

## 6. Les variations annuelles de la température dans les lacs suédois.

Par

S. Grenander.

---

La branche de l'hydrographie que depuis FOREL on nomme *limnologie* ne compte pas de longues traditions. Des observations isolées sur la profondeur et la température des lacs ont rarement été publiées avant les deux ou trois dernières décades, et les séries d'observations étendues sur celle que nous traitons dans le présent travail sont encore bien peu nombreuses. Pendant longtemps on manqua d'appareils convenables, et ce n'est qu'après l'invention des thermomètres de profondeur modernes que l'on a pu obtenir des mesures certaines, et que les recherches se sont développées.

En Suède les premières recherches ont été faites par VEGELIN<sup>1</sup> au cours d'une longue série d'observations de 1851 à 1858. Cependant il se borna à faire des observations en hiver, sous la glace et presque toujours en quelques lacs de Dalécarlie. Ces recherches faites à l'aide d'une bouteille isolante indiquèrent un refroidissement considérable et inattendu des couches d'eau inférieures en hiver. Par ex. VEGELIN constata dans le Vettern pendant le grand hiver de 1855 à 92<sup>m</sup> de profondeur (fonds) une température de + 0<sup>o</sup>.7.

Toutefois c'est seulement après la construction par NEGRETTI et ZAMBRA en 1878 du premier thermomètre renverseur, que l'on peut constater une évolution plus rapide de la limnologie thermique, et en général de l'étude moderne des profondeurs. Un grand nombre de lacs du continent européen ont été étudiés au cours des dernières décades, et le nombre des publications sur ce sujet s'accroît rapidement. En Suède au contraire où le champ d'observation est si extraordinairement riche, ce genre de recherches n'a presque pas été cultivé. Jusqu'ici on n'a pas encore publié de séries coordonnées d'observations en dehors des recherches faites dans le Vettern en 1900<sup>2</sup>, et de quelques séries de température de l'été

---

<sup>1</sup> Vet. Akad. Handl. 1864, Öfvers.

<sup>2</sup> Vet. Akad. Handl. 1902 Bih. II, 2.

provenant des grands lacs lapons<sup>1</sup>. Le présent travail, rapide reconnaissance d'un domaine à peu près inconnu, se justifie donc en ce qu'il pourra servir de guide aux recherches futures.

En 1903 je fis une série de recherches sur les variations annuelles de la température en un certain nombre de lacs suédois situés à des latitudes diverses de la Scanie au Jemtland. J'adoptai comme principe de choisir non seulement les lacs qui étaient d'accès facile permettant les déplacements rapides, mais surtout ceux qui étaient le plus dépourvus de forts courants et assez profonds. Malheureusement on manque généralement de renseignements sur les profondeurs des lacs ordinairement peu profonds de la Suède, qui n'ont sauf rares exceptions jamais été sondés méthodiquement, et même la profondeur des petits lacs forestiers que la légende affirme «sans fonds» dépasse rarement de beaucoup la longueur des filets des riverains.

C'est pourquoi je dus abandonner un grand nombre de lacs dès les recherches de mon premier voyage, et choisir définitivement les suivants:

- le **Ifösjön** (Scanie, près de Christianstad),
- le **Stråken** (Småland, env. 25 km. NO de Vexjö),
- le **Vettern** (en dehors de Hästholmen),
- le **Roxen** (Ostrogothie),
- le **Mälaren** (golfe d'Ekoln),
- le **Varpan** (Dalécarlie au nord de Fahlun, bien étudié par Vegelin),
- le **Storsjön** (Jemtland, golfe d'Östersund),
- le **Gefsjön** (Jemtland, entre Åre et Storlien).

En outre je choisis aussi deux anciens puits de mines remplis d'eau près de Sala.

Quant aux points d'observations dans ces lacs on n'a pas toujours pu les choisir librement à cause de l'état des glaces lors des observations d'hiver; en fait pour les nappes étendues ils représentent cependant les plus grandes profondeurs. Tous ces points à l'exception peut-être de celui dans le Roxen sont situés en des parages dénués de courants perceptibles.

Les observations ont été faites quatre fois dans l'année, en Février (Mars), Mai, Août, et (Octobre) Novembre.

L'appareil employé était un thermomètre renverseur de RICHTER, sauf pour les trois premières mesures relevées à l'aide d'un thermomètre renverseur du modèle NEGRETTI—ZAMBRA.

Je donne dans le tableau ci-joint toutes les observations qui ont été faites, avec indication de la température atmosphérique moyenne pour chaque poste d'observation.

<sup>1</sup> V. WAHLBERG, Sv. Fiskeritidskr. 1894 p. 156, K. AHLENIUS, Bull. of the Geolog. Inst. of the Univ. of Upsala 1901 n:o 9 p. 28.

le *Ifösjön*, 56°.1 de lat. N. Moyenne annuelle (Christianstad) 7°.0.

Point d'observation env. 800 m. de la rive, est du village de Kjuge.

Profondeur	—	23 Mai	13 Août*	2 Nov.
0 <sup>m</sup>		11°.82	15°.40	7°.55
1		11°.60	15°.91	7°.60
2		11°.27	—	—
5		10°.36	15°.89	7°.60
8		9°.80	—	—
12		9°.23	15°.81	7°.60

\* 7 h. m.

le *Stråken*, 57°.1 de lat. N. Moyenne annuelle (Vexjö) 5°.6.

Point d'observation env. 100 m. de la rive, ouest de la station de Lidnäs.

Profondeur	19 Févr.*	24 Mai	12 Août	3 Nov.
0 <sup>m</sup>	1°.4	14°.79	15°.98	6°.07
1	2°.1	13°.12	15°.93	6°.15
2	3°.3	12°.40	—	—
3	—	11°.19	—	—
5	4°.0	—	15°.93	6°.15
8	4°.1	10°.20	15°.93	6°.15

\* glace, 10 cm.

le *Vettern*, 58°.3 de lat. N. Moyenne annuelle env. 5°.5.

Point d'observation 2.5 km. ouest de Hästholmen, près de l'Omberg.

Profondeur	25 Févr.*	25 Mai	11 Août	4 Nov.
0 <sup>m</sup>	0°.8	7°.49	14°.97	8°.11
5	—	7°.49	14°.90	8°.18
15	0°.8	6°.82	12°.52	—
30	1°.0	5°.85	8°.00	8°.15
50	—	4°.50	6°.22	7°.45
90	1°.2	4°.18	4°.85	5°.32

\* eau libre tout l'hiver.

Les trois premières observations rendues très difficiles par suite d'une forte houle.

le *Roxen*, 58°.5 de lat. N. Moyenne annuelle (Linköping) 6°.1.

Point d'observation env. 200 m. de la rive, sud de Runstorp, près de Norsholm.

Profon- deur	26 Févr.*	26 Mai	23 Juillet**	15 Août	5 Nov.
0 <sup>m</sup>	1°.3	14°.57	20°.35	15°.32	5°.25
1	1°.3	13°.92	19°.80	15°.32	—
2	1°.3	13°.51	18°.87	—	5°.25
3	—	13°.08	18°.32	15°.28	—
4	1°.3	12°.75	18°.07	—	—
5	—	12°.50	18°.02	15°.28	5°.25
7	1°.4	12°.34	17°.96	15°.28	—
9	—	—	17°.70	15°.28	—
11	1°.6	12°.26	16°.37	15°.20	5°.25

\* eau libre de glaces depuis peu,

\*\* température maxima observée au cours de l'été.

le *Mälaren*, 59°.8 de lat. V. Moyenne annuelle (Upsala) 4°.5.

Point d'observation env. 3 km. SO de Flottsund.

Profon- deur	9 Avril*	27 Mai	17 Août	23 Oct.
0 <sup>m</sup>	2°.60	7°.89	15°.10	7°.80
1	2°.60	7°.83	14°.95	—
3	—	7°.69	—	—
5	2°.60	—	14°.85	7°.77
10	2°.60	7°.65	—	7°.73
34	2°.60	7°.34	9°.52	7°.73

\* eau libre de glaces depuis peu.

Puits de mines nord et sud de Sala, 60°.0 de lat. N. Moy. an. env. 4°.5.

Profon- deur	7 Mars*		28 Mai		18 Août		28 Oct.	
	n.	s.	n.	s.	n.	s.	n.	s.
0 <sup>m</sup>	1°.04	1°.22	10°.48	11°.72	12°.42	13°.02	5°.40	6°.30
1	1°.98	2°.14	5°.50	6°.59	9°.84	10°.45	5°.48	6°.30
2	3°.20	3°.68	4°.75	5°.79	8°.45	8°.92	—	—
3	—	—	4°.75	—	7°.50	7°.80	5°.80	—
5	—	3°.83	4°.72	5°.71	6°.38	6°.66	—	6°.47
8	3°.56	—	4°.70	—	5°.76	6°.02	5°.85	—
10	3°.88	5°.18	—	5°.65	5°.58	5°.79	—	5°.90
18	4°.20	—	4°.56	—	5°.46	—	5°.65	—
21	—	5°.40	—	5°.55	—	5°.57	—	5°.58

\* glace 1 cm., eau 25 cm., glace 6 cm.

le *Varpan*, 60°7 de lat. N. Moyenne annuelle (Falun) 3°9.

Point d'observation 1 km. ENE de Bäckahagen.

Profondeur	4 Mars*	29 Mai	18 Août	26 Oct.
0 <sup>m</sup>	0°75	15°15	15°70	5°71
1	1°54	13°42	—	—
2	2°05	12°01	—	5°71
3	2°37	10°98	—	—
5	2°80	9°37	15°69	5°71
10	2°96	7°72	15°66	—
15	3°85	7°36	10°35	—
19	4°00	7°34	8°91	5°71

\* glace 30 cm.

le *Storsjön*, 63°2 de lat. N. Moyenne annuelle (Östersund) 1°7.

Point d'observation 3 km. SSO d'Östersund.

Profondeur	1 Mars*	30 Mai	19 Août	25 Oct.
0 <sup>m</sup>	0°32	4°03	11°60	6°82
1	0°34	4°01	—	—
2	0°58	—	—	—
5	0°98	3°96	11°47	6°82
10	1°00	3°80	—	—
15	1°20	—	—	—
20	2°20	—	11°20	6°82
35	2°64	3°88	7°96	6°82
48	2°72	3°85	5°00	5°04

\* neige 5 cm., glace 60 cm.

le *Gefsjön*, 63°4 de lat. N. Moyenne annuelle env. 0°5.

Point d'observation 2.5 km. NO de la station de Gefsjön.

Profondeur	3 Mars*	31 Mai**	20 Août	24 Oct.***
0 <sup>m</sup>	0°10	0°80	12°22	0°80
1	0°14	0°80	12°22	1°12
2	0°14	—	—	1°51
3	0°16	—	—	1°70
5	0°63	0°80	12°20	2°23
10	1°28	1°24	8°97	2°75

\* neige 15 cm., glace 70 cm.,

\*\* glace flottante,

\*\*\* banc de glaçons épars.

Ces observations sont figurées graphiquement sur les pl. V et VI.

On le voit, tous les lacs étudiés appartiennent au point de vue thermique à la catégorie dite par FOREL «lacs tempérés»<sup>1</sup> c'est à dire dans lesquels la stratification «directe» ou «inverse» varie au cours de l'année. La température varie dans un lac de cette catégorie, on le sait, et les observations ici présentées en sont un exemple, en résumé de la façon suivante.

Lorsqu'au printemps toute la masse liquide a atteint une température de 4°<sup>2</sup> (pl. VI, Fig. 11 a), l'échauffement surtout dans les couches supérieures va très rapidement. L'état thermique est déterminé presque exclusivement par le rayonnement calorique qui se produit entre le soleil et l'atmosphère d'un côté, la masse liquide de l'autre, et il faut noter aussi que, comme l'a démontré J.—L. SORET, l'eau est plus diathermane aux rayons lumineux qu'aux rayons obscurs, fait qui favorise toujours les couches d'eau profondes.

Quand à la fin de l'été (Fig. 11 b) l'intensité du rayonnement solaire diminue et que les jours décroissent, le rayonnement de la masse liquide devient le plus puissant, et la phase rétrograde de l'évolution thermique commence. A mesure que l'eau de surface se refroidit, elle descend sa densité augment jusqu'à ce qu'elle rencontre une eau de même température, et se mêle ainsi complètement aux couches intermédiaires. Le refroidissement continuant, la couche d'eau homothermale augmente d'épaisseur (Fig. 11 c, d) jusqu'à atteindre le fonds (Fig. 11 e). Dès lors la température varie uniformément dans toute la masse liquide jusqu'à ce qu'elle ait atteint le point de départ de 4°. Alors commence la stratification «inverse» (Fig. 11 f), et bientôt, si les circonstances le permettent, une couverture de glace se forme à la surface. On peut alors considérer d'une façon générale la circulation thermique comme interrompue; elle ne reprend que lorsqu'au printemps la fonte de la glace est arrivée à un degré qui ramène une phase analogue à celle de l'automne mais inverse (Fig. 11 g, h). Cet échauffement de la masse liquide jusqu'à 4° s'accomplit avec une grande rapidité. Au cours des variations de température journalières — dont il n'a pas encore été question pour simplifier — l'échauffement se produit pendant le jour, les masses chauffées descendent, et sont ainsi protégées contre le rayonnement nocturne. La quantité de chaleur qui en d'autres temps se répand la nuit pour la plus grande partie dans l'air, est ainsi pendant cette période littéralement emportée au fonds pour réchauffer la masse liquide au détriment de l'atmosphère.

<sup>1</sup> FOREL, Seenkunde p. 113.

<sup>2</sup> RICHTER nie (Seenstudien p. 49) que cet état se réalise jamais — la température de l'eau de surface varie toujours *avant* celle de l'eau de fonds —; cependant une série de sondages opérés par W. HALBFASS dans le Dratzigsee (Verh. d. Ges. f. Erdk., Berlin 1901) montre que le fait peut se produire quand la température varie lentement.

Si après cet aperçu schématique nous parcourons les tableaux ci-dessus, nous sommes immédiatement frappés par la grande amplitude des variations de la température au fond des lacs. L'échauffement en été, et surtout le refroidissement en hiver des couches inférieures, sont beaucoup plus considérables et rapides qu'on ne l'eût prévu étant donné la diathermanité relativement médiocre de l'eau, surtout aux rayons obscurs. Si l'on peut expliquer la haute température observée au printemps au moins dans les lacs les moins profonds par l'intensité de l'insolation, le rayonnement de la masse liquide est tout à fait insuffisant pour rendre raison du fort refroidissement en hiver<sup>1</sup>. Il est intéressant de comparer ici le Vettern, le Storsjön et les mines de Sala. Tandisque dans le Vettern on observe 1°.2 à 90<sup>m</sup> de profondeur, à une profondeur moitié moindre on relève dans le Storsjön 2°.7<sup>2</sup>, et dans les couches d'eau inférieures des mines la température ne descend pas de tout l'hiver au dessous de 4° (V. ci-dessous). Le premier fait s'explique aisément: la couverture de glace formée de bonne heure sur le Storsjön l'a protégé contre un accroissement de refroidissement, tandisque le Vettern, demeuré libre constamment a été exposé à un rayonnement de plus en plus intense. Plus la couverture de glace se forme tôt sur un lac en automne, plus la quantité de chaleur emmagasinée est considérable, et plus la période signalée ci-dessus d'échauffement aux dépens de l'atmosphère au printemps est brève. Après un hiver précoce un chaud printemps et inversement, telle doit être dans une certaine mesure au point de vue climatologique la »consecutio temporum» normale auprès d'un lac qui gèle en hiver.

Quant au Vettern, même pendant les grands hivers il ne gèle pas de façon durable, évidemment à cause des tempêtes violentes qui soulèvent les eaux de ce vaste lac sans abri, et c'est là l'unique cause probable d'un si grand refroidissement. Que ce refroidissement toutefois puisse atteindre des couches si profondes, on le comprendra peut-être si l'on étudie par comparaison les conditions inverses observées dans les deux puits de mines.

Ceux-ci sont situés à quelques mètres l'un de l'autre à environ 1.5 km. au NO de l'église de campagne de Sala. Le puits nord régulier, cylindrique s'enfonce dans la montagne à une profondeur de 18<sup>m</sup> et a 3 à 4<sup>m</sup> de diamètre; le puits sud plus irrégulier présente un ressaut aigu à environ 21<sup>m</sup> de profondeur. L'eau s'élève dans le puits sud presque jusqu'aux bords, à un mètre au dessous dans le puits nord.

La glace apparaît sur ces puits plus tard que sur le Storsjön, quoiqu'ils soient d'une profondeur plus petite. En effet, le refroidissement demeure si peu considérable qu'on retrouve le maximum de densité à quelques mètres seulement de profondeur.

Ce faible refroidissement des couches inférieures s'explique natu-

<sup>1</sup> En 1900 on observa seulement 0°.38 dans le Vettern à 95<sup>m</sup> de profondeur, l. c.

<sup>2</sup> La température atmosphérique en hiver (Déc.—Févr.) est à Jönköping — 1°.7, à Östersund — 8°.3.

rellement par l'action réchauffante du sol environnant dont la température au-dessous de 4 ou 5<sup>m</sup> de profondeur est, on le sait, à peu près égale à la température moyenne du lieu. On a un moyen connu depuis longtemps et commode d'obtenir cette température, c'est d'observer les sources de faible variation annuelle. On sait toutefois qu'à une plus grande profondeur la température s'accroît en sorte que les sources qui viennent de grandes profondeurs ont ordinairement une température un peu supérieure à la température moyenne du lieu.

On voit que la colonne liquide du puits sud demeure toute l'année plus chaude que celle du puits nord; probablement cela vient en partie de ce qu'elle est plus exposée au soleil tandis qu'un mur situé au sud du puits nord en abrite perpétuellement contre les rayons solaires une partie de la surface. En outre le puits sud dépasse de beaucoup en profondeur la limite inférieure des observations, ses eaux atteignent par conséquent des couches terrestres plus chaudes et s'échauffent ainsi davantage.

FOREL dans ses grands travaux a presque complètement négligé l'influence de la température du sol environnant, et l'on peut d'ailleurs admettre que cette influence est sans importance dans les grands lacs comme par ex. le Léman et le Vetter; dans nos lacs, ordinairement petits et peu profonds, cette influence peut au contraire être de grande importance.

Outre cette cause de stratification thermique différente dans un puits de mine et un lac, il faut noter encore dans les lacs les courants déterminés par les vents comme des facteurs de la plus grande importance.

Le phénomène qui se produit dans les grands océans lorsque sur les côtes abritées l'eau froide du fond monte tandis que sur les côtes exposées au vent l'eau chaude de la surface est refoulée vers le fond, ce phénomène joue très certainement un rôle encore plus important dans la distribution de la chaleur en un bassin lacustre fermé. Nous avons eu plusieurs fois l'occasion d'observer au cours de l'été 1903 combien complètement la stratification thermique était égalisée par un vent durant quelques journées dans toutes les couches du Roxen, lac peu profond assurément, mais fort étendu, et il en va très certainement de même aussi dans les lacs plus profonds; on est même tenté d'admettre en tenant compte des observations faites dans le Vetter qu'après quelques jours de vent fort la masse liquide tout entière subit un lent mouvement de rotation verticale.

Ainsi le vent qui indirectement entraîne un plus grand refroidissement d'un lac en hiver en empêchant la formation d'une couverture de glace, détermine aussi ce fait que le refroidissement atteint les couches les plus profondes.

En été il se produit naturellement une égalisation de la stratification de température analogue, bien que les vents soient en général moins violents.

FOREL indique encore un facteur important surtout aux très grandes profondeurs. Après avoir expérimentalement démontré<sup>1</sup> que les corpus-

<sup>1</sup> Forel, Le Léman I p. 368.



cules en suspension dans l'eau peuvent accroître notablement la densité, et qu'ils peuvent par conséquent faire descendre vers le fond des masses liquides de températures très différentes, il calcule<sup>1</sup> que de cette façon le Rhône a pu pendant l'été de 1886 grâce à ses eaux lourdes et chaudes élever de 0.6 la température du fond du lac Léman (300<sup>m</sup>). En hiver un affluent exerce naturellement une action inverse même si en général, comme aussi dans le cas cité,<sup>2</sup> la teneur en corpuscules est notablement diminuée.

Dans nos lacs toutefois qui ne reçoivent aucune affluent issu de glaciers, ce facteur ne peut avoir qu'une importance secondaire.

Les observations faites montrent la grande action qu'un lac exerce sur le climat de la région environnante. Cependant je n'ai pas cru devoir calculer de la façon ordinaire les quantités de chaleur absorbée ou émise pour tous les cas par où ressortirait le mieux l'action sur le climat. Tout au moins dans un petit lac les parties pélagiques et littorales sont, sous l'action de causes thermiques et mécaniques, en si rapide communication, qu'un tel calcul, basé sur une seule série de sondages n'aurait certainement qu'une valeur très problématique. Un tel calcul ne vaudrait peut-être la peine d'être fait que pour le Vettern, et il faut remarquer que, comme la marche du premier échauffement du printemps pouvait le faire prévoir (v. p. 165), il se produit un échauffement beaucoup plus rapide pendant cette période jusqu'au stade homothermal de 4° que plus tard. C'est ainsi que du 25 Février au 25 Mai il se produisit en chiffres ronds une absorption de chaleur journalière par cm<sup>2</sup> de 434 cal., tandisque, par la suite, et jusqu'à l'observation du 11 Août, l'absorption journalière ne fut plus que de 309 cal. Les chiffres correspondants de 1900 sont: 24 III—3 VI 462 çal. par jour; 3 VI—2 IX 304 cal. par jour. Des observations plus fréquentes accuseraient mieux encore ce fait, et c'est évidemment en grande partie par suite de cette circonstance que FOREL a pu constater<sup>3</sup> que l'amplitude des variations thermiques annuelles d'un lac est fonction de la latitude.

<sup>1</sup> l. c. II p. 359.

<sup>2</sup> l. c. I p. 374.

<sup>3</sup> Compt. rend. 1900 132 p. 1089.





