



Article scientifique

Article

1880

Published version

Open Access

This is the published version of the publication, made available in accordance with the publisher's policy.

Températures lacustres: recherches sur la température du lac Léman et
d'autres lacs d'eau douce. Deuxième série

Forel, François-Alphonse

How to cite

FOREL, François-Alphonse. Températures lacustres: recherches sur la température du lac Léman et d'autres lacs d'eau douce. Deuxième série. In: Archives des sciences physiques et naturelles, 1880, vol. 3e période, t. 4, n° 8, p. 89–106.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:164444>

TEMPÉRATURES LACUSTRES

RECHERCHES SUR LA TEMPÉRATURE DU LAC LÉMAN ET D'AUTRES LACS D'EAU DOUCE

PAR

M. F.-A. FOREL

Professeur à l'Académie de Lausanne.

DEUXIÈME SÉRIE ¹.

§ IV. *Congélation des lacs suisses et savoyards dans l'hiver 1879-1880.*

La congélation des lacs est souvent la seule donnée certaine que nous ayons sur la rigueur relative de quelques hivers des siècles écoulés, et, dans les problèmes de la variation des climats, les faits que l'on peut tirer de ces phénomènes ne sont pas à négliger. L'hiver de 1879 à 1880 ayant vu geler la plupart des lacs du revers nord des Alpes, je crois utile de conserver quelques dates, telles que j'ai pu les rassembler ².

Dans la première quinzaine de décembre 1879 les petits lacs des Alpes et du Jura, puis ceux de la basse

¹ Voir I^{re} série *Archives*, 3, III, 501. 15 juin 1880.

² Voir, pour plus de détails, mon étude sur ce sujet dans la *Revue l'Écho des Alpes*, XVI^{me} année, nos 2 et 3. Genève, 1880.

montagne, puis enfin ceux de la plaine suisse ont été successivement gelés : lac de Joux, lacs de Lowerz, d'Egeri, de Sempach, de Hallwyl. Bientôt des lacs un peu plus étendus ont été pris à leur tour : lac de Zurich supérieur, lac de Constance inférieur ou lac de Zell. On a vu ensuite la congélation successive du lac de Morat, 18 décembre, lac de Bienne, 22 décembre, lac de Zurich, 28 décembre. Pour ce dernier lac, le dégel étant survenu le 29 décembre, la glace n'a pu résister et le lac est redevenu en partie libre jusqu'au 22 janvier 1880, jour où il a été de nouveau pris en totalité.

Le lac de Zoug a été gelé le 24 janvier; le lac d'Annecy s'est pris progressivement entre le 20 janvier et les premiers jours de février. Le lac de Neuchâtel, qui avait déjà failli se geler en décembre, était entièrement pris le 8 février, lorsque le brouillard s'est levé et a permis de voir la surface glacée. La congélation totale du lac de Constance a été terminée le 7 février. Le lac des Quatre-Cantons n'a été gelé que partiellement, dans la partie occidentale jusqu'au détroit du Naze, du 6 au 10 février.

Quant aux lacs de Wallenstadt, de Brienz, de Thoune, du Bourget et au lac Léman¹, ils ont été épargnés par la glace.

Si nous recherchons dans l'histoire et les chroniques les faits connus de la congélation des lacs dans les siècles passés, nous voyons que l'ordre dans lequel nous venons de les énumérer correspond à peu de chose près à la fréquence de leur prise par la glace.

¹ Je reviendrai une autre fois sur la congélation partielle du lac de Genève.

Les petits lacs gèlent très souvent, quelques-uns presque chaque année.

Les lacs de Morat, de Bienne, de Zurich sont pris cinq à dix fois par siècle.

Les lacs de Neuchâtel et de Constance ne cèdent qu'aux grands hivers ; voici les dates que je puis citer :

Lac de Neuchâtel ¹ : 1420, 1514, 1573, 1624, 1695, 1830, 1880.

Lac de Constance ² : 1276, 1435, 1465, 1571, 1573, 1660(?), 1695, 1830, 1880.

L'on n'a gardé le souvenir de la congélation du lac d'Annecy que pour les années 1573, 1830, 1880 ³.

Le lac de Thoune aurait été entièrement pris en 1363, 1435, 1685, 1695, partiellement en 1830 ⁴.

Le lac de Brienz, d'après M. Gerwer, a été gelé en 1363.

Le lac de Wallenstadt ⁵ et le lac du Bourget ⁶ n'ont jamais été gelés.

Le lac des Quatre-Cantons n'a jamais été pris dans sa totalité ; en 1830, comme en 1880, la partie orientale du lac est restée absolument libre de glaces.

Le lac Léman, enfin, de mémoire d'homme et de chroniqueur, n'a jamais été gelé que dans la rade de Genève, et au plus jusqu'à une lieue au-dessus de la ville, 1570.

D'après cela nous pouvons établir comme suit l'ordre probable de la congélation des lacs suisses et savoyards :

¹ *Chroniques de Boyve.*

² *Neue Zürcher Zeitung*, 11 février 1880.

³ Communication de M. A. Mangé, architecte de la ville d'Annecy.

⁴ Communication de M. le pasteur Gerwer, de Thoune.

⁵ Communication de M. Legler, ingénieur à Glaris.

⁶ Communication de M. le Dr L. Blanc, à Aix-les-Bains.

1° *Congélation totale :*

Petits lacs.

Lac de Morat, lac de Bienne.

Lac de Zurich, lac de Zoug.

Lac de Neuchâtel, lac de Constance, lac d'Annecy.

Lac de Thoune, lac de Brienz.

2° *Congélation partielle :*

Lac des Quatre-Cantons.

3° *Réfractaires à la congélation :*

Lac de Wallenstadt, Léman, lac du Bourget.

L'immunité du lac du Bourget s'explique facilement, malgré le peu de profondeur de ses eaux, par sa faible altitude, 235 mètres, et par sa latitude fort basse; l'immunité du Léman s'explique bien aussi par sa grande profondeur, son altitude et sa latitude relativement basses. En revanche il est fort difficile de se rendre compte des causes de l'immunité relative ou absolue des lacs de Wallenstadt, de Thoune et de Brienz.

Voici les éléments géographiques de ces trois lacs :

	Wallenstadt	Thoune	Brienz
Altitude : mètres	425	560	566
Superficie : kilomètres carrés	23.3	47.9	30.0
Profondeur maximale : mètres	138	215	260
Latitude moyenne	46° 7'	46° 42'	46° 44'

Ces éléments géographiques rendent mal compte du fait que ces lacs n'ont pas gelé cet hiver. Ils sont tous plus élevés en altitude que plusieurs lacs qui ont été pris (lac de Zurich 409 mètres, lac de Constance 398 mètres). Ils sont tous moins profonds que le lac de Constance, 300 mètres; le lac de Wallenstadt, lui-même, est moins

profond que le lac de Zurich son voisin, 142 mètres. Leur latitude est supérieure ou égale à celle des lacs d'Annecy, de Neuchâtel et de Morat.

Les seuls faits qui peuvent être indiqués pour expliquer l'immunité qui nous intrigue sont :

Ou bien la grande masse des eaux, par rapport à la superficie des lacs, les talus étant très inclinés dans ces trois lacs, la quantité d'eau à refroidir par une même surface est relativement plus grande;

Ou bien la situation dans des vallées profondes, encaissées par des montagnes élevées; il en résulte que la chaleur centrale doit se faire sentir d'une manière plus sensible sur le fond du lac;

Ou bien la situation protégée de ces lacs qui sont, relativement à d'autres lacs, à l'abri du courant d'air violent des vents du nord;

Ou bien enfin le fait que, pendant l'hiver, dans les vallées des Alpes le froid est parfois moins intense que dans la plaine suisse.

Je dois avouer que je n'ai pas encore trouvé dans ces différents facteurs, isolés ou combinés ensemble, combinés aussi aux éléments géographiques, l'explication suffisante de cette immunité intéressante.

En réunissant ensemble les différents faits historiques de la congélation des lacs suisses, je formulerai comme suit la loi de la fréquence de la congélation des différents lacs; cette même loi s'appliquerait à l'époque plus ou moins tardive de la congélation des lacs : Toutes choses égales d'ailleurs, un lac se congèlera d'autant plus rarement, ou d'autant plus tard, qu'il est plus profond, — que ses talus sont plus inclinés, — que son altitude est

moins élevée, — que sa latitude est plus rapprochée de l'équateur, — qu'il est dans une région plus chaude et mieux protégée, — qu'il a dans l'été précédent emmagasiné une plus grande quantité de chaleur, — qu'il y a eu pendant l'hiver plus de soleil dans le jour, et plus de brouillards et de nuages pendant la nuit.

§ V. *Température des lacs gelés.*

En combinant ensemble les faits connus de la diminution de densité de l'eau, quand elle se refroidit au-dessous de 4° C. et du peu de conductibilité de l'eau pour la chaleur, l'on se figurait, jusqu'à l'année dernière, que la température de tout lac d'eau douce, gelé à la surface, devait dans la profondeur être encore à 4°. L'on savait que dans son refroidissement automnal le lac arrive, par convection thermique, à abaisser toute sa masse à la température uniforme du maximum de densité de l'eau; puis, la perte de chaleur continuant par la surface, le lac se stratifie en couches à température croissante du haut en bas; mais les courants de convection verticale cessant, et la conduction thermique de l'eau étant très faible, l'on supposait que les couches ainsi stratifiées doivent être relativement peu épaisses, et que, sauf les quelques mètres supérieurs, la masse du lac doit rester invariable à 4°.

Les recherches faites par M. J.-Y. Buchanan¹ pendant l'hiver 1878-1879, dans les lochs Lomond et Linlithgow, ont montré des faits très nouveaux et très intéressants. Au fond du loch Lomond, par 20 mètres de profondeur,

¹ J.-Y. Buchanan, On the freezing of lakes. *Nature*, XIX, 412. London, 1879.

il a trouvé une température de 2°.4, et non de 4° comme chacun s'y serait attendu; il a bien constaté une stratification superficielle, mais il a reconnu qu'elle s'étendait bien plus bas que l'on ne se l'imaginait. Voici quelques résultats numériques, traduits en degrés centigrades, de deux sondages faits par M. Buchanan dans le loch Lomond :

Profondeur	N° 1.	N° 4
^m 1	0.6	1.0
5	1.1	1.0
11	1.3	1.3
15	1.8	1.7
20	2.4	

Ces expériences ont un grand intérêt en montrant que la conductibilité de l'eau pour la chaleur est bien plus importante que l'on ne pouvait le supposer, ou, pour être plus prudent, que la propagation du froid descend bien plus bas que l'on ne le croyait; j'ai tenu à les répéter dans des lacs plus profonds que les lochs écossais, pour chercher à atteindre si possible la limite de la pénétration du froid. J'ai fait pour cela deux séries de sondages sous la glace du lac de Morat, le 23 décembre 1879 et le 1^{er} février 1880, et une série sous la glace du lac de Zurich le 25 janvier 1880.

Voici les résultats numériques de mes sondages dans le lac de Morat ¹ :

¹ Le lac de Morat a une superficie de 27.4 kilomètres carrés, une profondeur maximale de 45 mètres; son altitude est 435 mètres, et sa latitude moyenne 46° 56'. Il a été pris subitement par la glace dans la nuit du 17 au 18 décembre, et il est resté gelé jusqu'au 8 mars.

Profondeur m	23 décembre 1879				1 ^{er} fév. 1880	
	I	II	III	IV	I	II
0	0.4	0.3	0.4	—	0.5	0.2
5	1.3	1.7	1.8	1.9	2.0	1.8
10	1.8	2.1	2.1	2.1	2.3	1.7
15	2.1	2.3	2.3		2.5	2.4
20	2.4	2.4	2.6		2.6	2.4
25	2.6	2.5	2.7		2.5	2.5
30	2.7	2.6	2.7		2.4	2.4
35	2.8	2.7			2.6	2.5
40	2.7	2.7			2.7	2.7
45		2.8				2.7

Dans mes sondages du 23 décembre, la position des stations peut être déterminée comme suit :

Station I. Entre Meyriez et Motier, à un kilomètre de la rive sud du lac; profondeur 39 mètres.

Station II. A un kilomètre de la station I, en marchant sur un point à mi-chemin entre Motier et Guévaux; profondeur 43 mètres.

Station III. Devant la ville de Morat; profondeur 30 mètres.

Station IV. Devant Morat; profondeur 10 mètres.

Dans mes sondages du 1^{er} février, j'ai cherché à revenir autant que possible à la position des stations I et II de l'autre série; la profondeur que j'ai mesurée était 39 et 41 mètres.

Voici en second lieu les résultats numériques d'une seule série de sondages exécutés le 25 janvier 1880, dans le lac de Zurich ¹, au milieu du lac entre Herrliberg et Thalwyl.

¹ Lac de Zurich, superficie 87.8 kilomètres carrés; profondeur

Profondeur	Température	Profondeur	Température
^m	[°]	^m	[°]
0	0.2	70	3.7
10	2.6	80	3.8
20	2.9	90	3.8
30	3.2	100	3.9
40	3.5	110	3.9
50	3.6	120	4.0
60	3.7	133	4.0

Des chiffres de ces trois séries de sondages, je tirerai les conclusions suivantes :

1° L'ancienne théorie de la congélation des lacs, qui admet un refroidissement progressif de toute la masse de l'eau jusqu'à 4°, puis un refroidissement des couches superficielles se stratifiant de 0° à 4°, suivant leur ordre de densité, puis enfin la solidification de l'eau arrivée à 0°, est exacte.

2° C'est par suite de leur peu de profondeur que le loch Lomond et le lac de Morat n'ont pas montré, à M. Buchanan et à moi-même, une température de 4° dans leurs couches les plus profondes.

3° La pénétration du froid dans les couches supérieures peut descendre jusqu'à 110 mètres de profondeur, lac de Zurich.

4° Cette pénétration du froid dans la profondeur a

maximale 143 mètres; altitude 409 mètres; latitude moyenne 47° 16'. Sa congélation a été successive et non subite comme celle du lac de Morat. D'abord pendant longtemps la glace a pris le lac dans la partie supérieure, entre Mænnedorf et Wædensweil; à la fin de décembre, le 28, la glace l'a envahi entièrement, mais pour un jour seulement; le dégel survenant le 29, il est redevenu partiellement libre jusqu'au milieu de janvier; il a alors été pris de nouveau le 22 janvier; le 25 janvier, la glace avait déjà en plein lac 10 centimètres d'épaisseur.

lieu graduellement et régulièrement. La courbe que l'on peut tirer de mes chiffres du lac de Zurich ne présente ni sauts ni saccades; elle est tout à fait analogue aux courbes du réchauffement superficiel d'un lac en été.

5° Il y a cependant des différences locales d'une station à l'autre, le même jour et à la même profondeur, pouvant s'élever jusqu'à trois ou quatre dixièmes de degré, lac de Morat.

6° Si la stratification est en général régulière et suit normalement l'ordre des densités, cependant il peut y avoir des cas d'inversion de température, de l'eau plus chaude, plus lourde par conséquent, étant superposée à de l'eau plus froide. Ainsi dans ma station I, du lac de Morat, sondages du 23 décembre, l'eau était de 0°.1 plus chaude à 5 mètres au-dessus du sol qu'au contact du fond¹.

7° Pour comparer utilement les deux séries de sondages faites dans le lac de Morat à quarante jours d'intervalle, je tire la moyenne des deux séries d'opérations faites dans les stations I, II et III de la première et I et II de la seconde.

Profondeur	23 décembre	1 ^{er} février	Différence
^m 0	^o 0.35	^o 0.35	^o 0
5	1.60	1.90	+ 0.30
10	2.00	2.00	0
15	2.23	2.45	+ 0.22
20	2.46	2.50	+ 0.04
25	2.60	2.50	— 0.10
30	2.66	2.40	— 0.26
35	2.75	2.55	— 0.20
40	2.70	2.70	0
Moyennes	<u>2.15</u>	<u>2.15</u>	

¹ Les deux sondages à 35 et à 40 mètres ont été répétés l'un et l'autre deux fois.

Je constate que les moyennes sont restées égales ; que, pendant ces quarante jours qui ont séparé les deux sondages, le lac n'a ni gagné ni perdu, d'une manière sensible, de la chaleur ; que, par conséquent, la couche de glace a protégé la masse d'eau du lac contre un refroidissement ultérieur, ou plutôt que tout le froid, venu de l'extérieur par la surface glacée, a été employé pour augmenter l'épaisseur de la glace.

Il en résulte que l'on peut mesurer d'une manière fort exacte la quantité de chaleur perdue par la surface glacée du lac en mesurant l'épaisseur de la glace. Un calcul fort simple montre que chaque centimètre de glace correspond au dégagement de 7.3 calories par décimètre carré. Donc les 41 centimètres d'épaisseur de glace, que j'ai mesurés le 23 décembre sur le lac de Morat, représentaient le dégagement de 80.3 calories par décimètre carré, et, comme le lac n'était gelé que depuis cinq jours, cela correspond à un dégagement moyen de 16.2 calories par décimètre carré et par jour¹.

- 8° Si l'on compare dans mon tableau des moyennes la colonne des différences entre les deux séries de sondages du lac de Morat, l'on voit que jusqu'à 20 mètres de profondeur l'eau qui était d'abord plus froide s'est ensuite réchauffée, et que de 25 à 40 mètres de profondeur l'eau qui d'abord était relativement plus chaude s'est

¹ Il y a là l'indication d'un moyen fort simple pour mesurer d'une manière exacte, en calories, l'effet protecteur de la neige. Que sur un étang glacé l'on enlève la neige sur quelques mètres carrés, et qu'au bout de quelques jours l'on mesure la différence d'accroissement de la glace, dans la partie libre et dans la partie protégée par la neige, on en déduira la quantité de calories dégagées par unité de surface dans ces deux conditions différentes, et la différence donnera l'effet protecteur de la neige.

ensuite refroidie. Il y a donc eu tendance à l'égalisation de la température entre les couches superficielles et les couches profondes du lac.

9° Quel est le mode de propagation du froid jusqu'à 110 mètres de profondeur dans le lac de Zurich, ou pour m'exprimer plus correctement, comment le lac, qui, à un moment donné, avait une température uniforme de 4°, a-t-il perdu de la chaleur dans ses couches supérieures jusqu'à une profondeur de 110 mètres?

La perte de chaleur se fait entièrement par la surface supérieure, donc il faut que la chaleur se dégage en se propageant de bas en haut; cela est évident.

Cette propagation de bas en haut ne peut se faire par des courants verticaux de convection thermique. Ces courants, résultat d'une différence de densité entre deux couches, sont impossibles dans les circonstances en question; en effet, le refroidissement superficiel tend bien à exagérer les différences de densité entre le haut et le bas du lac, mais les couches supérieures qui se refroidissent sont déjà plus légères que les couches profondes encore chaudes. Les courants ordinaires de convection thermique ne peuvent donc se développer.

Dans l'article cité plus haut, M. J.-Y. Buchanan montre cependant comment, dans la congélation des lacs, des courants de convection thermique peuvent amener à la surface l'eau venant des couches profondes; il admet que les bords du lac se refroidissant plus vite que le milieu, il en résulte des courants horizontaux qui transportent au milieu du lac l'eau superficielle des bords, plus froide et que par suite il se développe quelques courants verticaux pour remplacer cette eau des bords qui s'est transportée au centre. Je reconnais bien la probabilité d'une

telle circulation; mais il me semble que ces courants doivent être excessivement faibles et qu'ils ne peuvent certainement pas expliquer la distribution thermique, constatée à de si grandes profondeurs dans les lacs de Morat et de Zurich. Le cas du lac de Morat, qui s'est pris subitement et en une seule nuit, sans qu'il y ait eu établissement de bandes concentriques de glaces littorales, montre bien du reste que le refroidissement s'est fait à la fois sur toute la surface du lac, et que par conséquent la circulation thermique de Buchanan a dû y être fort peu importante.

Il peut y avoir dans le refroidissement d'un lac propagation de la chaleur par voie de convection mécanique sous l'influence des vents; voici comment je comprends l'établissement de ces courants. Le vent en caressant la surface de l'eau cause une dénivellation du lac parfois assez importante; il abaisse l'eau dans la moitié du lac qu'il atteint d'abord, et la relève dans la moitié vers laquelle il se dirige¹. Il en résulte un courant de retour profond, qui marche en sens inverse du vent, et une circulation générale de l'eau. En été ce courant de retour n'a pas lieu à une grande profondeur, lorsque l'eau est stratifiée thermiquement et lorsque les différences de densité sont considérables entre la surface et le fond. Mais en hiver, lorsque la densité est uniforme dans toute l'épaisseur du lac, ce courant de retour peut descendre fort bas²; par conséquent, lorsque toute l'eau est à 4°,

¹ Cf. F.-A. Forel, *Limnimétrie du Léman*, § XIII et § XIX. *Bull. Soc. Vaud. Sc. nat.*, XV, 145 et 308. Lausanne 1878.

² Pendant l'ouragan du 20 février 1879 les filets des pêcheurs de féra d'Ouchy ont été arrachés et charriés fort loin par ce courant de retour alors même qu'ils reposaient au fond par 200 et 300 mètres de profondeur. Cf. Chatelanat, *Effets sous-lacustres du Cyclone du*

un vent violent peut déterminer, par voie mécanique, une circulation d'eau dans toute la masse du lac, jusqu'aux plus grandes profondeurs. Que, dans ces circonstances, la température de la surface s'abaisse à 3°.9 le fond étant à 4°, la différence de densité entre les couches n'est pas assez forte pour dépasser l'impulsion mécanique du vent, et la circulation continue, en entraînant dans la profondeur l'eau à 3°.9, et en ramenant à la surface l'eau à 4°; tout le lac peut ainsi abaisser sa température à 3°.9, puis à 3°.8 et ainsi de suite. De cette manière, dans un lac petit, peu profond, par un vent violent, et avec un refroidissement superficiel peu intense, on pourrait comprendre comment toute la masse du lac abaisserait successivement et uniformément sa température au-dessous de 4°; ce qui a lieu en petit dans un étang pourrait avoir lieu dans un lac. Mais si la vitesse du refroidissement superficiel est plus rapide dans ses effets que l'action de mélange mécanique que je décris ici, le courant de retour, au lieu de descendre jusqu'au fond du lac, reviendra entre deux eaux à des hauteurs de plus en plus élevées, et il en résultera une stratification thermique, à peu près analogue à celle que nous constatons.

Cette circulation mécanique suffirait-elle à rendre compte des faits observés? Je ne le crois pas. Quand je considère la profondeur à laquelle le froid a pénétré dans les lacs de Morat et de Zurich, quand je vois que déjà le 18 décembre, jour de sa congélation, le lac de Morat présentait, à 40 mètres de profondeur, une température de 1°.2 au-dessous de celle du maximum de densité de

l'eau, quand j'étudie la régularité de la courbe d'accroissement de la température dans le lac de Zurich, je suis porté à chercher autre chose que cette simple action mécanique pour expliquer le refroidissement profond des lacs.

La question serait jugée si l'on pouvait faire une comparaison entre la courbe thermique du même lac dans deux hivers à circonstances météorologiques différentes. Dans l'automne de 1879 le vent du Nord a régné avec une grande intensité et pendant longtemps¹; qu'il vienne un hiver froid où le lac de Morat gèle par un temps calme, la comparaison des sondages thermométriques nous apprendra si la circulation mécanique causée par le vent suffit à expliquer la descente du froid à une aussi grande profondeur.

Il n'y a pas lieu d'invoquer, pour expliquer le refroidissement des couches profondes du lac, le rayonnement de ces couches elles-mêmes; la physique générale nous apprend que cet effet est nul. Il n'y a pas lieu non plus de s'adresser au rayonnement du sol du lac à travers l'eau; nous savons que l'eau est adiathermane pour la chaleur obscure.

Il ne nous reste d'action efficace que la propagation de la chaleur de bas en haut, par conductibilité ou conduction, les couches inférieures livrant leur chaleur aux couches supérieures, refroidies elles-mêmes par rayonne-

¹ D'après les observations de Genève, nous voyons en fait de jours où un vent du Nord ou du Sud a régné:

en octobre 1879	14 jours
en novembre	18 »
en décembre (jusqu'au 17)	13 »

Sur ces 45 jours, le courant d'air venant du Nord a régné pendant 30 jours.

ment et par contact avec l'air. Les recherches classiques de Despretz ont démontré cette conductibilité dans des vases d'expérience; l'observation de la propagation de la chaleur dans les lacs la prouvera d'une manière bien plus grandiose.

J'ajouterai que c'est à cette conductibilité, et uniquement à elle, qu'il faut attribuer le phénomène d'égalisation de la température que j'ai décrit au n° 8 de ce paragraphe; dans les quarante jours qui ont séparé mes deux sondages du lac de Morat, la différence de température entre les couches supérieures et les couches inférieures a diminué; la chaleur s'est donc propagée verticalement, de bas en haut, et cela dans un vase fermé de toutes parts, où il n'y a pu avoir ni courants thermiques, ni courants mécaniques, mais seulement conduction.

En résumé, je ne vois pour expliquer les faits constatés de la distribution thermique dans les lacs de Morat et de Zurich, que trois actions possibles:

- a) convection thermique, circulation de Buchanan;
- b) convection mécanique, circulation causée par les vents;
- c) conduction de la chaleur.

Ces trois actions se sont probablement combinées ensemble; j'attribue la plus grande part à la troisième, puis à la seconde, la première de ces actions ayant l'effet le plus faible.

§ VI. *Mirages sur les lacs glacés. Dégagement de chaleur à travers la glace.*

Déjà sur le lac de Morat le 23 décembre 1879 j'avais

été frappé de la beauté des mirages. Ce phénomène s'est de nouveau présenté à moi sur le lac de Zurich les 25 et 26 janvier 1880, et je me suis appliqué à l'étudier d'un peu plus près.

Ces mirages sont analogues à ceux que nous constatons en hiver sur les lacs non gelés. En hiver, lorsque l'eau est plus chaude que l'air, par un jour de bise par exemple, les objets qui sont situés à une certaine distance sur le lac paraissent soulevés à une certaine hauteur sur l'horizon apparent, plan caustique de Biot, qui forme une ligne très visible à 5, 10 ou 12 minutes de degré au-dessus de l'horizon réel. Les objets soulevés au-dessus de l'horizon apparent se réfléchissent dans cet espace qui les sépare de l'horizon réel, comme s'ils étaient réfléchis par un miroir, ou une nappe d'eau absolument calme. Ce mirage se produit sur le sable du désert réchauffé par les rayons du soleil, sur l'eau d'un lac qui est plus chaude que l'air susjacent; il se produit aussi sur la glace d'un lac lorsque l'air susjacent est très froid. C'est que la glace, baignée à sa face inférieure par de l'eau à 0°, est moins froide que l'air qui est en dessus; elle livre de la chaleur à cet air, qui, au contact de la glace, est ainsi réchauffé et est moins froid que l'air des couches supérieures.

C'est ce que j'ai constaté par quelques mesures de température faites le 26 janvier sur la glace devant la ville de Zurich; j'ai mesuré successivement l'air, la glace et l'eau.

Température de l'air à	m		°
1.30 au-dessus de la		glace	— 10.5
»	0.01	»	— 8.0
» de la glace	0.01	au-dessous de la surface	— 3.8
»	0.05	»	— 2.6
»	0.10	»	— 0.8
» de l'eau	0.13	»	+ 0.2

On voit dans ces chiffres l'action de rechauffement de la glace sur l'air, qui était de $2 \frac{1}{2}$ degrés moins froid au contact de la glace qu'à une certaine hauteur, et l'on a ainsi l'explication des mirages.

Notons ici, que la variation de la température de l'air, au contact de la glace du lac de Zurich, était notablement plus importante que celle que l'on constate sur le lac Léman dans les grands mirages d'hiver. Dans ses belles recherches sur ce sujet¹, M. Louis Dufour a bien rarement trouvé sur le Léman une différence de plus d'un degré entre la température de l'air à la surface du lac et celle à un mètre de hauteur.

¹ L. Dufour, Des températures de l'air, et des mirages à la surface du lac Léman. *Bull. Soc. Vaud. Sc. nat.* V, 26.