

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 12 (1873-1874)
Heft: 69

Artikel: Recherches sur la réflexion de la chaleur solaire à la surface du Lac Léman
Autor: Dufour, L.
Kapitel: 1-12: Expériences préliminaires : méthode employée pour observer et mesurer la chaleur réfléchie
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-287479>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

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

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 pyréliomètre 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 pyréliomètre 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 ⁽¹⁾. En un point de la surface

⁽¹⁾ 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°,3 à 0°,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 inévitable 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'absorbtion 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 ₁	e ₂	e ₃	e ₄
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^m80, étaient fixés dans le sol, à une distance de 1^m à 1^m20 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 prompt 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 réfléchissait 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 influencer 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 au-

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

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'obte-

nir, 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 $V = \frac{d t}{d \theta}$. 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 réfléchi 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^{mm}, 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 θ_1 et θ_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 θ 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 $14^{\circ},80$ lors de la première série et $15^{\circ},65$ lors de la seconde.

Dans la série I, les constantes ont été déterminées à l'aide des observations faites à 8^m ($2^{\circ},24$) et à 18^m ($0^{\circ},46$). On trouve : $k = 0,01076$ et $\log. A = \overline{1},9045$. 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 observations de 4^m (8°,30) et de 10^m (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 espérer ; 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 θ . On a :

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

TABLEAU I.

SÉRIE I.			SÉRIE II.		
θ	E	E'	θ	E	E'
0 ^m	11 ^o .17	11 ^o .17	0 ^m	20 ^o .40	20 ^o .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 (l_n) aux logarithmes ordinaires :

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

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

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

tenir immédiatement V pour $\theta = 1^m, 2^m, \text{etc.}$ 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 θ 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 θ qui correspondent au phénomène physique en prenant le radical avec le signe *moins*.

En introduisant cette valeur de θ dans (2), on a :

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

ou :

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

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.

t	V_I	V_{II}	M	E
1 ^o	0 ^o 160	0 ^o 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 *rappports* 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 *rappports* 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 *rappports* 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 demeurait 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 *rappports* 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 précèdent 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	$\bar{1},8918$	17°,45
IV	11°,27	0,0133	$\bar{1},9045$	15°,42
V	10°,20	0,0096	$\bar{1},9069$	16°,12
VI	20°,66	0,0076	$\bar{1},9112$	14°,08
VII	15°,30	0,0105	$\bar{1},9122$	15°,68
VIII	18°,00	0,0099	$\bar{1},8984$	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° (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.

TABEAU III.

Excès <i>t</i>	III <i>a</i>	IV <i>b</i>	V <i>c</i>	VI <i>d</i>	VII <i>e</i>	VIII <i>f</i>	III <i>a'</i>	IV <i>b'</i>	V <i>c'</i>	VI <i>d'</i>	VII <i>e'</i>	VIII <i>f'</i>	M
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
4°	0.86	0.76	0.78	0.71	0.78	0.81	5.54	5.35	4.80	4.70	4.92	4.88	4.93
8°	1.93	1.68	1.67	1.52	1.69	1.74	12.45	11.83	10.25	10.07	10.69	10.47	10.68
12°	3.05	2.66	2.53	2.35	2.64	2.71	19.67	18.73	15.52	15.56	16.71	16.32	16.68
16°	...	...	...	3.21	3.62	3.70	...	...	...	21.26	22.91	22.29	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 différencié d'une série à l'autre.

11. Pour les excès de température inférieurs à 1° , 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 ^t	Vitesse du refroid.	Excès de temp ^t	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 :

$$(a) \quad t = 8,072. \quad 0,7745\theta - 0,016 \theta^2$$

La colonne T_1 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_1 et les vitesses relatives E_1 . — 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^{mm} (écarts maxima :

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

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 $\frac{1}{10}$ 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 rapport entre les vitesses du refroidissement pour des excès t_1 et t_2 de température observés au même instant avec les deux

± 6 à 8^{mm}). Quant à la température ambiante, elle a été très près de 15° 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 réfléchiée 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 _i	Excès	M _i	E _i
0 ^m	8 ^o .72	8 ^o .72	1 ^o	0 ^o .173	1 ^o .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^{mm}, 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 ⁽⁴⁾ 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-

⁽⁴⁾ *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 1,01 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_1) calculées à l'aide de la formule de Dulong et Petit.

TABLEAU H.

Excès t	M	P_1 $u = 15^\circ$	P_{II} $u = 5^\circ$	P_{III} $u = 25^\circ$
1°	0°.16	0°.174	0°.166	0°.184
2	0.36	0.37		
3	0.57	0.57		
4	0.79	0.79		
5	1.01	1.01	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 enceinte 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 enceinte 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° ; 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° . 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° , 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° .

La formule (5) a donc été calculée pour les cinq excès $1, 5, 10$ et 15° dans les deux hypothèses de $u = 5^{\circ}$ et $u = 25^{\circ}$. Les résultats se trouvent dans les deux colonnes P_{II} et P_{III} 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° , 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°	1,00	1,00	1,00
5°	5,91	5,80	5,71
10°	12,65	12,58	12,39
15°	20,02	19,87	19,40

Si l'on compare ces rapports, pour un même excès t° , 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° 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° . Pour ces valeurs, moins éloignées de 15° , 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° et une pression de 720^{mm} , 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 *rappports* des vitesses pour un excès quelconque t° .

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^m,50 au-dessus du niveau du lac et à une distance horizontale de 4^m,40 à 5^m,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^m,30 ; distance horizontale jusqu'au bord du lac : 0^m,70 à 0^m,90. A cause de cette