement en oxygène et, par conséquent, ceux des manifestations anaérobies, cela par suite de la proximité des déversements d'eaux d'égout de Grandson et d'Yverdon et en même temps parce que le volume du lac à cet endroit est très restreint. La teneur en azote et celle en carbonates sont les plus faibles dans les sables devant Cheyres (station 65), tandis que le sommet de la Motte (station 33) accuse les teneurs les plus faibles en silice. C'est à cette dernière station aussi que les teneurs en carbonates sont maximum, à cause de la forte précipitation de CO_2Ca comme Portner (1951 b) l'a montré. Enfin, c'est à l'embouchure de l'Arnon (station 71) que la teneur en sulfures est la plus élevée, ce qui ne surprend pas étant donné que

cet affluent drains une vaste contrée agricole et récolte aussi les égouts de très nombreux villages.

Utilisant les résultats des dosages de S dans les 78 bennages en profils transversaux, les 6 bennages isobathes, les prélèvements aux 11 stations réparties de A à N, ainsi que les 78 observations à Z, nous voyons la possibilité de dresser la carte de répartition des sulfures dans le sédiment tapissant l'ensemble du fond du lac de Neuchâtel. C'est ce que montre la figure 170.

Il en ressort que les zones contenant la plus faible quantité de sulfures sont situées dans le Bas-lac, au sommet de la Motte, le long du littoral (sur la berge) de droite de Chevroux jusqu'aux environs d'Yvonand et enfin à l'embouchure de l'Epeneze (plage d'Yvonand). Toutes ces zones sont peu profondes, fortement soumises à l'action solaire ainsi qu'à celle des vagues et, les cas de St. Blaise et d'Estavayer-le-lac exceptés, relativement éloignées des centres pollutifs urbains. Dans ces conditions, ces zones sont soumises à une vie intense, aérobie et très peu favorable à la formation des sulfures. La forte teneur en S relevée dans le sédiment à l'embouchure des égouts de St. Blaise et d'Estavayer-le-lac ne concerne qu'une zone très limitée et qui n'affecte pas l'ensemble de la zone à faible teneur.

La baie d'Anvernier, relativement profonde, protégée des vents d'W et du SW, située aussi bien sous la trajectoire de l'Arenée que des déversements urbains de la partie occidentale de Neuchâtel et de ceux de la région Anvernier-Colombier, accuse une forte teneur en sulfures. La zone adjacente au S et au SE est également très riche en S. L'apport de matières polluantes y a lieu dans une région trop profonde pour pouvoir être oxydée et les processus anaérobies prennent le dessus, fixant une quantité importante de sulfures dans le sédiment. Le même phénomène se manifeste au large et à l'E de Gorgier, dans la zone des grands fonds et malgré que les déversements d'eaux usées de cette partie de la Béroche soient moins importants en volume que ceux de la région urbaine de Neuchâtel. A notre avis, c'est principalement parce que ces déversements s'effectuent en eau trop profonde que la teneur en S peut atteindre une valeur aussi élevée.

A l'embouchure de l'Arnon où les fonds atteignent 80 m, on a affaire à un phénomène semblable à l'égard des eaux rurales trop riches en substances nutritives déversées par l'Arnon (cf. chapitre onzième et en particulier les tableaux CVI et CXXIV), dans une partie du lac qui, au surplus, a un développement restreint parce que située déjà dans le Petit-lac. Quant à la zone sise au S du sommet de la Motte, autour de la station B', le problème y est le même, avec pour origine soit les déversements provenant de Chevroux, soit l'accumulation, dans le cul-de-sac que constitue la vallée au S de la Motte à cet endroit, des eaux usées stagnantes dans la partie méridionale de la cuvette de Neuchâtel.

Les accumulations de S dans le sédiment à l'embouchure des égouts d'Yverdon, d'Estavayer-le-lac et de St. Blaise restent très localisées, car l'agitation des vagues et les courants sous-lacustres

Fig.167.

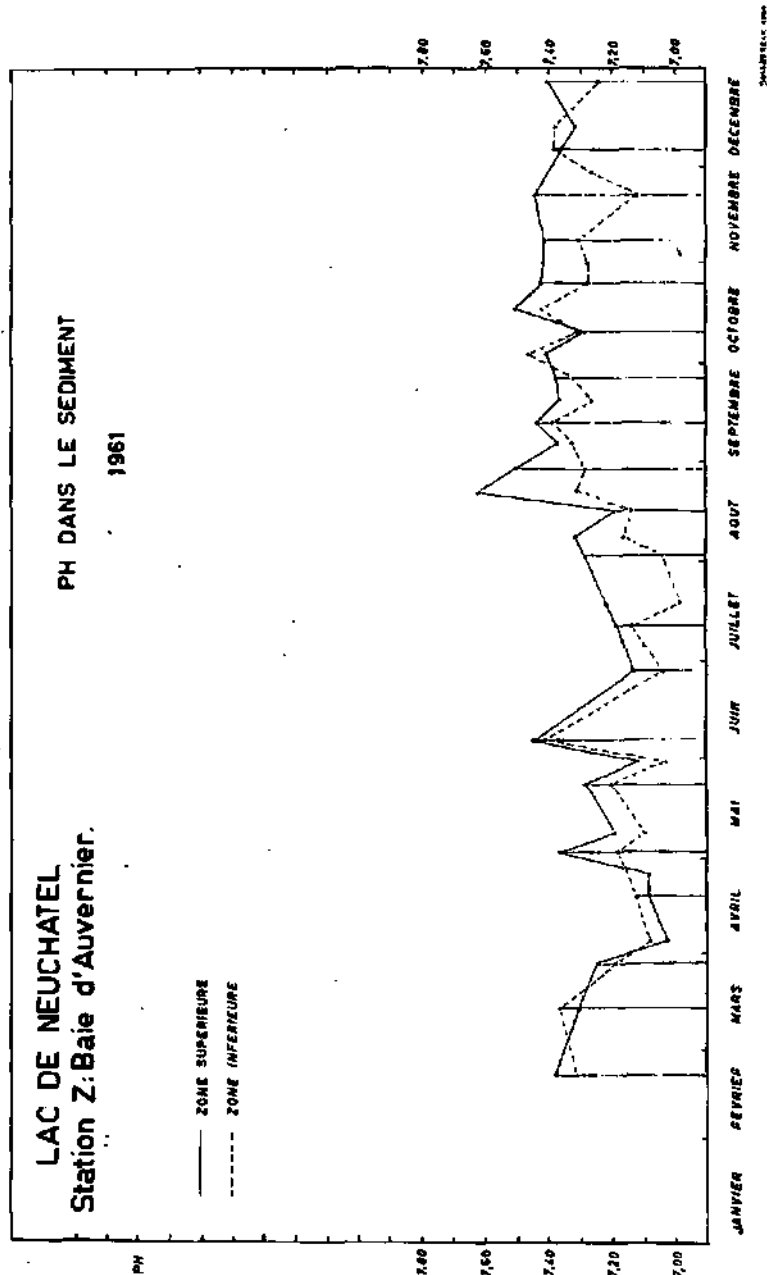


Fig.168.

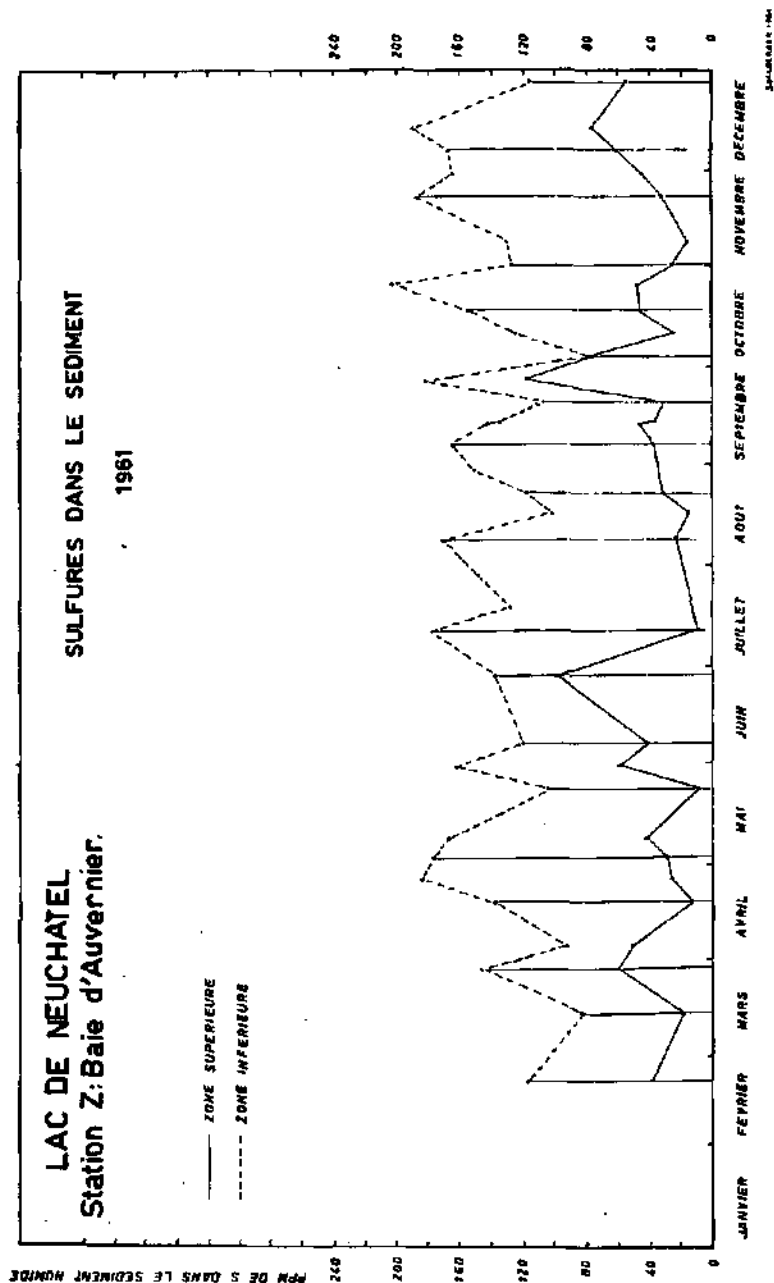
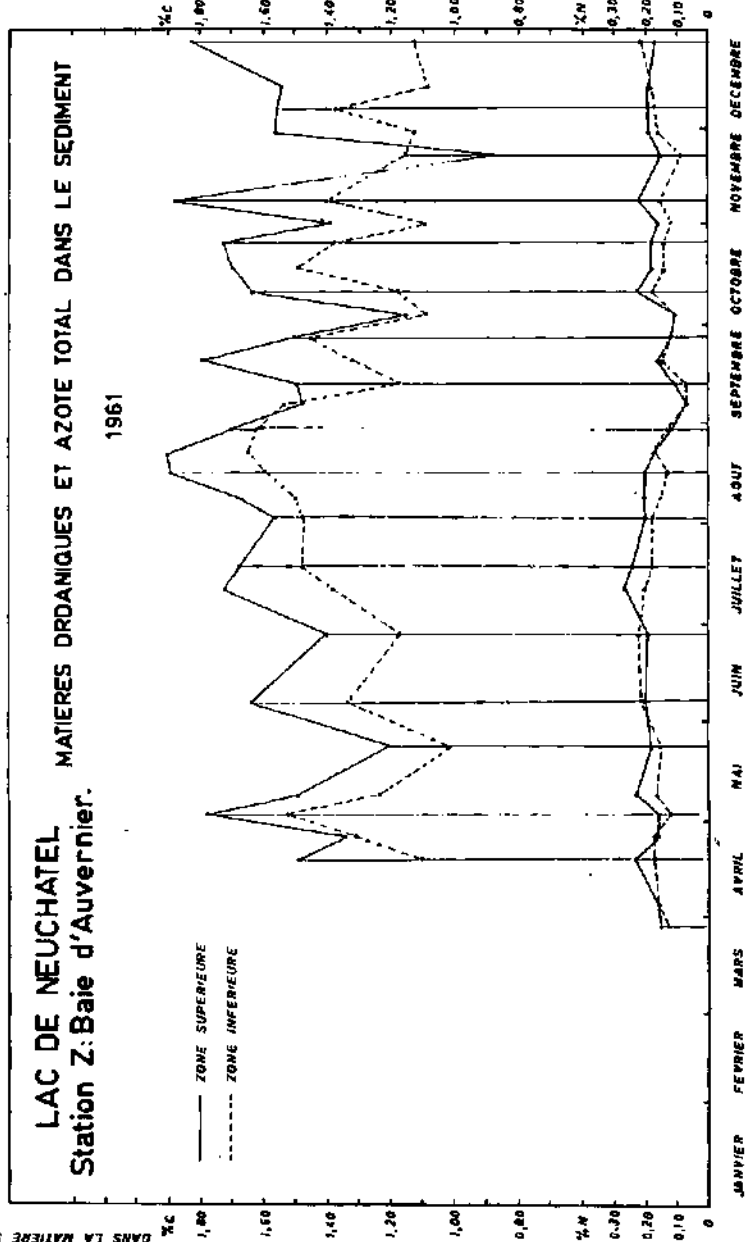


Fig. 169.

DANS LA MATIÈRE SÈCHE



SOURCE: IRI.

Fig.170.

LAC DE NEUCHÂTEL

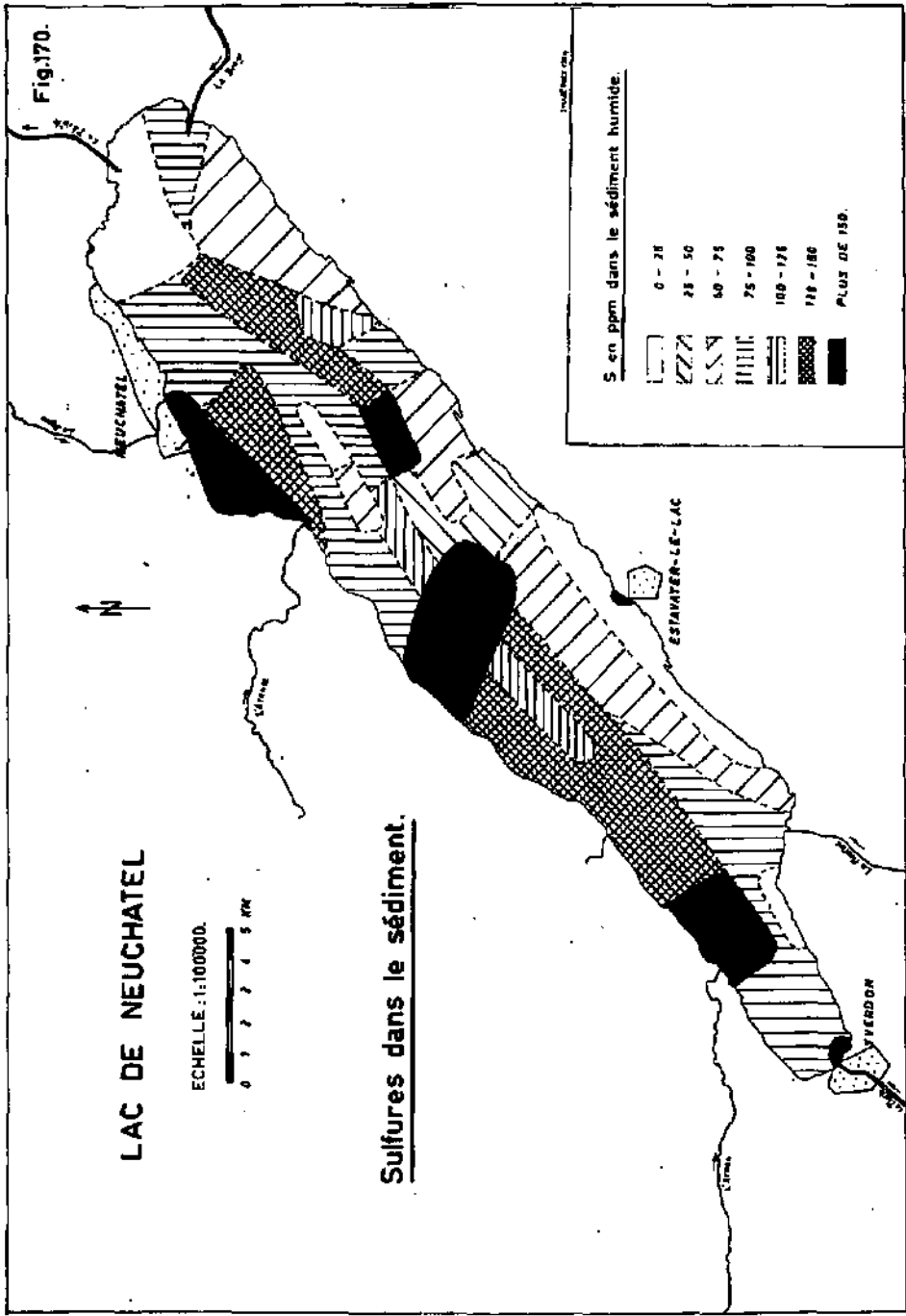
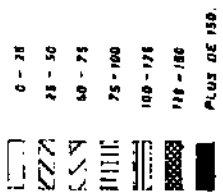
ECHELLE: 1:100000.



Sulfures dans le sédiment.

Travaux de terrain

S en ppm dans le sédiment humide.



dispersent très vite ces matières. Dans la région peu profonde du Bas-lac, l'apport du canal de la Broye crée une zone à teneur relativement élevée en S qui empiète sur la zone pauvre en sulfures qui caractérise cette extrémité du lac. L'influence de la Broye se trouve limitée par la lenteur du courant et le débit relativement faible de la rivière à son arrivée dans le lac de Nenchâtel.

En résumé, la présence des sulfures étant liée à l'apport de substances polluantes, on peut dire que la figure 170 constitue, en fait, la carte de la pollution des fonds de notre lac. Elle permet aussi de se rendre compte que la détérioration des sédiments a pour origine le Haut-lac et la rive gauche, la responsabilité du canal de la Broye étant moins grande.

50.6. Les sédiments de la Motte.

Les hennages sur le plateau sommital livrent du sable grossier, calcaire, parsemé de coquillages et surmontant une masse de sédiments plus fins, gris-jaunâtres.

A l'analyse, l'ensemble des deux couches donne les résultats suivants:

sulfures: 19 ppm et humidité: 55,7 % en poids, tous deux rapportés à la matière humide ; azote total: 0,16 %, matière organique en carbone: 0,97 %, carbonates en CO_2Ca : 91,26 % et silice en Si : 1,53 %, les quatre rapportés à la matière sèche.

Lors des forages de 1958 dont parle Quartier (1959 a), le carottier a percé 7 m de sédiments déposés sur la Motte, sans arriver à la roche sous-jacente. Déterminée 46 fois à des intervalles de quelques cm le long de la carotte, la teneur en carbonates varie entre 95,3 et 15,2 % exprimée en CO_2Ca dans la matière sèche. De 7 à 3,9 m de profondeur, le sédiment est pauvre en carbonates (entre 20 et 30 %) et correspond à des couches glaciaires. Au-dessous, sur 40 cm d'épaisseur, on rencontre une couche de transition dont la teneur en carbonates varie de 15 à 80 %, puis de 3,5 à 2,5 m de profondeur se trouve une couche de vrais crais lacustres (teneur en CO_2Ca : entre 89 et 93 %) à laquelle succède, entre 2,3 et 1,7 m, une zone blentée à plus forte teneur en argiles (carbonate : entre 70 et 80 %). Enfin, la partie supérieure du sédiment est fortement carbonatée (plus de 90 %).

D'autres dosages n'ont pu être entrepris, faute de temps. Mais les travaux exécutés et dont nous venons de parler, joints aux résultats de la granulométrie, permettent de conclure que la moraine de la partie inférieure du carottage appartient à la dernière glaciation et que le lac a été mis en eau immédiatement après la fonte du glacier. Quant à la sédimentation actuelle sur la Motte, elle semble à peu près nulle, le sommet ayant atteint un niveau d'équilibre sur lequel les vagues roulent les matériaux au fur et à mesure qu'ils se déposent.

50.7. La granulométrie des sédiments.

Nous nous contenterons d'un aperçu de cette question pourtant importante dans l'étude des sédiments, car autrement nous risquer-

riants de dépasser le cadre de notre travail.

Les tamisages sous l'eau auxquels se rapportent les résultats dont il va être question se bornent aux fractions des diamètres:

- a) plus grande que 632 μ ,
- b) compris entre 632 et 200 μ ,
- c) de 200 à 63,2 μ ,
- d) plus petits que 63,2 μ et les poids des fractions sont rapportés au poids sec intact des boues.

Bous donnons, dans le tableau CLXVI, les résultats de l'analyse granulométrique du sédiment des stations A à F, ainsi que de la Motte.

TABEAU CLXVI

Granulométrie du sédiment du lac de Neuchâtel à diverses stations, exprimée en %.

Station	Diamètre des particules				Profondeur en m.
	Plus grand que 632 μ	De 632 à 200 μ	De 200 à 63,2 μ	Plus petit que 63,2 μ	
A	0,06	0,3	8,3	91,3	153
B	0,06	0,7	16,5	82,7	104
B'	0,7	0,7	32,3	66,3	40
C	0,4	17,1	33,8	48,6	47
D	0,3	2,3	23,5	73,8	49
E	12,4	14,0	56,2	17,3	15
F	0,5	3,5	67,8	28,2	15
La Motte	6,2	37,9	21,1	34,5	9

D'une manière générale, la sédimentation fine décroît avec la profondeur et la fraction la plus grossière est négligeable dans les sédiments qui ne se trouvent pas dans une zone d'épandage d'eaux usées. Sinon, les fractions les plus grossières dominent largement; c'est ce qui se produit à la station E.

Dans les zones lacustres à granulométrie grossière, qu'on peut aussi appeler "zones à pollution grossière", les déchets sont généralement volumineux et d'origine végétale; ils se fossilisent rapidement perdant rapidement aussi leur virulence à l'égard de la pollution. Dans les "zones à granulométrie fine", la pollution se produit dans des vases calcaires ou argileux qui empêchent une fossilisation rapide des déchets, les laissant soumis à des transformations aérobies ou anaérobies dangereuses pour le lac.

51. Comparaison avec d'autres lacs.

On possède relativement peu de renseignements détaillés sur les sédiments d'autres lacs.

Dans le Léman, Juget (1958) signale aussi la présence, presque

toute l'année d'une couche oxydée, claire, à la surface du sédiment, surmontant une couche beaucoup plus épaisse et foncée, riche en SF₆ et en bactéries anaérobies.

La teneur en matière organique, calculée en C élémentaire, oscille entre 3,5 et 12,5 % pour le lac de Zurich selon Fehlmann et Minder (1920), donc bien au-dessus de ce que nous mesurons chez nous. Notre lac, selon Zöllig (1955) se rapproche davantage de celui de Walenstadt à ce point de vue, autrement dit d'un lac encore oligotrophe. Par contre, dans le lac de Hallwil (Güntert, 1920), la teneur en matière organique est encore plus élevée, de l'ordre de 30 % de la matière sèche du sédiment.

À propos des sulfures, la plupart des auteurs sont muets quant à un dosage éventuel. Seule Thomas (1948) signale la présence de SH₂ reconnaissable à l'odeur dans le Türleresee, tandis que Güntert mentionne, en 1920 déjà, 1200 ppm de S dans le sédiment de Hallwil.

Pour le phosphore total, les valeurs obtenues dans notre lac oscillent entre celles déterminées pour Zurich et le Bodan, mais nettement en-dessous de celles de Zoug et de Walenstadt (Zöllig, 1955).

52. Recherches sur les matières qui se déposent actuellement dans le lac.

Nous avons mentionné au paragraphe 20.10.3 déjà, l'emploi de pièges à sédiments permettant de "capturer" toutes les matières en cours de sédimentation au fur et à mesure qu'elles tombent vers le fond.

Comme nous l'avons dit alors, il s'agit de pièges d'un modèle spécial, chacun des engins utilisés étant placé seul à un endroit déterminé, à l'encontre de la disposition adoptée par Tutin (1955) qui les suspend tous les uns au-dessus des autres, à diverses profondeurs d'un seul endroit.

Les quatre pièges à notre disposition ont fonctionné deux fois dans le lac : une première fois au printemps 1959, durant 9 mois environ; 3 seulement ont donné des résultats, le quatrième, au Nid du Crô, a été victime d'un pêcheur qui l'a renversé avec ses engins. La seconde série a été placée en automne 1960, pour 3½ mois environ; 2 pièges seulement ont fonctionné : le troisième s'est perdu lors d'un accident de plongée en cours de relèvement et le quatrième a été renversé par un pêcheur retirant ses filets.

Les caractéristiques des sédiments recueillis ainsi figurent dans le tableau CLXVII ci-après. Rappelons que la surface intérieure de chaque piège représente 1029 cm² et que le grillage "anti-poisons" fixé sur l'ouverture de l'engin, s'il représente une surface non négligeable, empêche très peu cependant la chute des matières à l'intérieur du piège. En effet, les fils constituant le grillage sont de section circulaire et, les tout gros débris mis à part, ne retiennent pratiquement jamais rien des matières tombant vers le fond, ceci d'autant plus que les courants, si insignifiants soient-ils, ont tendance à faire basculer tout dépôt momentanément arrêté par les fils et à le faire tomber à l'intérieur du piège. Tout compte fait, la surface ré-

coltant les matières capturées par le piège à sédiment est très voisine de 1000 cm², valeur que nous utiliserons par la suite.

TABIEAU CLXVII

	Champ Bougin	Rue du Bassin	Chevroux	Champ Bougin	Nid du Crê
Mise en place	25. IV. 59	2. V. 59	3. V. 59	9. I. 60	16. I. 60
Relèvement	23. I. 60	30. I. 60	31. I. 60	28. I. 61	28. I. 61
Durée (jours)	273	273	273	111	104
Profondeur (m)	25	25	25	28	28
Epaisseur récoltée dans le piège (mm)	36	42	34	14	14
Epaisseur ramenée à une année (mm)	48	56	46	46	49
Couleur de la sur- face selon C.U.C.	209	308	208	427	218
Couleur sous la surface	noir	beige	gris	noir	gris- noir
Aspect	gélét.	gélét.	gélét.	gélét.	gélét.
Odeur	vase et SH ₂	vase et SH ₂	roseaux	vase et SH ₂	vase et égout
Poids de sédiment recueilli en gr.	3895	4233	3968	1648	1340
Poids ramené à une année et au m ² (kg)	52,2	56,6	53,1	54,1	47,0
Humidité rapportée au sédiment brut(%)	73,0	73,1	66,3	-	-
Sulfures rapportés au sédiment brut, en ppm de S	-	-	-	25,1	18,3

Les emplacements de ces cinq pièges sont données par la figure 34. Dans ce tableau, les valeurs rapportées à l'année sont calculées en admettant que l'épaisseur aussi bien que le poids de sédiment sont proportionnels à la durée des opérations, le tassement étant négligeable pour une si courte période.

Les teneurs en humidité et en sulfures restent dans l'ordre de grandeur des résultats obtenus pour le sédiment pris en profile transversaux. Mais l'humidité du sédiment capturé par nos pièges dépasse fortement celle que Hummel (1923), cité par Portner (1951 a, p. 76), donne pour les sédiments recueillis dans le Bodan de manière analogue (62 %). Les quantités de sédiment obtenues lors de nos mesures dépassent aussi largement celles indiquées par lui pour le Bodan (Hum-

mal) : 2 à 3 mm et pour la Lunzer Untersee (Göttinger) : 1 mm et obtenues aussi par dépôt dans un caisson de capture.

Malgré le tassement qui peut s'être produit (durant 9 mois pour la première série), le sédiment récolté dans nos pièges dépasse en épaisseur les quantités données par Portner (1951 a) pour les dépôts annuels dans notre lac. Cet auteur, opérant par quatre méthodes différentes et pour des sédiments visés de quelques années au moins, arrivait en effet à une épaisseur de $0,7 \pm 0,3$ mm par an, en moyenne.

Il est extrêmement difficile de relier nos résultats à ceux de Portner pour les raisons suivantes:

- 1) nos pièges capturent véritablement tout ce qui franchit la grille d'entrée, que la trajectoire de la matière tombant sous l'effet de la pesanteur soit rigoureusement verticale ou non; les matières ayant pénétré dans le piège y restent, quels que puissent être les mouvements de l'eau alentour, alors que les sédiments qui se déposeraient au même endroit en l'absence du piège courraient le risque d'être entraînés plus loin par les vagues et les courants. Ce risque semble permanent, d'ailleurs, à certains endroits; nous n'en voulons pour preuve que les objets préhistoriques retrouvés récemment par les plongeurs autonomes devant Monruz, à quelques mètres de profondeur, reposant de manière visible sur le fond, sans qu'ils se soient recouverts de sédiments depuis l'époque de leur chute au lac. Il ne se produit donc aucun départ de matière solide à partir des pièges et les résultats obtenus par cette méthode pèchent par excès en regard de ceux calculés comme nous l'avons dit plus haut;
- 2) les quantités de sédiment évaluées par Portner se basent sur une répartition uniforme des dépôts pour l'ensemble du fond du lac. Or, comme cet auteur le fait remarquer déjà, les quantités qui se déposent ne sont pas identiques quelle que soit la profondeur. Nous avons vu déjà la différence existant entre la sédimentation grossière et la sédiment fine en fonction de la distance à la rive. Nos résultats concernent tous la marge supérieure de la zone semi-profonde indiquée par Portner; nos essais à une profondeur plus grande ont échoué. Dès lors, il serait indiqué de placer des pièges à des profondeurs variables, mais plus grandes, pour voir si les dépôts s'y forment de la même manière que vers 25 m et dans les mêmes proportions. Ce problème figure à notre programme futur;
- 3) il ne nous a pas été possible, faute de temps, de suivre le tassement des sédiments récoltés, de sorte qu'on ne peut dire, pour le moment, à quel instant les sédiments des pièges se rapprochent de la consistance de ceux recueillis sur fond libre.

En dépit de ce qui précède, nous nous bornons à constater que les quantités de matières sédimentables recueillies par piège à sédiment représentent, à l'état frais, 46 à 56 mm par an à une profondeur comprise entre 25 et 30 m, que ce soit sur la rive gauche ou sur la rive droite. Ces matières ont une consistance gélatineuse, une odeur de vase ou de roseau mélangée à des traces de SH_2 , sont recouvertes d'un "feutre biologique" dans lequel vivent de grandes quantités de Tubifex et de Copépodes, ainsi que quelques Hirudiniées; elles sont sur

montées d'une eau dans laquelle abonde le plancton. La masse de sédiment est parsemée de fibres de papier, spécialement nombreuses devant la rue du Bassin à Neuchâtel et dues à l'apport d'égouts voisins. La teneur en sulfures est relativement faible, malgré la teinte grise ou noirâtre de la matière au-dessous du feutre biologique dont la puissance moyenne est de 2 à 2,5 mm.

Nous estimons qu'il conviendrait encore de prélever le sédiment "libre" adjacent à chaque piège au moment de la pose, puis au moment du relèvement, afin de comparer la nature et les quantités de matière qui se déposent simultanément dans le piège et à côté de celui-ci, en eau libre.



Sixième partie

CONCLUSIONS ET BIBLIOGRAPHIE

=====

Chapitre seizième : CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

53. Le lac en général.

En ravisant les divers paramètres du lac de Neuchâtel, nous complétons les données d'auteurs anciens, ainsi que celles de Quartier (1948 b). En les exprimant selon les normes de la limnologie moderne, nous en facilitons la comparaison avec ceux d'autres nappes d'eau qui sont étudiées actuellement en Suisse et à l'étranger. Une des données les plus modifiées, l'aire lacustre proprement dite, dépend de l'altimétrie pour laquelle les changements sont intervenus lors de la parution de la Carte nationale suisse.

La frange littorale peuplée de roseaux constitue un habitat particulier très différent du reste de notre lac. C'est pourquoi nous tenons à différencier très nettement ces deux zones l'une de l'autre. Nous limitons nos recherches, cependant, à la plus grande de ces masses lacustres, réservant à une étude particulière et ultérieure le biotope de la frange littorale.

Deux problèmes nouveaux de géographie économique sont apparus depuis les travaux qui ont précédé nos recherches actuelles: l'un se rapporte au rendement piscicole et l'autre à l'utilisation du lac comme réservoir d'eau potable; mais tous deux dépendent étroitement d'un troisième: la pollution de l'eau. Du point de vue de la qualité, le rendement de la pêche accuse particulièrement l'effet de la détérioration du biotope lacustre: alors que la pêche des corégones diminue régulièrement et indépendamment des variations climatiques aussi bien que des modifications dans la manière de pêcher, simultanément la prise des gardons et des espèces apparentées croît parce que la reproduction des espèces* est favorisée par l'augmentation de la "nourriture" apportée au plancton sous forme de matières polluantes. Quant à la possibilité d'utiliser le lac de Neuchâtel pour l'alimentation humaine à grande échelle, elle devient aléatoire, moins par la détérioration de la qualité bactériologique de l'eau que par les changements continuels qui affectent ses propriétés chimiques et qui sont de plus en plus difficiles à corriger.

La présence de la Motte qui constitue une particularité morphologique que ne possèdent pas les autres lacs suisses, tient un rôle important dans la vie de notre lac. En effet, si son volume évalué au-dessus du modèle général du fond à la profondeur de sa base se représente qu'à peine 1 % du volume total du lac, sa présence, par contre, prolonge par une sorte de rôle le plateau incliné de la rive droite au moment où celui-ci s'apprête à disparaître dans le bassin de Neuchâtel. La Motte sépare alors la masse d'eau de ce bassin en deux plus petites (remplissant deux vallées parallèles) dont la septentrionale est fortement soumise aux effets de la pollution urbaine, tandis que la méridionale jouit encore d'une vie naturelle (grandes quantités de roseaux).

Les cinq ans que couvrent nos recherches constituent une période légèrement plus chaude, tout aussi humide, mais un peu moins ri-

* non nobles

che en précipitations (8 % de moins) et un peu moins ensoleillée (déficit 5 %) que les 60 premières années du siècle. Nous nous trouvons donc dans une situation météorologique qu'on peut qualifier de normale, de sorte qu'à l'exception de certains cas particuliers mais dans certaines limites toutefois, il sera possible d'extrapoler nos résultats à une période plus longue de notre époque.

Sous l'effet des vents longitudinaux, le déséquilibre hydrostatique du lac est observable sur les limnigraphes actuels et il se traduit par une inclinaison de la surface lacustre vers l'aval lorsque la bise souffle, vers l'amont en cas de vent du SW ou d'W.

Une règle établie depuis 1889 voudrait que les basses eaux apparaissent en octobre et décembre et les hautes eaux en été. Or, notre statistique pour la période de 1957 à 1961, basée sur le nombre de jours où le lac est à un niveau inférieur à la moyenne et celui où il est au-dessus de cette même cote, ne coïncide qu'imparfaitement avec cette règle. En effet, les basses eaux se présentent bien en octobre et décembre, mais les hautes eaux se rencontrent en mars au lieu de l'été. Toutefois, comme la répartition des crues dépend fortement de conditions artificielles (la manœuvre des vannes au barrage de Port), nous nous bornons à signaler la chose sans lui accorder une grande influence sur nos résultats.

Les crues du lac apparaissent indépendantes des refoulements de la Thièle et très peu dépendantes du niveau lacustre. La période 1957-1961, avec un total de 62 jours de refoulement de la Thièle-émissaire et un maximum annuel de 27 jours en 1960, n'atteint pas la moyenne de 32 jours par an indiquée par Quartier (1948 b, p. 95) pour ce phénomène. Le régime d'écoulement de la Thièle-émissaire présente donc une différence par rapport aux années qui précèdent nos recherches. S'agit-il d'un fait exceptionnel ou d'un changement durable dû à une meilleure application que précédemment du règlement de manœuvre des écluses de Port près Nidau ? Cette question risque fort de rester sans réponse car nous n'aurons plus guère la possibilité de vérifier la chose avant la fin des travaux de correction du canal de la Broye et le début de ceux de la Thièle-émissaire, travaux qui vont changer le régime hydraulique des trois lacs jurassiens.

Si nous avons pu déterminer, lors de tempêtes sur le lac de Neuchâtel, la quantité de matières en suspension emportées par la Thièle en direction du lac de Bière, il ne s'agissait que de matières solides. Un autre problème reste à résoudre : celui des matières polluantes en général et des hydrocarbures en particulier, emportés par la Thièle-émissaire. Ce problème fait partie du programme de nos travaux ultérieurs.

54. A propos des recherches limnologiques modernes.

Au siècle passé, nos prédécesseurs avaient l'avantage sur nous de pouvoir mettre en évidence très facilement toute une série de phénomènes inconnus ou peu connus jusqu'alors. La limnologie n'en était qu'à ses débuts et il pouvait paraître suffisant, pour tirer des conclusions valables à cette époque, de se contenter d'étudier, dans les grands lacs, une ou deux stations simultanément, à quelques niveaux

seulement et à des intervalles même peu rapprochés dans le temps. L'absence presque complète de pollution (sauf dans quelques nappes d'eau comme celle de Morat) ne compromettrait pas l'homogénéité remarquable du lac; cette situation permettait même d'extrapoler à l'ensemble du biotope les résultats obtenus dans les conditions que nous venons d'énumérer.

Aujourd'hui, les mêmes phénomènes peuvent être mieux analysés grâce au perfectionnement des méthodes de recherche et on peut en suivre plus facilement l'évolution en fonction des saisons et des circonstances météorologiques. Toutefois, la pollution des eaux et surtout son accroissement de plus en plus rapide apportent de tels changements dans le biotope lacustre qu'une hétérogénéité notoire est actuellement l'apanage de la plupart des lacs. Aussi ne suffit-il plus, maintenant, d'examiner ce qui se passe en un point donné de la masse d'eau, ni de travailler comme on le faisait autrefois: il est nécessaire d'augmenter le nombre, la fréquence et la durée des recherches ce qui, du même coup, donne à une étude telle que la nôtre, une envergure à laquelle on n'aurait pas songé autrefois.

D'après ce que nous venons d'énumérer, nous estimons judicieux: le choix de la station Z pour nos recherches hebdomadaires, celui des stations A à F réparties aussi bien que possible dans l'ensemble du lac pour nos opérations de grande envergure, ainsi que le "quadrillage" par les profils transversaux pour les mesures simultanées dans l'ensemble du biotope lacustre.

L'étude complète des affluents de la Broye entre les lacs de Morat et de Neuchâtel est, certes, un problème important pour la pollution de nos eaux. Mais, en l'approfondissant maintenant déjà, il surchargerait notre travail à un point tel que nous renvoyons cette étude détaillée à un programme ultérieur.

Nous insistons sur la nécessité qu'il y a, en limnologie moderne, à serrer le plus possible les recherches dans le sens vertical. Cependant, des raisons d'ordre pratique limitent ce resserrament car nous montrons qu'il est illusoire de vouloir opérer à des intervalles verticaux de moins d'un mètre comme certains auteurs ont prétendu le faire et cela lorsque le lac dépasse la taille d'un étang.

Le grand nombre de facteurs à étudier simultanément dans un travail tel que le nôtre se justifie lorsqu'on constate à quel point leurs influences réciproques apparaissent au cours des investigations de plus en plus précises auxquelles l'appareillage moderne permet de procéder. C'est ainsi, par exemple, que si l'activité solaire fait varier la température de l'eau, elle modifie du même coup la solubilité des bicarbonates, de même que celles de l'oxygène et du gaz carbonique dissous, elle donne au pH la possibilité de changer de valeur et en même temps favorise la prolifération de certains algues; mais l'apport de phosphates allochtones conditionne le développement du plancton, en même temps qu'il bouleverse les teneurs en silice et en certains sels solubles et qu'il règle, indirectement aussi, la teneur de l'eau en oxygène. Si la mort du plancton contribue fortement à la formation du sédiment, la solubilisation d'une partie de celui-ci dépend

de la teneur en oxygène dissous de l'eau, et ainsi de suite.

En introduisant dans notre programme les mesures "in situ" du pH et de la conductivité électrique, nous oserions à éliminer un facteur encore indéterminé et qui dépend des changements de température ainsi que de la décompression que subissent les échantillons d'eau ramenés de la profondeur et sur lesquels ces mesures étaient faites jusqu'ici. En mesurant sur place le pH et la conductivité électrique, de même que la température, on obtient une image beaucoup plus exacte des couches d'eau et surtout des différences relativement faibles qui peuvent exister entre deux points peu éloignés l'un de l'autre dans le sens vertical. Du même coup apparaît la structure lamellée fine dont on avait soupçonné l'existence déjà par diverses mesures antérieures aux nôtres. Ajoutons que nos mesures "in situ" sont les premières de ce genre effectuées en Europe et jusqu'à 150 m de profondeur en eau douce.

Enfin, si nous joignons à nos recherches un aperçu des questions touchant le plancton, c'est surtout à cause des relations de celui-ci avec la physique et la chimie de l'eau, aussi bien qu'avec celles des sédiments.

Nous ne procédons qu'à un petit nombre de mesures et de dosages dans les lacs voisins de Bienne et de Morat, essentiellement dans le but de comparer les ordres de grandeur de quelques déterminations communes aux trois nappes d'eau. Nous comparons aussi avec les nôtres quelques moyennes tirées des travaux les plus récents touchant ces lacs, mais il est bien entendu que nous souhaitons pouvoir mettre en parallèle, dans un avenir que nous souhaitons proche, notre étude et celles entreprises déjà par le Service des eaux du canton de Berne pour le lac de Bienne et par l'EAWS pour celui de Morat.

Quant à l'énumération et à la description précises autant que détaillées de l'appareillage aussi bien que des méthodes de travail utilisées, nous en voyons la nécessité pour permettre à d'autres chercheurs de continuer les travaux actuels à l'aide des mêmes normes, en même temps que pour comparer ces travaux à ceux d'autres lacs dans le cadre de la limnologie moderne. Ce faisant, on contribuera à éviter l'erreur commise involontairement par certains de nos prédécesseurs qui, faute d'indications suffisantes, nous ont laissé des mesures et des dosages non reproductibles ou invérifiables.

55. L'eau du lac.

Dans notre lac, la température de l'eau en surface varie avec les saisons, plus fortement dans la zone littorale qu'au large. Elle subit des variations quotidiennes et horaires également, mais de manière très semblable à ce qui se passe dans les lacs de Morat et d'Ueberlingen, les extrêmes étant un peu plus accentuées dans ce dernier. Par contre, elle n'atteint pas les températures moyennes et maximum indiquées par Bargetzi (1960). Les variations de température de l'eau de surface suivent bien celles de l'air qui la surmonte, mais les extrêmes instantanés de l'air précèdent ceux de l'eau, de sorte que le lac est plus chaud que l'air de juin à février et plus froid que lui de mars à mai.

Au-dessous de la surface, la température varie avec la profondeur, mais subit aussi les influences saisonnières du climat. Le lac est homotherme en février, mais des plus hétérotherme durant les trois semaines qui suivent le solstice d'été, lorsque le réchauffement diurne est le plus long. La moyenne annuelle de la température diminue lorsque la profondeur augmente, de même que l'amplitude annuelle à chaque niveau. Les moyennes mensuelles varient parallèlement aux nôtres dans l'Ueberlingersee dont les maxima, toutefois, ne coïncident pas toujours mais retardent souvent d'un mois par rapport aux nôtres.

Dans notre lac, la descente des isothermes lorsque la saison avance est perturbée par les vents qui, en soufflant, font passer dans la profondeur de l'eau superficielle après l'avoir dressée contre le rivage. Les variations horaires de la température ne sont pas négligeables, mais diffèrent suivant les endroits et la profondeur considérées; elles apparaissent quelques heures en général après le début des vagues.

L'amplitude quotidienne instantanée, autrement dit la variation de température isochathe en fonction de la distance d'un point à un autre, varie également avec la profondeur et avec la saison.

Le gauchissement et le pendage des couches isothermiques varient avec la profondeur, mais la pente des interfaces séparant ces couches est tout juste suffisante pour créer des courants de densité qui ne dépassent jamais, en ordre de grandeur, la moyenne des vitesses des courants dus aux vents. Au voisinage du fond, les masses d'eau en mouvement subissent une déviation latérale due à la force de Coriolis. Quant aux interpénétrations de couches d'eau superposées mais de températures différentes, elles sont rarement observables dans notre lac.

Nos recherches mettent en évidence la stratification thermique estivale dans la complexité de ses détails. Les sauts thermiques sont bien plus répandus qu'on ne l'a cru jusqu'ici et plus souvent multiples qu'isolés. Les dates d'apparition et de disparition de la stratification thermique sont étroitement délimitées pour une station donnée. Il en est de même pour la période appelée "effacement vernal du saut thermique" qui dépend, avant tout, de la variation de température de l'air ambiant, puis de l'agitation du lac et finalement de l'insolation, tandis que la "réapparition du saut thermique" dépend surtout de l'insolation, moins de la variation de température de l'air ambiant et encore moins de l'agitation du lac. Par contre, la "disparition automnale du saut thermique" est commandée par l'agitation du lac, uniquement. Dans l'Untersee, l'existence du saut thermique et son effacement vernal sont de même durée que chez nous, tandis que dans le Bodan-Obersee, l'existence du saut thermique est prolongée de deux mois en général.

La couche de saut thermique s'enfonce au fur et à mesure que la saison avance et atteint une profondeur (45 m) beaucoup plus grande qu'on le pensait jusqu'ici. Il en est de même pour les sauts thermiques nouveaux qui apparaissent au-dessus du premier dès le mois de mai et qui constituent avec celui-ci des "trains de sauts thermiques" se déplaçant verticalement de manière analogue aux "trains dépres-

sionnaires" qui parcourent les cartes météorologiques. Les sauts thermiques multiples, surtout les doubles, sont plus fréquents que les simples.

L'ensemble des sauts thermiques et des couches incluses à gradient plus faible définit pour nous le métalimnion dont l'existence est ainsi prouvée durant le printemps, l'été et une partie de l'automne, contrairement à l'opinion de Dussart pour qui cette couche n'apparaît qu'en fin d'été ou droit avant l'"overtun" automnal. Aucune relation apparente n'existe entre la puissance du métalimnion et la profondeur du lac au même endroit.

Les différences sont suffisamment nettes entre les moyennes des températures de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion pour qu'on puisse reconnaître l'existence de ces trois zones lacustres superposées durant une partie importante de l'année.

Les gradients thermiques moyens, mensuels, saisonniers et annuels varient au gré des années, mais au printemps ils subissent fortement l'influence du calme du lac et très peu celle de l'insolation, tandis qu'en été ces deux facteurs agissent également sur le phénomène et qu'en automne c'est l'insolation qui devient prépondérante.

En recourant à des intervalles de température plus petits que ceux ayant servi à définir les sauts thermiques en général, on arrive à mettre en évidence une structure plus fine de la stratification, de plus longue durée et présentant davantage de sauts thermiques simultanés.

La provision annuelle de chaleur du lac de Neuchâtel le rapproche singulièrement du Loch Katrine (mêmes profondeurs maximum et moyennes), mais un peu moins du lac des Quatre Cantons. Par l'apport calorifique d'été, notre lac est très voisin du Lago di Bolsena et du Loch Lomond.

L'étude approfondie de la "structure thermique" de notre lac grâce à un découpage aussi serré que possible de sa masse lacustre, contribue à une connaissance un peu plus détaillée du rôle que joue la stratification dans un grand lac. Simultanément, elle fait voir que le problème est un peu plus compliqué que le laissait entrevoir "la possibilité d'une explication de la thermique du lac par une connaissance des conditions météorologiques" exprimée par Portner (1951 a, p.45). En même temps, nous démontrons l'existence dans notre lac et durant une bonne partie de l'année, de plusieurs couches de saut thermique, phénomène à peine soupçonné par ce même auteur d'une part, de même que la non-périodicité de l'enfoncement de la couche de saut thermique, contrairement aux déductions basées sur les mesures de Quartier (Portner, 1951 a, p.36). Nous estimons avoir expliqué ainsi l'effacement vernal du saut thermique simplement signalé par Robert. Quant à la limite assignée par Quartier (1948 b) à la descente de la couche de saut thermique, nous pouvons la reporter plus bas encore par nos travaux.

La transparence de l'eau augmente lorsque la température et la quantité de plancton diminuent. Mais si, en l'absence de pollution, la transparence est régie en hiver et au printemps par la teneur en

planeton, elle est influencée en été par la teneur en sels de Ca dissous.

En une quinzaine d'années, l'amplitude de la transparence a diminué des 3/4 de sa valeur. Les extrêmes d'hiver et d'été sont maintenant beaucoup plus proches l'un de l'autre qu'auparavant et on constate simultanément une diminution de la transparence elle-même.

Nos recherches montrent que l'absorption de la lumière augmente avec la pollution, aussi bien dans le temps que dans l'espace car la proximité des zones de déversement d'eaux usées urbaines joue un rôle analogue à l'augmentation de l'absorption au cours des années. Actuellement, le premier mètre vertical d'eau du lac absorbe 4/10 de la lumière incidente.

La pH et la conductivité électrique subissent tous deux des variations dans le temps et dans l'espace:

- a) en fonction de la saison: dans les couches supérieures à la zone de transition et de l'hiver à l'été, le pH augmente sous l'effet de la décaloification et aussi à cause des changements d'espèces qui peuvent se produire parmi les algues flottant dans l'eau, alors que la conductivité électrique diminue simultanément;
- b) en fonction de la profondeur: lorsque celle-ci augmente, le pH diminue mais la conductivité électrique augmente et tous deux présentent, à 5 m de profondeur, un point d'inflexion dans leur courbe représentative; il s'agit d'un maximum pour le pH et d'un minimum pour la conductivité électrique;
- c) en fonction de l'emplacement: le pH et la conductivité électrique varient d'un point du lac à l'autre, le premier essentiellement à cause des différences d'espèces et de maturité du planeton, la seconde à cause des différences dans la teneur en matières dissoutes;
- d) en fonction de l'augmentation de la pollution: le pH accuse des variations en rapport avec les changements d'espèces planctoniques alors que la conductivité électrique augmente chaque année de 5 à 15 unités de la dixième décimale du fait de l'augmentation de la teneur en matières dissoutes;
- e) en fonction de la stratification thermique: en passant de l'épilimnion au métalimnion et à l'hypolimnion, on constate qu'en moyenne le pH diminue, tandis que la conductivité électrique augmente.

La règle de Doroschewski modifiée permet de calculer la teneur en résidus calins dans le cas de notre lac, tandis que la constance du rapport entre la conductivité électrique et la dureté temporaire dont Portner avait fait état dans son travail, semble avoir été profondément altérée. Toutefois les mesures doivent être poursuivies si l'on tient à déceler l'influence éventuelle de la pollution sur les changements constatés à propos de ce rapport.

La composition chimique de l'eau du lac accuse plusieurs sortes de variations:

- a) en fonction de la saison: à partir du printemps et à mesure qu'on se rapproche de l'automne, les résidus d'évaporation et de calcination, les duretés totale et temporaire, l'ammoniaque libre et les azotates, la saturation en oxygène, la demande biochimique en oxygène-

ne et le rapport de ces deux valeurs, le calcium, le phosphore et la silice diminuent régulièrement et d'une manière générale. Par contre, les teneurs en azotites, en matières oxydables et en magnésium accusent une tendance à l'augmentation durant la même période;

b) en fonction de la profondeur: on observe une augmentation générale avec la profondeur pour les duretés totale et temporaire, les azotates, le calcium et la silice, tandis qu'une diminution se remarque de la surface vers le fond pour les azotites, la saturation en oxygène, le rapport de la DBO à l'oxygène dissous et celui du Mg au Ca. Par contre, une répartition plus singulière s'observe avec plusieurs composants qui présentent un maximum dans la zone trophogène, tels l'oxygène dissous et la DBO à 5 m, l'ammoniacque libre à 10 m, tandis que le phosphore total présente le même phénomène en dehors de cette zone à 20 m, ainsi que le magnésium à 25 m. Enfin, des zones appelées "de transition" sont matérialisées par la présence d'un minimum à 5 m pour la silice, 15 m pour le magnésium, 20 m pour l'oxygène dissous, 30 m pour la DBO et à 40 m pour le phosphore total;

c) en fonction de l'emplacement: malgré le nombre relativement restreint de stations examinées durant un petit nombre d'années, on peut affirmer que la composition chimique varie notablement d'une station à l'autre en ce qui concerne: le résidu d'évaporation, les duretés totale et temporaire, l'ammoniacque, les azotites et les azotates, la saturation et la demande biochimique en oxygène;

d) en fonction de l'augmentation de la pollution: il s'agit ici d'une manifestation qui se répartit sur plusieurs années successives et qui touche:

- 1) l'ammoniacque libre, présente maintenant toute l'année quoiqu'en faibles quantités, alors qu'en 1944-1945 elle n'apparaissait que sporadiquement;
- 2) les azotites dont le cas est semblable et qui, de plus, accusent de 1960 à 1961 par exemple, une augmentation de 10 % pour la zone sise entre la surface et 15 m de profondeur, alors que l'augmentation est encore insensible plus bas;
- 3) les azotates qui accusent une tendance à la diminution parce qu'il y a de moins en moins d'oxygène dissous à disposition pour oxyder jusqu'au stade final les matières azotées, alors que simultanément les azotates déjà formés sont consommés sans arrêt par le biotope;
- 4) la saturation en oxygène dont on observe l'augmentation très nette entre 0 et 10 m parce que l'activité chlorophyllienne y est favorisée par les apports nutritifs d'eaux polluées qui contribuent à la prolifération des organismes à activité photosynthétique; simultanément et au-dessous de cette profondeur, la saturation en oxygène s'abaisse régulièrement en moyenne annuelle, approchant actuellement de 70 % alors que les amplitudes de ses extrêmes augmentent régulièrement;
- 5) la demande biochimique en oxygène qui augmente régulièrement à tous les niveaux, plus précisément de 20 à 25 % entre 0 et 10 m de profondeur de 1960 à 1961 et suivant les endroits considérés;
- 6) les teneurs en calcium qui augmentent régulièrement aussi chaque année;

- 7) les phosphates que le lac "digère" encore dans les couches profondes où leur quantité diminue légèrement, mais qu'il n'"assimile" plus dans les couches eusuperficielles où leur teneur augmente de 10 à 12 % en moyenne par an, en relation avec l'emploi de plus en plus massif de phosphates dans les produits détergents ou comme adoucisseurs d'eau;
- 8) la silice dont le taux augmente en eau profonde parallèlement avec la quantité de cadavres de diatomées qui, elle, dépend d'une quantité toujours accrue de phytoplancton dans les couches superficielles du lac;
- e) en fonction de la stratification thermique: dans l'ordre épilimnion-métalimnion-hypolimnion, il y a augmentation des duretés totale et temporaire, des teneurs en azotates, calcium et silice, tandis qu'un appauvrissement se manifeste pour l'ammoniacque libre, les azotites, la saturation et la demande biochimique en oxygène, ainsi que pour le rapport de cette dernière à la quantité d'oxygène dissous, le rapport du Mg au Ca, la teneur en phosphore total.

Pour dresser un bilan des matières apportées au lac par les affluents, il faudrait connaître pour plusieurs années et à brefs intervalles, la composition moyenne et le débit de l'eau de chacun d'eux. Or, parmi les 13 affluents principaux pour lesquels nous donnons un aperçu de la variation de la composition des eaux, trois seulement ont un débit connu, mais déterminé à un endroit qui ne correspond pas du tout à celui pour lequel les analyses sont exécutées. Or, pour l'Orbè-Thielle et surtout pour la Broye, l'apport de matières en solution et en suspension entre le point de jauge et l'embouchure est nettement plus important que celui d'amont. Il n'est donc pas possible d'être sûr des quantités de matières qui sont réellement déversées au lac. C'est pourquoi nous renouons, pour le moment, à établir ce bilan, même pour le canal de la Broye.

Deux problèmes se posent du point de vue hydrobiologique: celui des bactéries et celui du plancton.

Des fortes fluctuations qui affectent actuellement le nombre des microorganismes dans le lac, on peut dégager tout de même une augmentation nette de ce nombre par rapport à 1944-1945, augmentation qui a quintuplé le nombre de germes microbiens depuis cette époque. Le nombre de colibacilles a augmenté également depuis lors, aussi bien en valeurs absolues que par rapport au nombre total de germes. Mais il faut relever surtout qu'*Escherichia coli* est présent toute l'année maintenant dans le lac, ce qui n'était jamais le cas il y a vingt ans. Si on rencontre ce bacille sur toute la hauteur de l'eau, mais sensiblement plus répandu près de la surface qu'au fond, on le trouve aussi à tous les endroits examinés dans le lac. L'accroissement de la pollution est seul responsable de cette évolution qui ne surprend guère lorsqu'on tient compte des quantités considérables de germes fécaux amenés au lac, en partie par les affluents, mais surtout par les réseaux d'égouts.

Nous effleurons seulement le problème de l'évolution du plancton dans notre lac, laissant aux spécialistes le soin de le traiter plus à fond. Cela ne nous empêche pas, cependant, de mettre en évidence la relation qui existe, chez nous, entre la température de l'eau, son pH

et sa teneur en calcium d'une part et le plancton d'autre part. En outre, nous relevons, parmi les variations d'association des espèces de plancton, le développement massif de *Tabellaria* qui a précédé la prolifération extraordinaire d'*Oscillatoria* et l'apparition, autant explosive qu'imprévue, d'*Aphanizomenon* flos aquae qui a envahi toute la masse lacustre.

Nous vérifions, spécialement au cours d'opérations en profils transversaux, que les espèces et leurs associations, ainsi que les quantités d'individus planctoniques, de même que le degré de maturité de certaines espèces ne sont pas les mêmes simultanément en des points du lac éloignés l'un de l'autre. Ceci bouleverse les idées de Robert (1924) et de Bargetzi (1960) sur l'uniformité de la répartition horizontale du plancton.

L'examen de l'action des vagues s'impose car celles-ci contre-carrent la stratification thermique, mais aussi brassent plus ou moins profondément les couches superficielles et celles qui leur sont sous-jacentes. Nos observations directes se justifient par la possibilité, souvent réalisée d'ailleurs, de constater qu'il existe des différences entre les vents enregistrés à l'Observatoire et la formation des vagues, ainsi que leur maintien sur le lac. Nous pouvons conclure que, pour la période quinquennale considérée, mars est le mois où le lac est le plus calme, alors qu'en décembre ce dernier est le plus agité. Il y a alors concordance entre ces conclusions et les résultats donnés par Guyot et Perrenoud (1949, p.16) quant à la répartition mensuelle des vents dans notre région. Enfin, nous pouvons fixer à 20 m de profondeur la limite générale d'action des vagues dans le lac de Neuchâtel.

La vitesse des courants de densité, calculée en se basant sur les mesures thermiques en profils est faible en général et ne semble pas dépasser la moyenne de celle des courants dus aux vents.

Des courants de turbidité prennent naissance fréquemment sur le littoral urbain de Neuchâtel. Ils peuvent s'observer dans un éventail centré sur la rive et capable de s'ouvrir de Monruz à la baie d'Auvernier.

Nos observations permettent de reconnaître que par 30 m de profondeur à un demi-kilomètre au large de Neuchâtel, un courant sous-lacustre peut s'établir 4 à 5 heures déjà après le début des vagues à la surface.

La vitesse moyenne (composante horizontale) des courants dus aux vents, mesurée entre la surface et 30 m de profondeur varie:

- a) en fonction de la saison: la plus faible s'observe en juillet et la plus forte en mai, aussi bien en valeur moyenne qu'instantanée;
- b) en fonction de la profondeur: c'est entre 0 et 6 m qu'elle est la plus élevée; elle diminue au-dessous et passe par un minimum entre 18 et 24 m, puis augmente à nouveau légèrement plus bas; elle peut varier de 30 m à 1 km par heure en moyenne, mais aussi de 3 m à 3,3 km par heure en valeur instantanée;
- c) en fonction de l'emplacement: aussi bien en valeurs moyennes qu'instantanées, la vitesse a tendance à être la plus faible dans les

zones relativement fermées ou peu profondes (par exemple: la baie d'Auvergnier et le Nid du Crê), mais la plus forte dans les régions bien ouvertes et relativement profondes (par exemple: Champ Bougin et Chevrour-Portalban).

En moyenne journalière, la vitesse des courants dus aux vents est de 200 m/h dans notre lac, tandis que les valeurs instantanées les plus fréquentes sont comprises entre 50 et 150 m/h. Par contre, dans les grandes profondeurs (supérieures à 100 m), les courants sont très peu marqués.

La stratification thermique exerce une action sur la vitesse des courants dus aux vents, surtout lorsque le métalimnion a une puissance importante; mais la direction et la trajectoire des masses d'eau en mouvement sont influencées davantage que la vitesse par l'existence de cette stratification.

56. Les sédiments du lac.

La composition du sédiment lacustre varie pour l'ensemble du lac tout comme celle de l'eau, bien qu'à un rythme plus lent en général:

- a) en fonction de la saison: en moyenne et de l'hiver à la fin de l'été, le pH et l'azote total diminuent, tandis que la teneur en sulfures augmente en traduisant l'épuisement en oxygène de l'hypolimnion;
- b) en fonction de la profondeur (de l'eau): l'humidité augmente, tandis que les teneurs en matières organiques et en phosphates ne varient pas sensiblement;
- c) en fonction de l'emplacement: les variations sont les mêmes que pour la profondeur, étant donné que cette dernière est, le plus souvent conditionnée par l'emplacement;
- d) en fonction de l'augmentation de la pollution: celle-ci a pour origine un certain nombre de points appelés centres pollutifs et d'où elle se répand dans le lac. Or, l'eau ne pouvant conserver, du fait de sa mobilité, l'image instantanée de la dispersion de la pollution à partir des centres mentionnés ci-dessus, les changements de sa composition se bornent à traduire l'effet d'ensemble de l'eutrophisation. Le sédiment, au contraire, garde l'image sans cesse renforcée de l'amenée des matériaux polluants. C'est pourquoi, à mesure qu'on se rapproche des centres pollutifs, on constate une augmentation des teneurs relativement faibles en matières organiques et en phosphore, mais plus fortes en sulfures. Cependant deux phénomènes naturels sont encore reconnaissables malgré l'aggravation de la pollution: l'oxydation superficielle qui se produit encore pendant la plus grande partie de l'année pour les sédiments profonds d'une part et, sur la rive droite, la teneur en matières organiques qui diminue encore très rapidement pour devenir presque nulle lorsqu'on s'éloigne des roseaux d'autre part.

La composition du sédiment à l'intérieur de la couche déposée varie également, quel que soit l'emplacement considéré dans la cuvette lacustre. Pour le premier décimètre sous l'interface eau-sédiment, on constate que le pH, l'humidité, l'azote total et les matières orga-

riques diminuent lorsque la profondeur augmente, tandis que la teneur en sulfures augmente à mesure qu'on s'enfonce dans le sédiment.

Les quantités de matières tombant actuellement au fond du lac et capturées à mesure qu'elles atteignent le fond, constituent un dépôt nettement plus important que celui qui correspond à l'épaisseur moyenne annuelle calculée par d'autres méthodes et au cours d'autres recherches. Il faut voir dans cette différence la preuve que la quantité de matières qui se dépose ne peut être constante d'un point à l'autre du fond et cela jusqu'à une cinquantaine de mètres de profondeur au moins. En effet, la quantité de matières qui participe à la formation du sédiment dépend essentiellement de la durée du calme à l'endroit et au moment où elle se dépose. Plus cette durée sera grande, plus la possibilité de s'agglomérer et de former un matériel suffisamment dense et capable de résister à l'action des courants sous-lacustres sera grande et moins il y aura de chances que le dépôt soit entraîné ailleurs dans une proportion qu'il est d'ailleurs impossible d'évaluer pour le moment. On ne peut donc, a priori, utiliser les dépôts les plus superficiels pour tenter d'évaluer la quantité de matières qui sédimentent chaque année et, par conséquent, pour évaluer l'âge des couches supérieures du sédiment. Au-delà de 50 m de profondeur, il est possible, si les courants sont suffisamment faibles, qu'on puisse obtenir une relation simple entre l'épaisseur et l'âge du sédiment, mais cette hypothèse est à vérifier encore.

Pour les couches suffisamment profondes à l'intérieur du sédiment, on doit pouvoir, en tenant compte des tassements, obtenir une proportionnalité entre l'épaisseur de certaines couches et la durée de formation du dépôt d'une part, puis déterminer l'âge de ces couches à l'intérieur d'un cadre créé par détermination des grandes périodes historiques et préhistoriques au moyen de l'analyse pollinique, par exemple.

57. Résumé.

Nos recherches révèlent que pour l'ensemble de notre lac il existe simultanément des différences relativement importantes de température, de transparence, de composition chimique et d'état hydrobiologique d'un point à un autre. La variation de ces données est complexe car elle dépend de la météorologie (facteurs saisonniers et annuels), de la profondeur, des variations de la pollution, des mouvements affectant la masse d'eau, ainsi que des modifications survenant dans le sédiment.

Nous mettons en évidence l'existence d'une stratification thermique plus importante et plus compliquée que celle connue jusqu'ici, ainsi que de mouvements importants dus aux vagues mais surtout aux courants sous-lacustres.

Enfin, un examen détaillé du sédiment montre que celui-ci enregistre, mieux qu'on pouvait le penser, l'effet de l'aggravation de la pollution de l'eau sur le fond du lac ces dernières années.

* * * * *

Neuchâtel, septembre 1964.

Chapitre dix-septième:

B I B L I O G R A P H I E .

Cette liste groupe toutes les publications consultées pour l'élaboration du présent travail. Elle comprend également la presque totalité de la liste des publications scientifiques parues sur le lac de Neuchâtel, à l'exception de celles touchant l'histoire et la préhistoire pour lesquelles nous renvoyons aux ouvrages spécialisés. Nous espérons également n'avoir omis que le moins possible de travaux dispersés dans des publications rares ou très locales.

Les références sont abrégées conformément aux normes internationales usuelles et à la "World List of Scientific Periodicals, 3d. Ed. (1950)".

Toutefois, pour remplacer certaines références très fréquentes, nous utilisons les sigles suivants:

SFSN - Société fribourgeoise des sciences naturelles

SHSN - Société helvétique des sciences naturelles

SNG - Société neuchâteloise de géographie

SNSN - Société neuchâteloise des sciences naturelles (aussi bien pour les publications récentes parues sous ce titre que pour les anciennes parues sous: Société des sciences naturelles de Neuchâtel)

SVSN - Société vaudoise des sciences naturelles.

Enfin, désirant alléger la présentation des références bibliographiques, nous remplaçons toutes les indications en chiffres romains se rapportant aux tomes par des chiffres arabes.

* * *

ABKEGE chronologique... (1787): Abrégé chronologique de l'histoire du comté de Neuchâtel et Valengin depuis l'an 1035 jusqu'en 1787, rédigé sur des manuscrits authentiques, par un ancien Jnaticier du Locle, Bourgeois de Valengin. En Suisse. S.l., 366 p.

ACHERMANN F. (1946): L'eau du lac de Neuchâtel; étude chimique et bactériologique. - Monatsbull. schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachm., 26, p. 1-8, 2 fig., 4 tabl.

- (1959): Le Lac de Neuchâtel. Campagnes 1957-1959. - Monatsbull. schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachm., 32, p. 281-286, 9 fig.

AGASSIZ Louis (1835): Description de quelques espèces de Cyprins du lac de Neuchâtel, qui sont encore inconnues aux naturalistes. - Mém. SNSN., 1, p. 33-48, 2 pl.

ALABASTER J.S. and ROBERTSON K.G. (1961): The effect of diurnal changes in temperature, dissolved oxygen and illumination on the behaviour of roach (*Rutilus rutilus* (L.)), bream (*Abramis brama* (L.)) and perch (*Perca fluviatilis* (L.)). - Animal Behaviour, 2, p. 187-192, 6 fig., 1 tabl.

- ALLGEIER R.J., HAFFORD B.C. and JUDAY C. (1941): Oxidation-reduction potentials and pH of lake waters and of lake sediments.- Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett., 33, p. 115-133, 12 fig., 1 tabl.
- ALSTERBERG Gustaf (1924): Die Nahrungszirkulation einiger Binnenseetypen.- Arch. Hydrobiol., 15, p. 291-338, 3 fig.
- (1927): Die Sauerstoffschichtung der Seen.- Bot. Notiser, p. 255-274, 6 fig., 4 tabl.
 - (1930): Die thermischen und chemischen Ausgleichs in den Seen zwischen Boden- und Wasserkontakt sowie ihre biologische Bedeutung.- Int. Rev. Hydrobiol., 24, p. 290-327, 6 fig., 5 tabl.
- ÅLVIK Gunnar (1937): Ueber Lichtabsorption von Wasser und Algen in natürlichen Gewässern.- Bergens Mus. Arb., Naturvidenskabelig rekke No. 2.
- AMANN J. (1921): Examen du bois silicifié; une mousses intéressante du lac de Neuchâtel.- Bull. SVSN, 54, p. 70.
- AMBUEHL Heinz (1958a): Die Chloridbestimmung im Wasser nach der Quecksilber-rhodanidmethode.- Mitt. Lebensm. Hyg. Bern, 49, p. 241-246, 3 fig., 1 tabl.
- (1958b): Die praktische Anwendung der elektrochemischen Sauerstoffbestimmung im Wasser. II. Kurzzeitmessung; der Oxytester.- Schweiz. Z. Hydrol., 20, p. 341-359, 17 fig.
 - (1959): Die Bedeutung der Strömung als ökologischer Faktor. Physikalische, biologische und physiologische Untersuchungen über Wesen und Wirkung der Strömung im Fließgewässer.- Schweiz. Z. Hydrol., 21, p. 133-264, 67 fig., 33 tabl.
 - (1960): Die praktische Anwendung der elektrochemischen Sauerstoffbestimmung im Wasser. III. Das kombinierte Gerät zur Temperatur-, Leitfähigkeits- und Sauerstoffmessung mit dem Oxytester und mit Lebereonden. Die Weiterentwicklung der bisherigen Sauerstoffmessung zur Polarometrie mit festen Elektroden.- Schweiz. Z. Hydrol., 22, p. 23-39, 10 fig.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (1959): Tentative Methods of Test for Electrical Conductivity of Industrial Water and Industrial Waste Water.- A.S.T.M. Stand., Part 10, p. 319-326, 1 tabl.
- AMIS de LA NATURE DE NEUCHÂTEL, Club des (1907): Le lac de Saint Haise. Histoire, hydrographie, faune des invertébrés.- Bull. SNG, 18, p. 5-46, 11 pl., 1 carte.
- ANDRÉ Emile (1923): Appareil pour la prise des échantillons de limon lacustre.- Ann. Biol. lacust., 12, p. 41-48, 2 fig.
- ANNUAIRE hydrographique de la Suisse (1957-1961): - Berne, Serv. féd. eaux, nombr. fig., nombr. tabl., cartes.
- ANONYME (1853): Erection d'une colonne météorologique à Neuchâtel.- Bull. SNSN, 3, p. 111, 116, 127-129.
- (1861): Hanteur du môle de Neuchâtel sur la mer.- Bull. SNSN, 5, p. 248-252.

ANONYME(1865): Sur la hauteur du môle.- Bull.SNSN, 7, p.302.

- (1888): Discussions sur la limnémie du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN, 16, p.264-265.
- (1895): Discussions au sujet de la Commission chargée d'étudier les hauteurs du lac.- Bull.SNSN, 23, p.248-249.
- (1898): Réparations à la colonne météorologique.- Bull.SNSN, 26, p.453-454.
- (1901): Der Neuenburgersee. Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in fischereilicher Hinsicht.- Schweiz.Fisch.Ztg., 2, p.84-87.
- (1903): Fischerei und Fischer am Neuenburgersee am Anfang des 19. Jahrhunderts.- Schweiz.Fisch.Ztg., 11, p.220-229.
- (1960): Die Seen der Erde-ein Größenvergleich.- Gas- u.Wasserfach, 101, p.169-170, 1 fig., 1 tabl.

ANSTALT FUER BODENSEEFORSCHUNG(1957-1963): Limnologischer Monatsbericht Ueberlingersee(Bodensee).- Konstanz-Staad, Anst.Bodenseef.Stadt Konstanz.

ANTONESCU C.S.(1951): Ueber das Vorkommen eines ausgeprägten metalimnischen Sauerstoffminimums in einem norddeutschen See(Sakrower See bei Potsdam).- Arch.Hydrobiol., 22, p.580-596, 14 fig., 13 tabl.

ARON M. et GRASSE P.(1939): Précis de biologie animale, 2è.éd.- Paris, Masson & Cie, éd., 1201 p., 740 fig.

ARMSTRONG F.A.J.(1952): The determination of Silicate in Sea Water.- J.Mar.Biol.Ass.U.K., 30, p.149-160, 5 fig., 2 tabl.

ASSOCIATION INTERCANTONALE POUR LA 2è.CORRECTION DES EAUX DU JURA (1958a): Fascicule 1: IIme.correction des eaux du Jura.- Bienne, 9 p., 6 fig.

- (1958b): Fascicule 2: De l'effet de la IIme.correction des eaux du Jura.- Bienne, 19 p., 17 fig.
- (1959): Fascicule 3: La IIme.correction des eaux du Jura considérée comme un tout.- Bienne, 36 p., 10 fig., 2 tabl., 1 carte.

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES HYDROGEOLOGUES(1960a): Dureté de l'eau: 1. Unité. Méthodes de mesure.- Coll.Monogr.hydrogéol.No.3, Liège, CEREDOC, éd., 125p., 4 fig., 12 tabl.

- (1960b): Dureté de l'eau: 2. Effets. Dureté des eaux dans le monde. Traitements d'adoucissement.- Coll.Monogr.hydrogéol.No.3, Liège, CEREDOC, éd., 130p., 15 fig.

AUBERT Daniel et BADOUX Béli(1956): Carte géologique de la Suisse, 1:200'000. Notice explicative. Feuille 1: Neuchâtel.- Berne, Kümmerly & Frey, éd., 27 p., 1 fig., 1 pl.

AUERBACH Max(1920): Fischereibiologische Untersuchungen am Bodensee.- Festschr.f.Zachokke, Nr.10, Basel, 24 p., 1 fig.

- und RITZI Max(1958): Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees IV. Der Lauf des Rheinwassers durch den Bodensee in den Sommermonaten.- Arch.Hydrobiol., 32, p.409-433, 18 tabl., 14 cartes.

- AUERBACH Max und ROTTENGATTER Gisela(1960):Untersuchungen über des Wasseraustausch der einzelnen Becken des Untersees(Bodensee).- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.45-83,14 fig.
- und SCHMALZ Josef(1927):Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees.- Sohr.Ver.Gesch.Bodensees u.Umgebung,55,p.179-214, 5 tabl.,13 pl.
 - Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees.II:Die konstanten Strömungen des Untersees, des Seerheins und der Konstanzer Bucht.- Arch.Hydrobiol.,23,p.231-249,6 fig.,9 tabl.,13 cartes.
- AYERS John C.(1962):Great Lakes Waters,Their Circulation and Physical and Chemical Characteristics.- Amer.Assoc.Adv.Sci.,Publ.No. 71:Great Lakes Basin Symposium 29-30.12.1959,Howard J.Pincus Ed., p.71-89,5 fig.,5 tabl.
- BAER Jean-G(1962):Le Loolat.- Saint Blaise au bord de l'eau.Saint Blaise,Commission du 3 février,p.3-10,4 fig.,2 pl.
- BAGNOLD R.A.(1946):Motion of waves in shallow water.Interaction between waves and sand bottoms.- Proc.Roy.Soc.A.,187,p.1-15,8 fig., 1 tabl.
- BAIDI Edgardo(1949):La situation actuelle de la recherche limnologique après le Congrès de Zurich.- Schweiz.Z.Hydrol.,11,p.637-649, 1 tabl.
- BAROETZ Jean-Pierre(1960):Application de méthodes d'analyse biochimique à un problème taxonomique:les Corégones du Lac de Neuchâtel.- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.641-758,18 fig.,10 tabl.
- BARNES B.(1959):Oceanography and Marine Biology.A book of techniques.- London,George Allen & Unwin Ltd.,217 p.,110 fig.
- et BARNES Margaret(1956):Contenuto di fosforo totale in alcuni stadi di due comuni animali planctonici d'acqua dolce e suo rapporto con quello delle loro uova.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol.de Marchi,2,p.113-124,2 tabl.
- BARTHELMES Detlev(1963):Ein bemerkenswertes Windtriftsystem im Gr. Müggelsee(Berlin).- Arch.Hydrobiol.,59,p.391-398,10 fig.,1 tabl.
- BAYBERGER Emmeran(1888):Der Chiemsee.I.- Mitt.Ver.Brck.,p.1-75,8 tabl., 1 carte.
- (1890):Der Chiemsee.II.- Mitt.Ver.Erdk.,p.1-103,13 fig.,8 tabl., 1 carte.
- BEHRENS Hans(1937):Temperatur- und Sauerstoffuntersuchungen in Tümpeln und Brunnen.- Arch.Hydrobiol.,31,p.145-162,4 fig.
- BENDEL H.-L.(1959):L'épuration des eaux usées de la ville d'Yverdon.- Eau et santé,7,p.59-62.
- BERSSET J.(1950):La végétation de la réserve de Cheyres et des rives avoisinantes du lac de Neuchâtel.- Bull.SFSB.,40,p.65-94,2 fig., 7 tabl.
- BERTHOUD Alfred(1934):Samuel de Perrot-Suchard.1862-1934.- Bull.SNSN., 59,p.3-7.

- BESSARD M.(1858):Note sur les Erdburg du Vully.- Bull.SVSN.,6,p.37-38, 6 fig.
- BETANT A. et FERRENOUD G.(1932):Etude sur la partie occidentale du Lac de Genève.Courants et températures.- Genève,Kundig éd,p. 225-293,34 fig.,12 pl.
- BEYTHIEN A.(1957):Laboratoriumsbuch für den Lebensmittelchemiker.7. Aufl.nen bearb.v.N.Diemair.- Dresden u.Leipzig,Tb.Steinkopff, 723 p.,65 fig.,50 pl.
- BIELER Théodore(1902):Le Léman et le Lac de Neuchâtel ont-ils été soudés autrefois, aux temps post-glaciaires, de manière à former un bassin unique.- Bull.SVSN.,38,p.LXIII-LXV.
- (1904a):Déviation de cours d'eau dans les environs d'Yverdon.- Bull.SVSN.,40,p.XXV-XXVII.
 - (1904b):Ancien réseau hydrographique du lac d'Yverdon.- Bull.SVSN. p.XXXVII-XXXIX.
- BILLETTER O(1892):L'analyse bactériologique de l'eau au laboratoire cantonal.- Bull.SNSN.,20,p.181-182.
- BIRGE Edward A.(1910a):An unregarded factor in lake temperatures.- Trans.Wis.Acad.Sci.Arts.Lett.,16,p.989-1004,3 tabl.,2 pl.
- (1910b):On the evidence for temperature seiches.- Trans.Wis.Acad. Sci.Arte.Lett.,16,p.1005-1015,1 fig.,1 pl.
 - (1916a):The Heat Budgets of American and European Lakes.- Trans. Wis.Acad.Sci.Arts.Lett.,18,p.166-213,3 fig.,6 tabl.
 - (1916b):The Work of the Wind in Warming a Lake.- Trans.Wis.Acad. Sci.Arte.Lett.,18,p.341-391,11 tabl.,12 pl.
- BLANC Henri(1898):Le plankton nocturne du lac Léman.- Bull.SVSN.,34, p.225-230,1 pl.
- BOREL Aug.et RITTER G.(1879):Aperçu de l'écoulement futur des eaux du lac.- Bull.SNSN.,11,p.32.
- BOREL Fritz(1867a):Sur la topographie du fond du lac et sur la pression de l'eau.- Bull.SNSN.,7,p.155-157.
- (1867b):Changement de l'échelle du limnimètre.- Bull.SNSN.,7,p. 537.
 - (1882):Sur un mouvement particulier des eaux du lac pendant la période de gel.- Bull.SNSN.,12,p.120-122.
- BOSSANYI J.(1952):An apparatus for the collection of plankton in the immediate vicinity of the sea-bottom.- J.Mar.Biol.Ass.U.K.,30, p.265-270,3 fig.
- BOSSET Eric(1960):Des caractéristiques physiques-chimiques des eaux souterraines de la plaine alluviale de l'Orbe.- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.396-406,1 fig.,1 tabl.
- (1961):Quelques aspects des recherches d'eau souterraines dans les "Grèves d'Onnens".- Eau,Air,Santé,2,p.82-83.
 - (1962):Le lac de Joux.Etude hydrologique du bassin.Recherches de mai 1953 à avril 1957.- Schweiz.Z.Hydrol.,24,p.90-151,32 fig., 5 tabl.

- BOURCART Jacques et FRANCIS-BOEUF Claude(1942):La Vase.- Coll.Actualités scientifiques et industrielles.No.927.Sédiments et sédimentation.I.,Paris,Hermann éd.,67 p.,8 fig.
- BRAEM F.,SARTORY J. et HINDLISBACHER J.(1920):Régime des eaux en Suisse.Bassin de l'Aar depuis les sources de l'Orbe jusqu'au Rhin.Première partie:Surfaces des bassins de réception,des zones de 300 en 300 m au-dessus de la mer,des rochers,des forêts, des glaciers et des lacs.- Service fédéral des eaux,Berne,53 p., 10 tabl.,2 cartes.
- BRAJNIKOF B.,FRANCIS-BOEUF C.et ROMANOVSKY V.(1943):Techniques d'étude des sédiments.- Coll.Actualités scientifiques et industrielles.No.952.Sédiments et sédimentation.II.,Paris,Hermann éd., 110p.,21 fig.,4 tabl.
- BRAUN Rud.(1955):Chemische Untersuchungen am Hallwilersee.- Verbands-Ber.des Verb.Schweiz.Abwasserfachleute,Nr.36,p.11-18.
- BRIGGS R. and KNOWLES G.(1961):Developments in the Use of the Wide-bore Dropping-mercury Electrode for Determining Dissolved Oxygen and Oxygen in Gases.- Analyst,86,p.603-608,3 fig.
- BRINKHURST R.O. and KENNEDY C.R.(1962):A report on a collection of aquatic Cligochaeta deposited at the University of Neuchâtel by Dr.E.Piguet.- Bull.SNSH.,85,p.183-189,2 tabl.,1 pl.
- BROUARDEL J. et VERNET J.(1958):Recherches expérimentales sur la variation,en Méditerranée,de la teneur en oxygène de l'eau au proche voisinage des sédiments.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,55, 34 p.,20 fig.,14 tabl.
- BROWN Seward R.(1956):A piston sampler for surface sediments of lake deposits.- Ecology,37,p.611-613,1 fig.
- BRUNNER C-E. und DESOR Ed.(1839):Ueber Schaum und Schlamm im Neuenburgersee.- Actes SHSN,p.32,107-112.
- BUFFLE Jean-Ph.(1940):Séparation et détermination quantitative des matières organiques en suspension dans l'eau.- Arch.Sci.phys.nat., 22,p.277-280.
- BURCKHARDT G.(1899):Faunistische und systematische Studien über das Zooplankton der grösseren Seen der Schweiz und ihrer Grenzgebiete.- Rev.suisse Zool.,7,p.353-715,116 fig.,107 tabl.,5 pl.
- BURGER André(1959):Hydrogéologie du bassin de l'Aare.- Bull.SNG., 52,p.5-304,29 fig.,53 tabl.,6 pl.
- BURKARD R.(1955):Zur Ermittlung der relativen Sauerstoffsättigung von Wasser.- Vom Wasser,22,p.272-274,1 fig.
- BURZ Jean(1956):Deltabildung im Ammersee und Chiemsee.Ein Beitrag zur Untersuchung der Verlandungsvorgänge in den oberbayerischen Seen.- Mitt.Arb.Bayer.Landeset.Gewässerkunde,München,47 p.,17 fig.,12 tabl.,33 pl.
- BUTLER A.M. and TUTHILL Elizabeth(1931):An application of the Uranyl zinc acetate method for determination of sodium in biological

material.- J.Biol.Chem.,23,p.171-180,3 tabl.

BUTTIN Henri(1839):Pierre ponce dans le lac de Neuchâtel.- Actes SESSN,p.46.

CACHON Jean(1957):Sur Quelques Techniques de Pêches Planctoniques pour Etudes Biologiques.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,54,No.1103, 6 p.,2 fig.

CALLAME Bernard(1960):Etude sur la diffusion des sels entre les eaux surnageantes et les eaux d'imbibition dans les sédiments marins littoraux.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,57,No.1181,19 p.,4 fig, 2 tabl.

- (1961):Note sur les échanges de phosphates entre l'eau interstitielle des sédiments marins et l'eau qui les recouvre.- Bull. Inst.Océanogr.Monaco,58,No.1201,8 p.,3 tabl.

CAMUS A.(1921):Les fleurs des marais, des tourbières, des ours d'eau, des lacs et des étangs(plantes palustres et aquatiques).- Encycl.prat.Nat.,5,112 p.,96 pl.

CANDOLLE A.-P.de(1825):Notice sur la matière qui a coloré en rouge le lac de Morat au printemps de 1825.- Mém.Soc.phys.Genève,3,p.29-37.

CAPART André(1955):Quelques échosondages des fonds et des poissons sur environs de Monaco.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,52,No.1068,10 p., 8 fig.

CARLIN-NILSSON Sörje(1938):Morphometrie und Sauerstoffschiebung einiger Seen Schwedens.- Arch.Hydrobiol.,32,p.91-99,31 fig.,1 tabl.

CARRUTHERS J.N.(1951):Observations continues sur les mouvements de l'eau de mer dans les zones de pêche.- Confér.Centre Rech.Océanogr.Paris,5 p.

- (1958):A Leaning-Tube Current Indicator("Piss").- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,55,No.1126,34 p.,14 fig.

CARSON Rachel L(1950):Cette mer qui nous entoure.- Coll.Les livres de nature,388.éd.,Paris,Stock,275 p.,1 carte,nombr.photos.

CARTE NATIONALE DE LA SUISSE.Rohelle:1:25000.(1956-1957): 8 feuilles 78 x 56 cm.- Wabern-Bern,Serv.topogr.féd.

CHAMBON Marc et GIRAUD André(1960a):Le rôle des détergents anioniques dans le ralentissement de l'autoépuration des fleuves.- Bull.Acad.nat.Méd.,144,p.623-628,1 fig.,4 tabl.

- (1960b):Propriétés inhibitrices d'oxydation des détergents anioniques synthétiques.- Bull.Acad.nat.Méd.,144,p.628-631,3 tabl.
- (1960c):Essais sur l'élimination des détergents anioniques synthétiques rejetés dans les eaux fluviales.- Bull.Acad.Nat.Méd.,144,p.631-636,4 tabl.
- (1960d):Rôle des détergents anioniques de synthèse dans le ralentissement de l'auto-épuration des fleuves.- Pr.méd.,68,p.1803.

- CHAMBERTIER Samuel de (1840): Description topographique et économique de la Mairie de Neuchâtel avec des notes historiques.- Neuchâtel, H. Wolfrath, 610 p., 12 pl.
- CHARLOT G. et GAUGUIN N. (1952): Dosages colorimétriques. Principes et méthodes.- Paris, Masson éd., 243 p., 42 fig.
- CHAVANNES H. et de PERROT S. (1895): Courbes de jaugeage des sources de l'Arcuse et de la Serrière.- Bull. SNSN., 23, p. 245-246, 259, 2 pl.
- CHAVAZ Fernand (1953): La nouvelle correction des eaux du Pied du Jura et l'aménagement des forces hydrauliques du bassin de la Sarins.- Bull. SFSN., 43, p. 5-72, 16 fig., 4 tabl.
- CLESSIN S. (1877): Les Pisidiums de la faune profonde des lacs suisses.- Bull. SVSN., 14, p. 234-243.
- CLOTTU Olivier (1962): Poissons et pêche, in "Saint Blaise au bord de l'eau".- Saint Blaise, Commission du 3 février, p. 11-15, 2 fig.
- COIN Louis (1943): Force ionique et conductibilités des eaux naturelles. Bull. Soc. chim. Fr. Mém., 10, p. 132-135, 2 fig., 2 tabl.
- COLEBROOK J.M. (1960): Plankton and Water Movements in Windermere.- J. Anim. Ecol., 29, p. 217-240, 15 fig.
- COLLET Léon W. (1925): Les lacs. Leur mode de formation. Leurs eaux. Leur destin. Eléments d'hydro-géologie.- Paris, Doyn, 320 p., 63 fig., 28 pl.
- CONNÉ F. (1904): La valeur de l'eau du lac de Neuchâtel pour l'alimentation.- Bull. SNSN., 32, p. 215-220, 350-353, 1 tabl.
- et SANDOZ G. (1903): Sur un cas d'infection d'eau d'alimentation par un paracolibacille.- Bull. SNSN., p. 328-331.
- COOPER L.N.B. (1952): Factors affecting the distribution of silicate in the North Atlantic Ocean and the formation of North Atlantic deep water.- J. Mar. Biol. Ass. U.K., 30, p. 511-526, 2 fig., 2 tabl.
- CORRELLA Carla, DELLA CROCE Norberto e RAVERA Oscar (1956): Plancton, bentos e chimismo delle acque e dei sedimenti in un lago profondo (Lago maggiore).- Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 2, p. 125-262, 27 fig., 54 tabl.
- TONOLLI Vittorio e TONOLLI Livia (1958): I sedimenti del Lago d'Orta, testimoni di una disastrosa poluzione cupro-ammoniacale.- Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 10, p. 9-50, 8 fig., 7 tabl.
- CORBÈRI Elisa e SOLAINI Adriana (1960): Osservazioni sulla microflora delle acque del Lago Maggiore.- Ann. Mior., 10, p. 36-56, 1 fig., 6 tabl.
- CORNÉZ Edouard (1870): Recherches sur le climat et les productions du sol de notre pays sous la première dynastie de ses comtes, soit de 1033 à 1395.- Bull. SNSN., 8, p. 265-266.
- CORNU M. (1888): Relief des bassins du Léman et de Neuchâtel.- Bull. SVSN., 23, p. XVIII.
- COSANDEY F. (1955): Etude hydrobiologique du lac de Bret. Ecologie, systé-

- natique, périodicité et associations du phytoplancton.- X.Schweiz.
Z.Hydrol., 17, p. 1-86, 12 fig., 7 tabl., 1 carte.
- COULON E. (1876): Sur les "gonfles" du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,
10, p. 24.
- COULON O. de (1888): Traitement des eaux d'égout par l'électricité.- Bull.
SNSN., 16, p. 278-281.
- COULON Louis (1861): Apparition de "fumée" sur le lac en automne.- Bull.
SNSN., 5, p. 172.
- (1867): Formation d'une commission pour étudier la question de la
hauteur du môle.- Bull.SNSN., 2, p. 230, 233.
 - ⁽¹⁸⁶²⁾ Sur le gaz inflammable qui remplit les vauoles de la glace du
lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 12, p. 73-74.
- CRIBLET M. (1892): Troches sur le lac de Neuchâtel.- Bull.SVSS., 28, p.
XXIV.
- CSEGGY Géza v. (1938a): Ujabb adatok a Balatonviz összetételéhez (Neuere
Untersuchungen am Balatonwasser).- Magy.Biol.Kut.Munk., 10, p. 424-
428, 2 tabl.
- (1938b): A Balaton-víz elnyelt oxigéntartalmarának vonatközi újabb
vizsgálata (Weitere Untersuchungen über den Sauerstoffgehalt des
Balatonwassers).- Magy.Biol.Kut.Munk., p. 429-439, 1 fig., 6 tabl.
- CZECSNYI R. (1938): Titrationskolorimetrische Bestimmung geringer Phos-
phatmengen in natürlichen Gewässern.- Jubiläumsfestschr."Oregore
Antipa" Bucuresti.
- DARBE P. (1943): Introduction à la météorologie.- F.Rouge et Cie, S.A.,
éd. Lausanne, 178 p., 48 fig., 6 cartes, 10 tabl.
- DARNELL M.C., Jr. and WALKER S.S. (1940): Determination of Sodium in Bio-
logical Fluids.- Industr. Engng. Chem. (Anal.), 12, p. 242-244, 1 fig.,
4 tabl.
- DAVIS Francis-J. (1941): Surface loss of Solar and Sky Radiation by In-
land Lakes.- Trans. Wis. Acad. Sci. Arts. Lett., 33, p. 83-93, 6 fig.
- PRACON C.E.R. (1958): Les vagues de l'océan.- Endeavour, 17, p. 134-139,
4 fig.
- PEVEY Edward S. (1955): The obliteration of the hypolimnion.- Mem. Ist.
Ital. Idrobiol. de Marchi, suppl. 8, p. 9-38, 5 fig.
- DELACHAUX Th. et BAER Jean-G. (1944): Otto Fuhrmann. 1871-1945.- Bull.
SNSN., 62, p. 147-167, 2 pl.
- DE LA HARPE J. (1866): Nouveaux renseignements sur les galets sculptés
des lacs de Genève et de Neuchâtel.- Bull.SVSS., 2, p. 237-242.
- DELIBECQUE André (1898): Les lacs français.- Paris, Chamerot et Renouard,
436 p., 153 fig., 5 tabl., 22 pl.
- DESOR Edouard (1860): Physionomie des lacs suisses.- Revue suisse.
- (1866): Pêches et stations lacustres du lac de Neuchâtel.- Actes

SNSN, p.184-185.

DESOR Edouard(1870a):Action corrosive d'une espèce d'algue.- Bull. SNSN., 8, p.68.

- (1870b):Présumptions en faveur d'un ancien niveau plus bas des lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat.- Bull.SNSN., 8, p.80, 147-152.
- (1879):Sur les galets sculptés du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 11, p.275-279.

DEUTSCHE Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung(1954):Physikalische, chemische und bakteriologische Verfahren.- Weinheim, Verlag Chemie GmbH., 180 p., nombr. tabl.

DICTIONNAIRE géographique de la Suisse(1905):Lac de Neuchâtel.- D.G.S., p.507-516, 13 fig., 2 cartes.

- (1902-1910):Série d'articles sur les divers lacs suisses.- 6 vol. et suppl., Neuchâtel, Attinger frères éd.

DICK E.C., SEULL I.F. and ARMSTRONG A.S.(1960):Surface-subsurface distribution of bacteria in swimming pools.- Field studies.Amer.J. publ.Hlth., 50, p.689-695.

DIERERT F. et WARDENBULCKE F.(1923):Sur le dosage de la silice dans les saurs.- C.R.Acad.Sci.Paris, 176, p.1478-1480.

DIETSCHE A. et DUBUISSON M.(1960):Mesures directes de pH aux grandes profondeurs sous-marines.- Bull.Inet.Océanogr.Monaco, 57, No.1174, 8 p., 4 fig.

DOBY Alice és JACZO Imre(1959):Ujabb vizsgálatok a Balaton vizének időleges változásáról (Seuere Untersuchungen über jahresperiodische Veränderungen des Balatonwassers).- Magy.Biol.Kut.Munk., 11, p.29-37, 4 fig., 3 tabl.

DOMASZY Ernő(1959):Das Leben des Szeledier Sees.- Die Binnengewässer Ungarns, Bd.1, Budapest, Akadémiai Kiado, 425 p., 555 fig., 42 tabl., 38 pl., 29 photos, 1 carte, 31 annexes.

DOTRENS E. et QUARTIER A.(1949):Les Corégones du lac de Neuchâtel.B-tude biométrique.- Rev.suisse Zool., 56, p.689-730, 10 fig., 14 tabl.

DUBOIS Georges(1928):Etude des Cercaires de la région de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 52, p.14-32, 24 fig.

- (1929):Les Cercaires de la région de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 53, p.3-178, 8 fig., 6 graph., 13 tabl., 17 pl.
- (1934):Contribution à l'étude des Cercaires de la région de Neuchâtel, suivie d'une note sur les Cercaires du Lac Noir (Zermatt).- Rev.suisse Zool., 41, p.73-84, 6 fig.

DUBOUL-RAZAVET C.(1958):Sur quelques lanciers de cartes siphonophores et de bidons lestés au large de la baie de Marseille.- Bull.Inet. Océanogr.Monaco, 55, No.1132, 16 p., 9 fig.

DUGDALE Richard, DUGDALE Vera, NEESS John and GOERING John(1959):Nitrogen Fixation in Lakes.- Science, 130, p.859-860, 1 fig.

- DU PASQUIER Léon(1892): Sur les limites de l'ancien glacier du Rhône le long du Jura.- Bull.SNSN.,20,p.32-43,165.
- (1893): Sur les seiches du lac de Neuchâtel d'après les recherches de M.Ed.Sarasin.- Bull.SNSN.,21,p.41-50,206.,1 pl.
 - (1894): Sur les seiches du lac de Neuchâtel.- Bull.MNSN.,22,p.306,316-318,330.
 - (1895a): Le niveau des lacs de Neuchâtel, Bienné et Morat de 1891 à 1894.- Bull.SNSN.,23,p.243-245,4 pl.
 - (1895b): Carte du lac de Neuchâtel d'après les levés récents du Bureau topographique fédéral et éléments de grandeur des lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bienné.- Bull.MNSN.,23,p.252-253.
 - (1895c): Rapport de la commission limnimétrique.- Bull.SNSN.,23,p.274.
 - (1896): Le niveau des lacs de Neuchâtel, Bienné et Morat en 1895.- Bull.SNSN.,24,p.197-198,1 pl.
 - (1897): Rapport de la commission hydrologique.- Bull.SNSN.,25,p.276-278.
- DUSSART B.(1954a): Température et mouvement des eaux dans les lacs. Introduction à l'étude d'un milieu.- Ann.Sta.Cent.Hydrobiol.,5,p.5-128,29 fig.,34 tabl.
- (1954b): L'Ombre-Chevalier en France. Hicmétrie et biologie.- Ann.Sta.cent.Hydrobiol.appl.,5,p.129-157,7 fig.,1 tabl.
 - (1954c): La température des lacs et ses causes de variations.- Vorh.Int.Ver.Limnol.,12,p.78-96,5 tabl.
 - (1956): Autoépuration et protection des eaux naturelles.- Eau et Santé,4,p.41.
 - (1958): Types de lacs et protection de la nature.- Revue de Savoie, Chambéry, 1er.trim.,p.49-57,2 pl.
 - (1960): L'évolution du Léman, vue par le biologiste et l'écologiste.- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.257-266.
- E.A.W.A.G. Cf. Institut fédéral pour l'aménagement, etc.
- ECKEL O.(1953): Zur Thermik des Neusiedlersees.- Wett.u.Leben,5,p.72-78,6 tabl.
- EDEN G.E. and TRUESDALE O.A.(1960): Pollution by synthetic detergents. Some recent developments.- Proc.Soc.Water Treatm.and Exam.,2,p.92-108,3 fig.,8 tabl.
- EDMONSON W.T.(1956a): The relation of photosynthesis by phytoplankton to light in lakes.- Ecology,37,p.161-174,8 fig.
- (1956b): Measurements of Conductivity of Lake Water in situ.- Ecology,37,p.201-204,4 fig.
- EHRKE Gerhard(1934): Die Assimilation in ihrer Abhängigkeit vom Licht,

von der Temperatur, der Kohlensäuremenge und der Zeit.- Int.Rev. Hydrobiol., 31, p.373-420, 23 fig., 15 tabl.

EINSELE Wilhelm(1936): Ueber die Beziehungen des Eisenkreislaufs zum Phosphatkreislauf im eutrophen See.- Arch.Hydrobiol., 29, p.664-686, 5 fig., 2 tabl.

- und GRIM Julius(1938): Ueber den Kieselsäuregehalt planktischer Diatomeen und dessen Bedeutung für einige Fragen ihrer Ökologie.- Z.Bot., 32, p.545-590, 3 fig., 10 tabl.

- und VETTER Heinz(1938): Untersuchungen über die Entwicklung der physikalischen und chemischen Verhältnisse im Jahreszyklus in einem mäßig eutrophen See (Schleinsee bei Langenargen).- Int.Rev. Hydrobiol., 36, p.285-324, 18 fig., 15 tabl.

EKMAN Even(1943): Ueber hochgelegene Temperatursprünge in Kleinsseen.- Int.Rev.Hydrobiol., 43, p.57-81, 6 fig., 7 tabl.

ELSTER Hans-Joachim(1955): Limnologische Untersuchungen im Hypolimnion verschiedener Seetypen.- Mem.Iet.Ital.Idrobiol.de Marchi, suppl. 8, p.83-119, 12 fig., 3 tabl.

- (1960): Der Bodensee als Organismus und die Veränderungen seines Stoffwechsels in den letzten Jahrzehnten.- Ges.n.Wasserforsch., 101, p.171-180, 19 fig.

- und EINSELE Wilhelm(1938): Beiträge zur Kenntnis der Hydrographie des Untersees (Bodensee).- Int.Rev.Hydrobiol., 36, p.241-284, 12 fig., 15 tabl.

ENDRÖES Anton(1906): Die Seeschwankungen (Seiches) des Chiemsees.- S.B. bayer.Akad.Wiss., München, 36, p.297-350, 5 fig., 6 tabl., 2 pl.

ENTZ Béla(1953): Horizontális kémiai vizvizsgálatok 1950 és 1952 nyarán a Balaton külföldi biotopjaiban és néhány beömlő patak torkolatánál. (Horizontale chemische Wasseranalysen in verschiedenen Biotopen des Balaton-Sees und in einigen in den See mündenden Bächen im Sommer 1950 und 1952.- Annal.Biol.Tihany, 21, p.29-48, 3 fig., 1 tabl.

- (1960): Historique des travaux de recherches au lac Balaton. ("La mer hongroise").- Université radiophonique internationale, Paris, 9 p.

ENTZ Géza(1941): A Balatonak és vizköznyékének puhatestűfaunájáról (Die Molluskenfauna des Balaton-Sees und seiner Umgebung).- Magy.Biol.Munk., 13, p.35-56, 5 tabl., 1 carte.

- und SEBESTYÉN Olga(1946): Das Leben des Balaton-Sees.- Magy.Biol.Kut.Munk., 16, p.179-411, 40 fig., 16 tabl., 10 pl.

FAST H.(1955): Systematische Untersuchungen über den chemischen und bakteriologischen Zustand des Bodensees.- Vom Wasser, 22, p.11-37, 10 fig., 4 tabl.

- RAST E.(1960):Einige neuere Untersuchungsergebnisse über den Zustand am Bodensee(westlicher Obersee).- Gas-u.Wasserfach,101,p.866.
- FAVRE A.(1853):Influence de l'Air sur le niveau du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSB.,4,p.154.
- FAVRE Jules(1928):Die Mollusken aus den Pfahlbauten des nord-westlichen Ufers des Neuenburgersees und ihre Bedeutung für die Siedlungswiese der Neolithiker;in:O.Tschumi,W.Rytz und J.Favre.-Sind die Pfahlbauten Trocken- oder Wassersiedlungen gewesen ?.- Römisch-germanische Kommission,18,p.85-91,4 tabl.
- (1941):Les Pisidium du canton de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,66,p.57-112,63 fig.,1 tabl.,6 pl.
- FAVRE L.(1879):Discussion sur les limnimètres du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,11,p.211.
- (1901):Pêches extraordinaires de brèmes dans le lac de Neuchâtel.- Bull.SNSB.,22,p.452-453.
- FERDMANN W.(1948):Zuflussbedingte Sekundärströmungen in Seen.- Schweiz. Z.Hydrol.,11,p.58-64,2 fig.
- et MINDER L.(1920):Beitrag zum Problem der Sedimentbildung und Besiedelung im Zürichsee.- Festschr.f.Zschokke,Bd.11,Basel,23 p., 1 fig.,2 tabl.
- FIESER Louis F. and FIESER Mary(1956):Organic Chemistry.- 3d.Ed.,New York,Reinhold Publ.Corp.,1112 p.
- FLINDENEGGE Ingo(1932):Die Schichtungsverhältnisse im Würthersee.- Arch. Hydrobiol.,24,p.253-262,5 fig.
- (1934):Umschichtungsvergänge im Billstätter- und Weissensee.- Int.Rev.Hydrobiol.,31,p.88-98,5 fig.
 - (1936):Ueber den Sauerstoffgehalt tiefer Seen und seine indikatorische Bedeutung für ihren Trophiezustand.- Arch.Hydrobiol.,30, p.337-344,3 fig.
 - (1955):Trophiezustand und Seetypen.- Schweiz.Z.Hydrol.,17,p.87-97.
- FLINISCHER Ludwig(1925):Die Verwendbarkeit der elektrischen Leitfähigkeit für die Trinkwasseruntersuchung besonders für die Härtebestimmung.- Z.Byg.Infekt.Kr.,104,p.157.
- FOREL F.-A.(1874):Sur les "fontaines" du lac.- Bull.SVSN.,13,p.286.
- (1891):La congélation des lacs suisses et savoyards dans l'hiver 1891.- Arch.Sci.phys.nat.,27,p.86.
 - (1892-1904):Le Léman.Monographie limnologique.- 3 vol.,Lausanne, Ed.Rouge,539 p.-651 p.-715 p.,nombr.fig.et tabl.,pl.
 - (1898):Le raz-de-marée de Grandson.- Bull.SVSN.,34,p.IXX-XXXI.
- FUEHRMANN Otto(1900a):Beitrag zur Biologie des Neuenburger Sees.- Biol. Zbl.,20,p.85-96,120-128,1 fig.,5 tabl.
- (1900b):Le plancton du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSB.,28,p.88-99,

1 fig., 5 tabl.

FUHRMANN Otto (1900e): Plancton du lac de Neuchâtel.- Actes SHSN, p.75.

- (1902): Sur les maladies des bonnelles.- Bull.SNSN., 30, p.476-477.
- (1903a): Sur une variété de l'Omble chevalier (*Salvelinus salvelinus* var. *profundus*).- Bull.SNSN., 31, p.382-384.
- (1903b): La pisciculture dans le canton de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 31, p.394-396.
- (1904): Sur les maladies de nos poissons.- Bull.SNSN., 32, p.361-362.
- (1905): Sur l'origine des lacs de Neuchâtel, de Morat et de Bienne avec des observations sur la pêche relatives au premier.- Bull. suisse Pêch., 6, p.17-26, 1 fig.
- (1906): Le Plancton dans le lac de Neuchâtel.- Bull.SVSE., 42, p.41.
- (1908): Nouveau botryocéphale du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 35, p.106.
- (1909a): Un cas d'hermaphrodisme chez un vengeron (*Leuciscus rutilus*) du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 36, p.82-85, 1 fig.
- (1909b): *Triacnophorus robustus* Oesson dans les lacs de Neuchâtel et de Bienne.- Bull.SNSN., 36, p.86-89, 2 fig.
- (1916): Das Plankton des Neuenburger-, Bieler- und Murtensees.- Bull.SNSN., 41, p.197.

FURLANI Johannes (1934): Zur Methode der Konzentrationsbestimmung natürlichen Wasser und Bodenlösungen durch Interferometrie und elektrische Leitfähigkeitsmessungen.- Int.Rev.Hydrobiol., 31, p.66-87, 1 fig., 7 tabl.

OAMBARTIAN M.E. (1958): Assimilation of molecular nitrogen in the water and grounds of the Sevan lake.- Mikrobiologija, 27, p.366-370.

GARNIER. (1864): Nouvelles éponges du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 6, p.305.

GASTINEL Pierre (1957): Précis de bactériologie médicale.- 2è.éd., Paris, Masson éd., 1243 p., 163 fig.

GERMAYE Louis (1912): Etudes sur les mollusques terrestres et fluviatiles de quelques formations quaternaires des bassins du Rhône et du Rhin; 3è. partie: Faune malacologique du dépôt néolithique de Bevaix (lac de Neuchâtel).- Arch.Mus.Hist.Nat.Lyon, 11, p.133-178, 6 pl.

- (1925): La faune des lacs, des étangs et des marais.- Coll. Encyclopédie pratique du naturaliste. No.20. Paris, Lechevalier éd., 315 p., 225 fig., 20 pl.

GESLIÉ Marcel et CHAHNAZAROFF D. (1953): Mesure de la radioactivité des eaux et des gaz naturels, suivant les méthodes utilisées au La-

boratoire de Chimie-physique appliquée à l'Hydrologie. Collège de France.- Ann. Inst. Géophys. Neuchâtel., 1, p. 312-351, 15 fig., 7 tabl.

CESSNER Fritz (1934): Die chemische und biologische Schichtung im Vätternsee. Ein Beitrag zur Produktionsbiologie des oligotrophen Sees.- Int. Rev. Hydrobiol., 21, p. 99-106, 2 fig., 2 tabl.

- (1939): Die Phosphorarmut der Gewässer und ihre Beziehung zum Kalkgehalt.- Int. Rev. Hydrobiol., 28, p. 203-211.
- (1943): Der Chlorophyllgehalt der Seen als Ausdruck ihrer Produktivität.- Arch. Hydrobiol., 40, p. 667-732, 10 fig., 19 tabl., 1 pl.
- (1948): The vertical distribution of phytoplankton and the thermocline.- Ecology, 29, p. 386-389, 5 fig., 3 tabl.

GEYER Fritz und MANN Nann (1939): Limnologische und fischereibiologische Untersuchungen am ungarischen Teil des Fertő (Neusiedler See). (Limnologiai és halászati biológiai vizsgálatok a Fertő magyarországi részén).- Magy. Biol. Kut. Munk., 11, p. 64-193, 37 fig., 42 tabl.

GIGNOUX Maurice (1950): Géologie stratigraphique.- 4^e éd., Paris, Masson, & Cie., 155 fig., 735 p.

GILLIERON V. (1861): Sur l'âge des dépôts modernes entre le lac de Neuchâtel et celui de Bienne.- Actes SHSN, p. 63-68.

GIRARDIN P. (1929): La Morphologie du Mont Vully.- Bull. SFSM., 29, p. 197-205.

GODET Paul (1864a): Note sur les Anodontes du Lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 6, p. 12, 71-75, 1 pl.

- (1864b): Examen d'une éponge trouvée dans le lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 6, p. 304.
- (1873): Les Anodontes du canton de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 2, p. 145-151.
- (1876): A propos des sondages de Ph. de Rougemont dans le lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 10, p. 126-128.
- (1893): Sur les déformations de coquilles de bivalves habitant les eaux douces.- Bull. SNSN., 21, p. 188.
- (1900): Les protozoaires neuchâtelois.- Bull. SNSN., 28, p. 61-79, 252.
- (1907a): Catalogue des Mollusques du Canton de Neuchâtel et des régions limitrophes des cantons de Berne, Vaud et Fribourg.- Bull. SNSN., 34, p. 97-158, 2 pl.
- (1907b): Les Mollusques du Jura neuchâtelois.- Arch. Sci. phys. nat. oct-nov., p. 89-92.
- (1911): Contribution à l'histoire naturelle des Nafades suisses. Unio consentaneus, Zgl., et ses variétés neuchâteloises.- Bull. SNSN., 38, p. 33-38, 14 fig.

GOLL J.-N. (1882): Sur quelques Corégones du Lac Léman et du Lac de Neuchâtel.- Actes SHSN., p. 36-38.

- (1883): Histoire naturelle des Corégones du lac de Neuchâtel.-

Actes SHSN., p.43.

GOLL J.-H.(1907):Le lac de Morat et quelques spécimens typiques de poissons.- Arch.Sci.phys.nat.,oct.-nov.,p.92-94.

- (1908):Coregonen des Genfer-,Neuenburger- u.Murtensees.- Actes SHSN.,p.265.

GORHAM Eville(1958):Observations on the Formation and Breakdown of the Oxidized Microzone at the Mud Surface in Lakes.- Limn.and Oceanogr.,3,p.291-298,2 fig.

- (1961):Factors Influencing Supply of Major Ions to Inland Waters, with Special Reference to the Atmosphere.- Bull.geol.Soc.Amer.,72,p.795-840,3 fig.,23 tabl.

GRAY E.A.(1956):Microbiologie.- Trad.A.Noischoy,Paris,Dunod éd.,225 p., 25 fig.

GREMAUD M.(1882):Les galets perforés de nos lacs et de nos cours d'eau.- Bull.SFSN.,2,p.97-100,1 pl.

GRESSLY A.(1864):Eponge trouvée dans le lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,6,p.286.

GRIM J.(1956):Die chemischen und planktologischen Veränderungen des Bodensees-Obersees in den letzten 30 Jahren.- Gas.u.Wasserfach,97, p.227-228.

GROTE August(1934a):Der Sauerstoffhaushalt der Seen.- Minnengewässer, 14,Stuttgart,Schweizerbart,217 p.,35 fig.,12 tabl.,3 pl.

- (1934b):Ueber den Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffhaushalt, den benthal-faunistischen Besiedelungsverhältnissen und der Typenzugehörigkeit der Seen.- Int.Rev.Hydrobiol.,31,p.1-39, 2 tabl.
- (1936):Ist das absolute Defizit das Mass des biogenen Sauerstoffverbrauchs im See?Kritische Studien zu den diesbezüglichen Abhandlungen Alsterbergs.- Arch.Hydrobiol.,29,p.410-544,14 fig.,15 tabl.

GUENTERT A.(1920):Sauerstoff und Schwefelwasserstoff im Hallwilersee und ihre biologische Bedeutung.- Festschr.f.Zschokke.,Nr.12,Basel,13 p.,3 fig.,7 tabl.

GUILLAUME Georges(1961):Sur la vérification de la hauteur du môle de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,5,p.211-212.

- (1864a):Mesures limnimétriques du Seyon et de la Serrière.- Bull. SNSN.,6,p.37.
- (1864b):Notice sur les éponges du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,6,p.305,405-411,1 pl.

GUILLAUME L.(1879):A propos des arbres à planter sur les grèves exon-dées.- Bull.SNSN.,11,p.439-442.

- (1882a):Dessins des différentes phases de la congélation et du dégel du lac en 1880.- Bull.SNSN.,12,p.73.
- (1882b):Sur les bandes lisses ou "fontaines" de la surface du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,12,p.87-92,1 pl.

- GUILLIERMOND A. et MANGENOT G.(1946):Précis de biologie végétale.- 2^e éd.,Paris,Masson éd.,1110 p.,621 fig.,2 pl.
- GUTERSON Heinrich(1960):Le canton de Neuchâtel(Neuenburger Jura).Trad. de l'allemand par R.Zellweger et B.Grandjean.- Bull.SNG.,52, fasc.2,p.17-84,9 fig.,2 tabl.,5 pl.
- GUYOT A.(1844):Note sur le relief du fond du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN.,1,p.113-115.
- (1845):Notice sur la carte du fond des lacs de Neuchâtel et de Morat.- Mém.SNSN.,3,10 p.,1 carte.
 - (1847):Carte du fond des lacs de Neuchâtel et de Morat,dessinée d'après les sondages de M.Guyot et les siens propres,par le Comte Henri de Pourtales-Gorgier.- Bull.SNSN.,1,p.413.
- GUYOT Edmond(1932):Variations séculaires des éléments météorologiques à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,57,p.5-44,2 pl.
- (1937):Les curagans et le sauvetage sur le lac.- Bull.SNSN.,62, p.189-190.
 - (1939):La température du lac de Neuchâtel en 1938.- Bull.SNSN., 64,p.21-31,4 fig.,2 tabl.
 - (1943a):Les précipitations à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,68,p.17-20, 3 tabl.
 - (1943b):La durée d'insolation à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,68,p.21-26,6 tabl.
 - (1944):Le vent à Neuchâtel en 1943.- Bull.SNSN.,69,p.105-118, 7 fig.,8 tabl.
 - (1951):Le nouveau pluviographe de l'observatoire de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,74,p.83-88,1 fig.,2 tabl.
 - (1934-1955):Observations météorologiques faites(de 1934 à 1954) à l'Observatoire de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,59 à 73,nombr.tabl.
 - (1963a):Influence de la nébulosité sur la température de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,86,p.63-68,5 tabl.
 - (1963b):Le climat de Neuchâtel se réchauffe-t-il?.- Bull.SNSN., 86,p.69-79, 5 tabl.
 - et FERRENOUD Jean(1949):Le vent à Neuchâtel de 1943 à 1947.- Bull. SNSN.,72,p.111-142,20 tabl.
 - et FORTNER Claude(1954):Quelques considérations sur les pointer du vent à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,77,p.111-115,7 tabl.
- HAIBFASS Wilhelm(1904):Die Tieferlegung des Chiemsees.Ein Kapitel aus der Wirtschaftsgeographie.- Globus,86,p.241-245,2 fig.
- (1922):Die Seen der Erde.Morphometrie derjenigen mindestens ein Quadratkilometer grossen Seen,für welche gesicherte Tiefenangaben vorliegen,nebst dem Versuch einer Zusammenstellung unserer sonstigen Kenntnisse über die Seen der Erde,mit besonderer Berücksichtigung der Alpenseen.

sichtigung der wichtigsten unter ihnen.- Petermanns Mitt., Ergz. No. 185, Gotha, Justus Perthes, 169 p., 33 tabl.

HARANGHY Leszle (1941): Adatok a Balaton bakteriologiajához (Beiträge zur Bakteriologie des Balaton).- Magy. Biol. Kut. Munk., 13, p. 57-73, 6 tabl 1 carte.

HAYES F.R. et COFFIE C.C. (1951): Le phosphore radioactif et les échanges de matière nutritives dans les lacs.- Endeavour, 10, p. 78-81, 3 fig.

HECHT W. und MOERIKOFER W. (1937): Methodik und Genauigkeit der Ablesung von Graukellphotometerstreifen.- Photogr. Korrr., 72, Nr. 11, 12, 7 p., 6 tabl.

- (1939): Kritik und Verbesserung der Graukellphotomethode.- Met. Z., 56, p. 142-193, 4 fig., 1 tabl.

HEINRICH Karl (1934): Atmung und Assimilation im freien Wasser.- Int. Rev. Hydrobiol., 30, p. 387-410, 2 fig., 7 tabl.

HERON J and MACKERETH F.J.E. (1955): The estimation of calcium and Magnesium in natural waters, with particular reference to those of low alkalinity.- Mitt. int. Ver. Limnol., 50, 2 tabl.

HERFICH Hans (1911): Die Eisverhältnisse in den südbayerischen Seen.- Die zert. Techn. Hochschule München, 89 p., 10 fig., 42 tabl., 5 pl.

KIPP Matthaeus (1882a): Présentation de la première feuille du limnimètre enregistreur.- Bull. SNSN., 12, p. 198.

- (1882b): Description du nouveau limnimètre enregistreur de la colonie météorologique de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 12, p. 240-243, 1 pl.

MIRSCH Adolphe (1861): Maitre du môle de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 5, p. 171-172.

- (1863): Maitre du môle de Neuchâtel sur la mer.- Bull. SNSN., 6, p. 443, 603-608.

- (1864): Sur un phénomène lumineux apparu sur le lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 6, p. 288-289.

- (1867a): Sur la hauteur du Môle de Neuchâtel par rapport au Chasse-rail.- Bull. SNSN., 7, p. 229-230.

- (1867b): Travaux de la commission du môle.- Bull. SNSN., 7, p. 302.

- (1867c): Rapport de la commission nommée pour étudier le niveau du môle.- Bull. SNSN., 7, p. 526-532.

- (1879a): Mesure de l'écoulement des eaux du lac.- Bull. SNSN., 11, p. 17-18.

- (1879b): A propos du limnimètre de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 11, p. 213-215.

- (1879c): Sur la nature des seiches, à propos d'un travail de M. Ph. Plantamour.- Bull. SNSN., 11, p. 457.

- (1882a): Sur la mesure des températures de l'eau du lac.- Bull. SNSN., 12, p. 38-40.

- HIRSCE Adolphe(1882b):Mouvement des glaçons du lac.- Bull.SNSN.,12,p. 73.
- (1882a):Proposition sur la construction d'un appareil pour mesurer les seiches du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,12,p.102-103.
 - (1882d):Discussion sur le nouveau limnimètre euregistrateur.- Bull.SNSN.,12,p.198-201.
 - (1882e):Rapport de la commission du limnimètre.- Bull.SNSN.,12,p.272-276.
 - (1882f):Observations limnimétriques.- Bull.SNSN.,12,p.334.
 - (1886):Etude sur le régime pluvial dans le canton de Neuchâtel depuis 1864 à 1884.- Bull.SNSN.,15,p.65-82,197,1 pl.
 - (1895):Question des observations limnimétriques de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,25,p.248-249.
 - et WEHER R.(1882):Sur une nouvelle détermination du zéro du limnimètre provisoire.- Bull.SNSN.,12,p.15-16.
- HOANG NGOC CAN, POCHON J., ROCHE A. et de BARJAC H.(1959):Microflore des sédiments marins et évolution de la matière organique.- Ann. Inst.Pasteur,97,p.263-265.
- HOEFLER Karl und FETZMANN Elsa Leonore(1959):Algen-Kleingeseellschaften des Salzlacheengebietes am Nensiedler See.I.- S.H.8st.Akad.Wiss., Mathem.-naturw.Klasse,Abt.I,168,p.371-386,6 tabl.,1 pl.
- HOFFMAN William S. & OSGOOD Bess(1938):A photoelectric method for the microdetermination of sodium in serum and urine by the uranyl zinc acetate precipitation.- J.Biol.Chem.,124,p.347-357,1 fig.,2 tabl.
- HOFMANN E.(1958):L'ozonisation de l'eau du lac de Constance à l'usine de la ville de Saint Gall.- L'Eau,45,p.119-124,2 fig.,1 tabl.
- HOFSTEE J.(1957):Analysemethoden voor Grond,Gewas,Water en Bodemvocht.- Kampen,Directie van de Wieringermeer,298 p.,34 fig.,28 tabl.
- HOLMBERG Otto R.und NAUMANN Einar(1927):Die Trophie-Begriffe in sprachlicher Hinsicht.- Bot.Notiser,p.211-214.
- HORISBERGER Pierre(1958):Manifestations trombeales sur le lac de Neuchâtel,les 21 juillet et 15 septembre 1957.- Bull.SNSN.,81,p.119-121, 2 fig.
- HURAUULT Etienne(1943):Les grands lacs subalpins de Savoie sont-ils aléolithrophes?- Arch.Hydrobiol.,40,p.240-249,7 tabl.
- (1947):Etudes thermiques, chimiques et biologiques des eaux des lacs de l'Est de la France.- Ann.Ec.Eaur.For.,Nancy,10,p.115-260, 2 fig.,104 tabl.,17 pl.
- HUTCHINSON G.Evelyn(1938):On the Relation between the Oxygen Deficit and the Productivity and Typology of Lakes.- Int.Rev.Hydrobiol.,36,p.336-355,1 fig.
- (1957):A Treatise on Limnology.Vol.I:Geography,Physios,and Chemistry.- New York,John Wiley Ed.,1915 p.,228 fig.,132 tabl.

HYDROGRAPHIE NATIONALE division de 1' (1910): Régime des eaux en Suisse. Bassin de l'Aar depuis ses sources jusqu'en lac de Biemne. Première partie: Surfaces des bassins de réception, des zones de 300 en 300 m au-dessus de la mer, des rochers, des forêts, des glaciers et des lacs.- Edit: Département fédéral de l'Intérieur, Berne, 85 p., 8 tabl., 1 pl., 2 cartes.

IDRAC Pierre (1931): La nouvel enregistreur de courants sous-marins de M. Pierre Idrac. Les premiers résultats qu'il a permis d'obtenir en océanographie.- Ann. Inst. océanogr., 10, fasc. 4, p. 101-116, Paris, Blondel La Rougery, fig., pl.

IMHOFF Othmar-Emile (1895): Premiers résultats des recherches sur la faune des invertébrés aquatiques du canton de Fribourg.- Bull. SFSE, 6, p. 547-552, 2 tabl.

INSPECTION CANTONALE DE LA PECHE ET DE LA CHASSE, NEUCHÂTEL (1943-1961): Publications Nos. 1 à 47.- 98 p., 4 fig., 91 tabl.

INSTITUT FEDERAL POUR L'AMENAGEMENT, L'EPURATION ET LA PROTECTION DES EAUX (E.A.W.A.G.). Lac de Morat. Recherches de 1954 à 1955.- Zurich, non publié, 30 p. (1960).

IVANOV M.V. & TEREBKOVA L.B. (1959a): A study of microbiological processes of hydrogen sulphide formation in the Solence lake. I.- Mikrobiologija, 28, p. 251-256.

- (1959b): On microbiological processes of hydrogen sulphide formation in the Solence lake. II.- Mikrobiologija, 28, p. 413-418.

JAAG Otto (1949): Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizer Seen.- Ver. int. Ver. Limnol., 10, p. 192-209, 8 fig.

- (1954): La pollution des eaux de surface et des eaux souterraines en Suisse.- La pollution des eaux en Europe, 4^e réunion europ. d'Ing. sanitaires, Opatija, Yougoslavie, 22-28. avril, Genève, O.M.S., p. 129-176, 7 tabl.

JACCARD Auguste (1882a): Carte hydrologique du canton de Neuchâtel.- Actes SFSE, p. 34.

- (1882b): Découverte de feuilles fossiles dans le lac de Neuchâtel, au port de Bèvaix.- Bull. SVSE, 18, p. 134-136.

JACOT GUILLARMOUD J. (1921): Bois silicifiés.- Bull. SVSE, 54, p. 31-73.

JAKSKEFFER H. (1952): Plankton als Indikator der Trophiegruppen der Seen.- Ann. Acad. Sci. Fenn., Serie A. IV. Biologia, fasc. 18, 29 p., 3 fig., 9 tabl.

JAMES Harry R. (1934): Beer's Law and the Properties of organic Matter in Lake Waters.- Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett., 32, p. 73-82.

- and BIRGE Edward A. (1938): A laboratory study of the absorption of light by lake waters.- Trans. Wisc. Acad. Sci. Arts Lett., 31, p. 1-154, 54 fig., 14 tabl.

- JACQUEROD A.(1933):A propos de la correction des eaux du Jura.Questions thermiques;quelques chiffres.- Bull.SNSN.,58,p.128.
- JEANPRETRE John(1910):Appareil pour le prélèvement des eaux profondes destinées à l'analyse bactériologique.- Mitt.Lebensm.Hyg.,Bern., 1,p.169-171,1 fig.
- JØRGENSEN Erik G.(1955a):Variations in the Silica Content of Diatoms.- Physiol.Plant.,8,p.840-845,2 tabl.,3 fig.
- (1955b):Solubility of the Silica in Diatoms.- Physiol.Plant.,8, p.846-851,4 fig.
 - (1957):Diatom Periodicity and Silicon Assimilation.Experimental and Ecological Investigations.- Dansk.bot.Ark.,18,p.6-54,6 tabl., 16 fig.
- JUDAY C.(1916):Limnological Studies on some Lakes in Central America.- Trans.Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,18,p.214-250,4 fig.,3 tabl.
- and BIRGE E.A.(1933):The Transparency,the Color and the Specific Conductance of the Lake Waters of Northeastern Wisconsin.- Trans. Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,28,p.205-259,12 fig.,12 tabl.
 - - and MELOCHE V.W.(1941):Chemical Analyses of the Bottom Deposits of Wisconsin Lakes.II.Second Report.- Trans.Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,33,p.99-114,1 fig.,2 tabl.
- JUGET J.(1958):Recherche sur la faune de fond du Léman et du lac d'Annecy.- Ann.Sta.Centr.Hydrobiol.appl.,7,p.9-96,17 fig.,22 tabl., 5 pl.
- KAISER P.E. und SCHEFFSLIT E.(1925):Das Phytoplankton des Chiemsees nebst Algenfunden aus anderen Seen des Chiemgaus.- Arch.Hydrobiol 15,p.141-178,51 fig.,1 tabl.,7 pl.
- KELLER N.(1945):Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee.- Diss. ETH.,Sauerländer & Co.,Aarau.Cité par Braun(1955).
- KINDLE E.M.(1915):Note on Bottom Currents in Lake Ontario.- Amer.J. Sci.,32,p.192-196.
- KITSON R.E. and MELLON M.G.(1944):Colorimetric Determination of Phosphorus as Molybdovanadophosphoric Acid.- Industr.Engng.Chem.(Anal.),16,p.379-383,2 fig.,3 tabl.
- KLEINKOFF M.Dean.(1960):Spectrographic Determination of Trace Elements in Lake Waters of Northern Maine.- Bull.Geol.Soc.Amer.,71,p.1231-1242,3 fig.,6 tabl.
- KNAB Ch.(1867a):Tableau des degrés hydrotimétriques,d'après la mesure de MM.Boudron et Boutet, des eaux du canton de Neuchâtel,déterminées en 1861.- Bull.SNSN.,7,p.463-464.
- (1867b):Jaugeage de quelques rivières du canton de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,7,p.464.
 - (1873):Zéro des limnimètres des lacs de Neuchâtel et de Morat.- Bull.SNSN.,2,p.13-17,1 tabl.

- KNIE K.(1959):Ueber den Chemismus der Wässer im Seewinkel und des Nensiedlersees.- Niss.Arbb.Burgenland,23,p.65-68,Eisenstadt,Bgld, Landesmuseum,2 tabl.
- KOPP Charles(1852):Observations météorologiques faites à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p.367.
- (1855a):Couleurs de la surface du lac de Neuchâtel.- Actes Soc. helv.Sci.nat.,40,p.38.
 - (1855b):Résumé des observations faites à Neuchâtel en 1852,1853 et 1854.- Bull.SNSN.,2,p.38-48;117-119;303-306.
 - (1855c):Faits relatifs à l'érection de la colonne météorologique de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p.129.
 - (1855d):Sur les couleurs du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p. 208-210;212-213.
 - (1856):Tabellen über den Stand des Wassers im Neuenburgersee.- Actes SNSN,p.57.
 - (1858a):Sur un instrument pour déterminer l'évaporation du lac.- Bull.SNSN.,4,p.16.
 - (1858b):Mouvement des eaux du lac de Neuchâtel depuis 1817 à 1856,réduite en mètres et mouvements des lacs de Neuchâtel et de Biennne pour 1856.- Bull.SNSN.,4,p.160,1 pl.
 - (1858c):Rapport météorologique pour l'année 1856.- Bull.SNSN.,4, p.243-282,20 tabl.
 - (1858d):Inscriptions sur la porte de la Neuveville et marques sur des blocs erratiques.- Bull.SNSN.,4,p.309-310;336.
 - (1858e):Rapport météorologique pour l'année 1857.- Bull.SNSN.,4, p.395;413-430,12 tabl.,1 pl.
 - (1858f):Résumé des phénomènes les plus remarquables qui se sont passés à Neuchâtel dans le 14^e.et le 15^e.siècle,de l'en 1300 à 1500.- Bull.SNSN.,4,p.396-412.
 - (1858g):Ueber die enormalen Zustände des Neuenburgersees.- Actes SNSN.,p.39.
 - (1859):Des variations du niveau du lac de Neuchâtel pendant les années 1835 à 1856.- Mém.SNSN.,4,1^è.partie,52 p.,17 tabl.
 - (1861a):Sur l'évaporation du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p. 5-6.
 - (1961b):Rapport du comité météorologique de la société des sciences naturelles de Neuchâtel pour l'année 1858,suivi du résumé des phénomènes les plus remarquables qui se sont passés à Neuchâtel dans le 16^e.siècle,de l'en 1500 à 1600 et du tableau des variations de niveau des lacs de Neuchâtel,de Biennne et de Morat pendant l'année 1858.- Bull.SNSN.,2,p.31;102-147;164,15 tabl.,1 pl.
 - (1861c):Erreurs dans les différences de niveau des lacs de Neuchâtel,Biennne et Morat.- Bull.SNSN.,2,p.168-171;198-200.

- KOPP Charles(1861d):Rapport du comité météorologique de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel pour l'année 1859,suivi d'un résumé des phénomènes les plus remarquables qui se sont passés à Neuchâtel dans le 17^e.siècle,de l'an 1600 à l'an 1700 et du tableau des variations de niveau des lacs de Neuchâtel,de Bienne et de Morat pendant l'année 1859.- Bull.SNSN.,2,p.198;266-321,20 tabl.,1 pl.
- (1861e):Rapport du comité météorologique de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel pour l'année 1860,suivi du résumé des phénomènes les plus remarquables qui se sont passés à Neuchâtel dans le 18^e.siècle de l'an 1700 à l'an 1750 et des variations de niveau des lacs de Neuchâtel,de Bienne et de Morat en 1860.- Bull.SNSN.,2,p.517-518;675-752,18 tabl.,1 pl.
 - (1864a):Rapport du comité météorologique de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel pour l'année 1861,suivi d'un résumé des observations faites à Neuchâtel dans le 18^e.siècle,de 1750 à 1759 et des variations de niveau des eaux des lacs de Neuchâtel de Bienne et de Morat pendant l'année 1861.- Bull.SNSN.,5,p.33;219-247,21 tabl.,1 pl.
 - (1864b):Analyse chimique de l'éponge du lac.- Bull.SNSN.,6,p.310.
 - (1864c):Variations du niveau des eaux des lacs de Neuchâtel,de Bienne et de Morat pendant les années 1862 et 1863.- Bull.SNSN.,6,p.561-567,2 tabl.
 - (1867a):Tableau des hauteurs des lacs de Morat,de Neuchâtel et de Bienne pour 1864.- Bull.SNSN.,7,p.110;115-123;152,3 tabl.,1 pl.
 - (1867b):Résumé des observations météorologiques anciennes,encore inédites,faites à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,7,p.111;403,1 tabl.
 - (1867c):Tableaux des hauteurs des lacs de Neuchâtel,de Bienne et de Morat pour l'année 1865.- Bull.SNSN.,7,p.273;456-458,3 tabl.,1 pl.
 - (1867d):Résumé des variations du niveau de l'eau des lacs de Neuchâtel,Bienne et Morat de 1856 à 1866.- Bull.SNSN.,7,p.300;458-463,6 tabl.
 - (1867e):Variations du niveau des eaux des lacs jurassiques de Neuchâtel,de Bienne,de Morat et de Joux pendant l'année 1866 et coupe du lac de Bienne de Neuveville à Cerlier.- Bull.SNSN.,7,p.513;594-603,6 tabl.,5 pl.
 - (1870a):Variations du niveau des eaux des lacs jurassiques de Neuchâtel,de Bienne,de Morat et de Joux pendant l'année 1867.- Bull.SNSN.,8,p.75;153-156,4 tabl.,2 pl.
 - (1870b):Idem 1868.- Bull.SNSN.,8,p.272-275,4 tabl., 2 pl.
 - (1870c):Idem 1869.- Bull.SNSN.,8,p.482-485,4 tabl.
 - (1873a):Commission pour l'observation des lacs.- Bull.SNSN.,2,p.43
 - (1873b):Tableaux des variations de niveau des lacs jurassiques pour l'année 1870.- Bull.SNSN.,2,p.50-54,4 tabl.,2 pl.

- KOPP Charles(1873c):Résumé des observations météorologiques faites à Neuchâtel dans le 18^e.siècle,de l'année 1760 à 1800.- Bull.SNSN., 2,p.56-68,1 tabl.
- (1873d):Réparations au limnimètre de la colonne météorologique de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p.193.
 - (1873e):Variations du niveau des eaux des lacs jurassiques de Neuchâtel,de Biennne,de Morat et de Joux,pendant l'année 1871.- Bull. SNSN.,2,p.193;219-222;4 tabl.,2 pl.
 - (1873f):Idem 1872.- Bull.SNSN.,2,p.409,494-501,6 tabl.,2 pl.
 - (1876):Variation du niveau des eaux des lacs de Neuchâtel,de Biennne et de Morat pendant l'année 1873.- Bull.SNSN.,10,p.96;110-113, 4 tabl.,2 pl.
 - et NIRSCH Adolphe(1873a):Réparations à la colonne météorologique.- Bull.SNSN.,2,p.143 et 151.
 - - (1873b):Correction du limnimètre de la colonne météorologique de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p.210 et 214.
 - - (1876):A propos du limnimètre et de la température du lac.- Bull. SNSN.,10,p.5;24;29-30.
- KREITMANN L.(1931):Etude des courants du lac Léman.- Etud.rhodan.,2, p.109-130,7 tabl.,5 cartes.
- KURLER Bernard(1959):Rapport concernant l'étude rapide des sondages de la Motte du point de vue pétrographique.- Neuchâtel,inédit,15 p., 3 fig., 1 tabl.
- (1961):Sur quelques interstratifiées irrégulières mica-montmorillonite.- Bull.Carte géol.Als.Lorr.,14,p.173-178,2 fig.
- KUEBLER J.(1874):Diatomées du Léman,du lac de Constance inférieur,du lac de Neuchâtel et du lac de Zurich.- Bull.SVSN.,13,p.126-132, 1 tabl.
- KUSNETZOW S.J.(1939):Determination of the intensity of oxygenabsorption in the lake water,caused by bacteriological processes.- Arb.limnol.Bta.Kossino.,22,p.53-74,1 fig.,11 tabl.
- LACOMBE H.(1960):Les mouvements de la mer.- Sci.et Vie,sécial.No.51, p.10-23,7 fig.,1 carte.
- LADAME Henri(1852):Observations météorologiques faites à Neuchâtel.- Bull.SNSN.,2,p.311.
- (1853):Remarque sur les observations météorologiques faites par Kopp.- Bull.SNSN.,2,p.49-52.
 - (1855):Température du lac de Neuchâtel,mesurée pendant huit ans.- Actes SNSN.,40,p.38 et 213,1 tabl.
 - (1858a):Note sur la température de l'air et du lac pendant le brouillard.- Bull.SNSN.,4,p.250;283-293,10 tabl.

- LADAME Henri(1858b):La correction des eaux du Jura et le dessèchement des marais du Seeland.- Bull.SNSN.,4,p.301-305.
- (1861a):Observations faites de 1753 à 1782.- Bull.SNSN.,2,p.519; 522.
 - (1861b):Note sur la température du lac à différentes profondeurs.- Bull.SNSN.,2,p.528;753-761,2 tabl.,1 pl.
 - (1867a):Rectification des repères au Gymnase et à l'Hôtel de ville.- Bull.SNSN.,7,p.538,
 - (1867b):Résumé des observations thermométriques faites à Neuchâtel pendant les années 1754,53-1782,soit pendant 30 années.- Bull. SNSN.,7,p.547,590-593,2 tabl.
 - (1879):Détermination de la hauteur du Môle de Neuchâtel.Nivellement direct rattaché au nivellement fédéral de précision.- Bull. SNSN.,11,p.485-485,1 pl.
 - (1882):Rétablissement définitif du limnimètre.- Bull.SNSN.,12,p.15
 - (1886):Erreurs relatives au niveau des lacs de Neuchâtel et de Bienne pendant les travaux de la correction des eaux du Jura.- Bull.BNSN.,15,p.222.
 - et PETERS Samuel(1861):Résumé des observations météorologiques relatives aux vents faites à Cornaux,de 1812 à 1819.- Bull.SNSN.,5, p.148-154,6 tabl.
- LASTOCKIN D.(1931):Beitrag zur Seetypenlehre.- Arch.Hydrobiol.,22,p. 546-579,12 tabl.,2 pl.
- (1945):Achievements in Soviet hydrobiology of continental waters.- Ecology,26,p.320-331,2 tabl.
- LATIL,Pierre de(1960):L'exploration des fonds sous-marins a commencé.- Sciences et Avenir,No.155,p.17-22,11 fig.
- LAUGHTON A.B.(1959):Photographie du fond de l'océan.- Endeavour,18,No. 72,p.178-185,17 fig.
- LAURENT P.(1960a):Evolution biologique du Léman en 1959.- Eau,air,santé 8,p.74.
- (1960b):Quelles sont nos connaissances sur l'état actuel du lac Léman?- Eau,air,santé,8,p.79.
- LECLERC Edmond(1945):Eaux potables et eaux résiduaires.Les techniques de correction et d'épuration.- Liège,Vaillant-Carmanne éd.,384 p., 143 fig.,nombr.tabl.
- LE GRAND Yves(1954):Recherches récentes dans le domaine de l'optique de la mer.- Trav.Centre Rech.Océanogr.,Paris,1,No.5,4 p.,2 tabl.
- LEHN Hubert(1956):Kurzfristige Temperatur- und Planktonschwankungen im ufernahen Hypolimnion des Ueberlingersees(Bodensee).- Gas- u. Wasserfach,97,p.222-225,7 fig.,1 tabl.
- (1963):Einige Frühjahrsbefunde über die Isothermen-Phytoplankton-Relation im Bodensee.- Arch.Hydrobiol.,59,p.1-25,16 fig.,4 tabl.

- LETZMANN Johannes(1937):Die Anabildung der Bodenplatte eutrophes Gewässer und ihre Störungsformen.- Arch.Hydrobiol.,31,p.171-200,14 fig.
- LIEPOIT Reinhard(1960):Ein Profundalwasserschöpfer zur Erforschung der bodennahen Mikroschichtung stehender Gewässer.- Wass.u.Abwass., tirage à part 8 p.,5 fig.,1 tabl.
- LIKENS Gene E.and HASLER Arthur D.(1960):Movement of Radiosodium in a Chemically Stratified Lake.- Science,131,p.1676-1677,1 fig.
- LIVRE DE L'EAU(1954-1957):Guide pratique à l'usage des ingénieurs et des techniciens.- 4 vol.,Liège,C.B.E.D.E.,éd.,nombr.fig.,nombr. tabl., nombr. pl.
- LOEFFLER Reine(1959):Zur Limnologie,Entomotraken-und Rotatorienfauna des Seewinkelgebietes(Burgenland,Oesterreich).- S.B.Oest.Akad. Wiss.,168,p.315-362,5 fig.,17 tabl.,4 pl.
- LONGUET-HIGGINS M.S.(1953):Mass transport in water waves.- Phil.Trans. A.,245,p.535-581,8 fig.,1 tabl.
- LOOSLI C.-A.(1899):Découverte de bacilles typhiques dans le lac de Saint Blaise.- Bull.SNSN.,27,p.279.
- LOUB Walter(1955):Algenbiozöosen des Remisidler Sees.- S.B.Oest.Akad. Wiss.,164,p.81-107,2 fig.,1 tabl.,6 pl.
- LUDANY György von(1930):Vizinövények hatása a Balatonviz és mesterséges bikarbonat oldatok vezetőképességére.(Der Einfluss der Wasserpflanzen auf die Leitfähigkeit des Balatonwassers und von künstlichen Bicarbonatlösung).- Magy.Biol.Ent.Munk.,3,p.482-487,1 fig.
- LÜEDI W.(1935):Das grosse Moos im westschweizerischen Seeland und die Geschichte seiner Entstehung.- Veröff.geobot.Inst.Rübel,Zürich, 344 p.,47 fig.,3 pl.,2 cartes.
- LUND J.W.G.(1950):Studies on Asterionella formosa Hass.II.Nutrient depletion and the spring maximum.Part.II.- J.Ecol.,38,p.15-35,5 tabl.
- LUNDQVIST G.(1927):Bodenablagerungen und Entwicklungstypen der Seen.- Binnengewässer,2,Stuttgart,Schweizerbart,124 p.,60 fig.,3 tabl., 14 pl.
- (1942):Sjösediment och deras Bildningsmiljö.- Sverig.Geol.Unders. Ser.C.,No.446,Arbbook 36;No.3,Stockholm,31 p.,21 fig.
- MACKERETH F.J.H.(1955):Ion-exchange procedures for the estimation of (I)total ionic concentration,(II)chlorides and (III)sulphates in natural waters.- Mitt.int.Ver.Limnol.,No.4,6 fig.,4 tabl.
- MAERKT Erwin(1949):Die Limnologie der schweizerischen Seen und Flüsse. Zusammenstellung der Literatur seit 1900.- Schweiz.Z.Hydrol.,11, p.650-707,5 fig.
- MANNING Winston M. and JUDAY Richard E.(1941):The chlorophyll content and productivity of some lakes in Northeastern Wisconsin.- Trans. Wis.Acad.Sci.Arte Lett.,33,p.363-393,12 fig.,11 tabl.

- MANUEL SUISSE DES DENRÉES ALIMENTAIRES(1939):Méthodes d'analyse et normes pour l'appréciation des denrées alimentaires et des objets usuels.- 4^e éd.,Zürne,Zimmermann & Cie.S.A.,éd.,496 p.,16 fig., 59 tabl.
- MARINELLI Olinto(1894):Area e profondità dei principali laghi italiani. Riv.Geogr.Ital.,1,p.558-566,623-626;2,(1895),p.32-35,93-100,3 tabl
- MARTIN F.(1961):La future station d'épuration des eaux de la ville de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,84,p.201-204.
- MATTHEY François(1958):Contribution à l'étude de la végétation post-glaciaire de l'étage inférieur du canton de Neuchâtel.Analyse polynique de sédiments lacustres dans le voisinage du Loclat.- Bull. SNSN.,81,p.113-118,1 fig.
- MAUCHA Gersd(1932):Hydrochemische Methoden in der Limnologie.- Binnen-gewässer,12,Stuttgart,Schweizerbart,173 p.,36 fig.,19 tabl., 4 pl.
- (1936):Ueber die Sauerstoffsichtung der Seen.- Arch.Hydrobiol., 29,p.695-707,3 fig.,4 tabl.
 - (1938):Ueber einige kosmische Faktoren der Phytoplankton-Produktion.- Arch.Hydrobiol.,32,p.434-461,2 fig.,9 tabl.,2 pl.
 - (1947):Hydrochemische Salzmikro-Feldmethoden.- Arch.Hydrobiol.,41, p.352-391,1 fig.,8 tabl.
- MAURER J.(1911):Die Verdunstung auf den Seen am Nordfuss der Alpen während der grossen Hitze- und Dürrezeit 1911.- Met.Z.,28,p.545-555, 4 fig.,3 tabl.
- MAUVAIS Georges(1927):La faune littorale du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN.,51,p.77-208,6 fig.,25 tabl.
- (1929):Les pêches de hondelles dans le lac de Neuchâtel pendant l'été 1929.- Bull.suisse Pêch.,30,p.170-176,2 fig.,5 tabl.
 - (1930):Richesse ichtyologique des lacs de Constance et de Neuchâtel.- Bull.suisse Pêch.,31,p.130-133,145-151,162-168,177-181,4 fig.,5 tabl.
- MELOCHE V.W.,LEADER G.,SAFRANSKI L.and JUDAY C.(1938):The Silica content of Lake Mendota water.- Trans.Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,31,p. 363-376,8 fig.,2 tabl.
- and SETTERQUIST T.(1933):The Determination of Calcium in Lake Water and Lake Water Residues.- Trans.Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,28, p.291-296,5 ts bl.
- MERCIER P.(1960):Les trombes sur le lac Léman.- Schweiz.Z.Hydrol.,22, p.167-176,2 fig., 1 tabl.
- et GAY S.(1949):Station d'aération au lac de Bret.Résultats obtenus en 1947 et 1948.- Schweiz.Z.Hydrol.,11,p.423-429,4 fig.
- MERLIGEK Edouard(1925):Der Neuseiedlersee.- Wasserwirtschaft,p.86-88,1 carte.
- MESSIKOMER E.(1942):Beitrag zur Kenntnis der Algenflora und Algenvegetation des Hochgebirges um Davos.- Beitr.geobot.Landesseufn.,Heft

- 24, Bern, Verlag H. Huber, 452 p., 2 fig., 19 pl., 1 carte.
- MEURON, Pierre de (1892): Réflexions sur un manuscrit de M.-L. Perrot concernant les poisons des lacs de Neuchâtel, Morat et Bienne, de la Reuse et du Doubs.- Bull. SNSN., 20, p. 157.
- MEURON, Théodore de (1861): Coquille marine trouvée dans le lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 2, p. 238.
- MINDER Léo (1917): Die thermische Sprungschicht der Neen.- Actes SHSN., p. 260-261, Aarau, (1918), Sauerländer.
- (1926): Biologisch-chemische Untersuchungen im Zürichsee.- Schweiz. Z. Hydrol., 2, Heft 3/4, p. 1-70, 10 tabl., 6 fig., 2 pl.
- MOELLER Lotta (1936): Stachlin-See und Nakrower-See. (Ein Beitrag zur Charakteristik eutropher und oligotropher Seetypen).- Arch. Hydrobiol., 29, p. 137-156, 10 fig., 2 pl., 2 tabl.
- MONARD Albert (1918): Sur la faune profonde du lac de Neuchâtel. Description de quelques nouvelles espèces.- Rev. suisse. Zool., 26, p. 341-359, 21 fig., 1 tabl.
- (1919a): La profondeur des lacs et leur origine glaciaire.- Bull. SNSN., 43, p. 96-105, 317.
 - (1919b): La faune profonde du lac de Neuchâtel.- Rameau de Sapin, III^e série, 3^e année, p. 2-22, 63 fig.
 - (1920): La faune profonde du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 44, p. 65-236, 283-285, 2 fig., 27 tabl., 1 carte.
 - (1922a): Une nouvelle espèce de Rotateur: *Floccularia epizootica*, nov. spec.- Bull. SNSN., 46, p. 66-69, 1 pl.
 - (1922b): La faune de la Motte dans le lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 46, p. 90.
 - (1922c): La faune de la Motte, lac de Neuchâtel.- Schweiz. Z. Hydrol., 2, p. 150-187, 17 tabl.
- MONOD René (1956): Contribution à l'étude des variations de la composition chimique des eaux du lac Léman. Phénomènes de la pollution et d'autoépuration à l'embouchure du Flon à Viâny.- Ann. Sta. centr. Hydrobiol., 6, p. 233-345, 4 pl., 45 tabl.
- (1960): Evolution qualitative des eaux du Léman.- Eau, air, santé, 8, p. 66, 1 tabl.
 - (1960b): L'évolution du Léman, vue par le chimiste et par le bactériologiste.- Schweiz. Z. Hydrol., 22, p. 242-256, 8 fig.
- MONTGOMERY H.A.C. and DYMCK Joan F. (1961): The determination of nitrites in water.- Analyst, 86, p. 414-416, 1 tabl.
- MONTMOLLIN, Aug. de, père (1835): Note relative aux variations du niveau du lac de Neuchâtel, pendant les années 1817 à 1834.- Mém. SNSN., 1, p. 71-76, 4 tabl.
- MONTMOLLIN, Georges de (1831): Mémoires sur le Comté de Neuchâtel en Suisse.- 2 vol., Neuchâtel, Petitpierre et Prince éd., 256 et 302 p.

- MONTMOLLIN, H. de (1888): A propos d'une épidémie de fièvre typhoïde à Serrières.- Bull.SNSN., 16, p.180-183, 1 pl.
- MORTIMER Clifford H. (1941-1942): The exange of dissolved substances between mud and water in lakes.- J.Ecol., 29, p.280-329 et, 30, p.147-201, 46 fig., 5 tabl.
- (1952): Water movements in lakes during summer stratification; evidence from the distribution of temperature in Windermere.- Phil. Trans., Series B, 236, p.355-404, 22 fig., 2 tabl.
 - (1953a): A Review of Temperature Measurement in Limnology.- Mitt. intern.Ver.Limnol., No.1, 25 p., 6 fig., 1 tabl.
 - (1953b): The Resonant Response of Stratified Lakes to Wind.- Schweiz. Z.Hydrol., 15, p.94-151, 27 fig., 9 tabl.
 - (1956): The oxygen content of air-saturated fresh waters, and aids in calculating percentage saturation.- Mitt.int.Ver.Limnol., No.6, 5 fig., 2 tabl.
 - and MOORE W.H. (1953): The use of thermistors for the measurement of lake temperatures.- Mitt.intern.Ver.Limnol., No.2, 42 p., 14 fig., 2 tabl.
- MUCKLE Richard (1956): Die limnologischen Voraussetzungen für eine Gross-Trinkwasserentnahme aus dem Ueberlingersee (Bodensee).- Gas- u. Wasserfach, 97, p.213-22, 8 fig., 11 tabl.
- MUELLER Hans (1938): Beiträge zur Frage der biochemischen Schichtung im Lunzer Ober- und Untersee.- Int.Rev.Hydrobiol., 36, p.433-500, 30 fig., 11 tabl.
- MUELLER R. und WIDEMANN O. (1955): Die Bestimmung des Nitrat-Ions in Wasser.- Vom Wasser, 22, p.247-271, 3 fig., 5 tabl.
- MUSY M. (1880): Statistique sur la distribution des poissons dans les lacs et les cours d'eau du canton de Fribourg.- Bull.SFSN., 1, p.90-104, 1 tabl.
- (1921): La pêche dans le lac de Neuchâtel en 1917.- Bull.SFSN., 25, p.23-28, 1 tabl.
- MAGY Istvan (1939): A Balaton phytoplanktonjának quantitativ vizsgalata. I. A Balaton phytoplanktonja vertikális eloszlása Tihanyban 1938. VIII.16-20-ig. (Quantitativen Untersuchungen am Phytoplankton des Balatons. I. Die vertikale Verteilung des Phytoplanktons im Balaton bei Tihany, vom 16.VIII bis 20.VIII.1938).- Magy.Biol.Kut.Munk., 11, p.251-257, 3 tabl., 4 pl.
- NAUMANN Einar (1927): Ziel und Hauptprobleme der regionalen Limnologie.- Bot.Notiser, p.81-103, 2 fig., 3 tabl.
- (1930): Einführung in die Bodenkunde der Seen.- Binnengewässer, 2, Stuttgart, Schweizerbart, 126 p., 28 fig., 8 tabl., 7 pl.
 - (1931): Limnologische Terminologie.- Hdb.d.biol.Arbeitsmethoden von E.Abderhalden, Abt.IX, Teil 8, Berlin, Urban u.Schwarzenberg, 776 p., 158 fig., nombr.tabl.

- NAUMANN Eimar(1932):Grundzüge der regionalen Limnologie.- Binnengewässer,11,Stuttgart,Schweizerbart,176 p.,31 fig.,8 tabl.,8 pl.
- NICOLAS(1879):Couverture des terrains exondés par la correction des eaux du Jura.- Bull.SNSN.,11,p.439.
- NOLL W.(1937):Der Chemismus des Mainwassers im Wechsel der Jahreszeiten.- Arch.Hydrobiol.,31,p.58-67,11 fig.
- NORMES FRANCAISES CONCERNANT LES ESSAIS DES EAUX(1950-1960):- Paris, AFNOR éd.,83 p.,2 fig.,6 tabl.
- NORMES INTERNATIONALES APPLICABLES A L'EAU DE BOISSON(1958).- Genève, Organisation mondiale de la Santé éd.,164 p.,nombr. tables.
- NORMES SUISSES CONCERNANT LA CHIMIE DES EAUX(1948).- Zurich,Association suisse de normalisation(SNV),22 p.
- NOVEL Emile(1960):De quelques études bactériologiques des eaux du Léman,prélevées dans le Petit-Lac durant les années 1957,1958 et 1959.- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.271-279,6 tabl.
- et BURKARD P.(1959a):A propos de l'analyse colimétrique des eaux par la méthode des membranes filtrantes.- Mitt.Lebensw.Hyg.,Bern,5 p.186-206,5 tabl.
 - - (1959b):Des limites de précision de la méthode utilisant la technique des membranes filtrantes.- Mitt.Lebensw.Hyg.,Bern,50,p.292-309,16 fig.,14 tabl.
- RUEMANN Wilhelm(1936):Die Leitfähigkeit des Calciumbikarbonates und die Bestimmung der Sulfate und Gesamthärte in natürlichen Gewässern mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit.- Naturwissenschaft.,24,p.693-696,3 fig.,2 tabl.
- (1938):Die Verbreitung des Rheinwassers im Bodensee.- Int.Ber.Hydrobiol.,36,p.502-530,16 fig.,6 tabl.
 - (1960):Que savons-nous actuellement sur l'état et la récente évolution du lac de Constance?Quels points restent à examiner?- Eau, Air,Santé,8,p.81.
- RYDBGGER Paul(1957):Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizerseen.- Beitr.Geol.Schweiz,Nr.9,Bern,Kummerly & Frey, 80 p.,57 fig.,24 tabl.
- NYGAARD Gunnar(1938):Hydrobiologische Studien über dänische Teiche und Seen.I.Teil:Chemisch-physikalische Untersuchungen und Planktonwägungen.- Arch.Hydrobiol.,32,p.523-692,39 fig.,17 tabl.
- OHLE Waldemar(1932):Eine Selbstauflösevorrichtung zur Entnahme von bodennahen Wasserproben in Seen.- Arch.Hydrobiol.,23,p.690-693,2 fig.
- (1934):Chemische und physikalische Untersuchungen norddeutscher Seen.- Arch.Hydrobiol.,26,p.386-464,584-658,49 fig.,117 tabl., 3 pl.
 - (1953):Die chemische und die elektrochemische Bestimmung des molekular gelösten Sauerstoffs der Binnengewässer.- Mitt.intern.Ver.

Limnol., No. 3, 44 p., 14 fig., 10 tabl.

CELE Waldemar (1958): Stoffwechselfynamik der Seen in Abhängigkeit von der Gasausscheidung ihres Schlammes.- Gas- u. Wasserfach, 99, p. 744-745.

- (1961): Tagesrhythmen der Photosynthese von Planktonbiocoenosen.- Verh. Int. Ver. Limnol., 14, p. 113-119, 3 fig.

OSTERVAUD Jean-Frédéric d' (1861): Bateau du môle de Neuchâtel au dessus de la mer.- Bull. SNSN., 5, p. 248-252.

OSTERVAUD M. (1835): Notes sur l'élévation du lac de Neuchâtel au-dessus de la mer.- Mém. SNSN., 1, p. 146-148.

PAINTER H.A., VINEY E. and BYWATERS Avril (1960): Composition of Sewage and Sewage Effluents.- The Institute of Sewage Purification, Meeting paper: London, 8th Dec., 11 p., 5 fig., 8 tabl.

PAPP Ferenc von (1941): A Balaton Környékének földtani felépítéséről. (Ueber den geologischen Aufbau des Balaton-Gebietes).- Magy. Biol. Kut. Munk., 13, p. 187-197, 1 carte.

PARKS R.Q., HOOD S.L., HURWITZ Charles & ELLIS G.H. (1943): Quantitative Chemical Microdetermination of Twelve Elements in Plant Tissue. A Systematic Procedure.- Industr. Engng. Chem. (Anal.), 15, p. 527-533, 1 fig., 4 tabl.

PATRICK Ruth (1948): Factors Effecting the Distribution of Diatoms.- Bot Rev., 14, p. 473-524.

PEARSALL W.H. (1930): Phytoplankton in the english lakes. I. The proportions in the waters of some dissolved substances of biological importance.- J. Ecol., 18, p. 306-320, 2 fig., 3 tabl.

- (1932): Phytoplankton in the English lakes. II. The composition of the phytoplankton in relation to dissolved substances.- J. Ecol., 20, p. 241-262, 1 fig., 9 tabl.
- et HEWITT T. (1933): Light penetration into fresh water. II: Light penetration and changes in vegetation limits in Windermere.- J. exp. Biol., 10, p. 306-312, 2 fig., 3 tabl.
- et ULLYOTT P. (1933): Light penetration into fresh water. I: A thermionic potentiometer for measuring light intensity with photo-electric cells.- J. exp. Biol., 10, p. 293-305, 6 fig., 3 tabl.
- (1934): Light penetration into fresh water. III: Seasonal variations in the light conditions in Windermere in relation to vegetation.- J. exp. Biol., 11, p. 89-93, 3 fig., 1 tabl.

PENNINGTON Winifred (1942): Experiments on the utilization of nitrogen in fresh water.- J. Ecol., 30, p. 326-340, 1 fig., 13 tabl.

PERREGAUX J. de (1901): Crue extraordinaire des lacs du Jura.- Bull. SNSN., 29, p. 455.

PERRET E. et JAQUEROD A. (1918): Recherches sur la radioactivité des eaux neuchâteloises et seelandaises.- Arch. Sci. phys. nat., 45, p. 277-297,

336-348, 418-437, 6 fig., 1 pl.

PERRET Jean-Luc (1952): Les Hirudinées de la région neuchâteloise.- Bull. SNSN., 75, p.89-138, 15 fig., 1 carte, 3 pl.

PERROT L. et JAQUET-DROZ (1811): Informations sur les poissons des lacs de Neuchâtel, de Bienna, de Morat et du Doubs.- Manuscrit non publié, Bibl. de la ville, Neuchâtel.

PERROT, Noger de (1961): Considérations sur la deuxième correction des eaux du Jura. Influence sur le climat.- Bull. SNSN., 84, p.204-206.

PERROT, Samuel de (1896): Notes explicatives concernant les jaugeages de la Serrière.- Bull. SNSN., 24, p.199-202, 1 tabl., 1 pl.

- (1897): Données hydrologiques sur le canton de Neuchâtel en 1896.- Bull. SNSN., 25, p.231-236, et 299, 1 tabl., 4 pl.
- (1898): Données hydrologiques et météorologiques dans le canton de Neuchâtel en 1897.- Bull. SNSN., 26, p.251-304, 426-428, 26 tabl., 11 pl.
- (1899): Données hydrologiques dans le canton de Neuchâtel en 1898.- Bull. SNSN., 27, p.261-263, 291, 4 pl.
- (1900): Idem en 1899.- Bull. SNSN., 28, p.222-232, 255, 3 tabl., 4 pl.
- (1901): Données hydrologiques et météorologiques dans le canton de Neuchâtel en 1900.- Bull. SNSN., 29, p.242-251, 446, 1 tabl., 4 pl.
- (1902a): Données hydrologiques de 1901.- Bull. SNSN., 30, p.477-478.
- (1902b): Sur l'influence de la correction des eaux du Jura sur le niveau du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 30, p.495-497.
- (1905a): Données hydrologiques et météorologiques dans le canton de Neuchâtel de 1901 à 1904.- Bull. SNSN., 33, p.213-229, 247, 24 tabl.
- (1905b): Rapport sur la question de la colonne météorologique.- Bull. SNSN., 33, p.243-245.
- (1905c): Erosion des grèves du lac en vingt ans.- Bull. SNSN., 33, p.246.
- (1907a): De l'influence de la correction des eaux du Jura sur le niveau du lac de Neuchâtel de 1802 à nos jours.- Bull. SNSN., 34, p.296.
- (1907b): Erreur dans la fixation du niveau de l'ancien môle.- Bull. SNSN., 34, p.296.
- (1908): Données hydrologiques et météorologiques dans le canton de Neuchâtel, de 1905 à 1907.- Bull. SNSN., 35, p.76-85, 19 tabl.
- (1910): Observations limnimétriques et météorologiques faites dans le canton en 1909.- Bull. SNSN., 37, p.436.
- (1914): Données hydrologiques dans le canton de Neuchâtel, de 1908 à 1913.- Bull. SNSN., 40, p.240-242, 27 tabl.
- (1921): Hydrologie des trois lacs jurassiens.- Bull. SNSN., 45, p.144.
- (1922): Données hydrologiques dans le canton de Neuchâtel de 1914

à 1921.- Bull.SNSN.,46,p.68-69,32 tabl.

PEPROT,Samuel de(1927):Données hydrologiques des trois lacs jurassiens de 1921 à 1923.- Bull.SNSN.,51,p.209-210,6 tabl.

- (1928a):Sondages et profils thermométriques entre Neuchâtel et Portalban.- Actes SESN.,Lausanne,II,p.143-145,1 tabl.
- (1928b):Technique opératoire des Sondages thermométriques.- Actes SESN.,Lausanne,II,p.145-146.
- (1928c):Données hydrologiques des trois lacs jurassiens,1924 et 1925.- Bull.SNSN.,52,p.132,4 pl.
- (1929a):Observations thermométriques à Neuchâtel entre 1864 et 1928,en relation avec la première correction des eaux du Jura.- Actes SESN.,Davos,II,p.135.
- (1929b):Profils thermométriques entre Neuchâtel et Portalban.- Actes SESN.,Davos,II,p.135.
- (1930):Données sur la correction des eaux du Jura.Observations de température du lac de Neuchâtel et de la Thièle.Leur relation avec celles de l'Observatoire de Neuchâtel et le vignoble.- Bull.SNSN.,54,p.135-136,140-141.
- (1931):Nouvelle correction des eaux du Jura.- Bull.SNSN.,55,p.113.
- (1932):Sondages thermométriques du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,57,p.149-168,24 fig.
- (1933):A propos de la correction des eaux du Jura.- Bull.SNSN.,38,p.129-130.

PETER A.(1922):Die Juragewässerkorrektion.- Bern,237 p.,27 annexes.

PIA Julius(1933):Kohlensäure und Kalk.- Binnengewässer,13,Stuttgart, Schweizerbart,183 p.,17 fig.,58 tabl.,6 pl.

PIAGET Jean(1912):Supplément au catalogue des Mollusques du canton de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,39,p.74-89,8 fig.,

- (1914a):Premières recherches sur les Mollusques profonds du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,40,p.148-171,18 fig.
- (1914b):Malacologie du Vully.- Mém.SFSN.,1,p.69-119,6 tabl.

PIERREHUMBERT W.(1926):Dictionnaire historique du parler neuchâtelois et suisse romand.- Neuchâtel,V.Attlinger,éd.,764 p.

FIGUET Emile(1904):Quelques observations sur l'anatomie de l'appareil circulatoire de certains Oligochètes limicoles.- Bull.SNSN.,32,p.159-161,364.

- (1911):Les conditions de la vie au fond des lacs.- Bull.SNSN.,38,p.88.

FITTARD Eugène(1896):Sur le Plankton des lacs du Jura.- Arch.Sci.phys.nat.,2,p.612-615.

- (1897):Sur la répartition des organismes inférieurs à la surface de quelques lacs suisses.- Bull.SNG.,2,p.165-181,1 fig.,2 tabl.

- PLANCHEREL M.(1921): Sur le calcul des seiches de nos lacs.- Bull.SFSN., 25, p.100-102.
- PLEW Wayne F. and PENNACK Robert W.(1949): A seasonal investigation of the vertical movements of zooplankters in an Indiana lake.- Ecology, 30, p.93-100, 3 fig., 2 tabl.
- PITTET L.(1930): Influence des oiseaux et des poissons piscivores sur l'économie piscicole du lac de Neuchâtel.- Bull.suisse Pêch., 31, p.34-38, 2 tabl.
- POCEROY Lawrence B.(1960): Residence Time of Dissolved Phosphate in Natural Waters.- Science, 131, p.1731-1732, 1 tabl.
- PORTMANN Jean-Pierre(1955): Pétrographie des moraines du glacier würmien du Rhône dans la région des lacs subjurassiens(Suisse).- Bull.SRG. 51, p.13-55, 19 fig., 7 tabl.
- (1960): Nouvelle classification des sédiments meubles.(Classification U.S.C.S.).- Rev.techn.suisse Meneur., Génie rur., Photograph., 58, p.398-406, 2 tabl.
- PORTNER Claude(1951a): La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchâtel. Etude chimico-physique.- Thèse, Uni.Ntel., Bâle, Birkhäuser, éd., 14 fig., 34 tabl.
- (1951b): Le mécanisme de la précipitation du CO_3Ca et la détermination de l'épaisseur du dépôt annuel de la vase dans le lac de Neuchâtel.- Geol.Rdsch., 39, p.212-216.
 - (1951c): Mesure de la dureté temporaire de l'eau du lac de Neuchâtel par la conductibilité.- Mitt.Lebenen.Hyg., Bern, 42, p.312-315, 2 tabl.
 - (1952): Différents aspects de l'étude géochimique et hydrologique du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 73, p.225.
- POVOLEDO Domenico(1961a): Ulteriori studi sulle sostanze organiche disciolte nell'acqua del Lago Maggiore: Frazionamento e separazione delle proteine dai peptidi e dagli aminoacidi liberi.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol., 13, p.203-222, 4 tabl.
- (1961b): Studi sulle sostanze organiche dei sedimenti lacustri.- Verh.int.Ver.Limnol., 14, p.256-262, 1 tabl.
- PREVOT A.-R.(1950): Problèmes de bactériologie marine.- Confér.Centre Rec. Océanogr, Paris, 5 p.
- (1958): Utilité de la Bactériologie marine dans le Présent et l'Avenir.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco, 55, No.1114, 22 p.
- QUARTIER Archibald(1943): Pêche et statistique dans le lac de Neuchâtel. Pêch.suisse, 7, p.73.192-193, 5 fig.
- (1944a): Quelle est l'influence des facteurs météorologiques sur le rendement d'un lac?.- Pêch.suisse, 8, p.102, 1 fig.
 - (1944b): La pêche dans le lac de Neuchâtel en avril 1944.- Pêch.suisse, 1, p.257.

- QUARTIER Archibald(1945): La pêche dans le lac de Neuchâtel-I. La pêche des corégonides.- Bull.SNG., 50/2, p.3-30, 13 fig., 2 tabl.
- (1947): Quelques points nouveaux concernant l'étude des lacs.- Bull.SNG., 53, p.47-58, 3 fig., 4 tabl.
 - (1948a): Le lac de Neuchâtel a-t-il été corrigé?.- Bull.SNSE., 71, p.160.
 - (1948b): Le lac de Neuchâtel.- Mém.SNG., 1, Baconnière, Ntel., 164 p., tabl., 15 fig., 1 carte.
 - (1948c): Sur le comportement de *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Ktz dans les trois lacs sub-jurassiens.- Schweiz.Z.Hydrol., 10, p.13-22, 5 fig., 2 tabl.
 - (1951a): Les Corégonides du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSE., 74, p.163.
 - (1951b): La pêche des corégonides dans le lac de Neuchâtel.- Bull.SNSE., 74, p.170.
 - (1951c): Le cycle biologique annuel de trois Cladocères planctoniques du lac de Neuchâtel.- Schweiz.Z.Hydrol., 13, p.1-4, 1 fig., 2 tabl.
 - (1951d): Morphologie et biologie de *Salvelinus alpinus* dans le lac de Neuchâtel.- Schweiz.Z.Hydrol., 58, p.631-637, 1 tabl.
 - (1954): Les Corégonides du lac de Neuchâtel et leur pêche.- Colloque d'économie piscicole des lacs à corégonides, Thonon, 10 mars, p.16-19.
 - (1955): L'Arense et ses truites.- Schweiz.Z.Hydrol., 17, p.193-204, 4 fig., 6 tabl.
 - (1956a): La morphologie et l'origine du lac de Neuchâtel telles qu'elles sont révélées par les sondages aux ultra-sons.- Bull.SFSN., 46, p.5-30, 8 fig.
 - (1956b): Observations sur la fraie des Corégonides du lac de Neuchâtel.- Rev.suisse Zool., 63, p.385-393, 1 fig.
 - (1957a): Exploration hydrographique du lac de Morat par des sondages aux ultra-sons.- Bull.SFSN., 47, p.5-15, 3 fig.
 - (1957b): La morphologie et l'origine du lac de Neuchâtel telles qu'elles sont révélées par le sondage aux ultra-sons.- Bull.SNSN., 80, p.238-239.
 - (1959a): Note préliminaire concernant les sédiments du lac de Neuchâtel.- Schweiz.Z.Hydrol., 21, p.1-6, 1 fig.
 - (1959b): Etude préliminaire des courants du lac de Neuchâtel.- Schweiz.Z.Hydrol., 21, p.7-18, 3 fig., 3 tabl.
- QUARTIER-LA-TENTE Edouard(1897): Le canton de Neuchâtel.- [Neuchâtel, Attinger éd., p.90-103.
- QUENEY Paul(1950): Liaisons entre la météorologie et l'océanographie.- Confér.Centre Rech.Océanogr., Paris, No.5, 4 p., 1 fig.
- RAMDOHR Ewald(1960): Strömungsuntersuchungen mit radioaktiven Nukliden. Gas-u. Wasserfach, 101, p.853-855.

Rapport du comité météorologique de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel, sur les phénomènes qui se sont passés en 1855.⁽¹⁸⁵⁴⁾ Bull. SNSN., 4, p.17-49.

Rapport du Comité météorologique de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel pour l'année 1858.⁽¹⁸⁵⁹⁾ Bull. SNSN., 5, p.102-154.

RAVERA Oscar(1951): Velocità di corrente e insediamenti bentonici. Studio su una lancia del Fiume Toce.- Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 6, p.221-267, 12 fig., 10 tabl.

- e VIDO Ludovico(1961): Misura del Mn-54 in popolazioni di Unio pictorum L. (Molluschi, Lamellibranchi) del Lago Maggiore.- Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 13, p.75-84, 5 fig., 1 tabl.

RAWSON D.S.(1951): The total mineral content of lake waters.- Ecology, 32 p.669-672, 1 fig.

RENOU E.(1873): Note sur les hauteurs du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 2, p.345-348, 1 tabl.

RETHLY Antal(1940): A Balaton és környékének éghajlata. (Ueber das Klima des Balaton-Sees und dessen Umgebung).- Magy. Biol. Kut. Munk., 12, p.383-397, 1 fig.

REVELLE R. et SCHAEFER M.B.(1961): Les eaux résiduaires radioactives. Recherches océanographiques nécessaires en vue de leur rejet sans danger dans la mer.- L'Eau, 48, p.10-19, 1 tabl.

REVERDIN L.(1921): La faune néolithique de St. Aubin (Port-Conty).- Actes SHSN., Schaffhausen, II, p.188-189, 1 tabl.

RICHARD C. et VAN CO Nguyen(1961): Relation entre la résistivité d'une eau et son taux de minéralisation. Modification de la règle de Do- rochewski.- L'Eau, 48, p.22-26, 2 tabl.

RIGLER F.H.(1956): A tracer study of phosphorus cycle in lake water.- Ecology, 37, p.550-562, 9 fig., 5 tabl.

RISLER E. et WALTHER(1877): Analyse chimique du limon de fond de quelque lacs suisses.- Bull. SVSN., 14, p.122-128, 1 tabl.

RITTER Guillaume(1864a): Examen des débris de roseaux du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 6, p.429.

- (1864b): Cloche à plongeur pour explorer le fond du lac.- Bull. SNSN. 6, p.532.
- (1879): A propos du limnimètre de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 11, p.59-60
- (1882a): De l'action des vagues sur les sables des bords du lac.- Bull. SNSN., 12, p.114-119.
- (1882b): Sur la nature des taches du lac de Neuchâtel.- Bull. SNSN., 12, p.158-163.
- (1882c): Plan topographique d'aménagement des grèves de Cudrefin.- Bull. SNSN., 12, p.286-287.
- (1882d): Plan d'aménagement des grèves du lac de Neuchâtel, depuis les Saars jusqu'à Préfargier.- Bull. SNSN., 12, p.287-288.

- RITTER Guillaume(1888a):Projet d'alimentation de Paris et des localités environnantes au moyen d'une dérivation des eaux du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,16,p.155-166,5 fig.
- (1888b):Utilisation des eaux du lac de Neuchâtel.- Actes SHSN., p.48,209-216.
 - (1889a):Formation de quelques sources du Jura neuchâtelois et en particulier de la source néocomienne de Bonvillars.- Bull.SNSN., 17,p.25-35,10 fig.
 - (1889b):Note sur le sondage exécuté en avant du Crêt par la Commune de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,17,p.79-81,2 fig.
 - (1889c):Notice sur la formation des lacs du Jura et sur quelques phénomènes d'érosion des rives de ces lacs.- Bull.SNSN.,17,p.87-107,10 fig.
 - (1889d):Pureté des eaux profondes des lacs suisses.- Bull.SNSN.,17 p.241-244.
 - (1895):Sur l'hydrologie des sources néocomiennes en général et plus particulièrement sur celle des sources de Gorgier(tannes) et de Saint Aubin.- Bull.SNSN.,21,p.88-99,5 fig.
 - (1896):La Naiss.- Bull.SNSN.,24,p.88-110,259-260,5 fig.
 - (1898):Origine des lacs du pied du Jura.- Bull.SNSN.,26,p.395.
 - (1899):Sur la force motrice du Seyon.- Bull.SNSN.,27,p.146,166,6pl
 - (1900):Sur l'hydrologie neuchâteloise.- Bull.SNSN.,28,p.158-179,26 12 fig.
 - (1902):Sur la disparition des falaises de la rive sud du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,30,p.362-367,500-501,2 fig.
 - (1903):Sur l'utilisation des eaux d'égoutte et des rahlons.- Bull. SNSN.,31,p.390-392.
- HIVIER Odette(1936):Recherches hydrobiologiques sur le lac de Morat.- Bull.SNSN.,61,p.125-181,16 graph.,5 fig.,2 pl.
- ROBERT Henri(1920):A propos du Planeton du Lac de Neuchâtel.- Actes SHS Neuchâtel,II,p.220-222.
- (1921):Contribution à l'étude du zooplaneton du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,45,p.54-124,10 pl.,64 tabl.
 - (1922):L'emploi du filet et de la pompe dans les pêches de plancton.Notes critiques de méthodologie.- Ann.Biol.lacust.,11,p.208-240,10 fig.
 - (1924):Note sur le plancton des lacs de Neuchâtel,Bienne et Morat. Bull.SNSN.,48,p.17-24,1 fig.
 - (1927):Sur la variabilité de Daphnia longispina var.hyalina(Leydig du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,51,p.1-19,29 fig.,1 pl.,8 tabl.
 - (1931):La distribution du plancton animal dans les couches moyennes et profondes des grands lacs tempérés.- Bull.SNSN.,55,p.3-9.

- KODDE Wilhelm(1948):The ionic composition of lake waters.- Verh.int.Ver
Limnol.,10,p.377-386,21 fig.,2 tabl.
- RODIER J.(1960):L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau.Eaux
naturelles-Eaux usées,2è.ed.,Dunod,Paris,358 p.,nombr.fig., nombr
tabl.
- ROMANOVSKY V.(1950):Les remontées des eaux profondes dans la baie de
Villefranche.- Cah.Centre Rech.Océanogr.,Paris,7 p.,6 fig.
- (1959):La conquête des fonds marins.- Coll.Microcosme:Le Rayon de
la Science,Paris,Edit.du Seuil,191 p.,90 fig.
- ROSEN Félix(1919):Recherches sur le développement des Cestodes.1-Le
cycle évolutif des Hothriocéphales.Etude sur l'origine des Cesto-
des et leurs états larvaires.- Bull.SNSN.,45,p.241-300,4 fig.,3 pl
- HOTSCHI H.(1954):Méthode pratique pour l'étude du système gaz carboni-
que dans l'eau de mer.- Trav.Centre Rech.Océanogr.,1,No.6.,6 p.,
1 tabl.
- ROUCH Jules(1931):L'Atmosphère et la prévision du temps.- Coll.A.Colin,
Paris,2è.ed.,207 p.,35 fig.
- (1943):Traité d'océanographie physique.- T.1:Sondages,256 p.,11
tabl.,100 fig.,Paris,Payot.
 - (1946):Traité d'océanographie physique.- T.2:L'eau de mer,349 p.,
9 tabl.,150 fig.,Paris,Payot.
 - (1948):Traité d'océanographie physique.- T.3:Les mouvements de la
mer,411 p.,2 tabl.,176 fig.,Paris,Payot.
 - (1954):Hottle Papers.- Bull.Inst.Océanogr.Monaco,51,No.1046,7 p.,
2 fig.,2 tabl.
 - (1957):Les océans.- Paris,Coll.A.Colin,No.320,216 p.,13 fig.,7tabl
 - (1959):Les découvertes océanographiques modernes.- 251 p.,22 fig,
7 tabl.,Paris,Payot éd.
- ROUGEMONT,Ph.de(1879a):A propos de préparations de Diatomées.- Bull.
SNSN.,11,p.399.
- (1879b):Saiche dans le port de Neuchâtel.- Bull.SNSN.,11,p.430.
 - (1882):Coloration rouge de la glace sur le lac de Neuchâtel.- Bull.
SNSN.,12,p.73.
- ROUND F.E.(1960):Studies on bottom-living Algae in some lakes of the
English Lake District.Part IV:The seasonal cycles of the Bacilla-
riophyceae.- J.Ecol.,48,p.529-547,5 fig.
- RUSS H.(1886):Débit de la Serrière.- Bull.SNSN.,15,p.196.
- (1889):Etude sur la Serrière.- Bull.SNSN.,17,p.222.
- RUTNER Franz(1921):Das elektrolytische Leitvermögen verdünnter Lösun-
gen unter dem Einfluss submerger Gewächse.1.- S.B.öst.Akad.Wiss,
130,p.71-108,4 fig.,7 tabl.
- (1930):Das Plankton des Lunzer Untersees,seine Verteilung in Raum

und Zeit während der Jahre 1908-1913.- *Int.Rev.Hydrobiol.*, 23, p.1-138, 161-287, 89 fig., 27 tabl.

RUTNER Franz(1931): Hydrographische und hydrochemische Beobachtungen auf Java, Sumatra und Bali.- *Arch.Hydrobiol.*, Suppl. 8, p.197-454, 71 fig., 37 tabl., 17 pl.

- (1938): Limnologische Studien an einigen Seen der Ostalpen (Seen des Salzkammergutes, des Oetscher- und Hochschwabgebietes).- *Arch.Hydrobiol.*, 52, p.167-319, 22 fig., 10 tabl.
- (1955): Ueber die Entstehung meromiktischer Zustände in einem kaum drei Meter tiefen Quallsee.- *Mem.Ist.Ital.Hydrobiol.*, suppl. 8, p.265-280, 4 fig.
- und SAUBERER Franz(1938): Durchsichtigkeit des Wassers und Planktonschichtung. Einige Beobachtungen in den Lunzer Seen.- *Int.Rev.Hydrobiol.*, 37, p.405-419.

SAINT-GUILY Bernard(1957a): Sur le coefficient vertical de turbulence dans les courants de vent et de pente.- *Bull.Inst.Océanogr.Monaco*, 54, No.1090, 6 p., 5 fig.

- (1957b): Les Méandres des Veines de Courant dans les Océans.- *Bull.Inst.Océanogr.Monaco*, 54, No.1108, 11 p., 6 fig., 3 tabl.
- (1959): Note sur l'action de la force de Coriolis dans la circulation convective.- *Bull.Inst.Océanogr.Monaco*, 56, No.1148, 7 p., 3 fig.
- (1961): Sur la diffusion turbulente verticale devant Monaco.- *Bull.Inst.Océanogr.Monaco*, 58, No.1193, 6 p., 1 fig., 4 tabl.

SANDOZ René(1949): La température à Neuchâtel de 1864 à 1943.- *Bull.SNSN* 72, p.143-216, 16 fig., 24 tabl.

SARASIN Edouard(1892): Sur les seiches du lac de Neuchâtel.- *Notes SNSN*, p.57.

- et DU PASQUIER Léon(1895): Les seiches du lac de Neuchâtel.- *Bull.SNSN*, 23, p.3-9, 253-254, 1 tabl.

SAUBERER Franz(1947): Beiträge zur Kenntnis der optischen Eigenschaften der Kärntner Seen.- *Arch.Hydrobiol.*, 41, p.259-314, 7 fig., 15 tabl.

- und ECKEL O.(1938): Zur Methodik der Strahlungsmessungen unter Wasser.- *Int.Rev.Hydrobiol.*, 37, p.257-289.

SAUNDERS J.T.(1927): The hydrogen-ion concentration of natural waters... The relation of pH to the pressure of carbon dioxide.- *J.exp.Biol.*, 4, p.46-72, 3 fig., 4 tabl.

SAVOIE-PETITPIERRE Paul(1905): Carte piscicole du lac de Neuchâtel.- *Bull.SNSN*, 33, p.236.

SCHARDT Hans(1882): Dépôts lacustres observés sur le bord du lac de Neuchâtel.- *Bull.SNSN*, 18, p.XLV.

- SCHARDT Hans(1892): Notice sur l'effondrement du quai du Trait de Baye à Montreux précédée de quelques considérations générales sur la morphologie géophysique des rives lacustres, la formation des cônes de déjection, etc.- Bull.SVSN., 28, p.231-265, 1 fig., 3 pl.
- (1898a): Origine des lacs du pied du Jura.- Bull.SNSN., 26, p.395.
 - (1898b): L'origine des grands lacs du Jura.- Bull.SVSN., 34, p.I-II;
 - (1901): Mélanges géologiques sur le Jura neuchâtelois et les régions limitrophes.- Bull.SNSN., 29, p.107-166, 459, 13 fig., 6 pl.
 - (1905): Note complémentaire sur l'origine du lac de Neuchâtel et des lacs euhjurassiens.- Bull.SNSN., 33, p.186-199, 1 fig.
 - (1907): Mélanges géologiques sur le Jura neuchâtelois et les régions limitrophes. XXXIV: Sur la géologie du Mont Vully.- Bull.SNSN. 34, p.264-271, 3 fig.
 - (1910): Sur des cristallisations de calcite dans des eaux souterraines.- Bull.SNSN., 37, p.158-170, 4 fig., 1 pl.
- SCHÉELE Martin(1958): Fünfzig Jahre Archiv für Bydrbiologie. Eine Literatur-Analyse der Limnologie dargestellt an den Bänden 1-50, 1906-1955.- Stuttgart, Schweizerbart Verl., 175 p.
- SCHIEFFELT E.(1921a): Biologische Beobachtungen am Chiemsee.- Allg.Fisch Ztg., 46, p.26-30, 1 fig., 3 tabl.
- (1921b): Die Schichtung des Seenplanktons mit besonderer Berücksichtigung des Chiemsees.- Allg.Fisch.Ztg., 46, p.249-256, 3 fig., 2 tabl.
- SCHENKER Max(1948): Eau du Sayon, sources de l'Arense et eau du lac.- Monatsbull.schweiz.Ver.Ges.u.Wasserfachm., 28, p.297-309, 18 fig.
- SCHLAGINTWEIT-SAKUNLUNSKI, Hermann von(1867): Ueber die Temperatur von Alpenseen in grossen Tiefen nach Beobachtungen im Starnbergersee und im Chiemsee.- S.B.bayer.Akad.Wiss., p.305-316.
- SCHMALZ Josef(1932): Die Sauerstoff- und Härteverhältnisse des Wassers bei den Tag- und Nacht- Untersuchungen von Auerbach 1931 sowie Bemerkungen zu Thienemanns Buch: Der Sauerstoff im entropen und oligotrophen See 1928.- Schweiz.Z.Hydrol., 6, p.31-62.
- (1932/33): Die Oberflächen- und Tiefenströme des Bodensees. III. Der Weg des Rheinwassers im Bodensee.- Schr.Ver.Gesch.Bodensees Umgeb. 60, p.154-210, 9 fig., 32 tabl.
- SCHMASSMANN Hans Jörg(1949): Die Sauerstoffsättigung natürlicher Wässer ihre Ermittlung und ihre Bedeutung in der Hydrologie.- Schweiz. Z.Hydrol., 11, p.430-462, 1 fig., 2 tabl.
- SCHMASSMANN W.(1920): Ueber den Einfluss des Planktons auf die Transparenz und die Sauerstoff- und Kohlensäureschichtung im Davoser See.- Festschr.f.Zschokke, Nr.14, Basel, 11 p., 2 fig., 1 tabl.
- SCHNEIDERLI(1876a): Variation du niveau des eaux des lacs de Neuchâtel, de Bienne et de Morat pendant l'année 1874.- Bull.SNSN., 10, p.218-219, 2 pl.

- SCHEERLI (1876b): Variations du niveau des lacs de Neuchâtel, Sienna et Morat pendant l'année 1875.- Bull.SNSN., 10, p.376-377, 2 pl.
- (1879a): Variation du niveau des eaux des lacs de Neuchâtel, de Sienna et de Morat pendant l'année 1876.- Bull.SNSN., 11, p.165-166, 2 pl
 - (1879b): Rapport annuel sur les observations limnimétriques des lacs de Neuchâtel, Morat et Sienna pendant l'année 1877.- Bull.SNSN. 11, p.341-342, 2 pl.
- SCHULER Walter (1957-1962): Observations météorologiques faites (de 1956 à 1961) à l'Observatoire de Neuchâtel.- Bull.SNSN., 80 à 85, nombr. fig., nombr. tabl.
- SEBESTYEN Olga (1953a): A Balaton planktonjának oligotricha ciliatairól. (On Oligotricha ciliates in the plankton of Lake Balaton).- Annal. Biol.Tihany, 21, p.49-62, 58 fig., 5 tabl.
- (1953b): Mennyiség plaktontanulmányok a Balatonon. II. Evtizedes Valtosások. (Quantitative plankton studies in lake Balaton. II. Decennial changes).- Annal. Biol.Tihany, 21, p.65-89, 16 fig., 8 tabl.
- SEIBOLD Eugen (1956): Wasser, Kalk und Korngrößenverteilung in einem Adria- und Bodensee-Sedimentkern.- Neues Jb.Geol., p.451-470, 6 fig., 5 tabl.
- SERNOW S.A. (1958): Allgemeine Hydrobiologie.- Moskva, 2te. Aufl., 676 p., 192 fig., 64 tabl., Übersetzt v.Königemann, usw., Berlin, VEB Verlag.
- SIERP F. (1951): Die amerikanischen Einheitsverfahren zur Untersuchung von Wasser und Abwasser (Standard Methods for the Examination of Water and Sewage).- 328 p., 20 fig., 19 tabl.
- SINNER, Carl de (1886): Groupe de 50 blocs erratiques sur la grève du lac de Neuchâtel.- Actes SHSN., p.76.
- SIRE E. (1899/1900): Extension d'Erysimum ⁴ strictum sur les graviers des bords du lac de Neuchâtel.- Actes SHSN., Neuchâtel, p.73-74.
- SIRJEAN Gaston (1951): Encyclopédie des eaux de consommation.- 2 vol., en cours de publication, Paris, G.Sirjean éd., nombr.fig., nombr.tabl.
- SNEYERS Raymond (1948): Contribution à l'étude de l'insolation à Neuchâtel.- Bull.SNSN., 71, p.123-130.
- SOCIÉTÉ HELVÉTIQUE DES SCIENCES NATURELLES (1934): Bibliographie 1817-1930.- Bern, Buchdruckerei Böhler, 340 p.
- SOLLBERGER Henry (1946): Analyse d'eaux du Lac de Neuchâtel.- Mitt.Lebensm.Syg.Beru., 37, p.84-91, 6 tabl.
- (1960): Quelques problèmes posés par le lac de Neuchâtel.- Bull.SNC 52, p.85-97, 1 fig.
 - (1961): Le problème des eaux polluées à l'échelle régionale.- Bull.SNSN., 84, p.200-201.
 - (1962): Evolution inquiétante du Lac de Neuchâtel.- Eau, Air, Santé, 10, p.19.
- SOROKIN Yu., I. (1958): The role of chemosynthesis in the production of

- organic substance in water reservoir.III.Summer productivity of chemosynthesis in water.- Mikrobiologija, 27, p.357-365.
- SPINNER Henri(1933):La correction des eaux du Jura et le climat littoral.- Bull.SNSN, 58, p.33-48 et 128,3 fig.,6 tabl.
- (1936):Le Grand Marais et le lac de Neuchâtel depuis le retrait des glaciers.- Bull.SNSN, 61, p.224.
- STAEDLER Max(1934):Untersuchungen über die hygienisch bedeutungsvollen Strömungsvorgänge im Zürichsee, besonders im untern Seebecken.- Thèse EPF, Zurich, 56 p.,5 fig.
- STANGE-BURSCHE Eva-Maria(1963):Beobachtungen und Untersuchungen über die horizontale Phytoplanktonverteilung in Seen.- Arch.Hydrobiol., 52, p.351-372,19 fig.,8 tabl.
- STANGENBERG Marian(1961):Some remarks on the determination and the content of silica in lake waters.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol., 13, p.17-42, 15 fig.,6 tabl.
- STAUB Robert(1961):Ernährungsphysiologisch-autökologische Untersuchungen an der planktischen Blaualge *Oscillatoria rubescens* DC.- Schweiz.Z.Hydrol., 23, p.82-198,19 fig.,18 tabl.
- STEINBOECK O.(1955):Ueber die Verhältnisse in der Tiefe der Hochgebirgseen.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol., suppl. 8, p.311-343,4 fig.,9 tabl.
- STEINER O.(1919):Die von A.Monard gesammelten Nematoden der Tiefenfauna des Neuenburgersees.- Bull.SNSN, 43, p.142-240,18 fig.
- STEINMANN Paul(1950):Monographie der schweizerischen Koregonen.- Schweiz.Z.Hydrol., 12, p.109-189,340-491, 13(1951), p.54-191,68 fig., 109 tabl.,15 pl.
- STINGELIN Th.(1901):Bemerkungen über die Fauna des Neuenburgersees.- Rev.suisse Zool., 2, p.315-323,1 pl.
- STRAM, Kaare Münster(1931):Feformavn.A Physiographical and Biological Study of a Mountain Lake.- Arch.Hydrobiol., 22, p.491-536,8 fig., 6 pl.,2/ tabl.
- (1939):Conductivity and Reaction in Norwegian Lakes Waters.- Int. Rev.Hydrobiol., 38, p.250-258,2 fig.,5 tabl.
- STROM Kaare(1955):Waters and sediments in the deep of lakes.- Mem.Ist. Ital.Idrobiol., suppl. 8, p.345-356,2 fig.,4 tabl.
- STUDER(1864):Origine des lacs suisses.- Arch.sci.phys.nat., 19, p.89.
- STUMM W. and LEE G.F.(1960):The Chemistry of Aqueous Iron.- Schweiz.Z. Hydrol., 22, p.295-319,7 fig.,2 tabl.
- SUCHET Marysette(1954):Etude physico-chimique des eaux du lac d'Annecy. Ann.Sta.centr.Hydrobiol., 5, p.159-184,10 fig.,5 tabl.
- SUCHLANDT Otto(1937):Methodisches zu Strahlungsmessungen unter Wasser.- Arch.Hydrobiol., 31, p.201-208,2 tabl.
- und SCHMASSMANN W.(1934):Zur Verwendung neuer photoelektrischer Apparate in der Limnologie.- Actes SHSN, Zürich, p.376-379.

- SUCHLANDT Otto und SCHMASSMANN W.(1935):Limnologische Beobachtungen an acht Hochgebirgseen der Landschaft Davos.- Schweiz.Z.Hydrol.,7, p.1-201,Aarau,Sauerländer,25 fig.,10 tabl.,pl.
- SVERDRUP H.U.(1952):Oceanography for Meteorologists.- 2nd.Ed.,London, Allen & Unwin Ltd.,246 p.,70 fig.,4 pl.
- SWANWICK J.D. and WHITE K.J.(1961):Synthetic Detergents and the Sedimentation of Suspended Matter from Sewage.- Water and Waste Treatm J.,sept/oct.,2 p.,3 fig.,3 tabl.
- SZABO Zoltan(1930):A Balaton vizének vegyelemzése.(Die chemische Analyse des Balatonwassers).- Magy.Biol.Kut.Munk.,3,p.488-500,1 fig., 2 tabl.
- TALLING J.-F.(1960):Self-shading effects in natural populations of a planctonic diatom.- Wett.Leben,12,p.235-242,2 fig.
- TERRIER L.(1873):Mesure de la température du lac.- Bull.SNSN,2,p.493.
- THIERAUD Maurice(1908):Notes biologiques sur quelques entomostracés pélagiques du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN,35,p.105.
- (1911):Les rotateurs du canton de Neuchâtel.- Bull.SNSN,38,p.3-16.
 - et FAVRE Jules(1906):Contribution à l'étude de la faune des eaux du Jura.- Ann.Biol.lacust.,1,p.57-113,6 fig.,8 tabl.
- THIENEMANN August(1925):Die Binnengewässer Mitteleuropas.- Binnengewässer,1,Stuttgart,Schweizerbart,255 p.,88 fig.,21 tabl.
- (1928):Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See.- Binnengewässer,4,Stuttgart,Schweizerbart,175 p.,41 fig.,73 tabl.
 - (1931):Der Produktionsbegriff in der Biologie.- Arch.Hydrobiol.,22,p.616-622.
 - (1959):Erinnerungen und Tagebuchblätter eines Biologen.Ein Leben im Dienste der Limnologie.- Stuttgart,E.Schweizerbart'sche Verl., 499 p.,1 fig.,1 pl.
- THOMAS E.A.(1948):Limnologische Untersuchungen am Türlersees.- Schweiz. Z.Hydrol.,11,p.90-177,8 fig.,4 tabl.
- (1949a):Regionallimnologische Studien an 25 Seen der Nordschweiz.- Verh.int.Ver.Limnol.,10,p.489-495,1 fig.,2 tabl.
 - (1949b):Sprungschichtneigung im Zürichsee durch Sturm.- Schweiz.Z. Hydrol.,11,p.527-545,6 fig.,1 tabl.
 - (1950a):Auffällige biologische Folgen von Sprungschichtneigungen im Zürichsee.- Schweiz.Z.Hydrol.,12,p.1-24,10 fig.
 - (1950b):Beitrag zur Methodik der Produktionsforschung in Seen.- Schweiz.Z.Hydrol.,12,p.25-37,4 fig.
 - (1951a):Sturmeinflüsse auf das Tiefenwasser des Zürichsees im Winter.- Schweiz.Z.Hydrol.,13,p.5-23,5 fig.,4 tabl.
 - (1951b):Produktionsforschungen auf Grund der Sedimente im Pfäffi-

Kersee und Zürichsee.- Verh.int.Ver.Limnol.,11,p.409-421,4 fig., 1 tabl.

THOMAS E.A.(1953): Zur Bekämpfung der See-Eutrophierung: Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete.- Monatsbull.schweiz. Ver.Gas-u.Wasserfachm.,33,p.25-32,71-79,3 tabl.

- (1955a): Sedimentation in oligotrophen und eutrophen Seen als Ausdruck der Produktivität.- Verh.int.Ver.Limnol.,12,p.383-393,5 fig
- (1955b): Ueber die Bedeutung der abwasserbedingten direkten Sauerstoffzehrung in Seen.- Monatsbull.schweiz.Ver.Gas-u.Wasserfachm., 10 p.,5 fig.
- (1955c): Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Aegerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol suppl.8,p.357-465,19 fig.,26 tabl.
- (1956): Der Zürichsee, sein Wasser und sein Boden.- Jb.vom Zürichsee 17,p.173-208,Th.Gut & Co,Stäfa ZH,16 fig.
- (1958): Sedimentation und Typeneinteilung des Türlisees.- Verh.int.Ver.Limnol.,13,p.191-195.
- (1961a): Die Verschmutzung des Zürichsees und die Strömungs- und Durchflussverhältnisse bei Rapperswil.- Monatsbull.schweiz.Ver.Gas-u.Wasserfachm.,16 p.,6 fig.
- (1961b): Der Zürichsee, Folgen und Abwehr der Verschmutzung.- Naturf. Ges.Zürich, Protokoll d.Sitz.v.9.1.,2 p.
- und MAERKI E.(1949): Der heutige Zustand des Zürichsees.- Verh.int.Ver.Limnol.,10,p.476-488,9 fig.

THOMAS-PAULI Eugen(1956): Zur Bekämpfung der See-Eutrophierung.- Neue Zürcher Zeitung, Nr.2678, p.7.

THOULET J.(1923): Relation entre la profondeur de la ligne d'apparition des vases et la hauteur des vagues.- C.B.Acad.Sci.Paris,176,p.323-324.

TISON L.J.(1949): Origine des ondes de sable(Ripple-Marks) et des bancs de sable sous l'action des courants.- Ass.int.recherches trav.hydroaul.,3è. réunion,Grenoble,5,6 et 7 sept.,15 p.,nombr.fig.,nombr. tabl.

TONOLLI Vittorio(1951): Un nuovo apparecchio per la cattura di plancton in modo continuo e quantitativo: il "Plancton-Bar".- Mem.Ist.Ital. Idrobiol.,6,p.193-202,3 fig.

- (1961): The distribution of temperature and plankton along the axis of a large lake (Lago Maggiore).- Verh.int.Ver.Limnol.,14,p. 920-926,7 fig.

TRIBOLET Maurice de(1861): Anciens travaux de défense et changements dans le niveau du lac.- Bull.SNSH,5,p.15-18.

- (1879): Sur l'origine des fausses marmites de géants des bords du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSH,11,p.529-530.

- TRIPET Fritz(1882):Découverte de l'Argonaire Faux-Herprun (*Eippophae rhamnoides* L.) au pied des falaises de Marin.- Bull.SNSR,12,p.163.
- (1886):Modifications apportées à la flore du Jura neuchâtelois par l'abaissement des lacs.- Actes SNSR,p.59-60.
 - (1889):Nomination d'une Commission chargée de la publication des observations limnimétriques du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSR,17,p.213.
 - (1893a):Sur les niveaux du lac.- Bull.SNSR,21,p.182.
 - (1893b):Hauteurs du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSR,22,p.313,323.
- TROYON Frédéric(1858):Inondation des vallées de l'Orbe et de la Broye.- Bull.RVSN,6,p.69-71.
- TUTIN Winifred(1955):Preliminary observations on a year's cycle of sedimentation in Windermere,England.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol.,suppl.8,p.467-484,7 fig.,1 ts bl.
- ULLYOTT Philip(1934):Photoelektrische Apparate im Dienste der limnologischen Forschung.- Int.Rev.Hydrobiol.,30,p.164-180,12 fig.
- and KNIGHT F.C.E.(1938):Light penetration into Lake Balaton (A fény behatolása a Balaton vizébe).- Magy.Biol.Kut.Munk.,10,p.254-268,6 fig.,3 tabl.
- UNESCO(1960):Dans le secret des océans.- Le Courrier,13,No.7-8,juillet-août,66 p.,nombr.111.
- URBACH Carl(1934):Die stufenphotometrische Mikroanalyse des Trink- und Nutzwassers.- Mikrochemie,14,p.189-218,321-340,5 fig.,11 tabl.
- U.S.GEOLOGICAL SURVEY(1902):Measurement of color and turbidity in water U.S.Geol.Surv.,Div.of Hydrography,Circ.8.,
- VALLENTYNE J.H. and BIDWELL R.O.E.(1956):The relation between free sugars and sedimentary chlorophyll in lake muds.- Ecology,37,p.495-500,2 fig.,3 tabl.
- VARGA Ludwig(1928):Allgemeine limnobiologische Charakteristik des Fertő.- Int.Rev.Hydrobiol.,12,p.289-294,1 fig.
- VARGA Lajos(1932):Katastrophen in der Bioökose des Fertő- (Neusiedler Sees.- Int.Rev.Hydrobiol.,27,p.130-150,2 fig.
- VEVERS H.G.(1952):Photography of the Sea Floor.- J.Mar.Biol.Ass.U.K.,30,p.101-111,2 fig.,2 tabl.,1 pl.
- VIVIER P.(1960):Température et oxygène dissous en profondeur dans les lacs de barrage artificiel français.- Schweiz.Z.Hydrol.,22,p.350-364,6 tabl.
- VOLLERWEIDER Richard A.(1950):Ökologische Untersuchungen von planktischen Algen auf experimenteller Grund-lage.- Schweiz.Z.Hydrol.,12,p.193-262,9 fig.,31 tabl.

- VOLLENWEIDER Richard A.(1951):Eine Schnellmethode zur Ammoniakbestimmung im Tiefenwasser eutropher Seen.- Schweiz.Z.Hydrol.,13,p.27-28,1 tabl.
- (1955):Ein Nomogramm zur Bestimmung des Transmissionskoeffizienten sowie einige Bemerkungen zur Methode seiner Berechnung in der Limnologie.- Schweiz.Z.Hydrol.,17,p.205-216,1 fig.,5 tabl.,1 pl.
 - (1956a):L'influenza della torbidità provocata dalle acque di pisin nel bacino di Pallanza.(Lago Maggiore).- Mem.Ist.Ital.Idrobiol.,2,p.85-111,4 fig.,8 tabl.
 - (1956b):Das Strahlungsklima des Lago Maggiore und seine Bedeutung für die Photosynthese des Phytoplanktons.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol.,2,p.293-362,7 fig.,14 tabl.
 - (1961a):Photometric studies in inland waters:I.Relations existing in the spectral extinction of light in water.- Mem.Ist.Ital.Idrobiol.,13,p.87-113,17 fig.,4 tabl.
 - (1961b):Some observations on the C-14 method for measuring primary production.- Verb.Int.Ver.Limnol.,14,p.134-139,4 fig.,1 tabl.
 - und FREI Max(1953):Vertikale und zeitliche Verteilung der Leitfähigkeit in einem eutrophen Gewässer während der Sommerstagnation.- Schweiz.Z.Hydrol.,15,p.158-167,4 fig.,4 tabl.
- VOUGA Daniel(1943):Préhistoire du Pays de Neuchâtel des origines aux Francs.- Mém.SNSN,7,Neuchâtel,253 p.,70 fig.,34 pl.,1 carte.
- VOUGA M.(1852):Extrait du mémoire sur la faune ornithologique du bassin du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN,2,p.409-422.
- VOUGA Maurice(1922):L'économie piscicole du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN,46,p.77.
- (1923):Le cycle évolutif de la truite de lac.- Bull.SNSN,47,p.94-95.
 - (1925):Conséquences piscicoles d'une nouvelle correction des eaux du Jura.- Bull.SNSN,49,p.200-201.
 - (1928):La pêche des bondelles dans le lac de Neuchâtel en 1928.- Bull.suisse Pêch.,29,p.50-54,71-76,5 tabl.
 - (1929):Le rôle des palées et des bondelles dans l'économie piscicole du lac de Neuchâtel.- Bull.suisse Pêch.,30,p.115-121,146-153,2 fig.,1 tabl.
 - (1930):Un nouveau poisson dans le lac de Neuchâtel.- Bull.suisse Pêch.,31,p.171-173,1 fig.
 - (1931):Idem.- Bull.SNSN,55,p.120.
 - (1933):Economie piscicole et pisciculture des Corégones.- Bull.SNSN,58,p.131-133.
- VOUGA Paul(1936):Les faits archéologiques en présence de la récente municiation de M.Spinner sur le Grand Marais et le lac de Neuchâtel depuis le retrait des glaciers.- Bull.SNSN,61,p.225-226.

- WANDER I.W.(1942):Photometric Determination of Potassium.- Industr.En-
gng.Chem.,14,p.471-472,1 fig.,1 tabl.
- WASER E. und BLOSCHLIGER G.(1939):Untersuchung des Zürichsees,1936-1938
.- Unters.Öffentl.Gew.Kanton.Zürich,2,93 p.,44 tabl.,8 pl.,Stäfa,
Buchdr.Stäfa AO.
- WASMUND Erich(1928):Die Strömungen im Bodensee verglichen mit bisher in
Binnenseen bekannten Strömen.- Int.Rev.Hydrobiol.,19,p.21-155,4
fig.,36 cartes,1 pl.
- (1932):Entwicklung und Verbesserung der Entnahme-apparatur für Bo-
denproben unter Wasser.- Arch.Hydrobiol.,23,p.646-661,1 pl.
- WEBER Robert(1879):Rapport sur les observations limnimétriques des lacs
de Neuchâtel,Morat et Bienne pendant l'année 1878.- Bull.SNSN,11,
p.608-609,1 pl.
- (1882a):Température du lac de Neuchâtel.River de 1879 à 1880.-
Bull.SNSN,12,p.66-73.
 - (1882b):Rapport sur les observations limnimétriques des lacs de
Neuchâtel,Morat et Bienne pendant l'année 1879.- Bull.SNSN,12,p.
164-165,1 pl.
 - (1882c):Rapport sur les observations limnimétriques des lacs de
Neuchâtel et de Bienne pendant l'année 1880.- Bull.SNSN,12,p.419-
420,1 pl.
 - (1882d):Idem 1881.- Bull.SNSN,12,p.696-697,1 pl.
- WEGMANN Eugène(1950):L'exploration des espaces intercontinentaux.- Bull
SNSN,73,p.81-100,1 fig.,1 tabl.
- (1958):Le cadre naturel des glissements de terrain du Val-de-Tra-
vers,Neuchâtel(Suisse).- Bull.tech.Suisse rom.,No.4,février,8 p.,
5 fig.
- WEISER Jaroslav(1948):Pufferungskurven der Gewässer in der Typologie.-
Schweiz.Z.Hydrol.,11,p.65-71,9 fig.,2 tabl.
- WERESKAGIN O.J.,ANICKOVA N.J. und FORSCHER T.B.(1932):Methoden der hydro-
chemischen Analyse in der limnologischen Praxis.- Arch.Hydrobiol.,
23,p.1-64,167-230,9 fig.,16 tabl.
- WHITNEY Lester V.(1938):Microstratification on inland lakes.- Trans.
Wis.Acad.Sci.Arts Lett.,31,p.155-173,9 fig.
- (1941):A multiple electro-magnetic water sampler.- Trans.Wis.Acad.
Sci.Arts Lett.,32,p.95-97,2 fig.
- WIECKOWSKI K.(1961):Improved Vertical Core Sampler for Collecting the
Bottom Sediments Monoliths.- Bull.Acad.Holon.Sci.,série géol et
géogr.,2,p.129-133,1 fig.
- WIESER Erwin(1956):Die Anwendung einheitlicher Methoden bei der Unters-
uchung des Bodenseewassers.- Gas- u.Wasserfach.,97,p.209-213.
- WIKEN T.(1936):Ueber biogene und abiogene Sauerstoffvariation in Ober-
flächennasser.Einige vorläufige Ergebnisse.- Svensk.bot.Tidskr.,
30,p.165-192,4 fig.,17 tabl.

- WILHEIM Friedrich(1958):Die Neuanlotung des Chiemseebeckens.- Münch. geogr.Hft.,Nr.15,50 p.,5 fig.,4 pl.,1 carte.
- WORLD LIST OF SCIENTIFIC PERIODICALS published in the years 1900-1950. 3d.Edition.- London,(1952),Butterworths Scientific Publications, 1058 p.
- WORTHINGTON E.B.(1930):Observations on the Temperature,Hydrogen-ion concentration,and other physical conditions of the Victoria and Albert Nyanzas.- Int.Rev.Hydrobiol.,24,p.328-357,6 fig.,8 tabl.
- WOYNAROWICH Elek(1941):Néhány Magyarországi víz kémiai sajátosságairól. (Untersuchungen über die chemischen Eigenschaften einiger ungarischer Gewässer).- Magy.Biol.Kut.Munk.,13,p.302-315,31 fig.,2 tabl.
- WUTHRICH Marguerite(1948):Etude du développement des Nauplii de Diaptomus gracilis,O.Sars,et Diaptomus laciniatus,Lilljeborg.- Rev. suisse Zool.,55,p.427-445,15 fig.
- (1955):Contribution à l'étude des corégones du lac de Neuchâtel. Oeufs et alevins de Palée.- Rev.suisse Zool.,62,p.585-599,7 fig., 3 tabl.,2 pl.
 - (1960):Les diatomées du lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN,83,p.7-40,1 carte,7 fig.,3 tabl.,2 pl.
 - (1961):Etude des sédiments du lac de Neuchâtel.Les Diatomées.- Bull.SNSN,84,p.5-19,6 fig.,6 tabl.
 - (1962):Note sur l'apparition d'Aphanizomenon flos-aquae (L) Ralfs dans le lac de Neuchâtel.- Bull.SNSN,85,p.103-108,225.
- YOSHIMURA Shinkichi(1932a):Water Temperature and Dissolved Oxygen in several Subaqueous Basins of Lake Akimoto,Fukushima.- Arch.Hydrobiol.,23,p.279-283,2 fig.,5 tabl.
- (1932b):Seasonal Variation in Content of Nitrogenous Compounds and Phosphate in the Water of Takasura Pond,Saitama,Japan.- Arch. Hydrobiol.,24,p.155-176,6 fig.,13 tabl.
 - (1932c):Calcium in Solution in the Lake Waters of Japan.- Jap.J. Geol.Geogr.,10,p.33-60,2 fig.,7 tabl.
 - (1939):Stratification of Dissolved Oxygen in a Lake during the Summer Stagnation Period.- Int.Rev.Hydrobiol.,38,p.441-448,fig., tabl.
- ZENDER Jacques(1908):Sur la composition chimique de l'eau et des vases des grands lacs de la Suisse.- Thèse,Uni.Genève,65 p.,tabl.
- ZOETL Josef(1957):Neue Ergebnisse der Karsthydrologie.Untersuchungen im Dachsteingebiet mit Hilfe der Sporentriftmethode.- Erdkunde, 11,p.107-117,1 carte.
- ZORELL Franz(1954):Zur Frage des Trophiezustandes einiger oberbayerische Seen(auf Grund von Sauerstoff-Bestimmungen).- Arch.Hydrobiol., 42,p.376-385,6 fig.

ZUELLIG Hans(1955):Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers
Mem.Ist.Ital.Idrobiol.,suppl.8,p.483-530,14 fig.,1 tabl.

- (1956):Das kombinierte Hamm-Kolben-Lot,ein leichtes Bohrgerät zur vereinfachten Gewinnung mehrere Meter langer,ungestörter Sedimentprofile.- Schweiz.Z.Hydrol.,18,p.208-214,5 fig..
- (1938):Beobachtungen über zunehmende Eutrophierung des Sempacher-sees.- Flan,Zürich.,Nr.3,3 p.,3 fig.

- * - - - - -

Liste arrêtée en décembre 1963.

A N N E X E

Caractéristiques morphométriques de quelques lacs de comparaison.

	Balaton	Bodan	Chiemsee	Morat	Fertő	Untersee
Superficie (km ²)	610	477,0	80,14	22,9	320	65,0
Altitude moyenne (m s/mer)	104	395,7	518,2	429,4	115	395,4
Longueur (km)	77,2	63,5	12,8	7,7	36	21
Largeur maximum (km)	15,0	14,0	8,0	2,5	13	6,0
Largeur moyenne (km)	7,9	7,51	6,26	2,97	8,8	3,10
Profondeur maximum (m)	11	252	73,4	46	4	46
Profondeur moyenne (m)	3	100,1	25,6	25	1	28
Profondeur relative (‰)	0,04	1,02	0,73	0,85	0,02	0,51
Rapport $\frac{\text{prof. moy.}}{\text{prof. max.}}$ (‰)	27,2	39,3	34,9	54,3	25,0	58,7
Creux (selon Delebecque)	2245	86,69	121,9	104,0	4472	175,3
Volume (km ³)	1,8	47,61	2,053	0,58	?	1,760
Développement du volume	0,82	1,18	1,04	1,63	0,75	1,76
Périmètre (km)	196,6	284,5	60	20,0	100	87,7
Développement des rives	2,25	2,33	1,89	1,27	-	2,51
Débit moy. de l'effluent (m ³ /s)	23,1	300	47,5	11,1	-	350
Séjour moy. de l'eau (ans/j.)	3-8 a.	5/11	1/135	1/239	-	0/58
Insularité (km ²)	0	0	2,34	0	0	0
Déclinaison de l'axe (°)	60 E	58 W	31 E	56 E	178 E	90 W
Cryptodépression	0	0	0	0	0	0
Superficie du bassin (km ²)	5147	10922	1388	697	-	11487
Bassin sans le lac (km ²)	4537	10445	1308	674	-	11422
Rapport $\frac{\text{superf. lac}}{\text{superf. bass. sans lac}}$	13,4	4,5	6,1	3,4	-	0,6
Rapport $\frac{\text{bassin total}}{\text{superf. du lac}}$	8,43	23,06	17,32	30,30	-	176,7

Fertő - Neusiedlersee (Hongrie et Autriche)

TABLE DES MATIERES.

Page

Première partie:

LE LAC DE NUCHATTEL.

Chapitre premier: GENERALITES.	1
1. Introduction	1
2. Géographie	1
2.1. Le lac proprement dit	2
2.2. Le bassin d'alimentation du lac	3
2.3. Comparaison avec d'autres lacs	4
2.4. Aperçu de géographie économique	4
2.4.1. L'eau tirée du lac	4
2.4.2. La pêche dans le lac	6
3. Morphologie	8
3.1. Le lac proprement dit	8
3.2. Le bassin d'alimentation du lac	12
3.3. Le relief submergé du lac et la Mette	14
Chapitre deuxième: METEOROLOGIE. NIVEAU DU LAC. AFFLUENTS.	18
4. Météorologie	18
4.1. Le climat	18
4.2. Le gel du lac	19
4.3. Les caractères météorologiques des années 1957 à 1961	20
5. Niveau du lac	23
5.1. Les niveaux anciens	23
5.2. Les limnigraphes actuels	24
5.3. Les niveaux actuels	26
5.3.1. De 1889 à 1956	26
5.3.2. De 1957 à 1961	26
5.4. Les variations de niveau du lac	27
5.4.1. Crues et décrues	27
5.4.2. Autres causes de variation	29
6. Affluents et effluent	30
6.1. Les affluents	30
6.2. L'émissaire du lac	34
Chapitre troisième: HISTORIQUE DU LAC.	37
7. Origine du lac	37
8. Principaux travaux antérieurs à 1957	38
8.1. Niveau du lac	38
8.2. Thermique du lac	39
8.3. Examen chimique de l'eau	39
8.4. Plancton	39
8.5. Macrofaune	40
8.6. Sédiment lacustre	40
9. La première correction des eaux du Jura	41

	<u>Page</u>
Deuxième partie:	
<u>L'ORGANISATION DE LA CAMPAONE.</u>	
Chapitre quatrième: GENERALITES SUR L'ETUDE DU LAC.	44
10. Les buts à atteindre	44
11. Densité de la répartition des stations	44
12. Découpage du temps	45
13. Durées des recherches	45
Chapitre cinquième: LES EMPLACEMENTS DE TRAVAIL	47
14. Les stations du lac	47
14.1. Les stations principales	47
14.1.1. Grandes expéditions	47
14.1.2. Les petites expéditions	49
14.2. Les stations secondaires	49
14.2.1. Profils transversaux	49
14.2.2. Stations diverses	50
15. Les régions d'étude des courants sous-lacustres	51
16. Les stations sur les affluents	52
17. Les stations de comparaison des autres lacs	53
Chapitre sixième : LES DATES DES OPERATIONS.	54
18. Chronologie des recherches	54
Chapitre septième: LE MATERIEL UTILISE.	55
19. Moyens de transport	55
19.1. Sur le lac	55
19.2. A terre	55
20. Matériel de mesure et de prélèvement	56
20.1. Câbles et treuils	56
20.2. Mesure de la profondeur	57
20.3. Mesure de la température	57
20.3.1. Température de l'air	57
20.3.2. Température de l'eau en surface	57
20.3.3. Température de l'eau au-dessous de la surface	57
20.4. Mesure de la transparence	58
20.5. Mesure de l'absorption de la lumière	58
20.5.1. Méthode sensimétrique	59
20.5.2. Mesure directe	59
20.6. Mesure du pH	60
20.7. Mesure de la conductivité électrique	61
20.8. Prélèvement des échantillons d'eau	62
20.8.1. Echantillons pour l'analyse chimique	62
20.8.2. Echantillons pour l'analyse bactériologique	62
20.8.3. Echantillons de la microcouche d'eau de fond	63
20.9. Prélèvement des échantillons de plancton	63
20.9.1. Prélèvements au filet	63
20.9.2. Prélèvements au moyen de la "bouteille à eau"	64
20.10. Prélèvement des échantillons de sédiment	65
20.10.1. Bannages	65

20.10.2. Carottages	Page 65
20.10.3. Pièges à sédiments	66
20.11. Mesure des courants lacustres	67

Troisième partie:
L'EAU DU LAC.

Chapitre huitième: METHODES D'ANALYSE.	71
21. Déterminations physico-chimiques	71
22. Analyse chimique	72
23. Analyse bactériologique	79
Chapitre neuvième: LA THERMIQUE DU LAC.	81
24. Introduction	81
25. L'eau de surface	82
25.1. L'eau de surface dans la zone littorale	82
25.2. L'eau de surface dans la zone pélagique	85
25.2.1. Résultats antérieurs à nos recherches	85
25.2.2. La campagne 1957-1961	87
25.2.3. Comparaison avec les résultats antérieurs	93
25.2.4. Comparaison avec d'autres lacs	94
26. L'eau en profondeur	97
26.1. Résultats antérieurs à nos recherches	97
26.2. La campagne 1957-1961	101
26.2.1. Température moyenne mensuelle par station et comparaison avec les résultats antérieurs	101
26.2.2. Température moyenne instantanée par station	104
26.2.3. Variation isothermique de la température à Z	106
26.2.4. Variation isobathe de la température à Z	108
26.2.5. Variation horaire de la température	114
26.2.6. Mesures simultanées de la température à diverses stations	118
26.2.7. Température moyenne du lac	127
26.3. Comparaison avec d'autres lacs	128
27. La stratification thermique	132
27.1. Résultats obtenus lors des campagnes précédentes	134
27.2. La stratification thermique à la station Z	134
27.2.1. Durée de l'existence du saut thermique à Z	135
27.2.2. Evolution saisonnière du saut thermique à Z	139
27.2.3. Variation du gradient de température dans les sauts thermiques à Z	141
27.2.4. Evolution des températures de l'épilimnion, du métalimnion et de l'hypolimnion à la station Z	144
27.3. La stratification thermique aux stations A à F	145
27.4. La stratification thermique révélée par les profils thermiques transversaux	148
27.5. Existence d'une stratification thermique fine	154
27.6. Comparaison de la stratification thermique du lac de Neuchâtel avec celle d'autres lacs	155
28. Le bilan thermique du lac de Neuchâtel	159

	<u>Page</u>
Chapitre dixième: MESURES PHYSICO-CHIMIQUES.	162
29. Transparence	162
29.1. Résultats obtenus avant la campagne actuelle	162
29.2. Résultats obtenus en cours de la campagne actuelle	165
29.2.1. Transparence aux stations Z et D	165
29.2.2. Transparence aux stations A à P'	170
29.2.3. Variation horaire de la transparence	172
29.2.4. Transparence dans l'ensemble du lac	172
29.3. Comparaison de la transparence de l'eau du lac de Neuchâtel avec celle d'autres lacs	175
30. Absorption de la lumière	176
31. Le pH	179
31.1. Le pH à la station Z	180
31.2. Le pH aux stations A à P	186
31.3. Le pH mesuré "in situ"	187
31.4. Le pH mesuré dans l'ensemble du lac	189
31.5. Comparaison avec d'autres travaux	190
32. La conductivité électrique	190
32.1. La conductivité électrique à la station Z	192
32.2. La conductivité électrique aux stations A à P'	198
32.3. La conductivité électrique mesurée "in situ"	199
32.4. La conductivité électrique calculée pour l'ensemble du lac	199
32.5. Comparaison avec d'autres travaux	200
32.6. La conductivité électrique et la teneur en sels dissous	201
32.7. La conductivité électrique et la dureté temporaire	202
Chapitre onzième: ANALYSES CHIMIQUES.	203
33. Résidus d'évaporation et de calcination	203
33.1. Résidus d'évaporation et de calcination aux stations A à P'	204
33.2. Comparaison avec l'eau des affluents du lac	208
33.3. Comparaison avec d'autres lacs	210
34. Les duretés de l'eau	211
34.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle	211
34.2. La dureté totale	212
34.2.1. La dureté totale à la station Z	212
34.2.2. La dureté totale aux stations A à P'	215
34.2.3. La dureté totale des affluents du lac	216
34.3. La dureté temporaire ou alcalinité	218
34.3.1. La dureté temporaire à la station Z	218
34.3.2. La dureté temporaire aux stations A à P'	219
34.3.3. La dureté temporaire des affluents du lac	220
34.3.4. Comparaison avec d'autres lacs	222
34.4. La dureté permanente	223
35. Les matières azotées de l'eau	224
35.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle	226
35.2. Les combinaisons azotées à la station Z	227
35.3. Les combinaisons azotées aux stations A à P'	232
35.4. Les combinaisons azotées dans l'eau des affluents	235
35.3. Comparaison avec d'autres lacs	236

	<u>Page</u>
36. L'oxygène dissous dans l'eau	237
36.1. Résultats antérieurs à la campagne actuelle	239
36.2. L'oxygène dissous à la station Z	239
36.2.1. La teneur globale en oxygène à Z	239
36.2.2. L'évolution de l'oxygène au cours de l'année	243
36.2.3. La variation de l'oxygène en fonction de la profondeur	243
36.2.4. La stratification de l'oxygène dissous	244
36.3. L'oxygène dissous aux stations A à P'	247
36.4. L'oxygène dissous des affluents du lac	249
36.5. Comparaison avec d'autres lacs	251
37. Matières en suspension, matières oxydables et demande biochimique en oxygène	253
37.1. Matières en suspension	253
37.2. Matières oxydables	254
37.3. Demande biochimique en oxygène	257
37.3.1. La demande biochimique en oxygène à la station Z	257
37.3.2. La demande biochimique en oxygène aux stations A à P'	263
37.3.3. La demande biochimique en oxygène des affluents du lac	265
38. Calcium et magnésium	266
38.1. Le calcium dans l'eau du lac	267
38.2. Le magnésium dans l'eau du lac	272
38.3. Le rapport magnésium:calcium dans l'eau du lac	277
39. Le phosphore dans l'eau	281
39.1. Les phosphates à la station Z	282
39.2. Les phosphates aux stations A à P'	286
39.3. Les phosphates des affluents du lac	287
39.4. Comparaison avec d'autres lacs	289
40. Le silicium dans l'eau	290
40.1. Le silicium à la station Z	291
40.2. Comparaison avec d'autres lacs	295
41. Ions divers	295
41.1. Sulfates, chlorures et fer total dans l'eau	295
41.1.1. Les sulfates, les chlorures et le fer total aux stations A à P'	296
41.1.2. Les sulfates, les chlorures et le fer total des affluents du lac	298
41.1.3. Comparaison avec d'autres travaux	300
41.2. Sodium et potassium	302
42. Récapitulation des caractéristiques chimiques et physico-chimiques de l'eau à la station Z pour la période de 1938 à 1961	303
Chapitre douzième: APERÇU HYDROBIOLOGIQUE.	306
43. Les bactéries de l'eau	306
43.1. Les bactéries à la station Z	308
43.2. Comparaison avec d'autres travaux	311
44. Le plancton	311
44.1. Le plancton à la station Z	314
44.2. Comparaison avec d'autres travaux	316

	<u>Page</u>
Quatrième partie:	
<u>LES MOUVEMENTS DE L'EAU</u>	
Chapitre treizième: LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE LAC.	318
45. L'agitation du lac due aux vagues	318
45.1. L'agitation à la surface du lac	318
45.2. L'agitation au-dessous de la surface du lac	322
46. Les courants lacustres	324
46.1. Les courants en relation avec la densité de l'eau	324
46.2. Courants de turbidité	325
46.3. Courants liés aux vents	326
46.3.1. Données antérieures à la campagne actuelle	326
46.3.2. Mesure de vitesse au moyen des dragues à courants	328
46.3.3. Résultats obtenus quant à la direction des courants dans les diverses zones étudiées	330
46.3.4. Les vitesses des courants mesurées de 1959 à 1962	334
46.3.4.1. Les vitesses en fonction de la profondeur	334
46.3.4.2. Les vitesses en fonction de la saison	337
46.3.4.3. Les vitesses en fonction de la zone étudiée	338
46.3.4.4. Classement des vitesses instantanées	338
46.3.4.5. Récapitulation des résultats obtenus de 1959 à 1962	339
46.3.5. Comparaison avec d'autres travaux	339

Cinquième partie:	
<u>LES BEDIMENTS DU LAC.</u>	
Chapitre quatorzième: GENERALITES ET METHODES D'ANALYSE.	342
47. Les sédiments lacustres en général	342
48. Méthodes d'analyse des sédiments	343
Chapitre quinzième: LES SEDIMENTS DU LAC DE NEUCHÂTEL.	347
49. Recherches antérieures	347
50. Les recherches actuelles	347
50.1. Les sédiments du bassin de Neuchâtel	349
50.2. Les sédiments à la station Z	352
50.3. Les sédiments aux stations A à H	354
50.4. Les sédiments isobathes	355
50.5. Les sédiments en profils transversaux	356
50.6. Les sédiments de la Motte	359
50.7. La granulométrie des sédiments	359
51. Comparaison avec d'autres lacs	360
52. Recherches sur les matières qui se déposent actuellement dans le lac	361

Sixième partie:	
<u>CONCLUSIONS ET BIBLIOGRAPHIE.</u>	

	<u>Page</u>
Chapitre seizième: CONCLUSIONS GENERALES.	366
53. Le lac en général	366
54. A propos des recherches limnologiques modernes	367
55. L'eau du lac	369
56. Les sédiments du lac	376
57. Résumé	377
Chapitre dix-septième: BIBLIOGRAPHIE.	378

ANNEXES: Caractéristiques morphométriques de quelques lacs de comparaison.	427
Table des matières.	428

=====