

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	12 (1873-1874)
<b>Heft:</b>	69
 <b>Artikel:</b>	Recherches sur la réflexion de la chaleur solaire à la surface du Lac Léman
<b>Autor:</b>	Dufour, L.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-287479">https://doi.org/10.5169/seals-287479</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences naturelles.

Vol. XII.

N° 69.

1873.

---

## RECHERCHES

SUR LA

### RÉFLEXION DE LA CHALEUR SOLAIRE

A LA

SURFACE DU LAC LÉMAN

PAR

M. L. DUFOUR,

professeur de physique à l'Académie de Lausanne



La réflexion de la chaleur par une surface d'eau n'a pas été, jusqu'ici, l'objet de recherches développées. Les auteurs qui se sont occupés de la réflexion de la chaleur paraissent s'en être tenus à l'étude de ce qui se passe à la surface des corps solides, et je n'ai pas trouvé de renseignements quelque peu détaillés sur le rôle des liquides comme réflecteurs. Melloni dit qu'il a constaté la chaleur rejetée par une surface aqueuse ; mais il ne donne point le détail des expériences et ne cite aucun résultat numérique de ses observations.

Les grands bassins naturels, la mer et les lacs, réfléchissent sûrement une certaine portion de la chaleur solaire ; il suffit de s'être trouvé dans une situation convenable et à proximité d'un semblable bassin pour n'avoir

aucun doute à ce sujet. Si le soleil est bas sur l'horizon, que ses rayons atteignent très obliquement la surface de l'eau, la proportion de chaleur réfléchie est assez forte pour que chacun puisse s'en apercevoir sans le secours d'aucun instrument.

Si la côte se relève un peu brusquement à partir du rivage, les rayons réfléchis doivent l'atteindre et augmenter ainsi le réchauffement que procure au sol le rayonnement direct du soleil. Cet accroissement de chaleur n'est sans doute pas négligeable, et il compte peut-être pour un facteur de quelque importance dans le climat des contrées convenablement situées.

La rive suisse du lac Léman présente diverses portions qui sont très favorablement placées pour recevoir la chaleur réfléchie par l'eau. Dans quelques endroits, la côte se relève avec une forte pente au nord, au nord-ouest ou au nord-est ; elle s'offre ainsi particulièrement bien aux rayons que réfléchit le lac lorsque le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon. Ces coteaux, couverts de vignes, sont d'ailleurs très bien orientés pour profiter du rayonnement direct. La chaleur réfléchie par le lac vient donc améliorer une situation climatologique déjà fort bonne.

Mais quelle est, approximativement au moins, la proportion de chaleur qui est renvoyée par la surface liquide ? Comment cette réflexion varie-t-elle avec l'incidence des rayons ? Jusqu'à quelle distance de la surface aqueuse se conserve-t-elle appréciable ? Quelle est l'influence de l'état de la surface de l'eau ?

Ces diverses questions, qui se présentent naturellement à l'esprit, ont provoqué les recherches qui font l'objet du présent mémoire. Ces recherches sont malheureusement encore insuffisantes et elles n'ont point la prétention de

répondre d'une manière complète et précise aux questions posées. Elles ont été commencées il y a plusieurs années déjà. J'avais espéré les reprendre et les poursuivre en suivant d'autres méthodes ; mais diverses circonstances m'ayant empêché jusqu'ici, je me décide à ne pas différer davantage la publication des résultats obtenus. Ces résultats, qui ne sont pas aussi nombreux ou aussi concordants que je l'aurais désiré, n'en offrent pas moins, ce me semble, un certain intérêt physique et météorologique.

#### Expériences préliminaires. — Méthode employée pour observer et mesurer la chaleur réfléchie.

**1.** Des observations comme celles dont il est ici question offrent bien des difficultés spéciales. Il s'agit de mesures qui doivent se faire en plein air, qui doivent se répéter dans diverses stations plus ou moins éloignées du lac et avec des installations parfois assez incommodes. On ne peut pas employer les méthodes et les procédés qui seraient les meilleurs s'il s'agissait d'opérer dans le calme et le confort d'un laboratoire, mais qui deviennent impossibles lorsqu'il s'agit de s'établir pour quelques heures seulement sur la plage sablonneuse du lac ou sur la pente inclinée d'une vigne. Les appareils thermo-électriques, qui se prêtent si bien aux expériences sur la chaleur rayonnante, ne sont guère utilisables dans les circonstances où il était nécessaire de se placer pour observer la réflexion de chaleur par le lac.

Lorsqu'on veut mesurer la chaleur qui provient directement du soleil, on a un point déterminé comme origine du flux rayonnant et il suffit que les instruments puissent

recueillir la chaleur qui arrive d'une direction unique. A la surface d'un grand bassin d'eau, la réflexion ne se produit que très rarement sur une place limitée ; l'agitation superficielle du liquide donne lieu à une réflexion qui provient d'une longue et large traînée ; c'est une surface très vaste qui envoie de la chaleur et il faut pouvoir recueillir des rayons dont les directions sont assez écartées les unes des autres.

Le pyrhéliomètre de Pouillet semble, au premier abord, convenir assez bien pour ce genre de recherches ; mais son emploi est entouré de difficultés à peu près insurmontables si l'air n'est pas bien calme et, en outre, il ne permet pas de faire plusieurs observations successives à des intervalles un peu rapprochés. Les instruments dont se sont servis, dans ces derniers temps, le Père Secchi et M. Soret sont, au point de vue de la précision, supérieurs au pyrhéliomètre de Pouillet et aux appareils dont j'ai fait usage. A l'époque où mes expériences ont été commencées, ces instruments ne m'étaient pas connus. Ils supposent d'ailleurs que le flux de chaleur rayonnante arrive dans une direction déterminée et il faudrait les modifier pour les rendre capables de recueillir la chaleur qui provient d'une surface assez étendue.

**2.** Pour observer la quantité de chaleur que le lac réfléchit, je me suis simplement servi d'une boule noircie, au centre de laquelle est installé un thermomètre. C'est la méthode qui a été indiquée et employée, il y a longtemps déjà, par M. de Gasparin pour mesurer le rayonnement direct du soleil.

J'ai employé des boules creuses exactement conformes au modèle de M. de Gasparin. Elles consistent en une

sphère de laiton très mince, de dix centimètres de diamètre, pesant 90 grammes<sup>(1)</sup>). En un point de la surface

(<sup>1</sup>) M. de Gasparin est arrivé à préférer et à admettre la dimension et la substance de ces boules après de nombreux essais préliminaires. Il a essayé des boules de bois, de verre, etc. Voici un passage de sa *note* :

« Nous avons fait de nombreux essais pour la dimension à donner à nos boules. La chaleur accumulée augmentait à mesure que nous augmentions le diamètre et d'une manière assez régulière jusqu'à 10 centimètres ; au-delà et jusqu'à 30 centimètres, les variations deviennent si grandes par l'effet des vents ou des nuages, que nous avons dû y renoncer et nous en tenir à la proportion de 10 centimètres. »

(*Comptes-Rendus de l'Acad.* T. 36 ; 1853).

J'ai fait de nombreuses comparaisons entre les boules employées dans les présentes expériences et des thermomètres ordinaires. Voici, entre autres, quelques faits intéressants à signaler :

1. J'ai exposé au soleil, dans des conditions semblables, une boule pourvue de son thermomètre, un thermomètre ordinaire recouvert de noir de fumée velouté, un thermomètre verni au noir de fumée et un thermomètre à surface vitreuse. — La boule a toujours présenté une température notablement plus élevée que les thermomètres, ou, comme le dit M. de Gasparin, elle « accumulait » plus de chaleur. Ainsi, par exemple, lorsque le thermomètre à surface vitreuse présentait un excès de 4 à 5° sur l'air ambiant, le thermomètre au noir de fumée velouté arrivait à + 9 ou + 10° ; le thermomètre au noir de fumée verni montait un peu moins, et la boule avait + 14 à + 15°. Dans beaucoup de comparaisons semblables, la boule atteignait de 3 à 5° de plus que le thermomètre à noir velouté.

2. Lorsqu'on fait intervenir une variation dans l'intensité du flux de chaleur qui frappe les instruments, ou dans l'intensité des causes qui refroidissent, la boule n'est pas influencée de la même façon que les thermomètres. Ainsi, lorsqu'on détermine un courant d'air un peu fort, ou bien lorsqu'on arrête les rayons solaires pendant quelques secondes, les thermomètres baissent rapidement. La boule ne varie que beaucoup plus lentement.

3. Lorsqu'on expose la boule et le thermomètre (velouté) à l'action d'une flamme, en les plaçant d'une manière telle que leurs excès de température sur l'air ambiant soient sensiblement les mêmes, on trouve que les causes qui font varier la tempé-

se trouve soudé un petit tube métallique rigide, de 40 millimètres de longueur et de 8 millimètres de diamètre. C'est à l'aide de ce tube que la boule est fixée à l'extrémité d'un piquet convenablement taillé, extrémité qui s'introduit dans le tube de métal. En un point diamétralement opposé au tube dont il vient d'être question, la boule est percée d'une ouverture de 10 millimètres de diamètre. Cette ouverture reçoit un bouchon à travers lequel s'introduit la tige d'un thermomètre dont la cuvette vient occuper le centre de la boule. Un peu de mastic mou sert à fermer l'ouverture autour du thermomètre. La surface extérieure de la boule est soigneusement recouverte d'un vernis au noir de fumée mat, répandu en une couche aussi uniforme que possible.

Trois boules parfaitement semblables ont servi aux observations qui seront rapportées plus loin. Je les désignerai par **A**, **B**, **C**. Les thermomètres étaient divisés en cinquièmes de degré ; on pouvait donc, à vue et très facilement, lire directement le dixième et même le vingtième de degré.

rature (augmentation ou diminution de la flamme pendant quelques instants) donnent lieu à une variation plus grande au thermomètre qu'à la boule. Ainsi, des variations petites et intermittentes de la flamme faisaient osciller de plusieurs dixièmes de degré le thermomètre, tandis que la boule demeurait sensiblement constante ou ne variait que très peu.

Ces faits montrent que la boule Gasparin, exposée au soleil, fournit une température plus élevée qu'un thermomètre ordinaire noirci, et que, à excès égal de température, la boule change moins sous l'influence de variations passagères dans la cause qui réchauffe. Ce caractère est évidemment un avantage en faveur de la boule pour des recherches comme celles dont il est ici question, recherches qui doivent se faire à l'air libre et dans des circonstances où les causes accidentelles de variations sont inévitables.

**3.** Il importait, tout d'abord, de s'assurer que les indications fournies par les diverses boules étaient comparables ; c'est-à-dire que, placées dans des conditions identiques, les instruments fournissaient des résultats semblables. Voici quelle marche a été suivie dans ces études préliminaires.

Les thermomètres ont été comparés avec les précautions ordinaires afin de déterminer leur correction. Les comparaisons ont été faites en les plaçant simplement dans un vase, très voisins les uns des autres, enveloppés de coton, et cela dans diverses circonstances de température ambiante.

Les thermomètres ont ensuite été observés alors qu'ils étaient installés dans une des boules décrites plus haut. Les boules, fixées sur des piquets d'environ 50 centimètres de hauteur, ont été exposées à diverses températures ambiantes, à l'ombre et à l'abri de tout rayonnement d'une source de chaleur. Ces comparaisons ont été faites les unes dans une chambre fermée ou dans le laboratoire, les autres, à l'air libre, dans un jardin, en choisissant des jours où l'air était bien calme et le ciel couvert.

Dans une pièce fermée et dans le laboratoire, les thermomètres plongés dans les boules ont présenté les mêmes corrections que celles qui avaient été obtenues précédemment ; en d'autres termes, en leur appliquant la correction convenable, on obtenait, pour les trois boules voisines, la même température. Les comparaisons faites à l'air libre ont donné des résultats moins concordants. Chaque thermomètre recevant la correction qui lui convient, on obtenait des températures qui différaient souvent de  $0^{\circ}1$  à  $0^{\circ}2$ , parfois même, exceptionnellement, de

0<sup>o</sup>,3 à 0<sup>o</sup>,4. Plus l'air était calme et plus les indications étaient concordantes. Mais ces différences n'ont offert entr'elles, d'une boule à une autre, aucune régularité; elles étaient tantôt dans un sens tantôt dans un autre et provenaient très probablement de l'agitation de l'air qui se faisait sentir d'une façon un peu inégale, même dans des points très rapprochés. On verra plus tard que cette cause d'erreur ou d'incertitude, malheureusement inévitables dans la méthode employée et pour les observations en plein air, a, du plus ou moins, exercé son influence pendant les observations de réflexion de chaleur par le lac.

Les trois boules, munies de leurs thermomètres, ont enfin été exposées au soleil près les unes des autres, afin de voir si le réchauffement dû à l'absorption de la chaleur rayonnante était le même pour toutes. Dans ces conditions, on a immédiatement pu constater une différence très sensible entre la boule A et les deux autres. Ces dernières ont marché très convenablement d'accord ou n'offraient que de petites différences, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. La boule A, au contraire, a donné des températures à écart négatif, écart d'autant plus grand que le rayonnement solaire était plus intense,

Voici, comme exemple, les résultats de quelques comparaisons semblables faites dans différents jours. Ces comparaisons ont été exécutées dans une chambre dont la fenêtre ouverte laissait entrer le soleil. La colonne T renferme les excès de température des deux boules B et C sur la température ambiante; les autres colonnes renferment les écarts, tous en *moins*, de la boule A :

T	e	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>
4°	0.50	. . . .	0.60	0.64	0.55
5°	0.55	0.55	0.70	0.72	0.65
6°	0.70	0.60	0.83	0.80	0.75
7°	0.80	0.75	0.95	0.90	0.90
8°	0.90	0.84	1.10	1.00	1.00
9°	0.95	0.95	1.13	1.05	1.15
10°	1.00	1.05	1.14	1.10	1.30
11°	1.05	1.15	. . . .	. . . .	1.35
12°	1.15	1.30	. . . .	1.25	1.45
13°	1.30	. . . .	. . . .	. . . .	1.50

Les chiffres de ces cinq séries, quoique un peu irréguliers et variant d'une série à l'autre, montrent nettement que la correction qui devrait être apportée à la boule A, pour la rendre comparable à B et à C, n'est pas constante. Cette correction augmente avec l'intensité du rayonnement solaire. A mesure que ce rayonnement diminuait, les trois boules s'approchaient de donner une même température.

La différence dont il s'agit ici se manifestant toujours dans le même sens et étant à peu près proportionnelle à l'intensité du rayonnement, doit sans doute être attribuée à un pouvoir absorbant moins considérable de la surface de A. Rien dans la dimension, le poids et l'aspect de cette boule ne trahissait cette différence de propriété touchant la faculté absorbante.

Les comparaisons qui viennent d'être décrites montrent que A, B et C fournissent des résultats comparables

lorsqu'il s'agit de la simple température de l'air, sans source de rayonnement; mais que lors d'un réchauffement dû à un flux de chaleur rayonnante, **B** et **C** seuls sont convenablement comparables. Je n'ai pas cherché à modifier la surface de **A** (par exemple par un nouveau vernissage) de manière à faire disparaître l'exception qu'elle fournissait. L'une des boules étant destinée à demeurer à l'ombre et à indiquer la température de l'air, c'est cette boule-là qui pouvait, sans inconvénients, être choisie.

**4.** Pour observer la chaleur réfléchie par le lac, les boules **A**, **B**, **C** étaient installées de la manière suivante :

Des piquets de bois, haut de 1<sup>m</sup>80, étaient fixés dans le sol, à une distance de 1<sup>m</sup> à 1<sup>m</sup>20 les uns des autres, suivant une ligne à peu près perpendiculaire à la direction générale du flux solaire. Sur ces piquets étaient plantées les boules pourvues de leurs thermomètres. A une distance convenable, en avant des boules, se trouvaient des écrans destinés à protéger partiellement ou complètement deux d'entr'elles. Pour la facilité des transports et d'une prompte installation, j'ai employé, comme écran, une simple planche carrée de bois, de 40 centimètres de côté, qui se fixait latéralement à un piquet solide planté dans le sol. Cette planche pouvait monter ou descendre le long du piquet; elle pouvait d'ailleurs s'incliner plus ou moins relativement à l'horizon.

En avant de la boule **A**, et dans une situation convenable, se trouvait un piquet le long duquel pouvait glisser deux écrans. En variant leur élévation et leur inclinaison, on protégeait cette boule du rayonnement direct du soleil et de la réflexion du lac. En avant de **B**, un autre piquet

était pourvu d'une seule planche qui se déplaçait de façon à empêcher le rayonnement direct, mais à permettre l'accès des rayons réfléchis par le lac. Enfin la boule C était parfaitement libre et recevait aussi bien les rayons du soleil que ceux que réflétait la surface aqueuse. Ainsi, en résumé, A donnait la température de l'air,  $t$ ; B, une température  $t + t'$  due à la réflexion du lac, et C une température  $t + t''$  provenant de la chaleur réfléchie et de la chaleur directe.

Par suite du déplacement du soleil dans le ciel et par conséquent aussi du changement de la région du lac qui réfléchissait, il était nécessaire de déplacer un peu les écrans dans le courant d'une même série d'observations. Ce déplacement se faisait en variant d'une manière convenable l'inclinaison des écrans et la position des piquets auxquels ils étaient fixés.

Dans les nombreuses comparaisons préliminaires que j'avais faites avant d'entreprendre les observations définitives près du lac, quelques faits m'avaient amené à craindre que les écrans de bois fussent une protection insuffisante. Le bois s'échauffant peu à peu sous l'action du soleil, la face postérieure de la planche pouvait rayonner vers la boule et influer ainsi un peu sur les indications thermométriques. Afin d'éviter cette cause possible d'erreur, les écrans ont été pourvus d'une feuille de carton, qui avait la même dimension que le bois lui-même et qui était fixée au bois, sans cependant le toucher tout à fait. Une distance de dix millimètres séparait les deux surfaces voisines et permettait, entr'elles, une libre circulation de l'air. Grâce à cette précaution, la face de l'écran tournée vers la boule (c'était la feuille de carton) ne s'échauffait pas et son rayonnement devenait sûrement sans influence.

**5.** Les excès de température  $t'$  et  $t''$  sont produits, le premier par la réflexion du lac et le second par cette même réflexion augmentée de la chaleur directement rayonnée par le soleil. A un moment donné, le soleil fournit une quantité de chaleur  $S$ , le lac en réfléchit une quantité  $R$ . Il s'agit de déduire, des excès  $t'$  et  $t''$ , le rapport entre  $R$  et  $S$ . C'est cette connaissance de la proportion de chaleur solaire réfléchie par le lac qui est le principal objet des présentes recherches. La valeur absolue de  $S$  ou de  $R$ , exprimée, par exemple, en calories sur un centimètre carré et pendant une minute, est un problème différent et sur lequel je reviendrai plus tard.

Lorsque la boule **B** indique une température de  $t'$  degrés supérieure à la température ambiante, il faut évidemment que la chaleur qui lui est communiquée à chaque instant par la réflexion du lac fasse équilibre à celle qu'elle perd par le rayonnement et par le contact de l'air. Soit  $V'$  la vitesse du refroidissement pour un excès  $t'$ ; la quantité de chaleur perdue pendant un petit instant  $d\theta$  est  $V' d\theta$ . C'est donc là aussi la mesure de ce qui provient du lac pendant l'intervalle  $d\theta$ .

Pour la boule **C**, qui indique en même temps un excès  $t''$ , la vitesse de refroidissement sera  $V''$  et la quantité de chaleur qu'elle reçoit pendant  $d\theta$ , du soleil et du lac, est égale à  $V'' d\theta$ . — Le rapport entre  $R$  et  $R + S$ , à un moment donné, sera donc égal à  $\frac{V'}{V''}$ , c'est-à-dire au rapport entre les vitesses de refroidissement des deux boules correspondant à deux excès  $t'$  et  $t''$  observés au même moment.

Si l'on pouvait admettre que la loi du refroidissement de Newton s'appliquât au cas dont il s'agit, le problème

serait promptement résolu puisque le rapport des vitesses serait égal au rapport des excès de température. On aurait

$$\frac{V'}{V''} = \frac{t'}{t''} \text{ et, par conséquent, } \frac{R}{R+S} = \frac{t'}{t''}$$

$$\text{d'où } \frac{R}{S} = \frac{t'}{t'' - t'}.$$

C'est là une première approximation qui, eu égard à la valeur toujours assez faible des excès  $t'$  et  $t''$ , n'est pas fort éloignée de la vérité. Mais j'ai désiré connaître d'une manière plus précise les vitesses de refroidissement des boules pour les divers excès de température, afin d'obtenir, avec plus d'exactitude, le rapport  $\frac{V'}{V''}$ .

**6.** La détermination de la vitesse du refroidissement revient, on le sait, à chercher la loi suivant laquelle les excès de température sont reliés au temps. Cette loi étant connue et représentée par une fonction  $t = F(\theta)$ , la vitesse, pour chaque excès, est  $V = \frac{dt}{d\theta}$ . Il s'agit donc de déterminer expérimentalement  $F(\theta)$  et de trouver les constantes de cette fonction qui conviennent aux appareils particuliers pour lesquels on désire connaître la marche du refroidissement.

Afin de connaître la loi que suit, dans son refroidissement, une des boules employées, j'ai opéré de la manière suivante. La boule était fixée sur un piquet court, maintenu par un support. On l'exposait pendant quelque temps au flux de chaleur réfléchie provenant d'un miroir métallique, au foyer duquel était une lampe à gaz. Le thermomètre montait lentement jusqu'à une température de 30 à 35° au-dessus de l'air ambiant. La boule était alors rapidement transportée dans un autre local que celui où

s'était fait le réchauffement et placée de telle sorte que le thermomètre pouvait être observé à distance, à l'aide d'une lunette. J'ai employé une lunette de cathétomètre du grossissement de 30 fois. La colonne mercurielle se voyait avec une grande netteté en même temps que les divisions de l'échelle, divisions égales à un cinquième de degré.

Pendant que je suivais la marche descendante du thermomètre, un aide notait le temps à l'aide d'un compteur à pointage. On inscrivait l'instant qui correspondait au passage de la colonne mercurielle derrière une des divisions de l'échelle, de degré en degré dans les premiers moments du refroidissement, et de deux en deux cinquièmes lorsque le refroidissement était plus lent. L'observation est plus sûre ainsi que si l'on opère d'une manière inverse. — Grâce à ce mode d'opération, la température indiquée par le thermomètre, à un moment donné, est connue avec une incertitude sûrement inférieure à un dixième de division de l'échelle, soit à  $0^{\circ},02$ .

Pour connaître la température ambiante, les deux autres boules, pourvues de thermomètres, étaient placées à une certaine distance de celle qui se refroidissait et séparées d'elle par de petits écrans. C'est la moyenne de leurs indications, d'ailleurs très concordantes, qui était admise comme température ambiante.

Les résultats ainsi obtenus étaient portés sur deux axes et servaient à construire la courbe du refroidissement ; les abscisses représentant les temps et les ordonnées les excès de température. La courbe une fois tracée, on pouvait en déduire les excès de température correspondant à des nombres entiers d'unités de temps. La minute a toujours été admise comme unité.

Il importait, en premier lieu, de savoir si les vitesses du refroidissement sont les mêmes pour les deux boules **B** et **C**. J'ai fait un certain nombre de séries en opérant d'abord avec l'une, ensuite avec l'autre, dans des conditions autant que possible identiques, c'est-à-dire le même jour, dans la même installation et alors que la température ambiante s'était conservée presque sans variation. — La planche I renferme les courbes de deux séries pareilles. On voit qu'elles se suivent d'une manière très satisfaisante. **B** et **C** ont été obtenues un même jour; **B'** et **C'** un autre jour. Ces dernières ont été, sur la planche, un peu déplacées, c'est-à-dire que les abscisses ont été augmentées de 20<sup>mm</sup>, afin qu'elles ne se superposent pas partiellement aux autres. Dans une autre série comparative, les deux courbes différaient si peu qu'il n'aurait pas été possible de les distinguer à moins de choisir une échelle notablement plus grande que celle que j'ai admise.

Il résulte de là que les deux boules **B** et **C** se refroidissent suivant une loi très sensiblement la même et que la même fonction  $t = F(\theta)$  convient à l'une et à l'autre.

7. Dans les expériences classiques de Dulong et Petit sur le refroidissement, ces auteurs ont trouvé que leurs résultats étaient très convenablement représentés par une équation de la forme  $t = t_0 A^{ax + bx^2}$  dans laquelle  $t_0$  est la température initiale,  $x$  le temps,  $A$ ,  $a$ ,  $b$  des constantes.

Les boules dont je me suis servi ne se refroidissant qu'entre des limites peu étendues, j'ai essayé une formule un peu plus simple, de la même forme que la précédente

et qui s'est trouvée représenter d'une manière très suffisante les expériences. Cette formule est :

$$(1) \quad t = t_0 A^{\theta} - k \theta^2$$

En prenant deux observations  $t_1$  et  $t_2$  correspondant à deux moments  $\theta_1$  et  $\theta_2$  du refroidissement dans une même série, on a :

$$t_1 = t_0 A^{\theta_1} - k \theta_1^2 \quad \text{et} \quad t_2 = t_0 A^{\theta_2} - k \theta_2^2$$

Ces équations servent à déterminer les constantes  $A$  et  $k$  qui conviennent à la série dont il s'agit. On obtient facilement :

$$k = \frac{\theta_1 b - \theta_2 a}{\theta_1^2 b - \theta_2^2 a} \quad \text{et} \quad \log. A = - \frac{a}{\theta_1 - k \theta_1^2}$$

équations dans lesquelles on a, pour simplifier, pris :

$$a = \log. t_0 - \log. t_1 \quad \text{et} \quad b = \log. t_0 - \log. t_2$$

On trouvera ci-dessous les tableaux complets des valeurs *observées* et *calculées* pour deux séries d'observations. La colonne  $\theta$  indique le temps exprimé en minutes ; la colonne E, les excès *observés* de la température du corps qui se refroidit au-dessus de la température ambiante, et la colonne E', les mêmes excès *calculés* à l'aide de la formule (1). La température ambiante était 14°,80 lors de la première série et 15°,65 lors de la seconde.

Dans la série I, les constantes ont été déterminées à l'aide des observations faites à 8<sup>m</sup> (2°,24) et à 18<sup>m</sup> (0°,46). On trouve :  $k = 0,01076$  et  $\log. A = 1,9045$ . La formule

qui convient à la série et qui a servi à calculer les chiffres de la colonne E est :

$$t = 11^{\circ}17 \times 0,8027\theta - 0,01076\theta^2$$

Dans la série II, les constantes ont été obtenues en utilisant les observation de 4<sup>m</sup> (8°,30) et de 10<sup>m</sup> (2°,49). On trouve :  $k = 0,0103$  et  $\log. A = \overline{1},8982$ .

L'équation qui convient à cette série et qui a servi à calculer la colonne E est donc :

$$t = 20^{\circ}40 \times 0,791\theta - 0,0103\theta^2$$

Si l'on compare, dans chaque série, les colonnes E et E', on verra que les observations sont très convenablement représentées par la formule. L'accord est même plus grand que ce que j'avais osé espéré ; il prouve que le mode d'observation indiqué plus haut est susceptible d'une grande sûreté.

(Tableau I.)

J'ai obtenu un grand nombre d'autres séries semblables à celles qui sont mentionnées ici comme types. Toutes se représentent par une équation de la forme (1) et il est ainsi bien démontré que cette formule exprime d'une façon très approchée la loi du refroidissement des boules dans l'air, au moins entre les limites restreintes de température dans lesquelles les observations ont eu lieu.

**8.** La vitesse du refroidissement, à chaque instant, s'obtient en différentiant  $t$  par rapport à  $\theta$ . On a :

$$V = \frac{dt}{d\theta} = t (1 - 2 k \theta) l_n A$$

## TABLEAU I.

SÉRIE I.			SÉRIE II.		
$\theta$	E	E'	$\theta$	E	E'
0 <sup>m</sup>	11°.17	11°.17	0 <sup>m</sup>	20°.40	20°.40
1	8.99	8.98	1	16.20	16.17
2	7.28	7.27	2	12.88	12.88
3	5.88	5.90	3	10.30	10.31
4	4.79	4.81	4	8.30	8.30
5	3.93	3.95	5	6.70	6.70
6	3.24	3.25	6	5.48	5.45
7	2.69	2.69	7	4.48	4.45
8	2.24	2.24	8	3.67	3.65
9	1.86	1.87	9	3.00	3.00
10	1.55	1.57	10	2.49	2.49
11	1.31	1.32	11	2.06	2.07
12	1.11	1.12	12	1.72	1.73
13	0.95	0.96	13	1.48	1.46
14	0.82	0.82	14	1.28	1.24
15	0.71	0.70	15	1.02	1.05
16	0.61	0.61	16	0.87	0.89
17	0.53	0.53			
18	0.46	0.46			
19	0.41	0.40			
20	0.35	0.35			
21	0.30	0.31			

ou bien, en passant des logarithmes népériens ( $I_n$ ) aux logarithmes ordinaires :

$$(2) \quad V = t (1 - 2 k \theta) 2,3026. \log. A.$$

Cette formule permet de calculer V en fonction du temps écoulé dès l'origine et de l'excès  $\theta$ .

Les valeurs inscrites dans le tableau I permettent d'ob-

tenir immédiatement  $V$  pour  $\theta = 1^m, 2^m$ , etc. Mais, si l'on veut connaître  $V$  pour les valeurs entières et successives de l'excès  $t$ , ce qui est plus commode dans la question présente, on peut suivre diverses voies :

- 1) Construire la courbe des vitesses pour les diverses valeurs de  $t$ , d'après l'équation (2), puis chercher les valeurs de  $V$  qui correspondent aux valeurs *entières* de  $t$  ;
- 2) Combiner (1) et (2) pour éliminer  $\theta$  et aboutir à une équation qui donne  $V$  en fonction de  $t$  et  $t_0$ .

Ces deux méthodes ont été employées dans quelques cas comme contrôle ; mais la plus grande partie des chiffres qu'on trouvera dans les tableaux ci-dessous ont été obtenus par la seconde.

L'équation (1) devient :

$$\log. t = \log. t_0 + (\theta - k \theta^2) \log. A$$

d'où l'on tire facilement :

$$\theta = \frac{1}{2k} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4k(\log. t - \log. t_0)}{\log. A}} \right)$$

On s'assure sans peine que cette formule donne les valeurs de  $\theta$  qui correspondent au phénomène physique en prenant le radical avec le signe *moins*.

En introduisant cette valeur de  $\theta$  dans (2), on a :

$$V = t \cdot 2,3026 \cdot \log. A \times \left\{ 1 - 2k \left( \frac{1}{2k} - \sqrt{1 - \frac{4k(\log. t - \log. t_0)}{\log. A}} \right) \right\}$$

ou :

$$V = t \cdot 2,3026 \cdot \log. A \sqrt{1 - \frac{4k(\log. t - \log. t_0)}{\log. A}}$$

Le calcul fournit naturellement pour V des valeurs négatives puisqu'il s'agit d'un refroidissement.

La formule ci-dessus est plus rapidement calculable en passant aux logarithmes. Le produit 2,3026 log. A est constant pour une même série. En faisant log. A positif, dans ce produit, la valeur de V deviendra elle-même positive, et il n'y a aucun inconvénient à cela pour l'usage qui doit en être fait dans la suite. — Cette dernière formule donne donc :

$$(3) \log. V = \log. t + \frac{1}{2} \log. \left\{ 1 - \frac{4k(\log. t - \log. t_0)}{\log. A} \right\} \\ + \log. (2,3026 \log. A)$$

En donnant à A, k et  $t_0$  les valeurs qui conviennent aux diverses séries, on déduit facilement de (3) les vitesses du refroidissement pour les excès  $t = 1^\circ$ ;  $t = 2^\circ$ , etc. au-dessus de la température ambiante.

Le tableau II donne les vitesses, pour les diverses valeurs entières de  $t$ , lorsqu'on utilise les constantes des deux séries précédentes I et II. La colonne  $t$  renferme les excès de température; les colonnes V, et V,, les vitesses déduites de (3) pour les séries I et II; la colonne M, les moyennes entre V, et V,, et la colonne E des nombres proportionnels à ceux de M, en choisissant comme unité la vitesse qui correspond à l'excès  $t = 1^\circ$ .

(Tableau II.)

**9.** La vitesse du refroidissement, pour un même excès  $t$ , varie évidemment avec les circonstances ambiantes; ainsi avec l'état plus ou moins agité de l'air et avec sa densité. Les observations de réflexion de chaleur par le lac

**TABLEAU II.**

<i>t</i>	V <sub>I</sub>	V <sub>II</sub>	M	E
1 <sup>0</sup>	0°160	0°161	0.16	1.00
2	0.358	0.362	0.36	2.25
3	0.568	0.575	0.57	3.56
4	0.786	0.793	0.79	4.93
5	1.005	1.017	1.01	6.31
6	1.235	1.246	1.24	7.75
7	1.468	1.479	1.47	9.18
8	1.700	1.715	1.71	10.68
9	1.937	1.955	1.95	12.18
10	2.175	2.195	2.19	13.68
11	2.416	2.435	2.43	15.18
12	2.656	2.680	2.67	16.68
13	2.900	2.925	2.91	18.18
14	3.145	3.171	3.16	19.72
15	3.390	3.420	3.40	21.26
16	3.636	3.670	3.65	22.81

ont toujours été faites par un temps très faiblement agité ou même calme; cependant, dès qu'on se trouve à l'air libre, il ne peut être question que d'un calme relatif, et il est hors de doute que la quantité de chaleur perdue par une boule, pour un excès déterminé, n'était pas exactement la même d'un jour à l'autre, ni même d'un moment à l'autre d'une même journée. Cette perte était plus grande dans un air plus agité ou plus dense (au niveau du lac) et plus faible dans un air tout à fait calme et moins dense (stations supérieures). Mais les deux boules, exposées l'une au soleil et au lac, l'autre au lac seulement, subissaient *en même temps* les influences qui modifiaient leur perte de chaleur; elles subissaient ces influences dans une mesure inégale et dépendant de leur excès de tem-

pérature. On peut admettre, approximativement au moins, que les vitesses de refroidissement se trouvaient diminuées ou agrandies simultanément et dans une proportion égale. En d'autres termes, les vitesses absolues du refroidissement pouvaient être assez fortement modifiées par les circonstances ambiantes ; mais les *rapports* des vitesses, pour deux excès  $t_1$  et  $t_2$ , ne s'en trouvaient probablement pas changés d'une façon importante ; et, dans la question présente, c'est le rapport des vitesses qu'il importe de connaître.

Les circonstances dans lesquelles ont été faites les observations de chaleur réfléchie par le lac ont été assez différentes d'une série à l'autre (voir § 18) ; elles ont également varié dans le courant d'une même série. Il ne pouvait d'ailleurs pas être question de rechercher directement, sur place, la loi du refroidissement applicable à chaque cas. Dans ces conditions, j'ai dû me borner à déterminer les vitesses du refroidissement dans des circonstances en quelque sorte moyennes, circonstances qui fournissent des valeurs absolues de V sûrement un peu différentes de celles sous l'influence desquelles les boules se refroidissaient à l'air libre ; mais des valeurs telles que les *rapports* des vitesses, pour divers excès de température, diffèrent probablement peu de ces mêmes rapports lorsque les instruments étaient exposés à l'action du soleil et du lac (2).

(2) Je n'ai naturellement pas la pensée que ces *rapports* soient absolument constants pour des circonstances ambiantes très variées. Il s'agit seulement ici d'une approximation que les développements renfermés dans les pages suivantes rendront très probables, approximation due à ce que les excès de température sont toujours demeurés faibles, et à ce que les conditions ambiantes n'ont pas beaucoup varié.

La méthode même employée dans les présentes recherches,

La série I (§ 7) a été obtenue par le refroidissement de la boule dans une salle bien fermée, et où l'air demeurerait parfaitement calme.

Lors de la série II, les fenêtres avaient été ouvertes, l'air était un peu agité. Le refroidissement a évidemment été moins régulier que dans la série I, ce que montrent les écarts entre les valeurs observées et calculées du tableau I. La vitesse du refroidissement, pour un même excès, est un peu plus grande dans la seconde série que dans la première; mais les *rapports* des vitesses, pour un même excès, diffèrent très peu d'une série à l'autre. — Dans plusieurs des observations faites en plein air et près du lac, l'atmosphère a été plus calme qu'elle ne l'était pour cette série II; d'autres fois, et surtout par moments, l'agitation était naturellement un peu plus grande.

Les valeurs moyennes de  $V$ , déduites des séries I et II (tableau II, colonne M) me semblent pouvoir être convenablement admises pour le calcul des observations faites en plein air et ce sont ces valeurs qui ont servi à calculer les quantités de chaleur des tableaux V à XXIII.

**10.** Afin de voir jusqu'à quel point les considérations qui précédent sont admissibles et appuyées par des faits, j'ai calculé les vitesses du refroidissement pour *quelques* valeurs de  $t$ , d'après six autres séries obtenues dans la

méthode plus ou moins imposée par la nature du phénomène à étudier, ainsi que le mode de calcul destiné à déduire des observations faites la quantité de chaleur que réfléchit le lac, ne comporte évidemment pas une précision aussi grande que celle qui peut être atteinte dans beaucoup d'autres études. Sans prétendre à une exactitude numérique très avancée, les résultats que cette méthode et ces calculs ont permis d'obtenir, n'en sont pas moins suffisants pour autoriser quelques conclusions intéressantes.

même salle que I et II, mais dans des circonstances assez variables quant à l'état de repos et d'agitation de l'air.

J'ai cherché d'abord les constantes de la formule semblable à (1) qui convient le mieux à chacune de ces séries. Voici les valeurs de ces constantes, lesquelles diffèrent passablement d'une série à l'autre, parce que les températures initiales étaient différentes également. La colonne G renferme les températures ambiantes :

Série	$t_0$	$k$	log. A	G
III	10°,20	0,0169	1,8918	17°,45
IV	11°,27	0,0133	1,9045	15°,42
V	10°,20	0,0096	1,9069	16°,12
VI	20°,66	0,0076	1,9112	14°,08
VII	15°,30	0,0105	1,9122	15°,68
VIII	18°,00	0,0099	1,8984	16°,35

Avec ces valeurs, et en appliquant la formule (3), on a obtenu les vitesses du refroidissement. — Le tableau suivant (tabl. III) renferme :

- 1) Les vitesses *absolues* pour des excès  $t = 1, 4, 8, 12$  et  $16^\circ$  (colonnes  $a, b \dots f$ );
- 2) Les valeurs *relatives* de ces vitesses, en admettant comme unité la vitesse du refroidissement qui correspond à  $t = 1^\circ$  (colonnes  $a', b' \dots f'$ );
- 3) Dans une dernière colonne (M), pour comparaison, les chiffres du tableau II se rapportant aux mêmes excès de température d'après les séries I et II précédemment rapportées.

TABLEAU III.

Excès <i>t</i>	III			IV			V			VI			VII			VIII			M		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a'</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>a'</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>	<i>d'</i>	<i>e'</i>	<i>f'</i>	<i>a'</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>	<i>d'</i>	<i>e'</i>	<i>f'</i>
1°	0°.155	0°.142	0°.163	0°.151	0°.158	0°.166	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4°	0.86	0.76	0.78	0.71	0.78	0.81	5.54	5.35	4.80	4.70	4.70	4.70	4.70	4.92	4.92	4.88	4.88	4.92	4.92	4.93	4.93
8°	1.93	1.68	1.67	1.52	1.69	1.74	12.45	11.83	10.25	10.07	10.07	10.07	10.07	10.69	10.69	10.47	10.47	10.47	10.47	10.68	10.68
12°	3.05	2.66	2.53	2.35	2.64	2.71	19.67	18.73	15.52	15.56	15.56	15.56	15.56	16.71	16.71	16.32	16.32	16.32	16.32	16.68	16.68
16°	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	21.26	21.26	22.91	22.91	22.91	22.91	22.81	22.81

On voit, en examinant les chiffres de ce tableau, que les vitesses absolues, pour un même excès de température, varient d'une série à l'autre ; mais que les variations demeurent cependant renfermées entre des limites peu étendues. Il importe d'ailleurs d'avoir égard au renseignement suivant : la série III a été obtenue alors que les deux fenêtres de la chambre servant aux observations étaient ouvertes ; il régnait, à l'extérieur, un vent assez fort et, dans la chambre même, l'air était par moments passablement agité, plus agité que dans un bon nombre des observations faites à l'air libre pour apprécier la réflexion du lac. Les chiffres de cette série, calculés d'après (1), offrent moins de régularité que d'autres, c'est-à-dire que les écarts entre l'observation et la formule sont parfois assez forts. On voit que les vitesses du refroidissement à 4, 8 et 12° dépassent sensiblement ceux des séries IV à VIII. Ces cinq dernières séries sont convenablement concordantes.

Il est à remarquer que le mode de calcul qui fournit les vitesses proportionnelles des colonnes  $a' \dots f'$  donne une grande influence aux petites différences qu'il peut y avoir d'une série à l'autre pour les vitesses correspondant à l'excès 1°. Ainsi, pour la série IV, la formule donne 0°,142 pour vitesse à 1° et, à cause de cette valeur plus faible, les nombres correspondant à  $t = 4, 8, 12^\circ$  de la colonne  $b'$  se trouvent sensiblement plus forts que ceux des autres séries, quoique les valeurs absolues des vitesses, pour ces excès-là, diffèrent peu.

En comparant V et VI, on voit que, dans cette dernière, la vitesse du refroidissement est toujours plus faible (colonnes  $c$  et  $d$ ) ; mais les rapports des vitesses (colonnes  $c'$  et  $d'$ ) sont sensiblement les mêmes pour les deux séries. La

même remarque s'applique à VIII comparé à VII ; à VIII comparé à VI ; etc. La série VI a été obtenue dans un air très calme, tandis que, pour la série VIII, une fenêtre était ouverte.

En résumé, la comparaison des nombres de la colonne M avec ceux des cinq séries IV à VIII me semble légitimer les considérations exposées plus haut (9), et l'on peut admettre que si les vitesses de refroidissement des boules varient sûrement suivant les circonstances ambiantes, les rapports des vitesses obtenues dans une même série diffèrent peu des mêmes rapports déduits d'une série différente. Cette conclusion cesserait sans doute d'être admissible ou elle serait moins exacte si les excès de température avaient été considérables ou si les circonstances ambiantes avaient beaucoup différé d'une série à l'autre.

**11.** Pour les excès de température inférieurs à  $1^{\circ}$ , lesquels se présentent assez fréquemment dans les observations de réflexion du lac, j'ai calculé un tableau spécial de dixième en dixième de degré, en opérant de la manière suivante. La vitesse correspondant à  $0^{\circ},5$  a été calculée à l'aide de la formule pour les séries I et II. On obtient  $0^{\circ},071$  et  $0^{\circ},069$ , soit en moyenne  $0^{\circ},07$ . En représentant par 1 la vitesse lorsque  $t = 1^{\circ}$ , on trouve ainsi que  $v = 0,44$  lorsque  $t = 0^{\circ},5$ . Les vitesses correspondant à  $0^{\circ},9$ ,  $0^{\circ},8$ , etc., ont été ensuite calculées en admettant un décroissement progressif de 1 à 0,44, puis de 0,44 à 0. On obtient de cette manière (en s'en tenant à deux décimales) les chiffres suivants qui peuvent

être considérés comme faisant suite à ceux du tableau I, colonne E (3).

(3) Les expériences qui viennent d'être discutées et qui avaient pour but de connaître la loi du refroidissement, n'ont pas été exécutées en plein air. Elles ont été faites dans un local élevé, pourvu de deux fenêtres, tantôt ouvertes et tantôt fermées. — Les conditions ambiantes variaient très peu durant les quinze ou vingt minutes que durait une série, et l'excès de la température de la boule sur la température ambiante pouvait s'obtenir, pour chaque instant, avec une grande précision.

A l'air libre, il n'est pas possible d'avoir des résultats aussi réguliers. J'ai cependant essayé, plus d'une fois, de suivre le refroidissement dans des circonstances semblables à celles dans lesquelles les observations de réflexion du lac ont eu lieu ; mais j'ai obtenu des résultats assez différents les uns des autres et jamais une série bien régulière.

Voici un exemple d'observations faites dans un jardin, par un air convenablement calme et un ciel pur. — Les deux boules **B** et **C** étaient fixés à des piquets plantés sur la limite d'un sol gazonné et d'une allée recouverte de gravier. La boule **B** était protégée par un écran et donnait la température de l'air ; la boule **C** était découverte et exposée au rayonnement du soleil. Lorsque le thermomètre eût cessé de monter, on plaça devant **C** un écran semblable à celui de **B**, puis on observa le refroidissement de minute en minute.

Pendant le refroidissement, le thermomètre de **B** a été noté à plusieurs reprises ; il a un peu varié. La moyenne des lectures est  $14^{\circ},84$  ; les observations isolées s'écartent, au maximum, de  $0^{\circ},18$  de cette quantité-là. Ces écarts prouvent que la température de l'air variait un peu ; une des causes du refroidissement n'est donc pas demeurée constante, et le phénomène doit s'en trouver plus compliqué.

Au début, **C** avait un excès de  $12^{\circ},55$ . La température a peu changé dans la première demi-minute ; c'est dû sans doute à ce que le thermomètre intérieur demeure un peu en retard sur la variation de température de l'enveloppe métallique. Les observations ont été commencées environ deux minutes après le moment où l'action du soleil a été supprimée.

La marche du thermomètre de **C** a été représentée graphiquement ; elle a fourni une courbe un peu irrégulière. En traçant à vue une ligne qui suivait la courbure générale accusée par les observations brutes, mais qui en rectifiait les anomalies, j'ai obtenu une courbe qui ressemblait assez convenablement à celles

**TABLEAU IV.**

Excès de temp <sup>t</sup>	Vitesse du refroid.	Excès de temp <sup>t</sup>	Vitesse du refroid.
1°.0	1.00	0°.5	0.44
0.9	0.88	0.4	0.34
0.8	0.76	0.3	0.24
0.7	0.65	0.2	0.16
0.6	0.54	0.1	0.08

de la Pl. I. En cherchant les ordonnées de cette courbe moyenne pour les minutes successives, j'ai obtenu les nombres de la colonne T du tableau Z. Ces nombres diffèrent tantôt dans un sens, tantôt dans un autre de ceux qui avaient été réellement observés. Les écarts ne dépassent cependant jamais 0°,20.

J'ai cherché à représenter la suite de ces excès de température par une formule analogue à (1). En utilisant les observations de 4 et de 11 minutes, on trouve les constantes  $k$  et  $A$  et la formule devient :

$$(a) \quad t = 8,^{\circ}72. \quad 0,7745\theta - 0,016\theta^2$$

La colonne T<sub>1</sub> renferme les valeurs *calculées* de  $t$ . En les comparant avec celles qui proviennent des observations, on voit que la formule représente d'une manière approximative la marche du refroidissement ; mais on aperçoit cependant des écarts bien plus considérables que ceux du tabl. I.

En utilisant la formule (3) et prenant les constantes renfermées dans (a), j'ai calculé la vitesse du refroidissement pour les divers excès de  $t = 1^{\circ}$  à  $t = 12^{\circ}$ . On trouvera dans le tableau Z les vitesses absolues M<sub>t</sub> et les vitesses relatives E<sub>t</sub>. — On voit que les vitesses absolues sont un peu plus fortes que celles des diverses séries précédemment rapportées (I à VIII) ; elles diffèrent peu cependant de la série III. Quant aux vitesses relatives, elles sont un peu plus fortes également que celles du tableau II (E).

**12.** Toutes les recherches dont il vient d'être question, au sujet de la vitesse du refroidissement des boules, ont été faites dans des conditions assez peu variables de température et de pression ambiantes. La pression a toujours été assez rapprochée de 720<sup>mm</sup> (écart maxima :

Ainsi, pour $t = 2^\circ$ ,	la différence est 0,06 soit $1/_{38}$
» $t = 3^\circ$ ,	» 0,19 » $1/_{19}$
» $t = 5^\circ$ ,	» 0,51 » $1/_{13}$
» $t = 10^\circ$ ,	» 1,29 » $1/_{11}$
» $t = 12^\circ$ ,	» 1,76 » $1/_{10}$

Les vitesses E sont, en revanche, bien concordantes avec celles des séries III et IV (Tabl. III,  $a'$  et  $b'$ ).

En admettant que les nombres  $M_1$  du tableau Z représentent exactement les vitesses du refroidissement pour les divers excès de température dans l'expérience faite en plein air, on voit que l'emploi des nombres E du Tabl. II ferait apprécier au-dessous de sa vraie valeur la quantité de chaleur solaire capable d'entretenir un excès donné de température. On voit, en même temps, quelle serait l'importance de l'erreur commise ; — cette erreur serait faible pour des excès ne dépassant pas 2 à 3° ; elle deviendrait  $1/_{10}$  de la quantité à apprécier pour un excès de 12°.

Mais il ne faut pas oublier que la formule (a) ne représente pas très bien les résultats des observations ; un petit changement dans les constantes A et  $k$  donnerait une formule qui n'offrirait pas des écarts plus grands que celle-là et ces nouvelles constantes, introduites dans (3), fourniraient des vitesses de refroidissement un peu différentes de celles qui ont été obtenues, et plus concordantes avec celles de M. Tabl. II.

En somme, et vu la difficulté de rencontrer à l'air libre des conditions ambiantes suffisamment constantes *pendant le temps* qu'exige une série d'observations de refroidissement, il me paraît bien préférable d'arriver à la loi du refroidissement par des observations comme celles qui ont été décrites au § 6. On obtient ainsi des valeurs qui ne diffèrent pas plus de celles qui s'appliquent à l'air libre, que ces dernières ne diffèrent les unes des autres.

Dans la question présente d'ailleurs, le but était de connaître le *rappor*t entre les vitesses du refroidissement pour des excès  $t_1$  et  $t_2$  de température observés *au même instant* avec les deux

$\pm 6$  à  $8^{\text{mm}}$ ). Quant à la température ambiante, elle a été très près de  $15^{\circ}$  pour les séries I et II et peu éloignée de ce chiffre-là pour les autres séries.

Les observations faites en vue de connaître la chaleur réfléchie par le lac ont eu lieu dans des circonstances parfois assez différentes de température ambiante et de pression, et il est important de voir quelle influence ces deux facteurs peuvent exercer sur le *rappor*t des vitesses.

boules **B** et **C**, placées près l'une de l'autre, dans des conditions semblables. — Pour atteindre ce but, il fallait, ou étudier le refroidissement simultané de deux boules ayant deux excès différents, ou le refroidissement d'une boule unique, pourvu que les conditions ambiantes demeurent convenablement constantes pendant toute la durée du refroidissement. C'est ce dernier moyen que j'ai cherché à pratiquer dans les expériences qui ont été décrites précédemment.

TABLEAU Z.

EXCÈS DE TEMPÉRATURE			VITESSE DU REFROIDISSEMENT		
Temps	T	T <sub>I</sub>	Excès	M <sub>I</sub>	E <sub>I</sub>
0 <sup>m</sup>	8°.72	8°.72	1°	0°.173	1°.00
1	6.64	6.78	2	0.40	2.31
2	5.25	5.31	3	0.65	3.75
3	4.12	4.20	4	0.92	5.31
4	3.35	3.35	5	1.18	6.82
5	2.70	2.69	6	1.46	8.44
6	2.26	2.18	7	1.73	10.00
7	1.87	1.78	8	2.00	11.56
8	1.58	1.47	9	2.30	13.29
9	1.28	1.22	10	2.59	14.97
10	1.06	1.02	11	2.89	16.70
11	0.86	0.86	12	3.19	18.44
12	0.69	0.74			
13	0.58	0.63			

Dans les diverses stations, à altitudes inégales, où l'on a observé la réflexion du lac, la pression de l'air a varié de 1,019 dans les stations les plus basses (au bord du lac) à 0,977 dans la station la plus élevée (Chexbres); 1,000 représentant la pression de l'air à Lausanne, lors des expériences faites pour trouver la loi du refroidissement.

L'influence de la pression sur la vitesse du refroidissement a été découverte par Dulong et Petit. Ces auteurs ont trouvé que le pouvoir refroidissant d'un gaz est proportionnel à une certaine puissance de son élasticité. Pour l'air, l'exposant de la puissance est 0,45, et, dans l'expression générale de la vitesse du refroidissement, le second terme (celui qui représente l'action refroidissante du gaz) renferme le facteur  $p^{0,45}$ . Si l'on applique cette loi au cas présent, on trouve sans peine que le pouvoir refroidissant de l'air étant 1,000 sous la pression 720<sup>mm</sup>, il est 1,009 au niveau du lac et 0,991 à Chexbres. Ces valeurs diffèrent peu les unes des autres et le changement qu'elles apportent dans la vitesse du refroidissement, calculée à l'aide de la formule dont il va être question plus bas, est tout à fait négligeable. Les rapports entre les vitesses, ainsi faiblement modifiées par la pression du gaz, sont eux-mêmes moins modifiés encore, et il n'y a pas lieu de tenir compte de cette influence-là dans l'ordre d'approximation que les présentes recherches peuvent atteindre.

Dans leurs études classiques (<sup>4</sup>) sur le refroidissement, Dulong et Petit ont trouvé quelle est l'influence de la température de l'enceinte. Ils ont établi que la vitesse du re-

(<sup>4</sup>) *Annales de chimie et de physique*, t. VII (1817).

froidissement dépend de cette température et que, pour un même excès  $t$ , la vitesse du refroidissement du corps augmente lorsque l'enceinte est de plus en plus chaude. Mais cette influence s'exerce seulement sur la portion de la chaleur qui se perd par rayonnement ; la perte de chaleur due au contact du gaz est indépendante de la température absolue de ce gaz et ne dépend que de l'excès de la température du corps qui se refroidit.

Il n'est pas possible d'identifier les conditions bien connues dans lesquelles Dulong et Petit ont fait leurs expériences avec celles dans lesquelles se trouvaient placées mes boules exposées à l'air libre ou à l'air renfermé dans une chambre. A l'air libre, il n'y avait pas une enceinte déterminée et homogène autour du corps en voie de refroidissement. Les boules rayonnaient vers le ciel, vers la terre et vers tous les corps avoisinants. Dans les expériences faites pour trouver la loi du refroidissement, l'enceinte était la surface intérieure (murs, plafond, fenêtre parfois ouverte, etc.) de la chambre. — Malgré cette différence de conditions, il m'a paru intéressant de voir jusqu'à quel point la formule générale de Dulong et Petit s'appliquerait aux résultats que j'ai obtenus.

On sait que, d'après ces auteurs, la vitesse totale du refroidissement d'un corps dans l'air est exprimée par la formule :

$$(4) \quad V = m a^u (a^t - 1) + n p^{0,45} t^{1,233}$$

$a$ , le même pour tous les corps, est 1,0077 ;  $p$  est la pression de l'air ;  $u$ , la température de l'enceinte ;  $t$ , l'excès, à chaque instant, de la température du corps qui se refroidit ;  $m$  et  $n$ , des constantes dépendant du corps.

Prenant dans le tableau II deux vitesses quelconques correspondant à deux excès, il faut les introduire

dans la formule (4) pour chercher les constantes. J'ai choisi les excès 5 et 12° pour lesquels les vitesses sont 1,04 et 2,67. En faisant les calculs, on trouve :  $m = 13,62$  et  $n = 0,066$ . La formule (4) devient :

$$(5) V = 13,62 \cdot 1,0077^u (1,0077^t - 1) + 0,006 \cdot 0,72^{0,45} \cdot t^{1,233}$$

Dans l'impossibilité d'avoir la température de l'enceinte proprement dite, j'ai pris pour  $u$  la température de l'air au milieu duquel le refroidissement se faisait, c'est-à-dire 15°, et la formule est alors immédiatement calculable pour toutes les valeurs de l'excès  $t$ . On trouvera dans le tableau ci-dessous (tabl. H) : — les vitesses M du tableau II telles qu'elles résultent des séries I et II calculées par la formule (3) ; — les vitesses (colonne P<sub>i</sub>) calculées à l'aide de la formule de Dulong et Petit.

**TABLEAU H.**

Excès $t$	M	P <sub>I</sub> $u = 15^\circ$	P <sub>II</sub> $u = 5^\circ$	P <sub>III</sub> $u = 25^\circ$
1°	0°.46	0°.474	0°.466	0°.484
2	0.36	0.37		
3	0.57	0.57		
4	0.79	0.79		
5	1.04	1.04	0.98	1.05
6	1.24	1.24		
7	1.47	1.47		
8	1.71	1.70		
9	1.95	1.94		
10	2.19	2.19	2.10	2.28
11	2.43	2.43		
12	2.67	2.67		
13	2.91	2.93		
14	3.16	3.20		
15	3.40	3.46	3.32	3.57

L'accord est très satisfaisant et dépasse ce que j'avais supposé. Il est assurément remarquable de voir avec quelle exactitude la formule générale de Dulong et Petit représente le refroidissement de mes boules, au moins dans les limites comprises entre les excès 1 et 15°. Cette concordance augmente évidemment la confiance que l'on peut avoir dans les chiffres M et prouve aussi, après coup, l'exactitude des mesures thermométriques qui ont servi à les déterminer (5).

Puisque la formule générale (5) représente si bien le refroidissement des boules dans une énceinte où  $u = 15^\circ$ , on peut, à bon droit, l'utiliser pour voir ce que serait le

(5) Les conditions dans lesquelles Dulong et Petit ont fait les expériences qui les ont conduits à la formule (4) diffèrent beaucoup de celles dans lesquelles j'ai opéré. Non seulement il y avait une énorme différence dans la dimension et la nature de l'enceinte; mais encore le corps, en voie de refroidissement, était tout autre. Dulong et Petit ont opéré avec des thermomètres, c'est à dire avec des vases à parois solides contenant un liquide; tandis que, dans mes observations, le corps qui se refroidissait était lui-même une énceinte métallique remplie d'air, renfermant en son milieu le thermomètre à petite cuvette qui indiquait la température. Il est remarquable que, malgré ces différences importantes, la formule (4) s'applique aussi bien aux résultats obtenus.

Je pensais que l'état de l'air autour des boules en voie de refroidissement devait différer assez de ce qu'il était dans l'enceinte de Dulong et Petit pour rendre improbable une application un peu exacte de leur formule. Dans mes observations, en effet, l'air n'a pas été rigoureusement calme; il l'était sûrement beaucoup moins que dans l'enceinte fermée qui a servi à obtenir la formule (4). Dans la série II surtout, alors qu'une fenêtre était ouverte, il y avait un peu de courant autour de la boule. Ce courant, il est vrai, était assez constant, assez uniforme pendant toute la série. Il semblerait ainsi que lorsque l'agitation de l'air ne devient pas trop grande et lorsqu'il s'agit d'un refroidissement où l'excès de température est peu considérable, cette agitation n'influe pas d'une manière très importante sur la loi du refroidissement.

refroidissement avec des valeurs différentes de  $u$ . Les observations qui sont données avec détail dans les tableaux V à XXIII montrent que la température ambiante a été, le plus souvent, voisine de  $15^\circ$ ; les valeurs les plus extrêmes, en plus et en moins, dans les moments où a été appréciée une réflexion du lac, sont  $25^\circ,8$  et  $2^\circ,5$ . Mais ces valeurs extrêmes ne se présentent que très rarement ou même une seule fois. Dans la grande majorité des cas, la température ambiante est comprise entre  $10$  et  $20^\circ$ . Cette température ambiante ne peut pas nécessairement être identifiée avec la valeur  $u$  de la formule de Dulong et Petit, laquelle est la température de l'enceinte, de dimension restreinte, vers laquelle le corps rayonnait; toutefois, si l'on prend garde à la concordance remarquable que fournit (5) en y introduisant pour  $u$  la température de l'air ambiant, on peut admettre que, en faisant  $u$  égal à  $25$  et à  $5^\circ$ , on aura, d'une manière fort approchée aussi, les vitesses du refroidissement des boules alors que l'air ambiant aurait été à  $5$  et à  $25^\circ$ .

La formule (5) a donc été calculée pour les cinq excès  $1, 5, 10$  et  $15^\circ$  dans les deux hypothèses de  $u = 5^\circ$  et  $u = 25^\circ$ . Les résultats se trouvent dans les deux colonnes  $P_u$  et  $P_{uu}$  du tableau H. On voit que les vitesses sont un peu différentes de celles qui correspondent à  $u = 15^\circ$ . Il s'agit maintenant de rechercher quelle influence ces diverses valeurs de  $u$  exercent sur le *rapport* des vitesses, puisque c'est ce rapport qui sert de base au calcul de la quantité de chaleur. En nommant 1 la vitesse pour  $t = 1^\circ$  dans les trois cas de  $u$  égal à  $5, 15$  ou  $25^\circ$ , on trouve, pour les vitesses, les valeurs que voici (6):

(6) Les chiffres relatifs à  $u = 15^\circ$  diffèrent un peu des chiffres E, tableau II. En voici la cause :

excès	$u = 5^{\circ}$	$u = 15^{\circ}$	$u = 25^{\circ}$
$1^{\circ}$	1,00	1,00	1,00
$5^{\circ}$	5,91	5,80	5,71
$10^{\circ}$	12,65	12,58	12,39
$15^{\circ}$	20,02	19,87	19,40

Si l'on compare ces rapports, pour un même excès  $t^{\circ}$ , alors que  $u = 25$  et  $u = 15^{\circ}$ , on voit qu'ils diffèrent de 2 à 3 centièmes de leur valeur; pour  $u = 5$  et  $u = 15^{\circ}$ , ils diffèrent entr'eux d'une quantité plus petite encore. Mais les limites 5 et  $25^{\circ}$  sont, je l'ai dit, très rares dans les observations faites près du lac; la plupart du temps,  $u$  est compris entre 10 et  $20^{\circ}$ . Pour ces valeurs, moins éloignées de  $15^{\circ}$ , les différences des rapports seront plus faibles encore que celles qui viennent d'être indiquées.

Les considérations qui précèdent autorisent, je pense, la conclusion suivante : les valeurs M du tableau II, se rapportant à un refroidissement dans une température ambiante de  $15^{\circ}$  et une pression de 720mm, peuvent s'employer, avec une approximation suffisante, pour le refroidissement des boules dans les conditions ambiantes

La formule (5) donne des résultats qui, on l'a vu, coïncident bien, d'une manière générale, avec ceux qui ont été obtenus par la formule (3). Il y a cependant quelques divergences, pour  $t = 1^{\circ}$  entre autres, où la formule (3) donne 0,160 et la formule (5), 0,174. Cette valeur étant choisie comme unité, cela change un peu les *rapports* des vitesses pour un excès quelconque  $t^{\circ}$ .

Or, comme les vitesses du refroidissement pour  $u = 5^{\circ}$  et  $u = 25^{\circ}$  n'ont pas été déterminées expérimentalement, mais s'obtiennent à l'aide de la formule (5), il fallait évidemment, pour les *comparer* avec les vitesses provenant de  $u = 15^{\circ}$ , prendre ces dernières également d'après la formule plutôt que d'après les observations directes.

de température et de pression où ont été faites les expériences à l'air libre.

### Stations. — Mesure de la hauteur du soleil.

**13.** La rive suisse du lac Léman offre plusieurs points très favorablement situés pour observer la chaleur réfléchie par la surface de l'eau et pour recevoir cette chaleur durant quelques heures successives, c'est-à-dire avec des hauteurs et des azimuts variables du soleil.

J'ai observé dans six stations placées à des distances variables du lac et à des altitudes assez différentes. Le choix de ces stations a d'ailleurs été aussi influencé par la circonstance qu'elles étaient accessibles sans une trop grande perte de temps et que les instruments pouvaient y être convenablement installés.

*Ouchy.* Les observations ont été faites sur le quai faisant face au sud-ouest, près de l'extrémité ouest, la plus voisine de l'usine à gaz. Les piquets portant les boules étaient plantés dans un sol sablonneux et séparés de la surface de l'eau par quelques gros cailloux destinés à briser le choc des vagues. Les boules étaient à 2<sup>m</sup>,50 au-dessus du niveau du lac et à une distance horizontale de 4<sup>m</sup>,40 à 5<sup>m</sup>,00 du bord de l'eau.

*Tour Haldimand.* Dans cette station, voisine d'Ouchy, à l'orient, les appareils ont été aussi rapprochés que possible du lac. Les piquets étaient plantés dans le rivage sablonneux, à l'ouest de la tour, près de l'embouchure du petit torrent la Vuachère. Hauteur des boules au-dessus du niveau de l'eau : 1<sup>m</sup>,30 ; distance horizontale jusqu'au bord du lac : 0<sup>m</sup>,70 à 0<sup>m</sup>,90. A cause de cette

grande proximité, les piquets porteurs des écrans ont dû être plantés dans le lac même.

*La Vuachère.* Cette station est la plus éloignée du lac en distance horizontale et les rayons réfléchis ne pouvaient l'atteindre que lorsque le soleil était près de se coucher. Les observations ont été faites en plein hiver; c'est le seul moment de l'année où les rayons solaires, vers la fin de la journée, donnent une réflexion dirigée vers la Vuachère. Les instruments ont été installés dans une vigne au-dessus du chemin qui se dirige, à l'orient de Lausanne, du côté de Belmont. Le nivellement, relativement à un point voisin dont la cote est connue, m'a permis de connaître l'altitude au-dessus du lac, laquelle est 140<sup>m</sup>. Quant à la distance horizontale jusqu'au bord de l'eau, dans la direction moyenne des divers azimuts du soleil, alors que les rayons réfléchis pouvaient atteindre les boules, elle est approximativement de 1600<sup>m</sup>.

*Dézaley.* C'est la station où a été fait le plus grand nombre de séries, dans des conditions atmosphériques parfois excellentes. Les instruments étaient installés dans un petit jardin, au nord-ouest de la maison du vigneron, jardin entièrement environné de vignes. L'altitude a été déterminée directement par un nivellement et a été trouvée égale à 61<sup>m</sup>,95. Cette valeur pouvait éprouver d'ailleurs une petite variation dans les divers jours d'observations à cause d'un changement dans le niveau du lac. (7)

(7) Pour les stations d'Ouchy et de la tour Haldimand, la hauteur des boules au-dessus de la surface de l'eau a été mesurée le jour même des observations; elle est donc exacte. — La hauteur des autres stations étant beaucoup plus considérable, cette mesure n'a pas pu être faite chaque fois. On sait que le niveau du lac n'est pas constant, mais la variation est faible et

De la station même, on ne voit pas le rivage du lac. Le rayon visuel aboutissant à la surface liquide, dans les points les plus voisins possibles, est tangent à des murs de soutènement de vignes. Ce rayon visuel fait un angle de 24 à 26° avec l'horizon dans les divers azimuts où les rayons solaires pouvaient se réfléchir. Cela correspond à une distance horizontale de 120 à 135 mètres.

*Rivaz.* Les observations ont été faites dans une vigne située au bord du chemin qui conduit de Rivaz au signal de Chexbres. En ce point, on est au-dessus de parois rocheuses ou de vignes qui descendent en forte pente jusqu'au lac.

Le nivellation, jusqu'à la gare de Rivaz, a donné 79<sup>m</sup>,5 au-dessus des rails, lesquels étaient à environ 5 mètres au-dessus du niveau de l'eau à l'époque où les observations ont été faites. L'altitude de la station, relativement au lac, est ainsi d'environ 84<sup>m</sup>,5. La distance horizontale jusqu'au bord du lac, dans l'azimut où les rayons réfléchis du soleil commençaient à pouvoir atteindre les instruments, est d'environ 107 mètres. Le rayon visuel allant de la station au bord du lac, dans cet azimut-là, fait avec l'horizon un angle de 38°.

*Signal de Chexbres.* C'est la station la plus élevée. Les instruments étaient installés dans un pré situé entre le signal et l'hôtel. De ce point, le coup d'œil est ravissant; quelques broussailles voisines dérobent la vue des vignes qui s'étagent jusqu'au lac et le regard plonge, sans aper-

n'est qu'une petite fraction des altitudes indiquées pour Rivaz, le Dézaley, Chexbres et la Vuachère. Il n'y a évidemment pas lieu de tenir compte ici de cette petite différence.

cevoir d'intermédiaires, jusqu'à la surface bleu foncé du grand bassin d'eau.

J'ai déterminé l'altitude à l'aide du baromètre. En basant le calcul sur la moyenne de trois observations faites simultanément près des instruments et à Lausanne (à une altitude connue) on trouve 263 mètres pour hauteur de la station au-dessus du lac. — A cause des arbres et des broussailles qui garnissent les parties supérieures du versant de la colline, les instruments ne pouvaient pas voir le bord même du lac. Les rayons réfléchis du soleil ne pouvaient commencer à les atteindre que sous un angle d'environ  $34^{\circ}$ . La distance horizontale, de la station au point où la réflexion pouvait commencer, est d'environ 400 mètres. (8)

**14.** La quantité de chaleur que réfléchit une surface d'eau dépend évidemment de l'angle sous lequel tombent les rayons solaires. Il est donc intéressant de placer, en

(8) Les séries d'observations faites dans les stations qui viennent d'être indiquées ne sont pas aussi nombreuses que je l'aurais voulu. Leur nombre s'est trouvé limité par les conditions mêmes dans lesquelles il était nécessaire d'opérer. — Les séries *utiles* et dont les résultats sont inscrits dans les tableaux qui suivent ont toujours été obtenues par un temps favorable, c'est à dire un ciel partiellement ou complètement pur, une atmosphère convenablement calme et un lac calme ou faiblement agité. Mais ces jours de travail utile ne sont naturellement pas les seuls où des observations ont été tentées. Plus d'une fois, l'apparence du temps était assez bonne pour me décider à partir; mais ce n'était qu'une apparence trompeuse et l'arrivée de quelques nuages ou d'un courant d'air un peu fort venait rendre impossible les observations projetées. En outre, j'ai fait dans chaque station une série d'essais préliminaires destinés à me renseigner sur l'installation la plus favorable des appareils et sur les déplacements que devraient subir les écrans pour suivre convenablement la marche du soleil.

regard des quantités de chaleur réfléchie, l'incidence des rayons. Cette incidence, variable avec l'heure, n'est autre chose que la hauteur angulaire du soleil au moment où se fait l'observation.

J'aurais pu déterminer directement, lors de chaque observation, la hauteur du soleil. Mais cette opération, sans être compliquée, aurait exigé un certain temps et il m'a paru préférable de n'être distrait par rien et d'avoir exclusivement à suivre la marche des thermomètres. J'ai donc mieux aimé déduire, après coup, la hauteur du soleil de l'heure à laquelle l'observation était faite. — L'heure de chaque observation était notée sur une bonne montre ordinaire, qui avait été réglée le jour même par l'observation du passage du soleil au méridien. Ce passage du soleil était constaté à l'aide d'un petit appareil méridien, installé chez moi, qui permettait de noter le moment du midi vrai avec une incertitude sûrement inférieure à 20 secondes. Comme contrôle, j'ai employé à diverses reprises un sextant pour déterminer l'heure d'après la hauteur du soleil ou d'une étoile. J'ai eu ainsi la certitude que la montre employée marchait avec une régularité très-suffisante et l'heure de chaque observation pouvait être connue sans que l'erreur atteignît une demi-minute.

Quoique les diverses stations fussent peu éloignées de Lausanne, j'ai toujours noté le *temps moyen* de chacune d'elles en tenant compte de leur longitude. Rivaz, la station la plus éloignée, est à 8' de longitude est de Lausanne.

La hauteur du soleil a été déduite de l'heure de l'observation à l'aide de la formule connue. Soient : *a* la distance zénithale du soleil; *b* sa distance au pôle; *c* la

distance du pôle au zénith ; A l'angle au pôle du triangle sphérique, on a :

$$\cos. a = \cos. b \cos. c + \sin. b \sin. c \cos. A$$

$a$  est complément de la hauteur de l'astre  $h$  ;  $b$  de sa déclinaison  $d$  et  $c$  de la latitude du lieu  $l$ . On a donc :

$$(6) \quad \sin. h = \sin. d \sin. l + \cos. d \cos. l \cos. A$$

C'est la formule qu'il s'agit d'appliquer aux observations. Afin de rendre le calcul, qui devait se répéter un grand nombre de fois, plus expéditif, l'équation (6) a été mise sous la forme :

$$(7) \quad \sin. h = \cos. d \cos. l (\tang. d \tang. l + \cos. A)$$

J'ai dressé une table du produit  $\tang. d \tang. l$  pour toutes les valeurs de  $\tang. d$  qui correspondent aux jours d'observations. Une autre table renfermait les diverses valeurs de la somme  $\log. \cos. d + \log. \cos. l$  pour les diverses valeurs de  $d$  également. (9)

Ces deux tables étant préparées, les calculs s'effectuaient rapidement.

L'angle  $A$  résultait de l'heure de l'observation exprimée en temps vrai.  $\cos. A$  (ligne naturelle) était ajouté à  $\tang. d \tang. l$  tiré de la première table. On prenait le logarithme de la somme et on l'ajoutait à  $\log. \cos. d + \log. \cos. l$  pris dans la deuxième table. On avait ainsi  $\log. \sin. h$  et par suite  $h$ .

**15.** On se rend facilement compte de l'erreur due à ce que les diverses stations ne sont pas exactement à la

(9) La déclinaison introduite dans la formule est celle du jour de l'observation à quatre heures après midi.

latitude de  $46^{\circ} 30'$  pour laquelle les tables ont été construites. — En différentiant (7), on a :

$$(8) \quad dh = \frac{\sin. d \cos. l - \cos. d \sin. l \cos. A}{\cos. h} \quad dl$$

On voit que la différence de hauteur qui provient d'une petite variation  $dl$  en latitude dépend de la hauteur absolue que l'on considère, de la déclinaison et de l'angle au pôle, par conséquent de l'heure. La valeur de  $h$  qui s'obtient en employant les tables est donc entachée d'une erreur qui n'est pas toujours la même lorsque au lieu d'être à  $46^{\circ} 30'$ , on est à une latitude différente.

Les diverses stations déjà mentionnées, Ouchy, Dézaley, etc., sont à des latitudes si voisines, en plus ou en moins, de  $46^{\circ} 30'$ , que la différence est, pour toutes, inférieure à  $0^{\circ} 02'$ . Cela étant, on s'assure sans peine, à l'aide de la formule (8), que cette petite variation correspond à une variation sur la hauteur du soleil qui est toujours inférieure à  $0^{\circ} 02'$  également. L'approximation est donc pleinement suffisante.

Pour se rendre compte de l'influence d'une erreur dans l'appréciation du temps de l'observation, il faut différentier (7) en considérant  $A$  comme variable. On a :

$$(9) \quad dh = - \frac{\cos. d \cos. l \sin A}{\cos. h} \quad dA$$

En admettant que l'on commette, par exemple, une erreur d'une minute sur le temps ou de  $0^{\circ} 15'$  de l'angle au pôle, on trouve facilement l'erreur correspondante de  $h$ . La formule (9) montre que, pour une même varia-

tion de 1<sup>m</sup> sur le temps, la variation de  $h$  dépend de la déclinaison et de la hauteur absolue au moment que l'on considère. Voici ce que donne le calcul de (9) pour quatre cas extrêmes : Soit

$$d = DB 20^\circ \dots A = 15^\circ ; \text{ on a } dh = -0,34 dA = -0^\circ 05'$$

$$d = DB 20^\circ \dots A = 75^\circ ; \quad » \quad dh = -0,69 dA = -0^\circ 10'$$

$$d = DA 20^\circ \dots A = 45^\circ ; \quad » \quad dh = -0,48 dA = -0^\circ 03'$$

$$d = DA 20^\circ \dots A = 60^\circ ; \quad » \quad dh = -0,56 dA = -0^\circ 08'$$

On voit ainsi que, dans le cas le plus défavorable (et qui ne s'est jamais rencontré dans les présentes recherches), une erreur de 1<sup>m</sup> dans l'appréciation du temps correspondrait à 0°10' dans la hauteur de l'astre.

Afin d'avoir la vraie hauteur du soleil à un moment donné, il faut encore corriger les valeurs trouvées par le calcul qui vient d'être indiqué de la réfraction atmosphérique. Cette réfraction est donnée par des tables connues et la correction a été faite pour obtenir les hauteurs vraies qui se trouvent (colonne H) dans les tableaux V à XXIII.

**16.** Dans le cas où la chaleur se réfléchirait sur la surface de l'eau comme sur un miroir parfaitement plan, le point de réflexion dépendrait évidemment de la hauteur du soleil au moment que l'on considère et de l'altitude de la station au-dessus du niveau de l'eau. En réalité, le lac n'étant jamais une surface parfaitement plane, les rayons réfléchis qui aboutissaient aux thermomètres provenaient d'une bande plus ou moins longue et plus ou moins large dont la ligne moyenne était l'intersection, avec la surface de l'eau, du plan vertical dans lequel se trouvait le soleil.

Mais la région qui réfléchissait, le plus souvent au moins, la plus forte proportion de la chaleur incidente, c'est celle

où se serait vue une image nette de l'astre si le lac eût été un miroir. Cette région de réflexion maximum était située d'une manière telle que les lignes qui y aboutissaient, du soleil et de la station, faisaient à chaque instant, avec la surface de l'eau, des angles égaux entre eux et égaux à la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.

Si, à un moment donné,  $H$  est la hauteur du soleil,  $Z$  l'altitude de la station et  $D$  la distance qui sépare la station du point de réflexion sur le lac, on a évidemment :

$$(10) \quad D = \frac{Z}{\sin. H}$$

Cette distance  $D$  est celle que les rayons réfléchis ont à parcourir pour aboutir aux appareils (dans le cas d'une réflexion régulière) et il y a un grand intérêt à voir quelle peut être son influence dans le phénomène dont il est ici question.

### Observations.

**17.** Les développements qui précèdent se rapportent tous à la méthode employée dans les présentes recherches pour mesurer la chaleur réfléchie, et pour déterminer les divers éléments qui doivent être pris en considération. Ce qui va suivre comprend le détail des observations et la discussion des résultats obtenus.

On trouvera le détail des observations dans les tableaux V à XXIII.

La première colonne indique l'heure, en temps moyen de la station. — La colonne  $H$  donne la hauteur du soleil obtenue par le calcul qui a été indiqué plus haut. — La

colonne D renferme la distance de la station au point du lac pour lequel les angles d'incidence et de réflexion sont égaux [formule (10)]. — Les colonnes C, B, A renferment les températures indiquées par les thermomètres des trois boules désignées jusqu'ici par les mêmes lettres ; les températures C sont dues à la chaleur directe et à la chaleur réfléchie du soleil ; B, à la chaleur réfléchie seulement. A est la température ambiante.

Les excès de C et de B sur A ont servi, conformément à la méthode exposée plus haut, à calculer la quantité de chaleur reçue par les boules, en adoptant toujours pour unité la chaleur qui est capable de maintenir un excès de  $1^{\circ}$  sur la température ambiante.

Les excès de C ont fourni la somme P, de la chaleur directe et de la chaleur réfléchie ; les excès de B ont donné la chaleur réfléchie P', seule. La quantité  $P - P' = S$  est donc la chaleur rayonnée directement par le soleil à un moment donné ; elle est inscrite dans les colonnes S. — En divisant P' par S, on obtient le *rappor*t entre la chaleur réfléchie par le lac et la chaleur directe. Ce rapport est contenu dans les colonnes L.

TABLEAU V. — Ouchy, 12 Septembre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
3 h. 07 <sup>m</sup>	31°, 34	4, 9 <sup>m</sup>	25°, 9	19°, 7	19°, 6	8, 01	0, 01
3—37	27, 02	5, 6	25, 3	19, 4	19, 0	7, 83	0, 04
3—52	24, 40	6, 0	25, 5	19, 6	18, 9	7, 95	0, 08
4—07	22, 14	6, 6	25, 5	19, 8	19, 0	7, 69	0, 10
4—22	19, 48	7, 5	25, 0	19, 8	18, 8	7, 04	0, 14
4—37	17, 17	8, 1	25, 2	20, 0	18, 7	7, 08	0, 19
4—52	14, 46	10, 0	24, 6	19, 8	18, 3	6, 57	0, 25
5—04	12, 44	11, 5	28, 5	21, 3	18, 8	10, 33	0, 28
5—12	11, 22	12, 9	25, 7	20, 3	18, 2	7, 55	0, 31
5—22	9, 39	15, 2	23, 6	19, 5	17, 6	5, 63	0, 38
5—35	7, 27	19, 4	22, 3	18, 7	16, 7	4, 81	0, 46
5—42	6, 17	23, 6	20, 9	18, 1	16, 1	3, 78	0, 59
5—52	4, 38	33, 0	19, 5	17, 3	15, 5	2, 93	0, 68

TABLEAU VI. — Ouchy, 14 Septembre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
4 h. 20 <sup>m</sup>	19°, 39	6, 0 <sup>m</sup>	30°, 1	23°, 5	22°, 4	8, 98	0, 14
4—33	17, 29	6, 9	28, 4	22, 8	21, 7	7, 20	0, 16
4—50	14, 38	8, 4	27, 5	22, 6	21, 5	6, 63	0, 17
5—03	12, 25	10, 0	26, 7	22, 3	21, 0	5, 92	0, 23
5—25	8, 40	16, 8	23, 8	21, 2	20, 2	3, 36	0, 30

TABLEAU VII. — Ouchy, 15 Septembre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
3 h. 35 <sup>m</sup>	26°, 34	5, 6 <sup>m</sup>	31°, 4	22°, 3	21°, 9	12, 59	0, 03
4—05	21, 50	6, 8	29, 0	21, 7	21, 2	9, 94	0, 04
4—35	16, 53	8, 7	28, 8	22, 4	20, 5	9, 38	0, 19
4—50	14, 22	10, 3	28, 4	22, 1	20, 3	8, 83	0, 23
5—05	11, 51	12, 8	27, 1	21, 7	19, 8	7, 55	0, 27
5—18	9, 38	15, 3	25, 8	21, 0	19, 5	6, 57	0, 25
5—30	7, 36	19, 5	24, 2	20, 2	19, 0	5, 36	0, 23
5—43	5, 05	29, 8	23, 0	20, 0	19, 0	3, 93	0, 25
5—56	3, 14	48, 3	20, 9	18, 8	17, 9	2, 68	0, 33

TABLEAU VIII. — Ouchy, 20 Septembre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
3 h. 31 <sup>m</sup>	25°, 37	5, 8 <sup>m</sup>	31°, 7	24°, 7	23°, 9	9, 62	0, 08
3—46	23, 18	6, 4	32, 2	25, 2	24, 1	9, 71	0, 11
4—01	20, 57	7, 1	29, 3	23, 7	22, 7	7, 60	0, 13
4—16	18, 31	7, 9	29, 0	23, 4	22, 4	7, 60	0, 13
4—27	16, 43	8, 8	28, 4	23, 0	21, 7	7, 37	0, 19
4—56	11, 53	12, 3	27, 1	22, 7	21, 0	6, 04	0, 31
5—18	8, 11	18, 0	26, 0	22, 2	20, 5	5, 19	0, 36
5—41	4, 20	35, 1	22, 2	20, 1	19, 2	2, 68	0, 33

## TABLEAU IX. — Tour Haldimand, 5 Oct. 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
3 h. 10 <sup>m</sup>	23°, 52	3, 2 <sup>m</sup>	30°, 8	19°, 6	19°, 2	15, 74	0, 02
3—31	20, 52	3, 6	28, 1	18, 6	18, 0	13, 29	0, 04
3—56	17, 09	4, 4	27, 1	18, 8	18, 4	11, 39	0, 03
4—06	15, 35	4, 8	27, 2	19, 0	18, 4	11, 04	0, 05
4—21	13, 14	5, 7	26, 2	18, 8	17, 6	10, 33	0, 12
4—31	11, 38	6, 5	26, 6	18, 9	17, 4	10, 86	0, 15
4—46	9, 12	8, 1	25, 0	18, 6	16, 5	9, 05	0, 26
4—58	7, 14	10, 8	23, 3	18, 1	15, 9	7, 27	0, 34
5—07	5, 46	13, 0	23, 0	18, 0	15, 6	7, 01	0, 39
5—16	4, 18	18, 6	21, 5	17, 6	15, 3	5, 39	0, 49
5—24	3, 03	27, 3	19, 8	. .	14, 1		
5—27	2, 30	33, 3	19, 0	. .	13, 7		
5—29	2, 12	39, 3	18, 1	. .	13, 5		
5—32	1, 44	54, 0	17, 3	. .	13, 0		

A partir de 5 h. 16<sup>m</sup>, les écrans de B ne pouvaient plus protéger cette boule du soleil tout en permettant l'accès de la chaleur réfléchie.

**18.** Ces tableaux doivent être accompagnés des renseignements suivants, relatifs aux circonstances météorologiques qui ont caractérisé les divers jours d'observation.

**OUCHY, 12 septembre.** — Le ciel était généralement pur, quoique d'un aspect vaporeux. L'air était tantôt calme, tantôt agité par une faible brise. La surface du lac, un peu

TABLEAU X. — Tour Haldimand, 7 Oct. 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
3 h. 01 <sup>m</sup>	24°, 24	3, 2 <sup>m</sup>	29°, 3	19°, 5	18°, 5	13, 88	0, 07
3—08	23, 28	3, 3	30, 2	20, 6	19, 5	13, 48	0, 09
3—28	20, 41	3, 7	26, 9	19, 1	17, 6	11, 03	0, 14
3—48	17, 43	4, 3	28, 8	20, 6	18, 8	11, 68	0, 17
3—56	16, 31	4, 7	27, 3	19, 8	17, 7	10, 70	0, 22
4—08	14, 40	5, 2	28, 0	20, 6	18, 2	10, 61	0, 26
4—13	13, 53	5, 4	27, 1	20, 0	17, 6	10, 16	0, 27
4—20	12, 46	5, 9	25, 2	19, 4	17, 3	8, 15	0, 29
4—46 *	8, 36	8, 7	14, 7	14, 1	13, 8		

\* La dernière observation a été faite alors que les nuages voilaient le soleil depuis quelques minutes.

agitée et frissonnante au commencement, est devenue de plus en plus calme. A 5<sup>h</sup> 4<sup>m</sup>, il s'est produit un maximum remarquable. La surface de l'eau était bien tranquille et donnait une image presque nette du soleil. A partir de 5<sup>h</sup>, l'eau était calme près de la côte; mais le lac était demeuré frissonnant au large où il présentait une grande traînée brillante. (10)

(10) Pendant quelques minutes, à partir de 4 heures 55 minutes, les thermomètres B et C montèrent d'une façon inusitée. Il y avait une rapide augmentation dans l'intensité du flux solaire direct et une augmentation correspondante de la chaleur réfléchie. Le maximum eut lieu à 5 heures 4 minutes, après quoi les thermomètres baissèrent, mais moins rapidement qu'ils n'é-

## TABLEAU XI. — Tour Haldimand, 19 Oct. 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
1 h. 12 <sup>m</sup>	31,16	2,5 <sup>m</sup>	26,9	17,8	17,7	12,40	0,01
1—32	29,52	2,6	26,9	17,7	17,7	12,48	0,00
1—52	28,14	2,7	26,6	17,6	17,4	12,34	0,01
2—02	27,18	2,8	28,5	18,7	18,4	13,59	0,02
2—27	24,42	3,1	28,6	18,7	18,4	13,74	0,02
3—12	19,10	3,9	25,7	17,3	16,7	11,64	0,05
3—27	17,08	4,4	25,2	17,5	16,6	10,70	0,08
3—42	15,01	5,0	26,0	18,0	16,9	11,21	0,10
3—52	13,33	5,7	26,5	18,3	17,0	11,56	0,12
4—02	12,04	6,2	26,2	18,6	16,8	10,78	0,16
4—12	10,34	7,2	25,9	18,3	16,6	10,76	0,17
4—22	9,01	8,7	25,1	18,3	16,4	9,61	0,22
4—32	7,28	10,2	25,4	18,8	16,1	9,46	0,33
4—35	7,00	10,8	25,8	18,7	15,7	10,27	0,35
4—46	5,16	14,6	25,5	18,9	15,6	9,56	0,41
4—51	4,30	17,3	24,1	18,7	15,3	7,78	0,53
4—57	3,34	22,4	21,9	17,8	14,5	5,82	0,68

14 septembre. Le lac était frissonnant lorsque les instruments ont été installés ; il est devenu ensuite très calme.

taient montés. Si l'on consulte les nombres du Tabl. V, on verra que la variation a été considérable. — La cause de ce brusque accroissement de la chaleur reçue par les appareils ne provient pas de quelque modification passagère de la surface de l'eau, car les nombres de la colonne L n'offrent pas d'anomalie. L'air ne présenta pas de changement sensible quant à son état d'agi-

TABLEAU XII. — Dézaley, 25 Septembre 1864.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 38 <sup>m</sup>	31,10	120 <sup>m</sup>	36,0	26,1	26,2	13,38	—
2—48	29,51	124	35,8	26,0	26,0	13,38	—
3—03	27,49	132	34,2	25,9	25,8	11,20	0,01
3—28	24,14	155	32,3	26,0	25,7	8,36	0,03
3—43	21,59	167	28,9	24,8	24,2	5,35	0,10
4—13	17,16	207	28,8	24,8	24,0	5,28	0,14
4—53	10,42	344	23,9	21,1	20,4	3,58	0,18
5—00	9,31	387	26,0	22,0	21,0	5,31	0,19
5—08	8,42	443	27,1	22,0	20,9	6,78	0,18
5—18	6,31	564	25,8	21,4	20,4	6,00	0,17
5—33	4,02	886	22,8	19,6	19,1	4,08	0,18

Malheureusement, l'air, déjà un peu vaporeux au début, est devenu de moins en moins transparent et la brume a sûrement bien affaibli la chaleur que recevaient les boules.

tion; il était d'ailleurs passablement calme. S'il y a eu un changement dans l'état de transparence de l'atmosphère, ce qui est le plus probable, ce changement a dû être singulièrement subit et très notable, quoique absolument inappréiable pour la vue. Ce serait sans doute un peu hasardé que de supposer, à la surface même du soleil, quelque modification passagère accompagnée d'une émission plus abondante de chaleur...

Dans la construction de la courbe *d* de la Pl. III (voir § 25), j'ai tenu compte seulement des observations de 4 heures 52 minutes et 5 heures 12 minutes; la courbe est alors assez régulière. En introduisant l'observation de 5 heures 4 minutes, on obtient une forte inflexion (marquée en ligne grise) qui met encore mieux en évidence l'anomalie remarquable qui s'est produite à ce moment-là.

## TABLEAU XIII. — Dézaley, 28 Septembre 1864.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 32 <sup>m</sup>	30°, 53	121 <sup>m</sup>	30°, 9	20°, 9	20°, 9	13, 68	—
2 — 52	28, 19	132	29, 0	20, 1	20, 2	11, 88	—
3 — 07	26, 16	141	29, 1	20, 0	19, 8	12, 47	0, 01
3 — 22	24, 08	151	31, 3	21, 4	21, 0	14, 79	0, 02
3 — 42	21, 09	172	31, 0	21, 5	20, 6	13, 40	0, 07
4 — 07	17, 17	207	29, 2	20, 9	19, 6	11, 71	0, 12
4 — 17	15, 41	230	28, 1	20, 6	19, 4	10, 48	0, 12
4 — 27	14, 05	257	28, 0	20, 8	19, 4	10, 08	0, 15
4 — 34	12, 57	282	28, 0	20, 8	19, 3	10, 11	0, 16
4 — 54	9, 40	365	27, 1	20, 3	18, 6	9, 57	0, 19
5 — 16	6, 00	620	25, 0	20, 0	17, 9	6, 95	0, 34
5 — 22	5, 02	738	24, 1	19, 8	17, 5	5, 96	0, 44
5 — 27	4, 11	886	23, 4	19, 6	17, 4	5, 24	0, 48
5 — 29 *	3, 50	990	23, 1	19, 4	17, 3	5, 05	0, 47
5 — 42	1, 45	2480	20, 0	16, 2	16, 2	4, 76	—

\* A partir de 5 h. 29<sup>m</sup>, l'écran de B ne pouvait plus protéger cette boule contre le soleil en permettant l'accès de la chaleur réfléchie. A 5 h. 42<sup>m</sup> le soleil se couchait.

15 septembre. — Temps très pur. Air tantôt calme, tantôt un peu agité par une faible brise. Le lac était parcouru par de petites vagues surmontées elles-mêmes par une surface frissonnante. La réflexion du soleil ne donnait pas d'image nette, mais une traînée brillante.

TABLEAU XIV. — Dézaley, 9 Octobre 1864.

HEURES	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 23 <sup>m</sup>	28,15	132 <sup>m</sup>	26,0	16,0	16,1	13,53	—
2 — 33	27,06	135	25,3	15,5	15,5	13,38	—
2 — 38	26,30	139	26,1	15,9	15,8	14,05	0,01
2 — 48	25,15	144	24,9	15,4	15,3	13,00	0,01
3 — 03	23,18	155	25,4	15,6	15,4	13,07	0,01
3 — 13	21,58	170	24,0	15,8	15,1	11,38	0,06
3 — 18	21,16	172	24,0	15,9	15,1	11,27	0,07
3 — 48	16,56	213	25,5	16,8	15,5	12,31	0,11
3 — 53	16,10	221	25,6	16,8	15,4	12,48	0,12
4 — 03	14,40	248	25,0	16,9	15,4	11,46	0,14
4 — 08	13,53	258	24,2	16,8	15,2	10,43	0,17
4 — 18	12,20	295	23,0	16,3	14,6	9,42	0,20
4 — 27	10,54	326	21,6	15,7	14,3	8,13	0,18
4 — 33	9,58	364	21,0	15,2	13,8	7,98	0,19

20 septembre. — Même temps que le 15. Le lac était parfaitement calme au début et la première observation s'est faite (3<sup>h</sup> 31<sup>m</sup>) avec une image nette du soleil. Plus tard, la surface de l'eau est devenue frissonnante et la réflexion a donné, jusqu'à la fin, une longue traînée lumineuse.

**TOUR HALDIMAND**, 5 octobre. — Ciel pur quoique d'un aspect légèrement vaporeux. Air convenablement calme pendant toute la durée des observations. La surface du

TABLEAU XV. — Dézaley, 17 Octobre 1864.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 50 <sup>m</sup>	22°, 25	163 <sup>m</sup>	33°, 0	22°, 1	21°, 5	15, 39	0, 03
2 — 55	21, 48	168	32, 2	22, 1	21, 4	14, 23	0, 05
3 — 00	21, 10	173	31, 4	21, 7	20, 6	13, 76	0, 08
3 — 10	19, 52	182	32, 2	22, 5	21, 3	13, 78	0, 09
3 — 15	19, 41	187	33, 0	22, 6	21, 4	14, 83	0, 08
3 — 25	17, 49	200	33, 3	23, 6	21, 8	13, 93	0, 14
3 — 30	17, 08	214	34, 2	24, 2	22, 1	14, 43	0, 17
3 — 35	16, 25	221	34, 0	24, 1	21, 5	14, 39	0, 21
3 — 50	14, 15	248	33, 0	23, 4	20, 7	13, 97	0, 23
4 — 00	12, 45	282	31, 7	22, 9	20, 4	12, 73	0, 23
4 — 30	8, 10	443	30, 2	22, 8	19, 9	10, 71	0, 32
4 — 35	7, 22	492	29, 0	22, 3	19, 5	9, 64	0, 34
4 — 40	6, 36	554	27, 6	21, 5	19, 1	8, 66	0, 32
4 — 50	4, 59	738	26, 1	20, 2	18, 4	8, 23	0, 24
5 — 00	3, 26	1107	24, 1	18, 8	17, 2	7, 36	0, 24
5 — 13	1, 27	3388	18, 9	—	14, 8	—	—
5 — 15	1, 04	4847	18, 0	—	14, 4	—	—

lac présentait de légères ondulations ; mais elle n'était pas frissonnante et il se produisait parfois une image presque nette du soleil. Mirages prononcés. Température de l'eau, au bord, 15°.

7 octobre. Air moins calme que le 5 octobre et ciel un peu vaporeux. Quelques nuages apparaissent vers 4<sup>h</sup> 20<sup>m</sup>

TABLEAU XVI. — Dézaley, 18 Octobre 1864.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 00 <sup>m</sup>	27°,35	135 <sup>m</sup>	31°,4	22°,0	21°,8	12,92	0,01
2—10	26,36	138	32,5	22,6	22,3	13,74	0,02
2—20	25,33	144	31,2	22,2	21,9	12,39	0,02
2—30	24,27	150	31,1	21,8	21,4	12,89	0,03
2—40	23,17	157	31,2	21,8	21,4	13,04	0,03
2—45	22,40	161	31,0	22,0	21,4	12,54	0,04
2—50	22,05	166	31,0	22,2	21,4	12,32	0,06
2—55	21,29	169	31,0	22,4	21,4	12,43	0,05
3—00	20,50	175	31,7	22,5	21,5	12,98	0,08
3—10	19,32	186	31,8	22,7	21,5	12,88	0,10
3—15	18,51	192	31,9	22,9	21,5	12,78	0,13
3—25	17,29	207	32,1	23,5	21,7	12,28	0,16
3—30	16,48	215	32,3	23,7	21,7	12,33	0,18
4—05	11,41	308	31,3	24,0	21,5	10,28	0,28
4—20	9,24	382	29,0	23,3	20,6	8,12	0,38
4—25	8,38	419	29,3	23,5	20,8	8,27	0,38
4—35	7,03	512	26,9	21,7	19,4	7,29	0,36
4—40 *	6,17	561	26,2	21,3	19,4	6,82	0,31
5—00	3,07	1240	21,4	17,5	17,4	—	—
5—05	2,21	1722	20,5	17,0	16,9	—	—

\* A partir de 4 h. 40<sup>m</sup>, la boule **B** a été protégée aussi contre la réflexion du lac. Ses indications sont devenues sensiblement d'accord avec celles de **A**,

## TABLEAU XVII. — Rivaz, 27 Octobre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 52 <sup>m</sup>	19°, 21	255 <sup>m</sup>	25°, 3	19°, 5	18°, 4	7, 89	0, 14
3—12	16, 49	290	22, 9	18, 1	16, 8	6, 64	0, 19
3—22	15, 30	311	25, 0	19, 2	15, 5	8, 07	0, 23
3—42	12, 45	382	22, 1	17, 7	15, 9	6, 05	0, 30
3—48	11, 54	420	23, 0	18, 3	16, 5	6, 45	0, 31
3—57	10, 36	466	23, 0	18, 0	16, 3	6, 87	0, 27
4—07	9, 22	525	22, 7	17, 8	16, 0	6, 73	0, 30
4—22	6, 54	700	21, 0	17, 0	15, 2	5, 15	0, 39
4—26	6, 17	764	20, 4	16, 7	14, 9	4, 59	0, 44
4—34	5, 04	933	18, 3	15, 8	14, 4	3, 32	0, 45
4—37	4, 35	1050	17, 2	14, 8	13, 8	3, 12	0, 32

et viennent insensiblement voiler le soleil. Lac variable, tantôt frissonnant, tantôt parfaitement uni. Température de l'eau, 15°,5. Mirages.

19 octobre. — Ciel très pur pendant toute la durée des observations. Air généralement calme ou parcouru par une faible brise nord-est. Le lac était un peu clapotant lors des premières observations ; il est devenu de plus en plus calme. A partir de 3<sup>h</sup> 40<sup>m</sup> ou 3<sup>h</sup> 50<sup>m</sup>, la surface était semblable à une surface d'huile et l'image du soleil parfaitement nette. Température de l'eau, 14°,8. Mirages.

DÉZALEY, 25 septembre. — Le ciel, qui était très pur lors de l'installation des instruments, s'est peu à peu

TABLEAU XVIII. — Rivaz, 7 Novembre 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
1 h. 34 <sup>m</sup>	23,46	210 <sup>m</sup>	23,8	15,9	15,4	10,97	0,07
2—02	21,30	227	24,2	16,0	15,1	11,45	0,08
2—12	20,34	240	24,8	16,3	15,2	11,96	0,09
2—22	19,35	255	24,1	16,3	15,2	10,91	0,10
2—32	18,32	263	25,1	16,6	15,2	12,03	0,12
2—52	16,17	300	24,2	16,5	15,1	10,83	0,14
2—57	15,44	311	24,2	16,6	15,3	10,67	0,13
3—07	14,29	336	23,8	16,4	14,7	10,46	0,18
3—17	13,14	366	23,8	16,7	14,7	10,08	0,22
3—27	11,56	400	23,7	16,8	14,6	9,82	0,26
3—41	10,03	494	23,8	16,8	14,5	9,98	0,26
3—46	9,21	525	23,0	16,6	14,4	9,07	0,28
3—50*	8,48	560	21,3	15,9	13,9	7,53	0,30
3—52	8,32	575	19,9	15,6	13,6	5,95	0,38

\* L'observation de 3 h. 50<sup>m</sup> et surtout celle de 3 h. 52<sup>m</sup> correspondent à une anomalie. Des nuages arrêtaient partiellement le rayonnement direct, sans empêcher la chaleur réfléchie.

voilé. Un halo a paru vers 3<sup>h</sup> et des filaments de cirrus ont presque caché le soleil vers 4<sup>h</sup> 30<sup>m</sup>. — Le calme qui régnait au début ne s'est malheureusement pas maintenu. Il a soufflé, par moments, un courant du nord irrégulier. Lac un peu agité, variable; aucune réflexion nette du soleil, mais une large traînée lumineuse.

## TABLEAU XIX. — Chexbres, 25 Sept. 1865.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 08 <sup>m</sup>	34°, 52	461 <sup>m</sup>	32°, 6	23°, 7	23°, 7	12, 03	—
2 — 23	33, 07	480	33, 8	24, 2	24, 3	12, 93	—
2 — 38	31, 45	508	34, 4	24, 7	24, 7	13, 08	—
3 — 08	27, 12	575	34, 8	25, 1	25, 0	13, 30	0, 01
3 — 28	24, 18	640	32, 8	24, 5	24, 3	11, 27	0, 01
3 — 38	22, 47	679	32, 0	24, 1	23, 9	10, 67	0, 06
3 — 48	21, 18	727	32, 7	24, 5	23, 9	11, 34	0, 05
3 — 53	20, 35	749	33, 7	25, 0	24, 3	12, 13	0, 05
3 — 58	19, 43	780	34, 4	25, 4	24, 4	12, 68	0, 08
4 — 13	17, 20	885	33, 5	25, 0	23, 4	12, 09	0, 14
4 — 33	14, 06	1087	35, 0	25, 8	23, 7	13, 25	0, 18
4 — 43	12, 26	1229	33, 3	25, 2	23, 4	11, 53	0, 17
4 — 53	10, 47	1414	33, 2	24, 7	22, 7	12, 18	0, 18
5 — 01	9, 26	1623	31, 0	24, 0	22, 3	9, 86	0, 19

28 septembre. — Le ciel était légèrement vaporeux, mais d'ailleurs bien uniforme et bien constant pendant toute la durée des observations. Air calme ou, par moments, légèrement agité. Le lac a été presque toujours parfaitement calme. Image nette du soleil jusqu'à 5<sup>h</sup> 25<sup>m</sup>. Lors des deux dernières observations, cette image était sensiblement allongée.

9 octobre. Ciel très pur jusqu'aux dernières observations, pendant lesquelles il était un peu vaporeux. Air calme ou,

TABLEAU XX. — Chexbres, 26 Sept. 1865.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 04 <sup>m</sup>	34°, 56	460 <sup>m</sup>	31°, 3	23°, 5	23°, 5	8, 60	—
2 — 14	33, 49	472	33, 9	24, 7	24, 8	12, 33	—
2 — 44	30, 07	526	31, 5	23, 5	23, 5	10, 68	—
3 — 24	24, 34	634	33, 3	24, 5	24, 4	11, 95	0, 01
3 — 34	23, 05	674	33, 1	24, 8	24, 6	11, 27	0, 01
3 — 49	20, 49	741	32, 1	24, 1	23, 7	10, 94	0, 03
3 — 59	19, 14	799	32, 3	24, 2	23, 4	11, 27	0, 07
4 — 09	17, 40	869	32, 7	24, 3	23, 4	11, 75	0, 07
4 — 19	16, 03	953	34, 2	24, 8	23, 6	13, 33	0, 09
4 — 29	14, 26	1060	33, 0	24, 4	23, 1	12, 15	0, 11
4 — 49	11, 08	1370	32, 0	23, 8	22, 3	11, 60	0, 14
5 — 12	7, 09	2156	28, 6	22, 0	20, 4	9, 23	0, 19
5 — 24	5, 18	2932	26, 4	20, 7	19, 4	7, 82	0, 17
5 — 29	4, 28	3508	25, 4	20, 0	18, 9	7, 35	0, 15
5 — 34	3, 38	4383	23, 7	19, 4	18, 6	5, 69	0, 13

par moments, faiblement agité. Lac parcouru par de petites vagues et, en outre, frissonnant. Pas de réflexion nette ; mais une traînée longue et plus ou moins large, d'aspect variable.

17 octobre. — Ciel remarquablement pur pendant toute la durée des observations. Air le plus souvent calme, rarement une petite brise. Le lac était variable, jamais assez

TABLEAU XXI. — Chexbres, 4 Octobre 1865.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 30 <sup>m</sup>	29°, 17	538 <sup>m</sup>	28°, 8	21°, 7	21°, 5	9, 47	0, 02
2—40	27, 44	565	30, 3	21, 7	21, 4	11, 79	0, 02
3—15	23, 25	662	33, 0	23, 1	22, 5	13, 89	0, 04
3—25	21, 59	703	32, 4	23, 2	22, 4	12, 92	0, 06
3—35	20, 50	741	32, 5	23, 7	22, 6	12, 41	0, 09
3—45	19, 03	807	31, 6	23, 2	22, 2	11, 78	0, 09
3—50	18, 18	840	30, 4	22, 7	21, 5	10, 78	0, 12
3—55	17, 32	877	28, 9	21, 9	20, 9	9, 68	0, 10
4—13	14, 44	1040	29, 3	22, 1	21, 0	10, 00	0, 11
4—20	13, 37	1124	25, 7	20, 3	19, 4	7, 30	0, 12
4—40	10, 24	1469	22, 4	19, 0	18, 4	4, 39	0, 12
4—45	9, 35	1594	21, 8	18, 7	18, 1	4, 00	0, 13

calme pour donner une image nette, parcouru par des « fontaines » ou stries plus calmes à travers l'ensemble frissonnant. Traînée lumineuse, large et longue.

18 octobre. — Ciel parfaitement pur. Air calme ou faiblement agité. Lac malheureusement variable à cause des « fontaines » qui se promenaient à sa surface. Il n'y eut jamais de réflexion calme et une image nette du soleil ; mais toujours une traînée plus ou moins large et éclatante, tantôt continue, tantôt divisée en deux portions, l'une plus près du rivage et l'autre plus éloignée.

## TABLEAU XXII. — La Vuachère, 8 déc. 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 30 <sup>m</sup>	13,00	636 <sup>m</sup>	10,3	4,6	4,3	7,51	0,03
2 — 51	10,49	737	10,0	4,0	3,5	8,03	0,05
3 — 16	7,59	1000	9,1	3,9	3,4	6,83	0,06
3 — 21	7,21	1273	8,6	3,7	3,2	6,43	0,07
3 — 36	5,31	1555	7,2	3,4	2,6	5,31	0,08
3 — 41	4,52	1750	6,9	2,9	2,5	5,15	0,07
3 — 53	3,20	2800	6,8	2,8	2,5	5,21	0,05

**RIVAZ**, 27 octobre. — Ciel un peu vaporeux dès le début des observations. Quelques nuages filamenteux ont, par moments, passé devant le soleil et faisaient un peu ombre sur le lac. Air convenablement calme. Lac un peu agité. La réflexion donnait une traînée éclatante.

7 novembre. — Ciel pur au début ; mais des nuages sont arrivés et ont interrompu trop tôt les observations. A la fin, les nuages commençaient à affaiblir le rayonnement direct du soleil, mais n'arrêtaient pas encore les rayons qui atteignaient le lac et qui pouvaient se réfléchir. Air convenablement calme. Lac un peu agité. La réflexion de donnait pas d'image nette.

**CHEXBRES**, 25 septembre. — Ciel très constant pendant toute la série , légèrement vaporeux. Air convenablement calme, lac un peu frissonnant et donnant, par la réflexion,

## TABLEAU XXIII. — La Vuachère, 15 déc. 1863.

HEURE	H	D	C	B	A	S	L
2 h. 37 <sup>m</sup>	11°, 46	690 <sup>m</sup>	13°, 9	6°, 6	6°, 5	9, 70	0, 01
2 — 57	9, 38	823	13, 0	6, 1	5, 7	9, 29	0, 04
3 — 07	8, 31	933	13, 0	6, 1	5, 5	9, 39	0, 06
3 — 17	7, 19	1070	13, 1	6, 0	5, 4	9, 69	0, 06
3 — 22	6, 45	1166	12, 8	5, 9	5, 2	9, 43	0, 07
3 — 27	6, 08	1380	11, 6	5, 6	4, 7	8, 13	0, 11
3 — 32	5, 31	1555	10, 9	5, 4	4, 5	7, 43	0, 12
3 — 42	4, 15	2000	9, 1	4, 8	4, 3	5, 67	0, 08
3 — 45	3, 54	2200	8, 8	4, 7	4, 3	5, 28	0, 06

une traînée éclatante. Les rayons solaires réfléchis commençaient à pouvoir atteindre les instruments vers 3 heures.

*26 septembre.* — Ciel pur ou très faiblement vaporeux. L'air a été un peu agité, par intermittences, jusqu'à trois heures et demie; il est devenu ensuite fort calme. Lac parcouru par des bandes irrégulières. La réflexion donnait une traînée éblouissante, mais non une image nette.

*4 octobre.* Ciel pur. L'air a malheureusement été un peu agité, surtout vers la fin des observations; le vent est devenu assez fort pour refroidir manifestement les boules

**B** et **C**. La surface du lac était irrégulière et la réflexion donnait une traînée éclatante.

**LA VUACHERE**, 8 *décembre*. — Ciel pur, mais un peu vaporeux. Air convenablement calme. Lac faiblement agité; la réflexion donnait une traînée brillante. — La station, fort éloignée du lac en distance horizontale, ne voyait malheureusement pas toujours la traînée lumineuse d'une façon complète. A partir de 3<sup>h</sup> 36<sup>m</sup>, quelques arbres, à distance, devaient retenir une partie des rayons réfléchis. Si le lac eût été parfaitement calme, les rayons réfléchis n'auraient pu atteindre les instruments qu'à partir de 3<sup>h</sup> 36<sup>m</sup> à peu près (voir § 21). C'est donc grâce à l'irrégularité de la surface de l'eau que la réflexion était déjà sensible bien avant ce moment-là.

15 *décembre*. Circonstances semblables à celles du 8 décembre. Air un peu moins calme.

#### Discussion des observations. — Résultats.

**19.** En parcourant les tableaux qui précédent, on verra bientôt que les résultats n'offrent pas la régularité qui peut être obtenue dans les expériences de laboratoire. Dans les conditions où ils étaient placés, les appareils thermométriques étaient évidemment soumis à diverses influences perturbatrices. Le phénomène qu'il s'agissait d'observer ne doit d'ailleurs que bien rarement pouvoir se développer d'une façon régulière.

L'action du soleil varie à mesure que s'accroît l'inclinaison de ses rayons et que l'épaisseur atmosphérique devient plus considérable. Un thermomètre qui subit son

influence et qui est préservé des causes perturbatrices ambiantes doit présenter une variation régulière et offrir une marche exempte de points singuliers. C'est ce qui arrive avec le pyréliomètre de Pouillet lorsqu'on peut faire convenablement les corrections dues au refroidissement de l'air. Dans mes observations, cette marche régulière ne se rencontre guère. Le thermomètre de la boule C (et les colonnes S des quantités de chaleur) accuse bien, d'une manière générale et très nettement, la diminution de la chaleur à mesure que l'astre s'abaisse sur l'horizon ; mais cette diminution est tantôt plus, tantôt moins rapide, parfois même elle est interrompue par des retours.

La proportion de chaleur réfléchie par le lac (colonnes L) ne présente également pas la régularité qu'on pourrait attendre, quoique l'influence de la hauteur du soleil sur cette proportion soit extrêmement manifeste.

Parmi les causes qui ont provoqué ces irrégularités, il faut sans doute mentionner les suivantes :

*L'agitation de l'air.* L'air ne présentait naturellement jamais un calme absolu. Les stations se trouvent à la limite d'une grande surface liquide et de la terre ferme ou bien elles sont situées sur le versant assez fortement incliné d'une colline. Dans ces conditions et lorsque le soleil rayonne, il y a toujours dans l'atmosphère, quoique du plus au moins, un peu de mouvement. Ce mouvement varie d'ailleurs d'un moment à l'autre.

A rayonnement solaire égal, le thermomètre se maintiendra naturellement plus haut dans un air absolument calme que dans un air agité, et il oscillera si l'atmosphère qui l'entoure glisse tantôt un peu plus, tantôt un peu moins rapidement le long de sa surface. — Cette influence

de l'agitation de l'air fait que les quantités de chaleur inscrites dans les colonnes S ne peuvent point prétendre à représenter, dans leur variation avec la hauteur angulaire du soleil, les vraies quantités de chaleur versées par cet astre sur la terre. Ce n'était d'ailleurs pas là le but des présentes recherches. Mais on a vu plus haut que si l'agitation de l'air ne dépasse pas certaines limites, les rapports entre les vitesses du refroidissement des deux boules **B** et **C** se conservent sensiblement les mêmes et c'est de ces rapports seulement que dépend la détermination de la proportion de chaleur réfléchie par le lac, c'est-à-dire les nombres des colonnes L. Les irrégularités qui existent dans les nombres des colonnes S, dans certaines séries surtout, n'entraînent donc pas comme conséquence nécessaire des irrégularités dans les valeurs de L (<sup>11</sup>).

*Etat du ciel.* On a vu, par les renseignements relatifs à l'état météorologique de chaque journée d'observations, que le ciel n'a pas toujours été parfaitement pur. Quelques

(<sup>11</sup>) Je ne prétends cependant pas que l'agitation de l'air ne soit pas aussi une cause qui produise parfois des irrégularités dans les valeurs L. Le calcul des quantités L suppose la constance du rapport des vitesses du refroidissement, malgré la variabilité des circonstances ambiantes. C'est sensiblement vrai pour des variations qui ne sont pas trop grandes et qui agissent en même temps sur les deux boules, c'est-à-dire pour les circonstances qui se trouvaient réalisées dans la majorité des cas.

Mais il y a parfois, dans l'atmosphère, une singulière localisation des courants et, malgré la faible distance des boules, ces appareils n'étaient pas toujours dans des conditions qu'on peut qualifier d'identiques. De là des influences inégales modifiant leur refroidissement, et, par suite, des causes d'erreur dans la détermination des rapports L. Ces causes d'erreur sont sans doute pour une certaine part dans les irrégularités que présente la suite des valeurs L pour diverses hauteurs angulaires du soleil.

cirrhus striés ou même de vrais nuages sont parfois venus affaiblir l'action du soleil, produire ainsi une irrégularité dans la marche des thermomètres et par conséquent dans les valeurs des colonnes S. J'ajouterai que, même dans les jours en apparence pure, si l'on observe avec beaucoup d'attention et un peu longuement la voûte céleste, si l'on prend des précautions pour ne pas être ébloui, on remarque fort souvent quelques traces nuageuses qui restent parfaitement inaperçues dans une première et rapide observation du ciel. On voit ou de vagues stries blanchâtres, ou des taches de même teinte qui sont probablement des cirrhus peu denses et très élevés. Ces taches varient de position. — Il est bien évident que les rayons solaires doivent être un peu plus affaiblis lorsqu'ils traversent une région atmosphérique ainsi troublée et cette circonstance doit produire de petites irrégularités dans les indications des thermomètres, même dans les jours notés comme tout à fait purs (¹²)

(¹²) Dans ses *Recherches sur le rayonnement solaire*, M. Quetelet signale aussi ce fait que, dans des jours réputés purs, la marche de l'actinomètre n'est pas d'accord avec la variation régulière de la hauteur du soleil.

« ..... On voit, par les tableaux, que les indications de l'actinomètre n'ont pas toujours été en rapport avec les hauteurs du soleil ; ainsi, pour une hauteur solaire de  $32^{\circ} 42'$ , j'ai trouvé 15,35 degrés de l'actinomètre, tandis que j'en avais obtenu 22, 30 pour une hauteur solaire de  $29^{\circ} 56'$  seulement, etc. »

Et ailleurs : « ..... Toutes les observations ont été faites par un ciel parfaitement serein, mais d'une pureté qui n'était pas toujours la même. Je regrette de n'avoir pu constater le degré de pureté de l'air au moyen d'un cyanomètre. Quoiqu'il en soit, les indications de l'actinomètre, d'après mes observations, n'ont pas suivi la loi de continuité que semblait devoir leur assigner la marche du soleil. Faut-il, pour expliquer ces anomalies, recourir à l'hypothèse de nuages transparents qui affectent certains instruments météorologiques, sans devenir sensibles à la vue ?

Outre l'obstacle apporté par les nuages proprement dits, l'air a aussi sa transparence modifiée par cette cause qui produit la brume, l'aspect vaporeux, etc. Cette brume est parfois assez prononcée à la surface du lac Léman, même dans les beaux jours ; elle n'est pas constante dans le cours d'une même journée et sa variabilité doit sûrement aussi influer sur la marche des instruments.

Il est à remarquer que l'état variable du ciel a pu apporter quelques irrégularités dans les valeurs des colonnes L, surtout pour les stations un peu éloignées du lac. Pour ces stations, en effet, les rayons solaires qui atteignaient directement la boule C, à un moment donné, traversaient l'atmosphère suivant une ligne parfois assez éloignée de celle que suivaient les rayons tombant sur la surface du lac, puis réfléchis vers la boule B. Or ces deux rayons, dans leur trajet, pouvaient rencontrer un air inégalement transparent et être par conséquent inégalement affaiblis. Dans ce cas-là, qui s'est probablement rencontré plusieurs fois, les nombres de la colonne L ne représentent pas la fraction du rayon incident qui a été réfléchie. La méthode, en effet, qui fournit ces nombres suppose que le rayon qui se réfléchit possède, à son point d'incidence sur le lac, une intensité égale à celle du rayon qui atteint la boule C.

L'anomalie que je signale ici a trouvé sa plus forte exagération dans la série du 7 novembre, à Rivaz, alors que les instruments ne recevaient à peu près plus les rayons directs du soleil, arrêtés par un nuage, tandis que

C'est une hypothèse qui a déjà été invoquée, et principalement pour se rendre compte de quelques circonstances particulières que présente l'électricité atmosphérique. » (*Annuaire météorologique de France pour 1850.*)

la surface de l'eau, encore brillamment éclairée, envoyait des rayons réfléchis (voir § 18 et tabl. XVIII depuis 3<sup>h</sup> 46<sup>m</sup>).

*Etat du lac.* La surface réfléchissante présente une variabilité bien connue de chacun. — Dans aucun des jours d'observations, il n'y a eu de grosses vagues ; l'air n'était jamais assez agité pour cela. En revanche, le lac a été parfois, rarement, tout à fait calme, assez calme pour fournir une image nette et limitée du soleil ; d'autres fois, il était parcouru par ces petites ondulations, « vagues mortes » qui laissent assez unie la surface proprement dite. D'autres fois encore, et ç'a été le cas le plus fréquent, la surface de l'eau offrait de très petites vagues irrégulières ; elle était frissonnante, ridée ; — ou bien ridée uniformément, ou bien traversée par des bandes, des « fontaines » plus calmes, dessinant des routes bizarres à la surface du liquide.

La proportion de chaleur réfléchie doit être variable suivant cet état superficiel du liquide et c'est sans doute là une circonstance qui a dû, dans toutes les séries d'observations, quoique du plus au moins, apporter des irrégularités dans les indications des appareils (13).

(13) Les « fontaines » entre autres, qui sont si fréquentes à la surface du lac Léman, sont probablement une cause importante de variation dans la proportion de chaleur réfléchie, et comme ces fontaines se déplacent souvent, se déforment, s'agrandissent, etc., leur influence doit se traduire par des irrégularités dans la marche des appareils,

Quelle est la cause qui produit ces bandes plus unies au milieu d'une nappe liquide frissonnante ? Dans une note récente (voir ce *Bulletin* N° 69 du vol. XII), M. le professeur Forel montre que les fontaines sont dues à la présence d'une couche de matière grasse, huileuse, étrangère à l'eau proprement dite, sur laquelle elle est répandue en pellicule infiniment mince. M. Forel appuie son opinion d'expériences et d'observations

**20.** Au début des présentes recherches, j'avais compté faire la lecture des trois boules A, B et C à des heures fixes ; par exemple de dix en dix minutes. Mais les causes d'irrégularités qui viennent d'être mentionnées m'obligèrent à renoncer à ce projet. Il est évident, en effet, que les observations qui ont le plus de valeur sont celles qui sont faites le plus possible à l'abri des influences perturbatrices dont il vient d'être question. Ces influences (surtout les courants irréguliers et locaux de l'air), par leur origine même, sont essentiellement variables d'un instant à l'autre. On peut dire, par conséquent, que quant les thermomètres variaient rapidement, par exemple de quelques dixièmes de degré en une minute, il y avait quelque cause accidentelle provoquant cette variation. Si, au contraire, l'air était bien calme ou n'était que très faiblement agité, que les rayons solaires se propagaient dans une atmosphère bien pure, les instruments conservaient, pendant un temps assez long, la même température ou ne variaient que lentement et régulièrement.

Ces détails expliquent pourquoi, dans les tableaux qui précèdent, les observations ne sont pas toujours faites à des intervalles égaux. Les thermomètres étaient suivis d'une manière à peu près continue ; mais je notais les températures simultanées seulement lorsque leurs indications n'avaient pas éprouvé de variations notables et brusques depuis quelques instants.

Il est à remarquer que les observations de diverses séries ne peuvent guère être combinées pour fournir des moyennes. Ces séries, en effet, ont été obtenues dans des

qui ont une grande valeur. Si cette explication est juste, on doit en conclure avec d'autant plus de probabilité que les fontaines doivent modifier la proportion de chaleur réfléchie.

circonstances un peu différentes de l'une à l'autre. L'état de la surface réfléchissante est essentiellement variable et il se peut que la loi suivant laquelle l'intensité de la chaleur réfléchie dépend de l'angle d'incidence ne soit pas la même dans divers états de la surface du lac. La transparence variable de l'air empêche également de comparer avec sécurité les résultats d'un jour avec ceux d'un autre jour.

La situation différente des stations, les unes plus rapprochées, les autres plus éloignées du lac, ne permet également pas de combiner entre elles les valeurs obtenues dans ces localités différentes. — Pour ces diverses motifs, il m'a paru d'une meilleure méthode de ne pas chercher à former des moyennes.

**21.** Si la nappe réfléchissante eût été parfaitement unie, les rayons solaires renvoyés par la surface de l'eau n'auraient pu aboutir aux instruments que quand l'astre aurait atteint une hauteur convenable, variant d'une station à l'autre, dépendant de son altitude et de sa distance au rivage. La boule B n'aurait pu accuser une élévation de température que quand elle aurait commencé à *voir* l'image du soleil. En réalité, le lac étant toujours plus ou moins irrégulier à sa surface, des rayons réfléchis pouvaient atteindre les instruments plus tôt. Avant l'instant où une image nette du soleil aurait pu apparaître vers le rivage, il se formait déjà, près du bord, une traînée brillante, plus ou moins élargie. Des rayons lumineux et chauds étaient renvoyés par les faces diversement inclinées des petites vagues du lac. Ce fait est surtout très frappant pour les deux séries de la Vuachère. La distance de la station au rivage et son altitude étaient telles que, pour

une surface réfléchissante unie , les rayons n'auraient pas pu atteindre les instruments avant que la hauteur du soleil fût d'environ  $5^{\circ}30'$ . Or, on voit que des quantités de chaleur réfléchie très appréciables atteignaient les instruments bien avant ce moment-là.

On aperçoit, cependant, en parcourant les tableaux des observations, que la quantité de chaleur réfléchie demeure fort petite tant que les rayons incidents de l'astre font un angle un peu grand avec la surface de l'eau. A la tour Haldimand , où les appareils pouvaient déjà recevoir des rayons réfléchis sous un angle de  $55^{\circ}$ , la chaleur est encore très-faible ou nulle de  $31^{\circ}$  à  $30^{\circ}$ . On remarque un fait semblable au Dézaley et à Chexbres. — En somme, la proportion de chaleur réfléchie sous une incidence de  $30^{\circ}$  a été ou inappréciable ou inférieure à 0,01 de la chaleur incidente, quel que fût l'état du lac.

Lorsque l'incidence passait de  $30$  à  $25^{\circ}$ , la chaleur réfléchie devenait appréciable dans toutes les séries, mais en demeurant encore assez faible, de telle sorte que, pour une incidence de  $25^{\circ}$ , la proportion a toujours été inférieure à 0,08.

A mesure que le soleil s'abaissait sur l'horizon et que ses rayons atteignaient plus obliquement la surface de l'eau, la quantité de chaleur réfléchie augmentait. — Suyant quelle loi se fait cette augmentation?

Pour mieux juger de l'influence de l'incidence , j'ai construit les courbes qui représentent quelques-unes des séries numériques des tableaux ci-dessus (colonnes L). On les trouvera dans les Planches II et III. L'axe horizontal est celui des distances zénithales de l'astre , un degré est représenté par  $10^{\text{mm}}$ . Les ordonnées représentent la fraction de chaleur réfléchie à raison de  $1^{\text{mm}}$  pour 0,01

de la chaleur incidente. — La Pl. II renferme : Ouchy 15 septembre (courbe 1); 14 sept. (2); 12 sept. (3); 20 sept. (4); Tour Haldimand 5 octobre (5) et T. H. 19 octobre (6). — Dans la Pl. III se trouve : Dézaley 28 septembre (courbe 1); 17 octobre (2); 9 oct. (6); 18 oct. (3); Chexbres 26 septembre (5); Rivaz 7 novembre (4). (Voir la note 15.)

Ces courbes montrent assez l'influence des causes énumérées plus haut comme devant produire des irrégularités dans une même série et des différences souvent fort grandes d'une série à l'autre. On voit, d'une manière générale, comment la quantité de chaleur réfléchie augmente avec la distance zénithale du soleil; mais il serait difficile d'en déduire une loi précise. Il est à remarquer, d'ailleurs, que cette loi ne pourrait ressortir directement des observations que là où la chaleur réfléchie a pu atteindre les instruments sans traverser une couche d'air un peu considérable à partir du point de réflexion, et là où le rayon incident sur la surface de l'eau est assez voisin de celui qui frappe la boule C pour qu'on puisse les considérer comme d'égale intensité à chaque instant. Cette double condition ne pouvait évidemment être convenablement remplie que dans les stations d'Ouchy et Tour Haldimand, et avec une surface réfléchissante assez unie pour que les rayons réfléchis proviennent uniquement d'une image à peu près nette du soleil et non d'une longue traînée brillante. Les Tabl. V à XI montrent, en effet, que pour ces deux stations le point de réflexion se trouvait à une distance (colonnes D) le plus souvent inférieure à cinquante mètres des appareils.

Les courbes de la Pl. III, se rapportant à des stations passablement éloignées du lac, doivent représenter moins

bien l'influence de l'angle d'incidence des rayons sur la quantité de chaleur réfléchie.

**22.** Quelle est l'influence de l'état de la surface du lac sur la proportion de chaleur réfléchie? — On a vu que dans la plupart des séries d'observations, le lac n'était pas parfaitement uni ; il offrait à la surface ou bien des ondulations assez prononcées, ou bien ces très petites vagues qui lui donnent un aspect ridé et chagriné.

Il arrive d'ailleurs aussi que l'aspect ridé s'ajoute à des vagues proprement dites.

En consultant mes notes sur l'état du lac, et en les comparant avec les proportions de chaleur réfléchie, je trouve entre autres, comme méritant d'être signalés, les rapprochements suivants :

*Ouchy.* Le 15 septembre, le lac était plus calme au commencement des observations. Les vagues sont devenues de plus en plus prononcées, faisant clapotement sur le rivage. La quantité de chaleur réfléchie n'a pas suivi la courbe ascendante que faisaient prévoir les premières observations.

Le 20 septembre, il s'est produit un fait semblable à celui du 15. Le lac était uni lors des premières observations ; il est devenu frissonnant et clapotant plus tard. La quantité de chaleur réfléchie a été, relativement à d'autres jours, forte surtout au début.

Le 12 septembre, circonstances inverses de celles des jours précédents. Le lac était frissonnant au début ; il est devenu de plus en plus calme. Vers la fin de la série, il y avait une image à peu près nette du soleil près du bord et, en même temps, au large, une traînée brillante due à

une surface ridée. La chaleur réfléchie est devenue très forte et a présenté le maximum constaté dans ces recherches.

*Tour Haldimand.* Le 19 octobre, la surface du lac était un peu agitée et frissonnante au commencement des observations. Elle est devenue de plus en plus calme. Lors des dernières observations, le lac était comme de l'huile, avec une image nette du soleil et aucune trace de traînée. La quantité de chaleur réfléchie a été, relativement à d'autres jours, faible au commencement ; elle est devenue surtout considérable vers la fin où elle a atteint un maximum semblable à celui du 12 septembre à Ouchy.

*Dézaley.* 17 octobre. Le lac a été toujours frissonnant et a fourni une longue traînée. A un certain moment, il s'est formé une région plus calme, près du rivage. La proportion de chaleur réfléchie s'est accrue justement à ce moment-là (courbe 2, Pl. III; distance zénithale 73 à 74°).

Le 28 septembre, le lac a été bien calme pendant la plus grande partie des observations, fournissant une image presque nette du soleil. La quantité de chaleur réfléchie n'a pas été aussi grande que dans d'autres séries, excepté lors des dernières observations où elle a atteint les plus fortes valeurs obtenues au Dézaley (courbe 1, Pl. III).

*Rivaz.* Le 7 novembre, le lac était presque tout à fait calme ; la réflexion donnait une *place* éclatante, mais non une traînée. Vers 2<sup>h</sup> 52<sup>m</sup>, le bateau à vapeur vint passer précisément dans la région où se faisait la réflexion, et produisit pendant quelque temps, à la surface de l'eau, l'agitation que chacun connaît. La quantité de chaleur réfléchie, observée quelques minutes après, parut un peu

plus faible (voir tabl. XVIII à 2<sup>h</sup> 57<sup>m</sup>); elle reprit plus tard sa marche ascendante en même temps que l'astre s'abaissait vers l'horizon.

Les détails qui précèdent montrent que, d'une manière générale, la proportion de chaleur réfléchie est plus grande lorsque la surface de l'eau est plus calme et que la réflexion s'approche de donner une image nette du soleil. Cette loi me paraîtrait bien établie s'il n'y avait pas les observations du 28 septembre, au Dézaley, qui font une exception assez frappante et qui m'obligent à ne présenter cette conclusion qu'avec une certaine réserve.

Les circonstances qui fournissent le plus de chaleur réfléchie sont celles qui se trouvaient réalisées de la manière la plus accentuée à Ouchy, le 12 septembre. Ces circonstances se sont reproduites, quoique à un moindre degré, dans quelques autres moments. Le lac étant très calme près du rivage donnait une image limitée du soleil; en même temps, la surface de l'eau était un peu agitée et frissonnante loin du bord; elle fournissait une traînée brillante dont la réflexion venait s'ajouter à celle qui se produisait sur les parties du lac voisines du rivage.

**23.** La distance des stations jusqu'au lac et leur altitude ne sont évidemment pas indifférentes à la quantité de chaleur qui peut les atteindre. Là où les thermomètres étaient placés près de la surface de l'eau, sur le rivage, les rayons réfléchis n'avaient qu'une faible couche à traverser pour arriver à la boule B. Ces conditions se trouvaient réalisées à Ouchy et à la Tour Haldimand. Les tableaux V à XXIII indiquent, dans les colonnes D, le chemin que devait parcourir le rayon réfléchi, dans le cas d'un lac parfaitement uni et d'une réflexion en un point

unique. Comme la surface de l'eau était le plus souvent un peu agitée, une partie des rayons réfléchis venaient d'une région du lac beaucoup plus éloignée et ils subissaient par conséquent une absorption plus grande que celle qui résulterait seulement de la distance D. On voit immédiatement que, par cette circonstance, l'état de la surface du lac doit influer sur la forme de la courbe qui représente la relation entre la chaleur réfléchie et la hauteur du soleil. Par un lac parfaitement calme, la couche d'air traversée demeure faible; même lorsque le soleil est bas sur l'horizon. Par un lac agité, les rayons qui atteignent les instruments se sont réfléchis, en partie, dans des points beaucoup plus éloignés, très variables suivant la hauteur du soleil, et avant d'arriver aux thermomètres ils subissent une absorption en traversant les couches d'air assez riches en vapeur d'eau qui recouvrent le lac. L'influence dont il est ici question a pu avoir une importance qu'il me paraît impossible d'évaluer; mais on comprend que les courbes des planches II et III ne pouvaient se trouver ni bien régulières ni bien concordantes, puisque l'élément qu'elles représentent dépend d'un facteur aussi variable que l'état de la surface de l'eau.

Dans les stations plus éloignées du lac, telles que le Dézaley, Rivaz, etc., la chaleur réfléchie avait un chemin encore plus long à franchir entre la surface de l'eau et les appareils. Pour de faibles hauteurs du soleil, cette distance devenait considérable. Elle a souvent dépassé 1000 mètres d'après les nombres des colonnes D; en réalité, elle était le plus souvent encore bien plus grande que ne l'indiquent ces nombres mêmes, parce que la réflexion provenait d'une traînée due à une surface frissonnante. On comprend qu'alors l'absorption produite par

l'air pouvait notablement affaiblir la chaleur reçue par la boule **B**.

A mesure que l'incidence des rayons augmentait, la proportion de chaleur réfléchie s'accroissait ; mais en même temps le chemin à parcourir jusqu'aux appareils devenait de plus en plus grand. Il pouvait ainsi se faire que, au-delà d'une certaine limite, la seconde influence l'emportant sur la première, la proportion de chaleur réfléchie reçue par les instruments cessât de s'accroître et atteignît un maximum pour diminuer ensuite. L'existence de ce maximum, suivi d'un décroissement, pour les faibles hauteurs du soleil, se retrouve évidemment dans plusieurs séries des stations éloignées du lac. On peut comparer, sous ce rapport, les courbes de la Pl. III (1, 2, 3, 5, 6), et celles de la Pl. II. — Les observations faites à la Vuachère sont également significatives dans le même sens (voir table XXII et XXIII), et malgré l'irrégularité des résultats, on voit que, pour une faible hauteur du soleil et une très longue distance parcourue par la chaleur réfléchie, cette proportion de chaleur diminue.

Une autre circonstance qui tend à faire paraître plus faible la chaleur réfléchie dans les stations élevées au-dessus du lac est la suivante : La méthode suivie pour calculer les nombres des colonnes **L** suppose que le rayon incident sur la surface de l'eau et qui, par sa réflexion, aboutit aux appareils, a la même intensité, à chaque instant, que le rayon solaire reçu directement par la boule **C**. Cela doit être sensiblement vrai lorsque les appareils sont près du rivage. Mais à mesure que les thermomètres sont plus élevée au-dessus de l'eau, les conditions cessent d'être aussi simples. Le rayon qui va jusqu'au lac et qui s'y réfléchit traverse une couche atmos-

phérique plus épaisse que celui qui arrive directement aux instruments ; il est donc plus affaibli que ce dernier par l'absorption. — Par conséquent, en comparant la chaleur réfléchie qui atteint la boule **B** à la chaleur directe qui frappe **C**, on compare cette chaleur réfléchie avec un rayon un peu plus intense que celui d'où elle provient par une réflexion à la surface de l'eau. Le rapport doit donc paraître un peu plus faible qu'il n'est en réalité. Il y aurait là le motif d'une petite correction, malheureusement impossible à faire parce que l'on ne connaît pas assez bien la loi suivant laquelle la chaleur solaire est absorbée dans les couches profondes de l'atmosphère. • Cette correction aurait pour résultat d'augmenter d'une petite quantité les chiffres des colonnes **L** dans les stations élevées, afin de les rendre comparables à ceux des stations inférieures.

**24.** Les tableaux ci-dessus, ainsi que les courbes des Pl. II et III font voir quelle est la fraction de la chaleur solaire réfléchie par le lac. Même en faisant la part des diverses causes d'erreur et d'incertitude qui ont été précédemment exposées, les chiffres obtenus montrent que cette chaleur réfléchie atteint une valeur considérable pour certaines hauteurs du soleil et dans certains états convenables de la surface du lac.

La plus forte proportion de chaleur réfléchie a été obtenue à Ouchy, le 12 septembre 1863, alors que le soleil était à  $4^{\circ}38'$  au-dessus de l'horizon, et le 19 octobre 1863, à la Tour Haldimand, par  $3^{\circ}34'$  de hauteur du soleil. Ce maximum a été 0,68 de la chaleur incidente. Outre ces deux cas extrêmes, il y a encore deux observations, dans

les stations basses, où la chaleur réfléchie dépasse la moitié de la chaleur incidente (<sup>14</sup>).

Une proportion de chaleur réfléchie comprise entre 0,40 et 0,50 de la chaleur incidente, se rencontre un certain nombre de fois aux stations d'Ouchy, Tour Haldimand, Dézaley et Rivaz, pour des hauteurs du soleil inférieures ou au plus égales à  $7^{\circ}27'$ .

La proportion 0,30 à 0,40 se retrouve plus fréquemment encore et pour des hauteurs du soleil inférieures ou au plus égales à  $11^{\circ}56'$ .

La proportion 0,20 à 0,30 est naturellement plus fréquente et se rencontre pour des hauteurs inférieures ou au plus égales à  $16^{\circ}35'$ .

Les quantités de chaleur inférieures à 0,20 forment la majorité de celles qui ont été observées et correspondent

(<sup>14</sup>) Par ce qui a été exposé précédemment, on a vu que la méthode employée pour calculer les quantités relatives de chaleur reçues par les deux boules n'a point la prétention de donner des résultats très exacts. Si l'on a égard aux causes qui peuvent diminuer le degré d'approximation que fournit cette méthode, on verra sans peine que ces causes doivent prendre plus d'importance lorsque les excès de température des boules **B** et **C** diffèrent beaucoup l'un de l'autre, ainsi lorsque **B** s'éloigne peu de la nature ambiante tandis que **C** présente un écart de 10 à  $12^{\circ}$ . Ce sera le contraire quand les deux boules ont des températures moins différentes et que **B**, par conséquent, s'éloigne davantage de la température ambiante.

En outre, dans le premier cas, une différence de un ou deux dixièmes de degré du thermomètre **B** peut changer assez fortement le chiffre qui représente la proportion de chaleur réfléchie; dans le deuxième cas, la même incertitude aura une portée beaucoup moins grande.

Il résulte de là que l'erreur relative dans l'évaluation de la proportion de chaleur réfléchie est plus faible quand cette proportion est forte. C'est pour les fractions (colonne L) très petites que les erreurs de l'observation et les imperfections de la méthode peuvent acquérir le plus d'importance.

généralement à des hauteurs du soleil supérieurs à celles qui viennent d'être indiquées. — On a vu plus haut que les premières traces de chaleur réfléchie l'ont été seulement lorsque le soleil arrivait à une hauteur d'environ 30°.

A la station de Chexbres, la chaleur réfléchie a toujours été inférieure à 0,20. Cela tient sans doute à l'altitude de cette station. Le lac ayant été clapotant ou ridé durant les séries qui ont été faites à Chexbres, les rayons provenaient toujours d'une traînée plus ou moins longue et par conséquent d'une distance sûrement fort grande. Ils étaient par conséquent absorbés dans une grande mesure par les couches inférieures de l'atmosphère avant d'atteindre les instruments.

A la Vuachère, les rayons arrivaient également d'un lac un peu frissonnant et d'une distance très considérable. On voit que, dans cette station si éloignée du rivage, la chaleur réfléchie n'a jamais dépassé 0,12 de la chaleur directe fournie par le pâle soleil de décembre (voir la remarque du § 18).

**25.** On a vu précédemment pourquoi les quantités de chaleur des colonnes S ne peuvent pas être considérées comme donnant la loi suivant laquelle la chaleur directe du soleil varie avec la hauteur de cet astre. Cette loi ne peut être fournie que par des instruments où l'on tient compte de l'influence refroidissante du milieu ambiant (pyrhéliomètre Pouillet) ou par des instruments dans lesquels le milieu ambiant est maintenu constant (appareils de Soret, Secchi). — Si l'on suppose connue la loi dont il s'agit et si les présentes expériences fournissaient la proportion de chaleur réfléchie par le lac pour diverses incidences (lac supposé uni), on pourrait évidemment cal-

culer la quantité *réelle* de chaleur fournie par la réflexion du lac pour les diverses hauteurs du soleil.

Les résultats obtenus dans les présentes recherches ne permettent pas de calculer avec exactitude cette quantité de chaleur. Cependant, en choisissant dans les séries citées plus haut celles qui paraissent offrir le plus de régularité, soit dans les valeurs  $S$ , soit dans les rapports  $L$ , on peut entreprendre, au moins avec une certaine approximation, le calcul dont il s'agit.

On obtiendra évidemment les quantités réelles de chaleur réfléchie en faisant, pour chaque observation en particulier, le produit des nombres  $L$  par  $S$ . — J'ai choisi, pour ce calcul, les séries du Dézaley 28 septembre et 18 octobre, d'Ouchy 12 septembre, et de la Tour Haldimand 5 octobre. On trouvera, dans le tableau XXIV, les valeurs obtenues, lesquelles ont servi à construire les courbes  $M$  de la Pl. III<sup>(15)</sup>.

On ne peut pas s'attendre à trouver, pour ces quatre séries, des courbes semblables ou des courbes bien régulières puisque toutes les causes perturbatrices ou variables (transparence de l'air, état du lac, distance de la station) qui influent sur  $S$  et sur  $L$  exercent aussi leur influence sur le produit de ces deux quantités.

A mesure que le soleil descend vers l'horizon,  $S$  diminue; en revanche,  $L$  augmente. L'inspection des courbes montre que, d'une manière générale, c'est cette dernière

(15) Les rapports  $L$  sont donnés dans les Tabl. V à XXIII avec deux chiffres décimaux seulement; mais je les avais calculés, dans l'origine, jusqu'aux millièmes. Dans le Tabl. XXIV, le produit  $L \times S$  a été obtenu en utilisant les rapports  $L$  avec trois chiffres décimaux. Les courbes des Pl. II et III ont aussi été construites en utilisant les millièmes.

influence qui l'emporte ; c'est-à-dire que la quantité de chaleur réfléchie s'accroît généralement lorsque l'astre s'abaisse. On aperçoit cependant que les quatre courbes indiquent un maximum ; en d'autres termes, qu'il y a une certaine hauteur du soleil, un peu avant son coucher, pour laquelle la quantité de chaleur réfléchie est la plus forte et à partir de laquelle la chaleur renvoyée par le lac diminue. Cette existence d'un maximum se vérifie dans toutes les autres séries, du moins dans toutes celles où les observations se sont poursuivies jusque près du coucher du soleil ; seulement, le maximum se produit un peu plus tôt ou un peu plus tard. Il doit effectivement varier avec l'état du lac.

(Tableau XXIV.)

**26.** Dans le tableau XXIV, le produit  $S L$  donne la quantité de chaleur réfléchie par le lac aux diverses heures d'observations, entre le moment où cette réflexion commence à être sensible jusque vers le coucher du soleil.

Il serait intéressant de pouvoir évaluer la quantité *totale* de chaleur réfléchie qui arrive à une station pendant les quelques heures où la réflexion peut l'atteindre. Cette quantité est évidemment variable d'un jour à l'autre pour les diverses raisons souvent indiquées déjà. Elle doit dépendre en outre de la hauteur et de l'orientation de la station par rapport au lac. Elle variera enfin par suite du changement de déclinaison du soleil. — Cependant, malgré ces influences qui enlèvent toute constance à l'élément dont il s'agit, il paraît intéressant de savoir, approximativement au moins, ce que peut être cette somme totale de chaleur dans quelques conditions déterminées.

J'ai cherché à faire cette évaluation pour les quatre

## TABLEAU XXIV.

DÉZALEY 18 octobre.		DÉZALEY 28 sept.		TOUR HALDIMAND 5 octobre.		OUCHY 12 septembre.	
Distance zénith.	L × S	Distance zénith.	L × S	Distance zénith.	L × S	Distance zénith.	L × S
64,24'	0,25	63,44'	0,16	66,08'	0,35	58,26'	0,08
64,27	0,23	65,52	0,34	69,08	0,53	62,58	0,34
65,33	0,35	68,51	0,88	72,51	0,34	65,20	0,65
66,43	0,34	72,43	1,37	74,25	0,54	67,46	0,76
67,20	0,54	74,29	1,25	76,46	1,24	70,12	1,00
67,55	0,75	75,55	1,49	78,22	1,61	72,43	1,37
68,31	0,65	77,03	1,62	80,48	2,38	75,14	1,62
69,10	1,00	80,20	1,86	82,46	2,51	77,16	2,90
70,28	1,25	84,00	2,38	84,14	2,76	78,38	2,38
71,09	1,59	84,59	2,64	85,42	2,64	80,21	2,12
72,31	2,00	85,49	2,51			82,33	2,25
73,12	2,24	86,10	2,38			83,43	2,25
78,19	2,89					85,22	2,00
80,36	3,12						
81,22	3,15						
82,57	2,63						
83,43	2,12						

séries du Tabl. XXIV, en comparant les quantités de chaleur S L avec celles qui résultent de l'action directe du soleil et qui sont inscrites dans les colonnes S des tableaux précédents. — J'ai considéré la durée totale des observa-

tions d'une série comme partagée en intervalles de quinze minutes, puis j'ai supposé que, durant chacun de ces intervalles, l'action solaire (directe et réfléchie) demeurait constante. J'ai cherché ensuite, pour ces diverses séries et pour les quarts d'heure successifs, les nombres qui représentent le plus approximativement la chaleur directe et la chaleur réfléchie. En ajoutant ces deux groupes de nombres, on obtient deux sommes qui sont proportionnelles l'une à la chaleur directe et l'autre à la chaleur réfléchie. — Voici les résultats de cette comparaison :

*Dézaley*, 28 septembre. A partir de 2<sup>h</sup> 30<sup>m</sup>, la chaleur directe est représentée par 133,6 et la chaleur réfléchie par 16,6.

*Dézaley*, 18 octobre. A partir de 3<sup>h</sup>, chaleur directe, 125,3 ; — chaleur réfléchie, 19,9.

*Ouchy*, 12 septembre. A partir de 3<sup>h</sup>, chaleur directe, 79,6 ; — chaleur réfléchie, 15,4.

*Tour Haldimand*, 5 octobre. A partir de 3<sup>h</sup>, chaleur directe, 102,9, — chaleur réfléchie, 12,4.

Au Dézaley, on trouve donc que, à partir du moment où le lac a commencé à réfléchir jusque tout près du coucher du soleil, la chaleur réfléchie a été douze centièmes, le 28 octobre, et seize centièmes, le 18 octobre, de la chaleur directe fournie par l'astre.

A Ouchy, la même évaluation donne dix-neuf centièmes ; à la Tour Haldimand, douze centièmes.

Par le mode de comparaison qui vient d'être mentionné, on peut aussi évaluer l'importance relative de la somme de chaleur réfléchie en recherchant pendant combien de temps le rayonnement direct fournit une somme équiva-

lente. Voici ce que l'on trouve : Au Dézaley, les 28 septembre et 18 octobre, toute la chaleur réfléchie par le lac et qui a pu atteindre la station est à peu près égale à celle que le soleil envoyait directement pendant les trois derniers quarts d'heure avant son coucher. — A Ouchy, le 12 septembre, la chaleur réfléchie est un peu supérieure à celle que le soleil a donné durant les trois dernières quarts d'heure ; à la Tour Haldimand, le 5 octobre, cette chaleur équivaut à peu près à celle qui a été fournie par cet astre durant la dernière demie-heure avant son coucher.

Les évaluations qui précèdent ne doivent être considérées, je l'ai déjà dit, que comme des approximations ; je les crois cependant peu éloignées de la vérité. Ces évaluations, d'ailleurs, s'appliquent à certains cas déterminés. Elles fourniraient évidemment d'autres chiffres pour des circonstances différentes d'état du lac, d'état de l'air, d'orientation et d'altitude de la station, de déclinaison du soleil, etc. — Il est permis d'ajouter que les circonstances où l'on peut recueillir beaucoup de chaleur réfléchie sont rarement plus favorables que celles qui se trouvaient réalisées dans les séries dont il vient d'être question. (Voir le § 35.)

**27.** Sans être bien considérable, la chaleur solaire réfléchie par le lac est cependant assez importante pour exercer une influence sensible sur le climat des régions qui peuvent en profiter. Grâce au lac, la chaleur qui atteint une partie de la région située à l'est, au nord et à l'ouest du bassin du Léman se trouve un peu augmentée. C'est comme si, durant une certaine fraction de l'année, laquelle varie avec la situation des stations, le temps pendant lequel le soleil se trouve sur l'horizon était un peu prolongé.

Cet accroissement de chaleur doit avoir quelque influence sur la végétation et spécialement sur les vignobles qui recouvrent les pentes plus ou moins fortement inclinées du côté du lac. Le moment de l'année où la chaleur réfléchie par le lac peut atteindre la côte doit passablement varier d'une région à l'autre à cause de l'orientation. Ainsi, par exemple, le vignoble de Villeneuve, à l'extrémité orientale du lac, reçoit de la chaleur réfléchie à la fin des jours chauds de Juillet et d'Août, tandis que à cette époque, les vignobles de Lavaux n'en reçoivent pas d'une manière sensible. A ce moment, lorsque le soleil est assez bas sur l'horizon pour que le lac réfléchisse, l'azimut dans lequel se trouve l'astre ne permet pas aux rayons réfléchis d'atteindre Lavaux, tandis que la réflexion atteint parfaitement Villeneuve. — En automne au contraire, en septembre et octobre, plusieurs parties de Lavaux et spécialement les pentes fortement inclinées du Dézaley et de Rivaz reçoivent très bien la chaleur réfléchie. Il en est de même, quoique à un moindre degré, de Montreux et de Vevey.

Il me paraît probable que cette différence dans le moment où la chaleur réfléchie vient ajouter son action à la chaleur directe doit correspondre à quelque différence dans son action sur les végétaux. — Dans le vignoble de Villeneuve, la chaleur du lac vient agir durant une certaine phase de la végétation; au Dézaley, cette chaleur agit durant une autre phase. Ici, le raisin est près de sa maturité; là, il est encore en formation. Il est fort possible que ces différences ne soient pas étrangères aux différences dans la qualité des produits, et on peut se demander, entre autres, si la richesse en alcool bien connue des vins du Dézaley (richesse supérieure à celle de tous les autres crus des bords du lac) ne provient pas de

ce que ce vignoble est particulièrement favorisé par la chaleur réfléchie à l'époque où le raisin mûrit et où le sucre se forme dans son intérieur.

On a vu que l'intensité de la chaleur réfléchie diminue pour des stations plus éloignées du lac à cause de l'absorption produite par la couche d'air traversée. Malgré cette diminution, cette chaleur doit se faire sentir jusque dans la zone supérieure au vignoble et jusque sur les flancs des montagnes qui entourent le bassin du Léman à son extrémité orientale. La colline de Sonchaud, qui domine Chillon, les monts de Caux, etc., sont très favorablement situés pour recevoir la chaleur réfléchie par le lac à la fin des jours de l'été et de l'automne. La végétation arborescente de ces sous Alpes doit bénéficier, dans une petite mesure, de ce surcroît de chaleur.

**28.** L'action réfléchissante du lac doit s'exercer en plus ou moins forte proportion sur *toutes* les radiations qui composent le flux solaire. Dans les expériences dont il est ici question, il s'agissait de la mesure de la chaleur, c'est-à-dire des radiations à faible réfrangibilité ou de la portion ultra-rouge du spectre, et des radiations à réfrangibilité moyenne, lesquelles produisent aussi l'impression de la lumière. — Il est extrêmement probable que les radiations très réfrangibles de la région ultra-violette se réfléchissent aussi. Ces radiations-là, et une partie de celles qui produisent l'effet lumineux, forment une fraction du flux solaire dont l'effet thermique est très faible, mais dont l'action finale n'est pas nulle pour cela. Cette fraction provoque, on le sait, les phénomènes chimiques et elle doit agir, dans une certaine mesure, sur la végétation.

Je ne sais quelles sont les radiations élémentaires du

flux solaire qui impressionnent le plus vivement l'épiderme chez l'homme, qui produisent ce changement de coloration, ce hâle si caractéristique du visage et des mains. Il me paraît probable que ces radiations sont réfléchies dans une forte proportion par le lac, car les personnes qui sont fréquemment et longuement exposées au soleil, près de la surface de l'eau (bateliers, etc.) présentent un hâle particulièrement foncé. Il est à remarquer d'ailleurs que la direction, oblique de bas en haut, des rayons réfléchis rend illusoire le rôle protecteur ordinaire de la coiffure.

Les végétaux qui reçoivent les radiations lumineuses et calorifiques réfléchies par le lac les reçoivent dans une direction assez différente de celle qui est suivie par le rayonnement direct du soleil. Les rayons réfléchis arrivent « par dessous » ; ils atteignent des portions ou des faces du végétal que n'atteindraient pas les rayons directs. Cette différence m'a apparu avec toute son importance au Dézaley, à l'époque où les raisins étaient en pleine maturité, et où j'ai constaté, sur un grand nombre de céps, que beaucoup de grappes étaient éclairées et réchauffées par les rayons réfléchis, tandis que les rayons directs, arrêtés par les feuilles et les parties supérieures de la plante, les atteignaient imparfaitement. Dans bien des cas, sans doute, cette addition de la chaleur et de la lumière réfléchies peut contribuer à dorer plus uniformément les grains de raisin.

**29.** On observe fréquemment, près de la surface du lac Léman, le phénomène optique du mirage. — Le mirage se produit, on le sait, lorsque les couches inférieures de l'air sont notablement plus chaudes que celles qui sont immédiatement au-dessus. Cette différence de température

détermine une densité plus faible dans les couches les plus basses ; elle se rencontre habituellement lorsque l'eau est plus chaude que l'air et que les portions inférieures de l'atmosphère se réchauffent exceptionnellement par le voisinage et le contact de la surface acqueuse.

Mais on observe quelquefois des mirages parfaitement caractérisés alors que les températures relatives de l'air et de l'eau ne permettent pas de supposer que c'est le contact de l'eau qui a réchauffé l'air. On observe des mirages alors que la température de l'air est de plusieurs degrés supérieure à celle de l'eau. Je puis citer, comme exemple, les mirages qui existaient lors des séries d'observations faites à la Tour Haldimand (voir § 18). La température du lac, *près du bord*, était de 14 à 15°. Au large, cette température était très probablement encore plus faible. Il suffit de consulter les tableaux pour voir que l'air, même à une certaine hauteur au-dessus de la surface, était plus chaud. Ce n'est donc pas le contact du liquide qui pouvait donner aux couches atmosphériques les plus rapprochées de la surface une température un peu plus élevée que celle des couches plus éloignées de l'eau.

Dans des cas semblables (et ils sont très fréquents), l'explication du phénomène doit être cherchée ailleurs que dans une influence réchauffante de l'eau sur l'air. — Je pense qu'on peut indiquer deux causes comme capables de produire les circonstances nécessaires pour que le mirage ait lieu.

1. Les couches d'air très voisines de l'eau sont probablement un peu plus riches en vapeur d'eau que celles qui sont plus élevées. Or, l'air plus humide agit, quoique à un faible degré, comme un corps moins réfringent par rapport à l'air moins humide. Cette cause-là explique sans

doute à elle seule les mirages faibles, mais pourtant bien reconnaissables, qui s'aperçoivent alors que l'eau est moins chaude que l'air et que les nuages empêchent le rayonnement du soleil.

2. Lorsque le soleil brille, ses rayons sont probablement absorbés en plus forte proportion par les couches très voisines de l'eau, parce que ces couches sont plus chargées de vapeur. Cette absorption doit se faire sur le rayon direct et sur le rayon réfléchi ; elle doit contribuer à réchauffer les couches les plus basses un peu plus que celles qui sont plus élevées et, pour ce motif, donner lieu à la différence de densité dont le mirage est une conséquence.

L'observation directe m'a montré (<sup>16</sup>) qu'un décroissement de température au plus égal à *un* degré, entre la couche d'air la plus rapprochée de l'eau et celle qui est à un mètre, suffit pour que le mirage soit extrêmement prononcé et pour que le plan caustique paraisse très élevé au-dessus du lac. Des différences de température bien plus faibles peuvent donc suffire pour donner lieu à des mirages qui sont bien plus faibles également.

**30.** La réflexion de la chaleur solaire par la surface d'un grand bassin d'eau ne dépend sans doute pas de l'absence de salure. Je pense donc que les phénomènes qui sont étudiés dans le présent travail se produisent à la sur-

(<sup>16</sup>) « Des températures de l'air et des mirages, etc. » *Bulletin de la Soc. des Sc. nat.*, nos 37 et 38, année 1856.

Je compte revenir, dans un autre occasion, sur cette question des mirages qui apparaissent lorsque la température de l'eau est plus froide que celle de l'air.

face de la mer et donnent lieu aux mêmes conséquences favorables pour la végétation des côtes convenablement orientées.

A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, l'obliquité moyenne des rayons solaires augmente et par conséquent ceux de ces rayons qui atteignent les surfaces océaniques doivent se réfléchir dans une proportion de plus en plus forte. Une partie de ces rayons réfléchis est absorbée par l'atmosphère et sert à la réchauffer, mais une autre partie échappe à cette absorption et est rejetée vers les espaces célestes. La prédominance considérable des mers dans les hautes latitudes de l'hémisphère austral doit donc avoir pour conséquence une moins grande utilisation de la chaleur directement fournie par le soleil. Dans l'hémisphère nord, où les surfaces continentales l'emportent, cette perte de chaleur doit être moins grande.

Je m'empresse d'ajouter que cette considération isolée ne suffit pas pour qu'on ait le droit de conclure à une température moyenne plus basse de l'hémisphère austral. La chaleur qui réchauffe les hautes latitudes des zones tempérées et polaires n'est pas uniquement due au rayonnement direct du soleil; les courants marins et atmosphériques qui, de l'équateur, arrivent dans ces latitudes y apportent une grande masse de chaleur, soit à l'état de chaleur sensible soit à l'état de chaleur latente dans la vapeur d'eau. La question de la différence possible de température entre les deux hémisphères doit tenir compte de ces diverses sources de réchauffement, et aussi des pouvoirs émissifs de l'eau et de la terre; cette question est manifestement très complexe et sa discussion ne peut pas trouver place ici.

**Comparaisons avec le pyrhéliomètre direct. — Evaluations en chaleur absolue.**

**31.** Assez longtemps après l'époque où ont été faites les observations dont il a été question jusqu'ici, j'ai eu à ma disposition un pyrhéliomètre. Il m'a paru intéressant de comparer les indications de cet instrument avec celles des boules qui m'avaient servi et de transformer en quantités absolues de chaleur les données toutes relatives fournies par ces boules.

Le pyrhéliomètre employé est absolument semblable à celui qu'a décrit et utilisé M. Pouillet sous le nom de *pyrhéliomètre direct*. — Le thermomètre est divisé en cinquièmes de degrés; le bouchon que traverse sa tige est de caoutchouc afin d'empêcher, autant que possible, le passage de la chaleur de l'eau du pyrhéliomètre aux autres parties de l'instrument. La surface exposée au soleil est celle d'un disque de dix centimètres de diamètre, d'argent mince, formant la base du cylindre aplati contenant l'eau. Cette surface a été soigneusement recouverte d'une couche de noir de fumée velouté<sup>(17)</sup>.

On sait en quoi consiste la méthode indiquée par Pouillet et généralement employée depuis lui pour faire usage de cet instrument. On observe l'effet de l'air ambiant avant puis après l'exposition au soleil, et on en déduit la correc-

(17) Dans tout ce chapitre, je me base sur les indications du pyrhéliomètre pour calculer la quantité de chaleur fournie par le soleil conformément aux travaux de Pouillet et d'autres; mais je ne méconnais pas la justesse des critiques qui peuvent être adressées à cet instrument. Le noir de fumée diffusant un peu la chaleur rayonnante, l'appareil doit donner des valeurs trop faibles.

tion qui doit être appliquée aux indications du thermomètre. Il est à remarquer, toutefois, que le thermomètre n'atteint pas son maximum au moment où l'instrument est de nouveau placé derrière l'écran, après les cinq minutes d'action solaire. La température continue à s'élever encore pendant une minute environ, puis elle demeure sensiblement stationnaire quelques instants et recommence à baisser plus ou moins longtemps après que l'action solaire a été supprimée. Ainsi, quand on lit la température à l'expiration de la cinquième minute, on n'observe pas tout le réchauffement que le soleil est capable de produire dans l'instrument.

Après quelques tâtonnements préliminaires, j'ai opéré avec la méthode et dans les circonstances suivantes :

Le pyrhéliomètre était placé dans une chambre où le soleil pénétrait par une fenêtre ouverte. L'instrument était, longtemps avant l'observation, installé à l'ombre, près de la limite du flux solaire, et continuellement tourné dans ses colliers afin de mélanger les couches liquides. Une loupe, convenablement tenue par un support lié au pyrhéliomètre, permettait de lire avec plus de précision les indications du thermomètre. — Dans ces conditions, l'instrument arrivait à une température qui ne variait plus que très peu dans le courant de plusieurs minutes ; c'est quand il était arrivé à cette température à peu près constante qu'on l'exposait cinq minutes à l'action du soleil, en continuant à observer le thermomètre de minute en minute ou de deux en deux minutes. On obtenait ainsi des excès de température,  $x_1$ ,  $x_2$ , etc. A la cinquième minute, l'instrument était ramené à l'ombre ; sa température continuait à s'élever et le maximum était atteint à six minutes plus ou moins quelques secondes. Lorsque l'appareil

avait sûrement fourni son maximum, on le replaçait quelques moments au soleil, de manière à le rechauffer d'environ un degré, puis on le retirait à l'ombre et l'on observait son refroidissement.

La température ambiante était suivie à l'aide d'un second thermomètre plongé dans la boule **B**, laquelle était placée près du pyrhéliomètre et à l'abri du soleil. La variation de cette température, pendant le refroidissement du pyrhéliomètre, a toujours été faible; cependant, il en a été tenu compte pour estimer, à chaque instant, l'*excès* du pyrhéliomètre sur l'atmosphère ambiante.

Les diverses températures du pyrhéliomètre, notées de quatre en quatre minutes, étaient portées comme ordonnées et servaient à obtenir la courbe du refroidissement. Cette courbe, un peu irrégulière, était rectifiée au juger; après cette régularisation, elle servait à construire une petite table donnant le refroidissement de l'instrument, durant une minute, pour divers excès de température. À l'aide de cette table, on corrigeait l'observation faite au soleil, en faisant porter la correction sur les divers excès  $x_1, x_2, \dots$  pris à part<sup>(18)</sup>.

La méthode que je viens de décrire n'est assurément pas irréprochable et laisse place encore à diverses incertitudes; cependant, ces incertitudes sont petites et inférieures, je le crois, à celles qui subsistent dans le procédé ordinairement employé. L'inconvénient de cette méthode est d'exiger plus de temps que celle qui est indiquée par

(18) Le thermomètre du pyrhéliomètre et celui de la boule **B** avaient été comparés dans des expériences préliminaires, afin de déterminer leur correction relative. Cette correction a été faite dans les chiffres qui sont cités plus bas.

M. Pouillet; elle ne serait guère applicable si l'on voulait faire plusieurs observations dans le courant d'une matinée ou d'une après-midi et si l'on opérait en plein air.

En même temps que le pyrhéliomètre, j'observais la boule C pourvue de son thermomètre et exposée au soleil. Cette boule présentait un excès  $t^0$  au-dessus de l'air ambiant sous l'influence du flux solaire qui faisait monter, en cinq minutes, de  $x^0$  la température du pyrhéliomètre.

Les observations simultanées du pyrhéliomètre et de la boule C n'ont pas été aussi nombreuses que je l'avais espéré. Après cinq comparaisons pareilles, faites en septembre 1872, il est malheureusement survenu un petit accident qui a modifié l'état de la surface absorbante de l'instrument.

Tableau a.

13 septembre 1872, entre 5 et 6 heures.

Temps.	Températ. amb.	Excès de C.	Pyrhéliomètre.
5 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup>	24, <sup>0</sup> 72	9, <sup>98</sup>	24, <sup>38</sup>
09	24,75	9,25	24,48
12	24,70	9,20	24,52
17	24,68	8,80	24,58
20	24,62	8,72	24,62
21	24,65	8,53	24,60
22	24,65	8,56	24,60
24	24,62	8,32	25,02
26	24,60	8,10	25,78
27	24,60	8,02	26,00
28	24,64	7,87	26,14
29	24,60	7,80	26,06
30	24,62	7,72	26,04

**32.** Afin de ne pas prolonger en citant trop de chiffres, je me contenterai de donner avec détail une des comparaisons faites; cela suffira pour que l'on voie en quoi consistait la méthode. (Tableau *a*, page précéd.)

Le pyrhéliomètre a été exposé au soleil entre 22 et 27<sup>m</sup>. Il a continué à monter, a atteint 26°,14 à 28 minutes moins quelques secondes et s'est conservé quelques instants à cette température, puis a baissé de nouveau.

L'observation du refroidissement, faite comme il a été dit plus haut, a fourni la marche suivante :

Temps.	Excès de température du pyrhéliomètre.	Différence.
0 <sup>m</sup>	2,30	0,15
4	2,15	0,15
8	2,00	0,14
12	1,86	0,12
16	1,74	0,12
20	1,62	0,11
24	1,51	0,11
28	1,40	0,10
32	1,30	0,08
36	1,22	0,08
40	1,14	0,07
44	1,07	

On en déduit l'abaissement de température, pendant 2 minutes, pour divers excès au-dessus de la température ambiante. Les vitesses du refroidissement sont à peu près proportionnelles aux excès de température et l'on a admis cette proportionnalité pour calculer le refroidissement dû à l'air de 22 à 24<sup>m</sup> et de 24 à 26<sup>m</sup>. Vu la faible valeur

de la correction, ce mode de procéder est suffisamment exact.

De 22 à 24<sup>m</sup>, le pyrhéliomètre a monté de 0<sup>o</sup>,42; excès moyen, 0<sup>o</sup>,21. La correction, pour ces deux minutes, est 0,007. — De 24 à 26<sup>m</sup>, l'excès moyen est 0<sup>o</sup>,80; la correction, 0<sup>o</sup>,028. — De 26 à 28<sup>m</sup>, l'excès moyen est 1<sup>o</sup>,36; la correction, 0<sup>o</sup>,047. — La correction totale est donc 0<sup>o</sup>,08, laquelle étant ajoutée à 1<sup>o</sup>,54, accroissement de température observé, donne 1<sup>o</sup>,62 comme résultat de l'action solaire durant cinq minutes.

Les excès de température fournis par la boule exposée au soleil n'ont pas été constants durant les cinq minutes d'observation. Le soleil s'abaissait vers l'horizon et son intensité rayonnante diminuait assez rapidement. Il y a forcément un peu d'incertitude sur le chiffre qui doit être choisi comme exprimant l'excès moyen correspondant à l'action solaire entre 22 et 27 minutes. Comme les indications du thermomètre sont un peu en retard et se rapportent à l'état du flux solaire quelques instants avant le moment où l'on observe, j'ai pris la moyenne entre les quatre lectures faites à 24, 26, 27 et 28 minutes; cette moyenne est 8<sup>o</sup>,08. — Il est hors de doute que des comparaisons comme celles dont il est ici question seront toujours plus sûres lorsque l'action solaire sera demeurée plus constante durant les cinq minutes que dure la mesure au pyrhéliomètre, et que le thermomètre de la boule ne variera que peu. La série que je donne comme exemple était des moins favorables sous ce rapport; celles des 3, 9 et 12 septembre ont offert des conditions meilleures. Le 28 septembre, l'atmosphère n'était pas parfaitement pure; un très léger voile blanchâtre, uniforme, recouvrait le ciel.

**33.** Voici maintenant (en laissant de côté, pour les autres séries, les détails des observations) les résultats obtenus :

Date. Septembre.	Heure moyenne.	Excès de la boule C.	Réchauffement du pyrhél.	Correction.	Réchauffement. total du pyrhél.
3	4 <sup>h</sup> ,57 <sup>m</sup>	10,60	2,14	+0,10	2,24
9	5, 08	11,45	2,34	+0,11	2,45
12	9, 46	16,94	3,67	+0,19	3,86
13	5, 25	8,08	1,54	+0,08	1,62
28	4, 24	6,09	1,14	+0,06	1,20

Avec ces données, il est possible de calculer la quantité totale de chaleur fournie par le soleil durant une minute sur un centimètre carré.

Le vase du pyrhéliomètre, réduit en eau, équivaut à 13<sup>g</sup>,2. Ce vase contenait 102<sup>g</sup> de liquide. Un réchauffement de  $x^{\circ}$  représente 115,2  $x$  unités de chaleur (le millième de calorie admis comme unité). La surface insolée de l'appareil étant 78,54 centimètres carrés, la quantité  $P = \frac{115,2 x}{5 \times 78,54} = 0,2933 x$  représentera le nombre d'unités de chaleur rayonnées par le soleil durant une minute sur un centimètre carré. On trouvera ces quantités P dans le tableau ci-dessous.

Le Tabl. II (§ 9) fournit des nombres qui représentent les quantités de chaleur reçue par la boule pour divers excès de température. En recherchant dans ce Tabl. les valeurs qui se rapportent aux excès observés dans les cinq séries dont il est ici question, on doit trouver des nombres proportionnels aux quantités P. Ces nombres sont

inscrits dans la colonne E ci-dessous. Enfin, il est évident que la division de P par E , pour chaque série , doit représenter la quantité absolue de chaleur (c'est-à-dire la quantité de chaleur fournie par le soleil en 1<sup>m</sup> sur 1<sup>cc</sup>) qui correspond à *l'unité conventionnelle* admise dans toute la première partie du présent mémoire , soit la quantité de chaleur capable de donner à la boule un excès de 1° sur l'air ambiant ; — avec la réserve toutefois que les rapports  $\frac{P}{E}$  s'appliqueront aux circonstances dans lesquelles ont été faites les cinq séries actuelles, c'est-à-dire alors que la boule était placée dans un air presque tout à fait calme et dans un local fermé, à l'exception de l'ouverture par laquelle entrait le flux solaire. Il a été longuement établi plus haut (9) que l'unité du Tabl. II représente des quantités absolues de chaleur un peu différentes suivant les conditions dans lesquelles les boules sont exposées.

Septembre.	P	E	$\frac{P}{E}$
3 . . .	0,657 . . .	14,58 . . .	0,0451
9 . . .	0,743 . . .	15,85 . . .	0,0450
12 . . .	1,132 . . .	24,28 . . .	0,0466
13 . . .	0,475 . . .	10,80 . . .	0,0440
28 . . .	0,351 . . .	7,88 . . .	0,0445
Moyenne :			0,0450

Le rapport  $\frac{P}{E}$  devrait se trouver le même pour toutes les séries. On voit qu'il n'en est pas exactement ainsi. Cependant , les différences demeurent comprises entre des limites assez restreintes ; les valeurs isolées offrent, avec la moyenne, un écart moyen de  $\pm 0,0006$ , soit environ 0,013 de la quantité elle-même. Ce résultat peut être con-

sidéré comme une vérification intéressante des valeurs relatives (Tableau II) qui ont servi de base à tous les calculs des quantités de chaleur dans la première partie du mémoire.

J'aurais désiré étendre cette vérification aux nombres les plus faibles du Tabl. II, à ceux qui correspondent à de petits excès de la température de la boule. Pour cela, il aurait fallu pouvoir soumettre la boule et le pyrhéliomètre à un flux de chaleur qui demeurât assez constant pendant au moins cinq minutes, qui agît avec la même intensité sur les deux appareils et qui fût suffisamment faible. Je n'ai pas pu jusqu'ici réunir ces trois conditions d'une façon assez satisfaisante.

**34.** La boule C pèse 90 grammes. Réduite en eau, elle représente 8<sup>g</sup>,46, et par conséquent toute variation de température  $t^0$  qu'elle subit, durant une minute, correspond à une quantité de chaleur égale à 8,46  $t$ . Soit V la vitesse du refroidissement dans les expériences mentionnées plus haut, les quantités de chaleur que la boule recevait ou perdait pendant une minute étaient donc équivalentes à 8,46 V. — La quantité V est donnée dans le Tabl. II, colonne M (§ 9) pour les conditions dans lesquelles ont eu lieu les séries I et II; ces conditions ne différaient pas beaucoup de celles qui se trouvaient réalisées lors des comparaisons avec le pyrhéliomètre, et il est intéressant de calculer, avec ces valeurs de V, la quantité absolue de chaleur que la boule recevait du soleil en une minute, puis de comparer le résultat de ce calcul avec les quantités P reçues et absorbées par le pyrhéliomètre. On trouvera les éléments de cette comparaison dans le tableau ci-dessous.

Septembre	V. du refroidissement d'après Tabl. II.	Chaleur reçue par C. 8,46 V.	Rapport entre la chal. reçue par la boule et la chal. reçue par le pyrhél.	
			3 . . .	9 . . .
3 . . .	2,34 <sup>0</sup>	19,8 . . .	0,384	
9 . . .	2,54 . . .	21,5 . . .	0,381	
12 . . .	3,88 . . .	32,8 . . .	0,369	
13 . . .	1,73 . . .	14,6 . . .	0,391	
28 . . .	1,27 . . .	10,7 . . .	0,387	
<hr/>				
Moyenne : 0,382				

On voit que la boule absorbait à peu près les quatre dixièmes seulement, avec de faibles écarts d'une série à l'autre, de la chaleur que recevait le pyrhéliomètre. D'où provient cette différence? La boule étant sphérique et ayant un diamètre de dix centimètres, sa demi-surface convexe absorbante était atteinte par un flux de même section que celui qui atteignait le pyrhéliomètre; mais ce flux n'était pas absorbé en totalité. Le noir de fumée verni qui recouvre la boule a un coefficient d'absorption inférieur à celui du noir de fumée velouté; en outre, quoique le vernis fût mat, il y avait une fraction assez notable de chaleur réfléchie par la demi-sphère sur laquelle l'incidence n'était normale qu'en une région très limitée. Ces deux causes expliquent sans doute suffisamment ce rapport de 4 à 10 entre la chaleur recueillie par la boule et celle qu'absorbait le pyrhéliomètre. (La petite quantité de chaleur employée à chauffer l'air de la boule et la substance du thermomètre a été négligée dans ce calcul.)

**35.** Si l'on suppose que les vitesses absolues du re-

froidissement, lors des expériences faites près du lac, étaient les mêmes que lors des comparaisons avec le pyrhéliomètre, on peut rechercher, avec les données qui viennent d'être obtenues, la quantité absolue de chaleur réfléchie par le lac dans les quatre séries qui ont été discutées au § 26.

On a vu que le 12 Sept., à Ouchy, l'addition des nombres représentant (en unités conventionnelles) les quantités de chaleur réfléchie par le lac, dans douze observations successives, a donné 15,34. Chacune de ces observations correspond à l'état moyen durant un intervalle de quinze minutes. La somme totale de chaleur réfléchie est évidemment la même que si chacune des douze observations eut fourni  $\frac{15,34}{12}$ , soit 1,28. Or, on a vu plus haut que l'unité conventionnelle correspond à 0,045 millièmes de calorie pendant chaque minute sur chaque centimètre carré. On aura donc la somme de toute la chaleur réfléchie par le lac à Ouchy, le 12 Sept., en faisant le produit :

$$1,28 \times 0,0450 \times 15 \times 12 = 10,36$$

Un calcul semblable peut s'appliquer aux trois autres séries mentionnées au § 26. On obtient comme résultat, exprimé en *calories* sur *un mètre carré*, les nombres suivants :

Ouchy, 12 Septembre . . . . .	104	calories.
Tour Haldimand, 5 octobre . . . . .	84	»
Dézaley, 28 septembre . . . . .	112	»
Dézaley, 18 octobre . . . . .	134	»

Ce sont donc les quantités totales de chaleur réfléchie par le lac, sur chaque mètre carré d'une surface normale au rayon, depuis le moment où la réflexion a commencé à se faire sentir jusque tout près du coucher du soleil.

Je m'empresse d'ajouter que ces nombres sont entachés de quelque incertitude pour deux motifs principaux :

1. La méthode par laquelle on a obtenu le premier facteur qui entre dans leur formation est seulement approximative (**§ 26**).

2. Le second facteur suppose certaines conditions ambiantes, celles qui étaient réalisées lors des comparaisons avec le pyrhéliomètre. Or, dans les observations faites près du lac, l'air était moins calme et par conséquent les causes de refroidissement devaient être plus actives. Il en résulte que ce deuxième facteur devrait être un peu plus considérable pour correspondre aux circonstances dans lesquelles ont été faites les mesures de réflexion de la chaleur par le lac.

Il est d'ailleurs convenable de rappeler que les observations ont forcément cessé quelques minutes avant le coucher du soleil. Pour cette raison donc, le résultat du calcul qui vient d'être exposé doit être un peu au-dessous de la réalité.

Le degré d'approximation auquel peuvent prétendre les nombres des calories indiqués plus haut échappe naturellement à une appréciation précise. Cependant, en faisant une large part à l'incertitude qui peut résulter de la méthode indiquée au **§ 26**; en tenant compte largement aussi des différences dans la vitesse absolue du refroi-

dissement des boules lorsque l'air était calme ou un peu agité autour d'elles, je pense que l'incertitude dont sont affectés ces nombres de calories *n'atteint pas* un quart de leur valeur et qu'ils sont très-probablement inférieurs plutôt que supérieurs à la quantité réelle de chaleur réfléchie par le lac. — Je rappelle en outre les remarques contenues dans les dernières phrases du § 26.

---

## APPENDICE.



Les tables mentionnées au § 14 facilitent dans une si grande mesure le calcul de la hauteur du soleil d'après l'heure de l'observation, que je les ai complétées en les étendant à toutes les valeurs de la déclinaison de  $0^{\circ}$  à  $\pm 24^{\circ}$ . Sur la demande qui m'en a été faite par quelques-uns de mes collègues de la Société vaudoise des sciences naturelles et malgré leur intérêt un peu local, je reproduis ici ces tables qui pourront être utilisées par d'autres personnes.

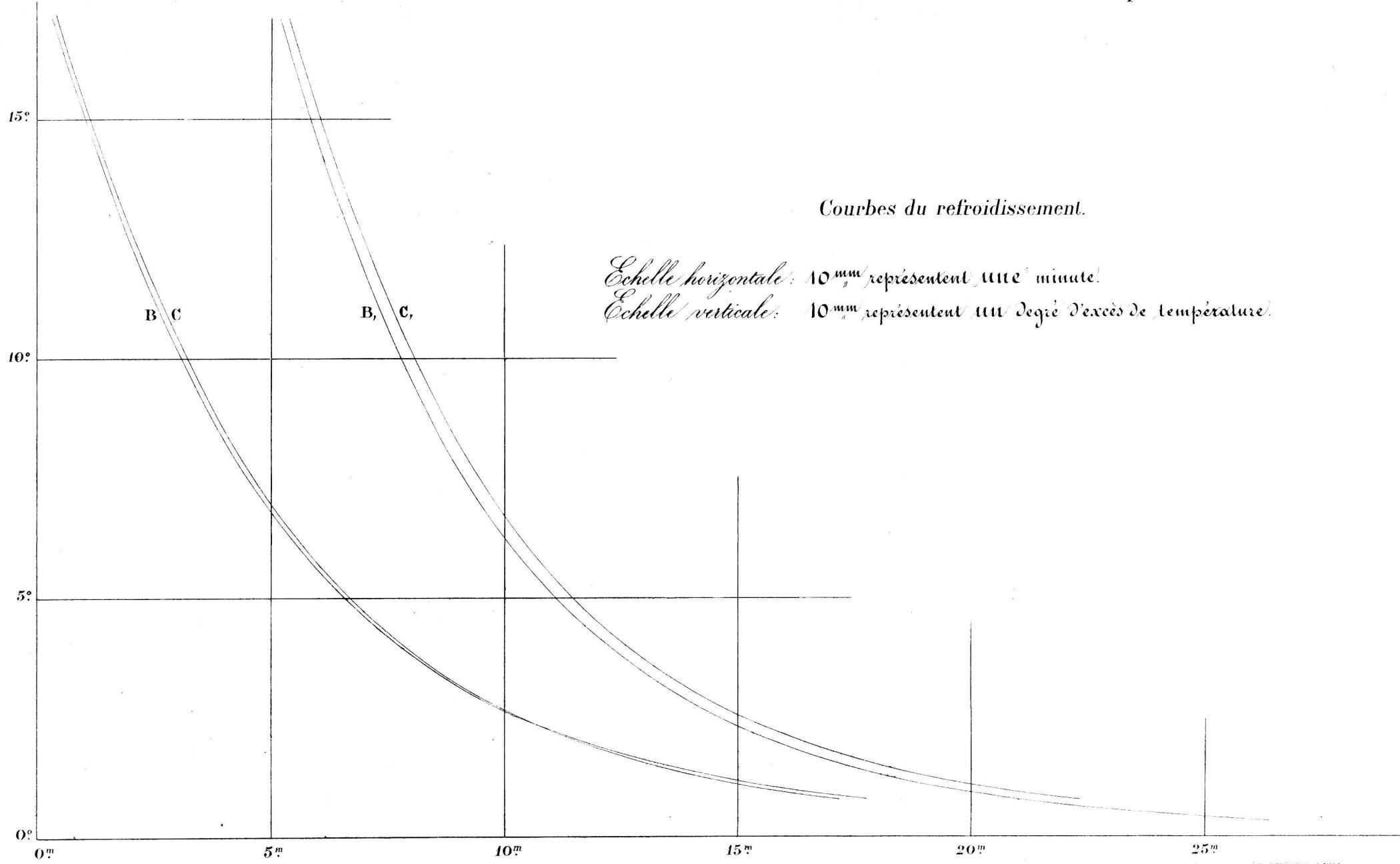
On trouvera avantage à exprimer les minutes de la déclinaison en centièmes de degré pour employer directement les nombres des colonnes *differences*.

Les valeurs log.  $d$  log.  $t$  doivent se prendre en + ou en — suivant que les déclinaisons sont boréales ou australes.

Je rappelle que ces tables sont calculées pour la latitude de  $46^{\circ},30'$  (Lausanne). Elles ne peuvent donc s'appliquer, avec une approximation satisfaisante, que pour les localités qui ne sont pas trop éloignées de cette latitude-là ; c'est le cas de la plupart des villes vaudoises de la rive nord du lac Léman. On a vu (§ 15) quelle erreur l'on commet sur la hauteur du soleil lorsque la latitude diffère un peu de  $46^{\circ},30'$ , ainsi que l'influence d'une petite incertitude sur l'heure de l'observation.

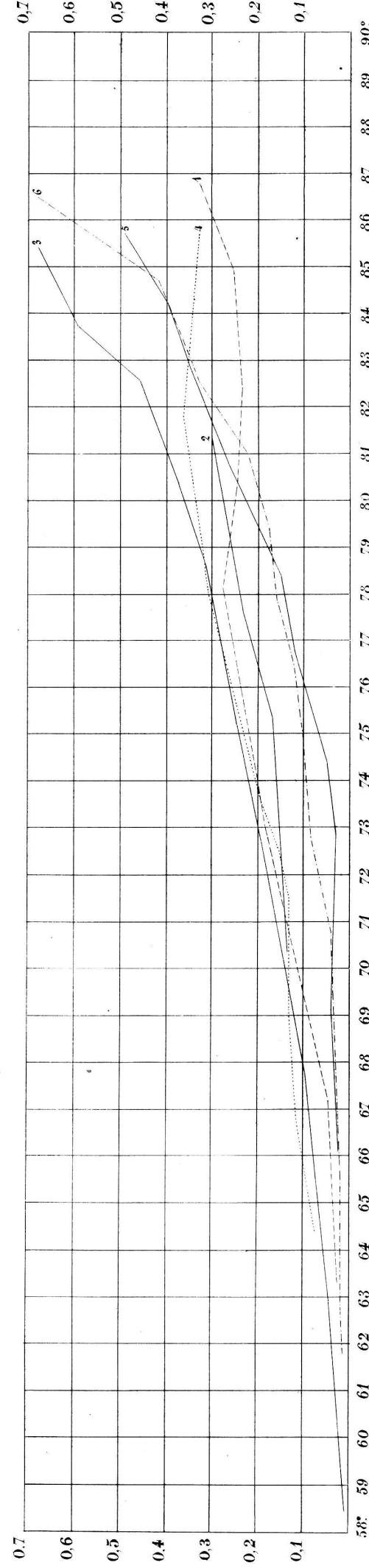
## TABLEAU XXV.

<i>d</i>	tang. <i>d</i> tang. <i>l</i>	Diff.	log. cos. <i>d</i> + log. cos. <i>l</i>	Diff.
0°	0,00000	0,01839	19,83781	0,00007
1	0,01839	1841	83774	19
2	0,03680	1843	83755	34
3	0,05523	1846	83721	46
4	0,07369	1851	83675	60
5	0,09220	1856	83615	73
6	0,11076	1863	83542	86
7	0,12939	1871	83456	100
8	0,14810	1880	83356	113
9	0,16690	1891	83243	127
10	0,18581	1902	83116	140
11	0,20483	1915	82976	154
12	0,22398	1929	82820	167
13	0,24328	1945	82653	182
14	0,26273	1963	82471	196
15	0,28236	1981	82275	210
16	0,30217	2001	82065	224
17	0,32218	2022	81841	239
18	0,34240	2045	81602	254
19	0,36285	2069	81348	268
20	0,38354	2096	81080	284
21	0,40450	2125	80796	298
22	0,42575	2155	80498	314
23	0,44730	2186	80184	330
24	0,46917		79854	

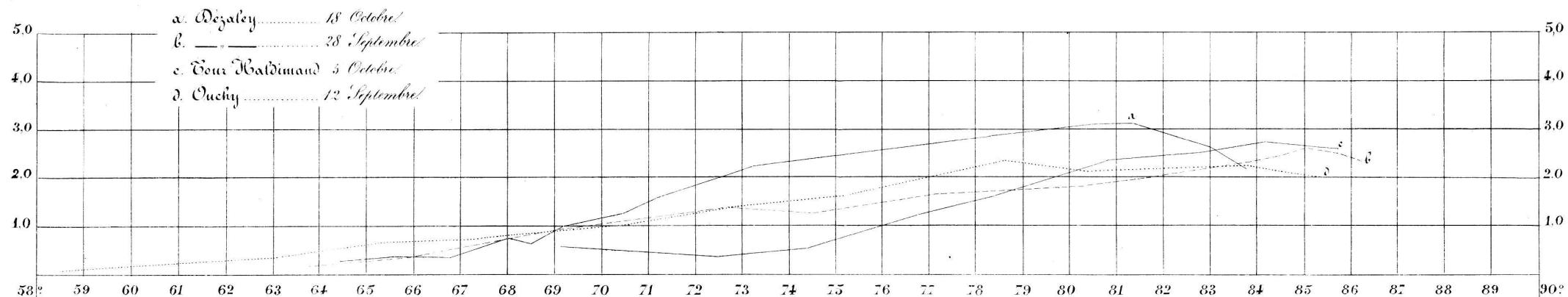


*Proportion de chaleur réfléchie.*

- 1. Saulty ..... 46 Septembre
- 2. .... 44
- 3. .... 42
- 4. .... 20
- 5. Cour Malbinaud 5 Octobre
- 6. .... 49



## Courbes M.



## Proportion de chaleur réfléchie.

