

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 10 (1868-1870)
Heft: 64

Artikel: Recherches sur la condensation de la vapeur aqueuse de l'air au contact de la glace et sur l'évaporation
Autor: Dufour, C. / Forel, F.-A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-256587>

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: 14.01.2026

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

RECHERCHES

sur la

condensation de la vapeur aqueuse de l'air au contact de la glace
et sur l'évaporation,

par

CH. DUFOUR & F.-A. FOREL,

professeurs à Morges.

(Pl. 29.)



1. La présence des glaciers et des neiges éternelles doit avoir, et a une influence importante sur les conditions thermométriques et hygrométriques des régions voisines. En effet, une surface considérable, dont la température ne peut jamais s'élever au-dessus de 0°, doit agir bien différemment que ne pourrait le faire la même surface, à conditions égales, si elle était occupée par des rochers, des terres couvertes de végétation, ou de l'eau dont la température varierait librement.

Nous ne nous occuperons dans les pages qui vont suivre que de l'action des neiges et des glaces sur l'humidité de l'air, et de l'influence des phénomènes hygrométriques de l'air, au contact des neiges et des glaces, sur les glaciers eux-mêmes et leur alimentation.

Nous allons résumer d'abord brièvement les principales lois hygrométriques dont nous aurons à faire usage.

2. L'air atmosphérique contient à l'état aériforme une certaine quantité de vapeur d'eau.

Quand la quantité de vapeur d'eau que contient l'air est à son maximum, on dit que l'air est *saturé*. Tout excès d'humidité, dépassant la quantité dont est capable l'air à l'état de saturation se résout en eau sous la forme de vésicules de brouillard, de gouttelettes de pluie, ou de rosée.

3. La quantité d'humidité dont est capable l'air à l'état de saturation varie avec la température. C'est ainsi que l'air saturé contient par mètre cube¹:

à — 20°	0,99	grammes	de vapeur d'eau.
— 10°	2,22	»	»
0°	4,88	»	»
+ 10°	9,72	»	»
+ 20°	18,44	»	»
+ 30°	33,47	»	»

4. Par suite de cette variabilité, suivant les températures, de la capacité hygrométrique de l'air à saturation, toutes les fois qu'un air saturé d'humidité se refroidit, il se condense une certaine quantité de la vapeur d'eau qu'il contient, à savoir la quantité qui excède celle dont est capable l'air à la température nouvellement acquise.

Ainsi, de l'air saturé à 20° contient 18,44 grammes d'eau par mètre cube. Il est refroidi à 10°. A cette dernière température il n'est plus capable que de 9,72 grammes par mètre cube. La différence, soit 8,72 grammes, se condense en brouillard, en pluie ou en rosée sur les corps solides.

5. L'air atmosphérique ne contient pas toujours toute la quantité d'humidité dont il est capable, étant donné sa température. L'on dit alors que l'air est plus ou moins *sec*, et l'on appelle *humidité relative*, le rapport entre la quantité de vapeur d'eau qu'il contient réellement et la quantité dont il serait capable à sa température.

Ainsi, de l'air à 20° contient à saturation 18,44 grammes de vapeur d'eau par mètre cube. S'il n'en possède que 9,72 il a les $\frac{9,72}{18,44}$ soit les $\frac{54}{100}$ de l'humidité dont il est capable. Son humidité relative est de 0,54.

6. L'on appelle *humidité absolue* de l'air la quantité réelle de vapeur d'eau qu'il contient, abstraction faite de sa température ou de son humidité relative. Ainsi, dans l'exemple que nous venons de citer, l'humidité absolue de l'air est de 9,72 grammes par mètre cube. On exprime généralement cette valeur par la hauteur dont une colonne barométrique de mercure serait soulevée par le poids de la vapeur d'eau, à supposer la pression de l'air annulée, ou ce qui revient au même, par la tension, en millimètre de mercure, de la vapeur d'eau à la température à laquelle l'air serait saturé.

¹ D'après les formules de Regnault.

De l'air contenant 9,72 grammes de vapeur d'eau par mètre cube serait saturé à 10°. La tension de la vapeur d'eau à 10° est de 9,17^{mm}. L'humidité absolue de cet air sera de 9,17^{mm}. Voici les tensions de la vapeur d'eau de 10 en 10 degrés pour les températures voisines de zéro :

— 20°	. . . . .	mm 0,93.
— 10°	. . . . .	2,09.
0°	. . . . .	4,60.
+ 10°	. . . . .	9,17.
+ 20°	. . . . .	17,39.
+ 30°	. . . . .	31,55.

7. La température à laquelle de l'air plus ou moins sec serait saturé, s'appelle généralement le *point de rosée*, parce que tout corps aussi froid et plus froid que cette température, se couvre de rosée lorsqu'il est plongé dans cet air. Nous préférons la désigner sous le nom de *point de saturation* ou de *température de saturation*.

Dans l'exemple que nous avons choisi, d'air à 20° ayant une humidité relative de mm 0,54
et une humidité absolue de 9,17
le point de saturation serait à 10°.

8. La tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air a toujours de la tendance à se mettre en équilibre avec celle des corps humides ou liquides baignés par cet air². C'est d'après ce principe général que se fait l'évaporation des corps liquides et la condensation à la surface des corps liquides et solides.

Tout corps liquide ou humide, dont la tension est plus forte que la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air qui l'entoure, évaporera³ jusqu'à ce que l'équilibre ait été rétabli. Cette loi peut se formuler autrement : tout corps liquide plus chaud que la température de saturation de l'air qui l'entoure, évaporera jusqu'à ce que, par le refroidissement du liquide ou par l'augmentation de l'humidité de l'air, l'équilibre entre les tensions se soit établi.

² Quand nous parlons de la tension d'un corps liquide ou humide, nous entendons la tension de la vapeur d'eau qui pourrait s'échapper de ce corps liquide à la température dont il s'agit. C'est en somme la tension de la vapeur d'eau à la température du liquide.

³ Nous emploierons, contrairement à l'usage généralement reçu, le verbe évaporer à la forme neutre, toutes les fois que nous voudrions exprimer le fait qu'un corps humide émet des vapeurs, sans déterminer autrement la quantité de ces vapeurs.

Tout corps liquide ou humide, dont la tension est moins forte que la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air qui l'entoure, condensera la vapeur d'eau de cet air jusqu'à ce que l'équilibre ait été rétabli. Autrement dit : tout corps plus froid que la température de saturation de l'air, condensera à sa surface de la vapeur d'eau jusqu'à ce que, par le dessèchement de l'air ou par l'échauffement du corps en question, les tensions se soient équilibrées. Un corps sec se comporte dans ce cas comme un corps humide à la même température.

Quand les tensions sont égales, l'équilibre existe. Autrement : un corps à la température de saturation de l'air qui l'entoure, n'évaporerait pas, ne condenserait pas la vapeur d'eau de l'air.

9. Il suit de là que les phénomènes d'évaporation et de condensation sont en rapport immédiat avec l'humidité absolue de l'air, mais n'ont aucun rapport avec son humidité relative.

Il peut y avoir condensation dans un air très sec mais très chaud, si le corps qui fait office de condensateur est très froid.

C'est ainsi, par exemple, que de l'eau à 10° , placée au contact d'une atmosphère d'air à 30° , le dessècherait en condensant la vapeur d'eau qu'il contient, jusqu'à ce que son humidité relative soit descendue à 0,29, car alors la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air à 30° serait de $9,17^{\text{mm}}$, tension égale à celle de l'eau à 10° .

C'est ainsi encore que de l'eau à 0° , ou de la glace fondante, condenserait de la vapeur d'eau et ramènerait de l'air à

5° à une humidité relative de 0,70		
10°	id.	0,50
15°	id.	0,36
20°	id.	0,26
25°	id.	0,20
....	
50°	id.	0,05
100°	id.	0,006

10. Comme c'est surtout la condensation que nous étudierons dans les expériences dont nous allons donner la description, analysons un peu plus en détail ce phénomène.

Mettons un bloc de glace dans une chambre contenant de l'air à 30° dont le point de saturation serait à 20° , ou qui aurait une tension de $17,39^{\text{mm}}$. La couche d'air immédiatement au contact de la glace va se refroidir, elle tombera successivement à 25° , à 20° ; à ce point elle est encore capable de contenir à l'état aériforme les

18,44 grammes par mètre cube que renferme l'air de la chambre. Mais quand elle sera à 19°, à 15°, à 10°, elle n'en sera plus capable, il y aura un excédant de vapeur d'eau qui devra se résoudre en brouillard, et l'expérience prouve que dans ce cas le brouillard vient se condenser en gouttelettes d'eau à la surface du corps froid.

1 1. Une expérience facile à répéter montre à l'œil ce phénomène de la condensation. Nous prenons un bassin de métal, et après en avoir enduit d'une couche d'huile la surface extérieure, nous le remplissons de glace. Le froid de la glace traverse rapidement la paroi métallique et la couche huileuse, et si l'air est dans les conditions convenables, si la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air est supérieure à 4,60^{mm}, il se condense de la vapeur d'eau sur les parois du bassin de métal. Mais la couche grasse dont nous l'avons enduit n'est pas mouillée, au premier moment du moins, par l'eau, et la vapeur d'eau, au lieu de se déposer en rosée comme elle le fait sur les corps froids, comme elle le ferait sur notre bassin sans la couche d'huile qui le graisse, la vapeur d'eau se résout en un brouillard léger qui entoure le vase.

1 2. Il peut y avoir d'une autre part évaporation dans un air très humide, si la tension du liquide à évaporer est supérieure à celle de l'humidité de l'air.

C'est ainsi que de l'eau, réchauffée à une température supérieure à celle de l'air, évaporera, même dans un air saturé d'humidité.

C'est ainsi que dans de l'air à 35°, de l'eau à 10° évaporera si l'humidité relative de l'air est moindre de

0,22	
20°	id. 0,41
30°	id. 0,75

C'est encore ainsi que de l'eau à 0°, ou de la glace fondante, évaporerait dans de l'air

à 5°	si l'humidité relative est moindre de	0,70
à 10°	id.	0,50
à 15°	id.	0,36
à 20°	id.	0,26
à 25°	id.	0,20

A ces températures et avec ces valeurs de l'humidité relative, la tension de la vapeur d'eau contenu dans l'air est de 4,60^{mm}, tension de la vapeur d'eau à 0°.

13. D'après cela, la tension du liquide mis au contact de l'air, et par suite sa température, est le second facteur des phénomènes de la condensation et de l'évaporation, le premier facteur étant l'humidité absolue de l'air.

Nous formulerons donc la loi de l'hygrométrie, qui régit les phénomènes de l'évaporation et de la condensation, en ces termes :

Les tensions de l'eau contenue à l'état de vapeur dans l'air atmosphérique, et à l'état d'eau dans un corps humide ou liquide qui est baigné par cet air, ont de la tendance à se mettre en équilibre.

Ou sous une autre forme :

Quand la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air est moins forte que celle d'un liquide baigné par cet air, ce liquide évapore ; quand la tension de la vapeur d'eau de l'air est plus forte que celle d'un liquide ou d'un corps froid, à une température équivalente, en contact avec cet air, l'excès de vapeur d'eau contenu dans l'air se condense à la surface du corps solide ou liquide.

Ou sous une autre forme :

Tout corps liquide, à une température supérieure au point de saturation de l'air ambiant, évapore. Tout corps solide ou liquide, à une température inférieure au point de saturation de l'air ambiant, condense à sa surface l'excès de vapeur d'eau contenu dans cet air.

14. Il est dans les phénomènes de condensation et d'évaporation un point de vue jusqu'à présent trop négligé par ceux qui ont traité de la physique des glaciers, point de vue qui a cependant une grande importance ; c'est la question des chaleurs latentes.

L'eau, en changeant d'état, absorbe ou dégage de la chaleur latente ; en passant de l'état de vapeur à l'état liquide ou de l'état liquide à l'état solide, elle dégage de la chaleur latente ; en passant de l'état solide à l'état liquide, ou de l'état liquide à l'état de vapeur, elle en absorbe.

Or la quantité de chaleur latente absorbée ou dégagée par l'eau dans ces divers changements d'état n'est pas la même. De l'eau à 0° se transformant en glace dégage 79 calories ; la même quantité de chaleur est absorbée par de la glace à 0° qui fond. De l'eau à 100° se transformant en vapeur, absorbe 520 calories ; la même quantité de chaleur est dégagée par la condensation de la vapeur d'eau à 100°. D'après cela, la condensation de la vapeur d'eau dé-

gage une quantité de chaleur environ 7 fois plus considérable que le gel d'une même quantité d'eau, et la vaporisation d'une certaine quantité d'eau absorbe une quantité de chaleur environ 7 fois plus forte que la fusion d'un même poids de glace. Donc par la condensation de la vapeur d'eau à la surface de la glace, il y a dégagement d'une quantité de chaleur suffisante pour fondre un poids de glace 7 fois plus pesant que la quantité d'eau condensée, et réciproquement, dans l'évaporation de la glace, il y a dégagement de froid assez fort pour transformer d'eau en glace une quantité d'eau 7 fois plus considérable que celle qui s'est évaporée. Ce rapport dans la quantité des chaleurs latentes absorbées et dégagées est encore élevé, si au lieu de considérer de l'eau à 100°, se changeant en vapeur, l'on s'adresse à la transformation en vapeur de l'eau à 0°; au lieu de 520 calories, dans ce dernier cas l'absorption de chaleur latente est de 606 calories, et la quantité de chaleur latente dégagée par la condensation de la vapeur d'eau suffirait à fondre 7,78 fois plus de glace qu'il ne s'est condensé de vapeur d'eau.

Il suit de là, que quand la vapeur d'eau se condensera à la surface d'une eau froide, elle la réchauffera; quand de l'eau chaude sera soumise à l'évaporation, elle se refroidira. Et si le phénomène a lieu à la surface de la glace, quand il y aura condensation, il y aura en même temps fusion de la glace; quand la glace évaporerait elle se refroidirait, si elle est fondante elle régèlerait.

13. Nous aurons donc en combinant ces différents facteurs et phénomènes, si nous voulons comprendre l'action de la condensation et de l'évaporation à la surface de la neige et de la glace, à étudier les points de vue suivants du phénomène.

Pour la condensation:

- 1° La quantité d'eau condensée à la surface de la glace;
- 2° Le dessèchement de l'air au contact avec la glace;
- 3° L'effet de la chaleur latente dégagée par la condensation.

Pour l'évaporation:

- 1° La quantité d'eau évaporée;
- 2° L'effet de cette eau évaporée sur l'humidité de l'atmosphère;
- 3° L'effet de la chaleur latente absorbée, autrement dit, la production du froid, dû à l'évaporation.

16. Si nous étudions maintenant les conditions hygrométriques et thermométriques de notre vallée du Léman, nous trouverons que le lac est presque constamment dans les conditions de l'évaporation, et très rarement dans celles de la condensation. Si nous prenons les moyennes de température de l'air et son humidité absolue telles qu'elles nous sont données par les observations météorologiques de Genève, si nous les comparons avec les moyennes de température du Rhône, à sa sortie du lac à Genève, (nous avons fait ce travail pour les moyennes calculées de 1826-1867, soit 42 années), nous trouvons que la température de saturation de l'air est toujours en dessous de la température de la surface de l'eau, et cela d'une quantité fort sensible. C'est au mois de mai et de juin que ces deux valeurs se rapprochent le plus, le lac étant encore de 3° plus chaud que la température de saturation de l'air. A partir du commencement de juillet elles commencent à s'éloigner, pour s'écarter au maximum à la fin de décembre; le lac est alors de près de 8° plus chaud que la température de saturation de l'air. Ces deux valeurs restent encore fort éloignées jusqu'au mois d'avril, où elles commencent à se rapprocher. Telle est la marche des températures et valeurs hygrométriques moyennes; mais en réalité il n'en est pas tout-à-fait de même. En réalité il arrive parfois qu'un jour très humide élève assez le point de saturation de l'air, pour que celui-ci atteigne et dépasse la température de la surface des eaux; il y a alors condensation à la surface du lac. Mais ce cas est assez rare; nous avons fait le relevé pour l'année 1867 des jours où les conditions de la condensation se sont trouvées réalisées et n'avons trouvé que 21 jours dans ce cas. Pendant 344 jours le lac a donc dû évaporer.

17. Supposons maintenant que la température du lac, au lieu d'être variable, au lieu d'osciller comme elle le fait entre 4°,4 et 18°,7 dans ses moyennes, entre 0° et 24° et 25° dans ses extrêmes, supposons que la température du lac soit constante et fixe à 0°. Supposons en même temps que les conditions hygrométriques de l'air restent ce qu'elles sont actuellement, les relations vont bien changer. Pendant 3 1/2 mois seulement la température moyenne de saturation de l'air est inférieure à 0° (du commencement de décembre au milieu de mars); pendant 3 1/2 mois il y aurait donc évaporation. Mais pendant 8 1/2 mois la température moyenne de saturation de l'air est au-dessus de 0°, le maximum arrivant à la fin de juillet par 12°,4; pendant 8 1/2 mois les conditions de la condensation seraient donc remplies et pendant ce temps une quantité considérable de vapeur d'eau devrait se condenser sur cette surface à 0°. Si donc, au lieu du lac Léman, nous avons un

glacier au fond de notre vallée, les fonctions hygrométriques de l'air seraient notablement altérées, et au lieu d'avoir comme action normale l'évaporation, nous serions presque constamment dans les conditions de la condensation.

18. Laissons ce glacier hypothétique et transportons-nous sur les véritables glaciers, sur les champs de neige et de glace de nos hautes Alpes. Nous y trouverons des conditions analogues. D'une part, une surface considérable qui, par sa nature, ne peut s'élever au-dessus de 0°, d'une autre part, un air plus ou moins chargé d'humidité. Cet air doit donc souvent être dans les conditions de la condensation.

Il est vrai que dans les grandes altitudes l'air est plus froid, qu'à saturation il y est par conséquent chargé de moins d'humidité que dans la plaine, que sa température de saturation y est aussi plus souvent rapprochée de zéro. Mais le fait que l'eau à l'état de glace, si au-dessous de zéro elle peut varier comme le fait l'eau liquide, ne peut pas cependant dépasser une certaine température, et ne peut sans fondre s'élever au-dessus de 0°, ce fait doit influencer d'une manière très sensible sur la fréquence relative des phénomènes de condensation et d'évaporation. Sur les surfaces glacées des neiges éternelles, la condensation doit être beaucoup plus fréquente que sur les surfaces liquides des lacs de nos plaines.

19. C'est pour constater cette condensation de la vapeur d'eau à la surface de la glace, et pour en déterminer si possible la valeur, que nous avons institué quelques expériences directes dont nous allons donner la description. Nous exposerons d'abord la méthode expérimentale que nous avons établie, à la suite d'une première série d'expériences faite à Morges, dans le printemps de 1870.

La première expérience, par laquelle nous avons démontré la condensation de la vapeur d'eau à la surface de la glace, est du 5 mars 1870.

Exp. I. — A 2 1/2 h. après-midi, nous remplissons de neige un plat circulaire de 20 centimètres de diamètre, et le pesant avec la neige qu'il contenait, nous lui trouvons un poids de 711 grammes. Au bout d'une heure d'exposition en plein air, la neige était en partie fondue, et la balance donnait un poids de 714 grammes, accusant ainsi une augmentation de poids de 3 grammes.

Exp. II. — Un second vase circulaire de 18 centimètres de diamètre, rempli d'un mélange de neige et de sel, a été exposé en

plein air pendant le même temps et dans les mêmes conditions. Il pesait au début de l'expérience 672 grammes, à la fin de l'opération 677 grammes.

Il s'était donc condensé à la surface de la neige 5 grammes d'eau.

Deux observations psychrométriques, faites pendant cette expérience, ont donné comme état hygrométrique moyen de l'air :

Température de l'air	10°,3.
Humidité absolue	mm6,36.
Humidité relative	0,68.
Température de saturation	4°,4.

D'après cette expérience la condensation a lieu dans des proportions assez fortes pour être facilement appréciable à la balance; c'est donc la balance qui nous servira pour ces recherches.

20. Nous avons répété cette expérience 23 fois à Morges, la variant chaque fois et en perfectionnant chaque fois le manuel opératoire. Voici le mode d'expérimentation que nous avons en définitive adopté :

Nous avons fait faire des bassins circulaires de cuivre, de 16 centimètres de diamètre et 7 centimètres de profondeur; leur fond aplati permet de les poser d'une manière stable sur le sol. Leur surface supérieure est d'environ 200 centimètres carrés, et ils peuvent contenir 1300-1400 grammes d'eau.

Nous les remplissons jusqu'au bord de glace concassée ou de neige (dans nos expériences la quantité de glace a varié de 700 à 1000 grammes), et nous les pesons exactement.

Nous exposons ces bassins pleins de glace à l'air libre pendant un temps plus ou moins long, une demi-heure, une heure, deux heures, en notant exactement le moment du début et de la fin de l'expérience. Puis nous pesons de nouveau. Le poids total de la glace non fondue et de l'eau de fusion s'est accru s'il y a eu condensation, s'est diminué s'il y a eu évaporation; la différence entre les pesées indique la valeur de cette action, et un simple calcul, nous permet de transformer la valeur ainsi obtenue en la rapportant à une surface d'un mètre carré, d'un kilomètre carré, ou en hauteur d'eau répandue à la surface de la glace.

Nous avons soin d'essuyer attentivement, au moment de la seconde pesée, la surface extérieure du bassin, laquelle, lorsqu'il y a condensation, est recouverte d'une abondante couche de rosée. La valeur de cette rosée est trop irrégulière pour pouvoir être considérée comme constante et trop importante pour être négligée.

En enlevant à l'aide d'un linge cette couche de rosée, nous supprimons cette cause d'erreur et nous n'avons plus à considérer comme surface condensante que la surface supérieure de la glace.

21. Voici, comme exemple, l'une de ces expériences :

Du 31 mai 1870. Dans un jardin au bord du lac à Morges.

A 8 h. 02 m. du matin. Nous remplissons de glace l'un des bassins ci-dessus décrits et lui trouvons un poids de $P + 45,00$ grammes.

Nous l'exposons à l'air et le pesant de nouveau à 8 h. 30 m., nous lui trouvons un poids de $P + 48,70$; en 28 minutes, il s'est donc déposé, sur une surface de glace de 200 centimètres carrés, 3,70 grammes de vapeur d'eau.

En 60 minutes, soit une heure, il se serait déposé 7,80 grammes.

Et sur une surface de 1 mètre carré, 390 grammes.

Si nous voulons exprimer autrement la valeur de ce dépôt, nous trouvons que 390 grammes par mètre carré représentent une hauteur d'eau de 390 millièmes de millimètre répandue à la surface de la glace. Nous dirons donc que la valeur horaire de la condensation était pendant cette expérience de $0,390^{\text{mm}}$.

Pendant ce temps nous faisons à l'aide du psychromètre une ou plusieurs observations pour déterminer l'état hygrométrique de l'air. Les thermomètres qui nous ont servi sont sortis des ateliers de Nöllner, à Darmstadt, et nous en avons à plusieurs reprises déterminé l'équation.

Voici pour l'expérience que nous venons de citer, quel était l'état hygrométrique de l'air.

DATE	HEURE	Température de l'air.	HUMIDITÉ		Température de saturation.
			relative.	absolue. millimètres.	
31 mai 1870	8,03	16° ₀	0,85	11,56	13° ₅
»	8,18	15° ₈	0,86	11,68	13° ₇
»	8,32	16° ₆	0,85	11,90	14° ₀
Moyennes .		16° ₄	0,85	11,71	13° ₇

L'air était calme et le lac n'était pas ridé.

22. Nous citerons les résultats de quatre expériences faites à Morges dans des conditions que nous estimons suffisamment exactes. Pour la température et l'état hygrométrique de l'air, nous donnons la moyenne des diverses observations faites pendant l'expérience. Nous exprimons la valeur horaire de la condensation en millièmes de millimètre de hauteur d'eau sur la surface de la glace.

Expérience n°	DATE	HEURE	Température de l'air.	HUMIDITÉ		Température de saturation.	VENT.	DURÉE de l'expé- rience.	Valeur horaire de la condensation.
				relat.	absol. mm.				
III	30 mai	8,45 m.	15°,4	0,83	10,71	12°,4	Brise de lac.	20 min.	0,570
IV	31 »	8,02 m.	16°,4	0,85	11,71	13°,7	Calme.	28 »	0,390
V	31 »	10,22 m.	17°,4	0,75	11,17	13°,0	Brise de lac.	20 »	0,360
VI	31 »	2,27 s.	17°,4	0,82	11,97	14°,1	Légères brises	30 »	0,330

Ces expériences montrent que le phénomène de la condensation peut avoir une grande intensité. La moyenne de ces quatre expériences donne, comme valeur horaire de la condensation, 0,410^{mm}, autrement dit, 410 grammes d'eau par heure et par mètre carré de surface glacée, ou encore, 410 mètres cubes d'eau par heure et par kilomètre carré de glacier.

23. Il est vrai que les conditions hygrométriques et thermométriques sont autres sur un glacier que dans un jardin situé au bord du lac Léman; il est vrai que sur les neiges éternelles la température de l'air ne monte presque jamais à 16°, et surtout l'humidité absolue à 11^{mm} de tension. Quoiqu'il en soit, le phénomène était intéressant, et nous avons résolu d'aller l'étudier et le poursuivre sur les glaciers eux-mêmes.

Notre intention était de déterminer, si possible, par des expériences directes faites sur le glacier, la valeur et l'importance du phénomène de la condensation de la vapeur d'eau de l'air. Entendues comme nous les avons faites, ces recherches étaient nouvelles.

En effet, si d'autres physiciens ont abordé l'étude du phénomène de la condensation, ou bien ils l'ont fait à une époque où les lois de l'hygrométrie n'étaient pas assez vulgarisées pour qu'ils aient pu en tirer toutes les conséquences désirables, ou bien ils n'ont pas pu faire et n'ont pas fait les expériences directes que nous avons entreprises.

24. Hugi ⁴ a, le 4 janvier 1832, sur le glacier de Grindelwald commencé des expériences à l'aide de la balance, pesant des blocs de glace qui tantôt augmentaient de poids, tantôt diminuaient; c'était pendant la nuit que ses blocs de glace augmentaient de poids et par conséquent condensaient la vapeur, pendant le jour, qu'ils diminuaient, évaporaient par conséquent. Mais l'absence d'observations psychrométriques qui auraient permis de rapporter ces phénomènes à l'état hygrométrique de l'air, l'impossibilité où nous sommes de rapporter à une unité de surface les valeurs en poids qu'Hugi donne dans ses expériences, nous empêchent d'utiliser ces recherches d'une manière pratique. — Quand, du reste, Hugi n'est pas trop préoccupé de ses idées sur la respiration du glacier, ses théories hygrométriques sont assez justes. ⁵

25. En 1840, le chanoine Rendu, depuis évêque d'Annecy, dans sa théorie des glaciers de la Savoie, s'occupa attentivement des phénomènes de condensation à la surface des neiges et des glaces. Il ne fit pas d'expériences directes, mais certainement il exagère la valeur du dépôt de la vapeur d'eau en l'estimant à une couche de 30 pouces par an. ⁶ Son erreur vient probablement de la fausse interprétation qu'il donne au principe physique de la condensation; il croit que toute la vapeur contenue dans l'air doit se condenser à la surface d'une vaste étendue de neiges, comme le Mont-Blanc, tandis que nous avons vu, que lorsqu'il y a condensation, ce n'est que l'excès de vapeur d'eau au-dessus du point de saturation de l'air à la température de la glace, qui peut se précipiter sur la glace.

26. Agassiz, dans ses Nouvelles études sur les glaciers actuels, en 1847, expose d'une manière très juste, très précise et très claire la théorie hygrométrique de la condensation et de l'évaporation à la surface du glacier; il conclut que ces deux phénomènes doivent probablement se contrebalancer et que l'un doit rendre au glacier la vapeur d'eau que l'évaporation lui enlève. Toujours est-il qu'il n'a pas cherché à apprécier directement la valeur de ces phénomènes. Il est vrai que l'hôtel des Neuchâtelois situé sur le glacier de l'Aar, à 2400 mètres au-dessus de la mer, était dans des conditions hygrométriques peu favorables au phé-

⁴ Hugi: das Wesen der Gletscher. Stuttgart 1842, p. 20-22.

⁵ Hugi: die Gletscher und die erratischen Blöcke. Solothurn 1843.

⁶ Rendu: Théorie des glaciers de la Savoie. Chambéry 1840, p. 27.

nomène de la condensation ; le point de saturation de l'air était, vu la hauteur de station, bien rapproché de zéro, et des expériences sur la condensation auraient donné des résultats bien moins évidents que ceux que nous avons pu obtenir dans une station moins élevée.

27. Nous avons trouvé une excellente station d'expérimentation au glacier du Rhône, où nous avons été nous établir le 26 juillet 1870. Nous y avons rencontré des conditions particulièrement favorables ; un hôtel de premier ordre joignant au confort, qui n'est point à dédaigner même dans les hautes régions, l'accueil gracieux et prévenant de l'hospitalité valaisanne ; le passage régulier des postes fédérales et le télégraphe qui nous permettaient de communiquer avec la plaine, et au besoin de nous procurer appareils et instruments ; un splendide glacier dont l'abord est partout aisé et dont la surface peu déchirée permet presque partout une circulation facile, situé à quelques centaines de mètres de l'hôtel ; toutes ces conditions réunies font du glacier du Rhône une excellente station d'observation et d'expérimentation pour des études comme celles que nous entreprenions, et nous ne saurions assez la recommander aux physiciens et glaciologues.⁷

28. Le glacier du Rhône est un des plus beaux glaciers de nos Alpes. Moins long que le glacier d'Aletsch, moins large que le Gorner ou la mer de glace du glacier des Bois, à Chamounix, il offre au naturaliste et à l'ami des grandes scènes de la grande nature, un spectacle des plus instructifs et des plus saisissants dans la splendide cascade de glace qui le coupe en deux moitiés. La partie supérieure, longue de 8 kilomètres environ et large de 1000 à 4000 mètres, forme un des *glaciers réservoirs* de Mgr Rendu, des mieux caractérisés. Elle remplit le vaste cirque bordé à l'est par le Furkahorn, le Galenstock, le Rhonestock, le Dammastock, le Schneestock, à l'ouest par le Thierælplstock et les Gelmer- et Gerstenhörner, cîmes dépassant toutes 3000 mètres et s'élevant au Galenstock jusqu'à 3596^m. Ce bassin de réception du glacier du Rhône s'étend comme un coin entre le bassin de la Reuss et celui de l'Aar et va plus au nord qu'aucun des autres glaciers affluents du Rhône, collecter et réunir les

⁷ Pour toutes les expériences et observations du moins qui n'exigent pas la présence ou l'existence des moraines superficielles. Celles-ci ont toutes disparu, en effet, dans le glacier inférieur, bouleversées qu'elles ont été avec le glacier lui-même dans la cascade de glace qui sépare le glacier supérieur du glacier inférieur.

neiges qui alimenteront pendant l'été le fleuve méditerranéen. Dans toute cette partie supérieure, le glacier du Rhône est peu incliné et descend en pente douce et relativement régulière.

Mais, arrivé à la ligne qui réunirait le Galenstock et le Furkahorn d'un côté, et le Nægelsgrætti et la Maienwand d'un autre côté, le glacier s'incline peu à peu sur le lit de plus en plus accidenté de son fond, et sur les parois de la vallée, qui se continue plus à l'est vers la Furka, il forme une magnifique cascade de glace qui n'a pas sa pareille, du moins dans les Alpes abordables au commun des touristes. La hauteur de cette cascade de glace est de 3-400 mètres environ. Nous n'avons pas à décrire les splendeurs de ce magnifique phénomène. Ceux qui n'ont pas vu les mouvements gigantesques de ce paisible glacier, qui n'ont pas sondé de l'œil ses crevasses de plus en plus tourmentées, ceux qui n'ont pas frémi en contemplant l'équilibre de plus en plus instable de ses énormes séracs, pyramides de glace formées par l'entrecroisement des crevasses, ceux qui ne l'ont pas vu s'étonneraient sans y rien comprendre de l'enthousiasme de notre peinture, et ceux qui le connaissent nous reprocheraient d'être restés dans notre description trop au-dessous de la sublime nature que nous aurions voulu représenter.

Au-dessous de la cascade, les débris entassés des blocs de glace écrasés dans leur chute, se ressoudent à nouveau et forment un nouveau glacier. Ce glacier inférieur s'élargissant, dans la vallée du Rhône, est connu sous le nom de la *coquille* ou de l'*écaille d'huître*. Il est coupé de crevasses longitudinales qui rayonnent plus ou moins, suivant les lignes de plus grande pente. Sa largeur est de 500 mètres environ, sa longueur était cette année de près de 2 kilomètres. Son altitude, de 1800 mètres environ, nous promettait des conditions hygrométriques très favorables aux expériences que nous projetions.

29. Nous avons commencé par établir en arrivant une station d'observations météorologiques, dans nos chambres, à l'hôtel du glacier du Rhône, par une altitude de 1760 mètres. Il importait pour nous, d'avoir un point de comparaison établissant au dehors du glacier les conditions thermométriques et hygrométriques du vallon dans lequel nous allions opérer.

Nous avons fait dans cette station 85 observations météorologiques à toutes les heures du jour et de la nuit.

30. Nous avons ensuite été choisir une station d'expérimentation sur le glacier; nous l'avons cherchée dans un point suffisamment rapproché de l'hôtel et de la cabane du gardien de la

grotte pour que nous pussions y trouver un refuge en cas de tempête, suffisamment au centre du glacier pour que nous fussions bien réellement dans l'atmosphère glaciaire. Nous avons été nous établir au centre de figure de la partie inférieure de la *coquille* du glacier du Rhône, à 260 mètres de la rive gauche, à 240 mètres de la rive droite, à 240 mètres du front du glacier et par une altitude de 1810 mètres environ. Si nous n'avons pas été plus haut sur le glacier c'est que nous avions, pour nos opérations, besoin d'avoir sous la main des pierres et que, cette année du moins, les pierres n'apparaissaient pas plus haut à la surface du glacier.

31. Il importait pour l'exactitude de nos pesées que notre balance fût à l'abri du vent. Nous avons d'abord projeté de construire sur le glacier une cabane, où nos instruments et nous-mêmes aurions trouvé abri et refuge contre le vent, le soleil et la pluie ; mais une fois sur place, l'absence à peu près complète, sur la surface du glacier, des matériaux nécessaires à cette construction nous fit abandonner ce dessein et nous dûmes songer à nous tirer d'affaire autrement. Après quelques recherches nous trouvâmes heureusement une large crevasse de 4 à 5 mètres de profondeur, dont une des parois était verticale, et dont l'autre était assez doucement inclinée pour qu'il fût facile à l'aide de quelques coups de hache d'y tailler un chemin praticable. Nous creusâmes avec le pic dans la paroi verticale une petite grotte ou niche de dimensions suffisantes pour recevoir notre balance, et en fixant au moyen de 4 clous un châte sur l'entrée de cette niche, nous pûmes, protégés comme par le voile des photographes, opérer tranquillement nos pesées parfaitement à l'abri du vent. Les tables, chaises, supports et autres meubles nécessaires, furent bientôt sculptés à coups de hache dans les parois de glace de notre crevasse, et nous eûmes ainsi, à peu de frais et à peu de peine, une installation aussi pratique que commode pour les opérations que nous avions à entreprendre.

32. Pour établir solidement le thermomètre sur le glacier, et pour le mettre facilement à l'ombre, nous avons fait construire un trépied très simple, très portatif et très commode. Nous nous permettons de le recommander aux personnes qui pourraient être dans le cas de faire des recherches analogues aux nôtres. Il se compose simplement de trois minces tiges de fer, longues de 45 centimètres et réunies par un anneau. Pour les transports, ces fiches se réunissent et occupent une place insignifiante ; pour les expériences, on écarte ces trois tiges de manière à donner à l'instrument la forme d'un tétraèdre.

Une seconde pièce en forme d'étoile à 3 branches est alors engagée au milieu de ce tétraèdre de manière à prévenir l'écartement des fiches si l'une d'elles est exposée à glisser; enfin le thermomètre est attaché d'une part à l'anneau de fer qui réunit les fiches, et d'autre part on l'attache au moyen d'une ficelle au point central de l'étoile. De cette manière, le tout présente un haut degré de solidité et nous avons constaté plusieurs fois que par de forts coups de vent ce système n'éprouvait pas la moindre oscillation.

Pour préserver le thermomètre des rayons du soleil, nous avons une plaque en fer-blanc, recourbée de manière à ce que son angle dièdre fût égal à l'angle obtus que devait faire avec un plan horizontal une des faces du tétraèdre, lorsque celui-ci était mis en expérience. Sur le glacier du Rhône, où l'air était toujours assez vif et où nous n'avons jamais eu du reste un soleil bien ardent, nous avons pu constater que cette plaque ne s'échauffait nullement, et par conséquent elle ne modifiait pas la température du thermomètre qu'elle devait protéger. Et si nous avions pu craindre qu'elle rayonnât un peu de chaleur, nous aurions toujours pu obvier à cet inconvénient en l'aspergeant avec un peu d'eau du glacier.

33. Nous allons donner en tableau le résumé des expériences de pesées de glace que nous avons faites à cette station; nous les établirons en série suivant la température moyenne de saturation de l'air. Nous indiquons l'état thermométrique et hygrométrique de l'air d'après la moyenne des observations faites de quart en quart d'heure pendant l'exposition de la glace à l'air. Quant à la valeur horaire de la condensation, nous l'exprimons en fraction de millimètre de hauteur d'eau précipitée à la surface de la glace, un millième de millimètre représentant un gramme d'eau par mètre carré, ou un mètre cube par kilomètre carré.

(Voir le tableau sur la page suivante.)

Expérience n°	DATE	HEURE du début de l'expérience.	DURÉE de l'exposition en minutes.	Température de l'air. °C	HUMIDITÉ		Température de saturation. °C	Valeur horaire de la condensation. mm.
					relat.	absol. mm.		
VII	27 juillet	4,15 s.	10	7,8	0,75	5,9	3,5	0,360
VIII	— —	8,15 m.	75	4,7	0,87	5,8	2,9	0,158
IX	— —	8,05 m.	80	4,7	0,88	5,8	2,9	0,214
X	3 août	9,29 m.	68	6,4	0,76	5,5	2,7	0,188
XI	— —	9,29 m.	68	6,4	0,76	5,5	2,7	0,067
XII	27 juillet	9,35 m.	55	4,7	0,85	5,5	2,5	0,125
XIII	— —	9,40 m.	65	4,8	0,82	5,4	2,3	0,106
XIV	3 août	8,12 m.	48	7,2	0,71	5,4	2,3	0,059
XV	— —	8,12 m.	48	7,2	0,71	5,4	2,3	0,056
XVI	28 juillet	3,07 s.	68	6,7	0,72	5,3	2,0	0,106
XVII	29 —	2,55 s.	50	8,6	0,63	5,3	2,0	0,078
XVIII	28 —	3,03 s.	74	6,7	0,72	5,3	2,0	0,064
XIX	30 —	8,25 m.	100	6,9	0,68	5,1	1,3	0,115
XX	— —	8,10 m.	110	6,9	0,68	5,1	1,3	0,062
XXI	1 août	3,35 s.	70	10,8	0,53	5,1	1,2	0,140
XXII	28 juillet	8,00 m.	50	4,0	0,82	5,1	1,2	0,093
XXIII	— —	8,50 m.	50	4,4	0,80	5,0	1,1	0,111
XXIV	29 —	1,25 s.	80	6,9	0,66	4,9	1,0	0,144
XXV	28 —	9,45 m.	35	4,2	0,78	4,9	1,0	0,055
XXVI	1 août	1,55 s.	75	9,9	0,53	4,8	0,6	0,064
XXVII	— —	1,50 s.	90	9,9	0,53	4,8	0,6	0,051

34. Nous avons mis en série ces expériences d'après la hauteur moyenne du point de saturation de l'air, car théoriquement, c'est d'après sa plus ou moins grande élévation au-dessus de zéro que la condensation doit être plus ou moins forte, et effectivement, dans les chiffres que nous avons obtenus on peut, d'une manière générale, observer une tendance à l'augmentation de la condensation quand le point de saturation est plus élevé au-dessus de zéro, une tendance à la diminution quand il s'abaisse. Mais un grand

nombre de nos expériences dévient d'une manière notable de cette progression, et cela d'une manière si forte que nous n'osons pas établir en courbe les chiffres que nous obtenons ainsi; un grand nombre s'écarteraient trop de la normale. Ces irrégularités que nous constatons tout en les regrettant, proviennent certainement, pour un certain nombre, d'erreurs dans l'expérimentation; l'expérimentation sur un glacier en plein air, avec des instruments et appareils exposés au vent, au soleil, n'est pas aussi facile ni aussi commode que dans la chambre d'un laboratoire, et les causes d'erreurs sont si fréquentes que nous ne pouvons que les avouer et les constater.

Il est cependant trois causes d'irrégularités qui tiennent à la nature des choses et qui, devant être séparées des erreurs inévitables d'expérimentation, expliqueraient peut-être quelques-unes des anomalies que nous reconnaissons.

35. C'est d'abord l'état d'agitation de l'atmosphère, l'effet du vent. Il est évident que par un vent violent les conditions hygrométriques, au point de vue de la condensation, sont autres que par un temps calme. Par un vent violent une quantité beaucoup plus considérable d'air est amenée en contact avec la surface gelée et le renouvellement en est beaucoup plus complet; mais d'une autre part l'air est pendant moins longtemps au contact de la glace; il se refroidit moins et le phénomène de la condensation se fait moins tranquillement. Quel est l'effet définitif du vent; augmente-t-il ou diminue-t-il l'importance de la condensation? Nous n'avons pas en temps utile dirigé notre attention sur cette question et nous ne saurions lui donner une réponse. Il est probable cependant que l'état d'agitation de l'air a une influence sur le phénomène et pourrait expliquer quelques-unes des anomalies que nous signalons.

36. Une autre circonstance qui peut expliquer aussi certaines divergences est l'inconstance prodigieuse de l'état thermométrique et psychrométrique de l'air à la surface du glacier. Chaque bouffée d'air, et l'on sait combien rarement l'atmosphère est absolument calme dans ces parages, chaque souffle de vent fait sauter les thermomètres dans un sens ou dans l'autre avec une rapidité et une variabilité étonnantes. Or suivant le moment où nous faisons l'observation psychrométrique, nous obtenions une valeur souvent fort anormale de l'état hygrométrique de l'air.

Voici deux exemples de cette inconstance de l'état hygrométrique de l'air :

	Heure.	Thermomètre		Humidité.		Point de saturation.
		sec	humide	relative	absolue	
28 juillet 1870.	3,30	6,9	4,9	0,73	mm 5,51	2,5
»	3,45	6,7	4,4	0,70	5,16	1,6
»	4,00	6,4	4,4	0,73	5,29	2,0
»	4,20	7,4	4,4	0,63	4,82	0,7
»	4,30	5,8	3,7	0,71	4,95	1,0
»	4,45	6,0	3,8	0,70	4,94	1,0
»	5,00	5,3	3,7	0,78	5,19	1,7
»	5,15	6,2	4,4	0,76	5,40	2,2
»	5,25	5,6	3,5	0,71	4,87	0,8
»	5,35	4,8	3,7	0,84	5,43	2,3

Le second exemple nous montrera, à côté des variations rapides et souvent inverses des deux thermomètres du psychromètre, une anomalie fort étrange que nous n'avons pas la prétention d'expliquer ; pendant près de 10 minutes le thermomètre humide était plus élevé que le thermomètre sec⁸, et cela dans des proportions qui ne peuvent dépendre des défauts dans le calibrage des tubes des thermomètres. C'était par une pluie assez forte et un vent très inégal, à notre station du glacier.

Nous avons fait nos observations à peu près de minute en minute, de 3 h. 40 m. à 4 h. du soir, le 3 août 1870. Nous indiquons l'une après l'autre les températures des thermomètres sec et mouillé :

Heure.	Thermomètre		Heure.	Thermomètre	
	sec	mouillé.		sec	mouillé.
3 h. 40	6,0	5,1	3 h. 53	4,7	4,8
—	5,4	4,7	—	4,6	4,8
—	5,0	4,4	3 h. 55	4,8	5,0
3 h. 45	4,8	4,3	—	4,9	5,1
—	5,0	4,8	—	5,1	5,3
—	4,8	4,6	—	5,3	5,7
—	4,5	3,9	—	5,5	5,7
—	4,3	3,8	—	5,8	5,7
—	4,0	3,7	—	5,9	5,7
3 h. 50	3,9	3,8	4 h.	5,9	5,6
—	4,8	4,8			

⁸ Voir une observation analogue, citée par M. Rosset. Bull. soc. vaud. sc. nat., t. VIII, p. 302.

Nous avons vérifié l'équation de nos thermomètres immédiatement après cette observation.

37. Une troisième cause d'irrégularité provient de l'inégalité des surfaces glacées que nous exposons à l'air. Les fragments de glace plus ou moins réguliers, dont nous offrons la surface à la condensation, variaient peut-être trop de dimensions pour que les différences dans leur grosseur n'aient pas eu quelque influence sur les résultats de l'opération. Cette cause d'irrégularité combinée avec l'influence de l'agitation de l'air peut avoir une assez grande importance. En effet, comparons notre bassin chargé de glace à la grande surface du glacier; les intervalles entre nos morceaux de glace sont comparables aux crevasses; or dans les crevasses du glacier l'air est, lorsque le vent n'est pas trop violent, saturé ou à peu près saturé d'humidité à 0°. C'est ce que nous prouvent les expériences suivantes:

Le 29 juillet, nous exposons des bassins chargés de glace à la condensation dans une des niches que nous avons creusées dans la paroi de notre crevasse, et nous obtenons les résultats suivants:

Expérience N°	Heure du début de l'exposition.	Durée de l'exposition.	Valeur horaire de la condensation.
XXVIII	1 h. 40 s.	80 min.	mm 0,030
XXIX	3 h. 00 s.	40 min.	0,004

Pendant l'expérience XXVIII, un vent violent soulevait parfois le rideau qui protégeait l'entrée de la niche et permettait le renouvellement de l'air. Si nous comparons cependant ces résultats avec ceux que nous donnaient les expériences XVII et XXIV faites pendant le même temps à la surface du glacier, nous verrons une différence notable de la condensation, à l'air libre d'une part, et d'une autre part dans notre niche, que nous pouvons assimiler pour les conditions hygrométriques à une crevasse profonde.

L'expérience XVII nous avait donné une valeur horaire de condensation de 0,078^{mm} et l'expérience XXIV nous avaient donné une valeur horaire de condensation de 0,144^{mm}.

Une autre observation montrera l'état de saturation de l'air au fond des crevasses. C'est l'état hygrométrique de l'air dans une grotte artificielle de 70 mètres environ de profondeur creusée dans le glacier. Nous avons fait cette observation le 30 juillet à 11 heures du matin, alors qu'aucun visiteur n'avait parcouru la grotte depuis la veille au soir.

Date.	Heure.	Température de l'air.	Humidité		Température de saturation.
			relative.	absolue.	
30 juillet.	11 h. 00 m.	1° 0	0,92	mm 4,53	— 0° 2
—	11 h. 15 m.	1° 0	0,92	4,53	— 0° 2
—	11 h. 30 m.	1° 5	0,89	4,53	— 0° 2

Les deux premières de ces observations ont été faites après que le psychromètre était resté assez longtemps dans la grotte pour être parfaitement équilibré; celui de nous qui s'était chargé de l'observation avait eu soin de s'éloigner, pour ne pas, par sa présence, réchauffer l'air de la grotte. Dans le but de vérifier ces observations, il est resté ensuite de 11 h. 15 à 11 h. 30 dans la grotte même, auprès des thermomètres; la chaleur rayonnante de son corps a élevé d'un $\frac{1}{2}$ degré la température de l'air, l'humidité relative a baissé de 3 pour 100; mais l'humidité absolue est restée la même (4,53 mm), prouvant ainsi la justesse de cette série d'observations.

Nous pouvons de ces expériences et observations conclure que dans les crevasses du glacier l'air est à peu près à l'état de saturation à 0°, que par conséquent la condensation ou l'évaporation doivent y être nulles.

Revenons à nos bassins de glace; les intervalles entre les morceaux de glace doivent être plus ou moins dans les mêmes conditions que l'air des crevasses du glacier, mais seulement alors que l'air est calme; pour peu que l'air soit agité il fouille entre les morceaux de glace des bassins et les surfaces en sont léchées par de l'air toujours renouvelé. Nous avons donc, dans les inégalités de la surface de la glace de nos bassins, une cause d'irrégularité dans l'expérimentation qui peut être importante.

C'est du reste ce que prouvera, mieux encore que le raisonnement, l'expérience directe.

Le 3 janvier 1871, à 9 h. 45 m. du matin, nous exposons à Morges, sur une fenêtre tournée du côté du nord, deux bassins remplis de neige. Le thermomètre oscillait entre — 2° et — 6°, l'air était très sec et l'évaporation fort active.

L'un de ces bassins était rempli de neige fortement tassée et parfaitement égalisée à l'aide d'un rouleau de bois, de manière à présenter une surface absolument plane.

L'autre bassin était chargé de fragments de neige gelée, aussi inégaux que possible, présentant force creux et force éminences, entre lesquelles l'air pouvait librement circuler.

Après 24 heures d'exposition à l'air, le premier de ces bassins avait perdu par l'évaporation un poids de 7,65 grammes, le second 22,40 grammes.

Après 48 heures d'exposition, le premier bassin avait perdu 15,90 grammes, le second 39,20 grammes.

L'évaporation avait donc été 2 et 3 fois plus active sur le bassin dont la surface neigeuse était accidentée, que sur celui dont la neige était aplanie. Si au lieu d'évaporation nous avions eu à constater le phénomène de la condensation à la surface de cette neige, il est évident que nous aurions eu la même inégalité d'action.

38. Ces trois causes d'irrégularité peuvent probablement expliquer quelques-uns des écarts que nous observons dans nos chiffres, mais ils ne suffisent peut-être pas à tout justifier; pour quelques expériences nous devons probablement reconnaître des erreurs d'expérimentation.

Quoi qu'il en soit, en faisant abstraction des irrégularités dues à l'action du vent, à l'inégalité de la surface de la glace et à l'observation de l'état hygrométrique de l'air, en faisant abstraction des erreurs d'observations, nous constatons d'une manière générale :

1° Que la condensation de la vapeur d'eau à la surface de la glace augmente de valeur à mesure que le point de saturation de l'air est plus élevé au-dessus de zéro.

2° Que la valeur de cette condensation est assez considérable.

39. Nous avons vu (§ 15) que, dans le phénomène de la condensation nous avons trois temps principaux à considérer :

1° La quantité de vapeur d'eau condensée;

2° Le dessèchement de l'air en contact avec la glace;

3° L'effet de la chaleur latente dégagée par la condensation.

Reprenons successivement ces trois points de vue:

40. 1° La quantité d'eau condensée à la surface du glacier est considérable; nous ne pouvons pas nous hasarder à fixer en chiffres définitifs la valeur de cette condensation, mais nous croyons rester au-dessous de la vérité en estimant sa valeur horaire :

à environ	^{mm} 0,050	quand le point de saturation de l'air est à	+ 1°
»	0,100	id.	+ 2°
»	0,150	id.	+ 3°

Or, une condensation dont la valeur horaire est de 0,150^{mm} signifie que, pendant une heure, il s'est déposé en eau à la surface

du glacier 150 grammes d'eau par mètre carré, 150 mètres cubes par kilomètre carré.

C'est un dépôt considérable. Si nous supposons un vent chaud amenant au contact des neiges de tout le bassin du Rhône, de l'air dont la température de saturation moyenne, serait à $+ 3^{\circ}$ (à une tension 5,69^{mm}), nous aurions par la condensation un dépôt considérable d'eau. La surface des neiges éternelles et glaces du bassin du Rhône est d'environ 1000 kilomètres carrés (voir appendice n° 1), nous aurions donc un dépôt horaire de 150 000 mètres cubes, et en 24 heures 3 600 000 mètres cubes, soit le $\frac{1}{2500}$ du débit annuel moyen du Rhône, à Genève⁹.

La condensation directe de la vapeur d'eau à la surface des glaciers est donc un facteur important de l'alimentation des fleuves, et mérite à ce point de vue d'être prise en sérieuse considération.

41. 2° La condensation de la vapeur d'eau dessèche l'air, et cela d'une manière notable. Sans nous arrêter à la sécheresse bien connue de la région des neiges éternelles, sans insister sur la rapidité de la dessiccation des habits mouillés et des aliments que tous les ascensionnistes ont constatée, sur le peu d'abondance des sécrétions urinaire et sudorale, sur la fréquence et l'intensité

⁹ Voir: *F.-A. Forel*. Comparaison du débit annuel moyen du Rhône à Genève, avec la hauteur moyenne annuelle de l'eau météorique. Bull. soc. vaud. sc. nat., t. X, p. 447. Ce travail a été la cause des études que nous publions aujourd'hui, en nous faisant rechercher comment on pourrait expliquer une anomalie apparente, entre le débit annuel moyen du Rhône à Genève et la quantité d'eau météorique tombée sur tout le bassin d'alimentation du fleuve. J'avais trouvé que la quantité d'eau s'écoulant annuellement par le Rhône, à la sortie du Léman, équivalait, répandue sur la surface du bassin d'alimentation, à une hauteur d'eau de 1^m,15, tandis que les moyennes annuelles de la pluie ne donnaient, pour ce même bassin, qu'une hauteur d'eau de 948 millimètres, sans en défalquer la quantité enlevée par l'évaporation. C'est en recherchant les causes possibles de cette anomalie, que nous avons abordé l'étude de la condensation de la vapeur d'eau sur les glaciers. Si aujourd'hui nous insistons moins sur la comparaison du débit du Rhône et de l'eau météorique, c'est que j'ai reconnu, dans le calcul que j'ai publié, une cause d'erreur dont il m'est impossible de ne pas tenir compte, et que je ne puis corriger faute de matériaux suffisants. Cette cause d'erreur est la présence, en hiver, des écluses et barrages de la machine hydraulique de Genève qui, relevant d'une manière notable le niveau du lac, fausse, au point de vue du débit du Rhône, les indications limnimétriques du lac. Pendant un temps plus ou moins long, variant d'année en année, l'administration de la machine ferme plus ou moins l'émissaire du lac, et procure ainsi un soulèvement artificiel de son niveau, et par suite, pendant un temps plus ou moins long, le niveau du lac ne correspond plus au débit de l'émissaire. Quelle est l'influence de cette altération du niveau régulier du lac sur le calcul que j'ai présenté, c'est ce que je ne puis me hasarder à calculer; mais cette remarque me commande à ce point de vue une réserve dont nous ne voulons pas sortir. F.-A. F.

des érythèmes et coups de soleil dans les hautes régions, nous prouverons ce dessèchement de l'air directement par nos observations.

42. A la surface du glacier l'air était beaucoup plus sec qu'à l'hôtel du glacier du Rhône, quoique ces deux stations soient fort rapprochées l'une de l'autre (900 mètres environ), et par conséquent soumises aux mêmes influences générales.

Il résulte de 85 observations faites à l'hôtel du glacier du Rhône, du 27 juillet au 4 août 1870, à toutes les heures du jour et de la nuit, que la moyenne d'humidité relative a été de 7,5^{mm} ou 7,95 grammes de vapeur d'eau par mètre cube.

Il résulte de 90 observations faites dans la même série de jours, sur le glacier du Rhône, entre 8 h. du matin et 5 h. du soir, que la moyenne d'humidité absolue y a été de 5,1^{mm} ou 5,41 grammes par mètre cube d'air.

La différence d'humidité en faveur de l'air de l'hôtel a donc été de 2,54 grammes par mètre cube ; l'air était de 32 pour 100 plus sec sur le glacier du Rhône qu'à l'hôtel.

43. Le détail des observations montrera encore mieux ce fait. Nous indiquerons dans le tableau suivant, pour chaque expérience, la valeur moyenne de l'humidité absolue sur la glacier, et pour l'humidité de l'air à l'hôtel, les deux observations qui précèdent et suivent immédiatement l'expérience.

DATE	HEURE	EXPÉRIENCES	Humidité absolue de l'air				
			sur le glacier		à l'hôtel		
			Nombre des observations.	Moyenne.	avant	après	
					l'expérience.		
			mm.	mm.	mm.		
Juillet.	27	8,15 m à 10,45 s	VIII, IX, XII, XIII	10	5,57	7,58	8,37
	»	4,20 s	VII	1	5,92	8,61	7,62
	28	8,50 m à 10,30 m	XIX, XX, XXII, XXIII, XXV	6	5,07	6,63	8,00
	»	3,30 s à 5,35 s	XVI, XVIII	10	5,16	7,73	7,48
	29	1,45 s à 3,50 s	XVII, XXIV	11	5,05	8,37	8,33
Août.	30	8,30 m à 10,15 m	XIX, XX	8	4,99	7,00	8,28
	1	11,45 m à 4,30 s	XXI, XXVI, XXVII	19	4,62	5,96	6,11
	3	8,00 m à 10,36 m	X, XI, XIV, XV	19	5,43	7,02	9,79

Si nous tirons de ce tableau les moyennes diurnes de tension de la vapeur d'eau, nous aurons :

Sur la surface du glacier $\text{mm} 5,23$.

A l'hôtel du glacier du Rhône 7,67.

Ces chiffres montrent bien l'état de sécheresse remarquable de l'air à la surface du glacier.

44. D'autres observations faites au-dessus de la cascade de glace du glacier du Rhône, nous donnent le même résultat.

La moyenne de 6 observations faites le 2 août, entre 11 et 2 heures du jour, au milieu du glacier, par une altitude de 2350 mètres environ, nous donnent pour la tension de la vapeur d'eau de l'air $4,18 \text{ mm}$.

Une observation faite le même jour à 2 h. 50 dans une prairie à quelques cents mètres du glacier et à la même altitude nous donne pour la tension de la vapeur d'eau de l'air $5,91 \text{ mm}$.

45. Le calcul nous amène du reste au même résultat et nous montre l'action desséchante du glacier sur la couche d'air qui l'environne.

Pendant notre expérience n° VIII, du 27 juillet, nous avons eu une condensation dont la valeur horaire a été de $0,158 \text{ mm}$, soit 158 grammes d'eau par mètre carré. La température moyenne de l'air étant de $4^{\circ},75$, ces 158 grammes auraient été contenus dans 23,6 mètres cubes d'air, si cet air avait été saturé et avait pu livrer toute son humidité.

Mais l'air n'était qu'à 0,87 d'humidité relative. Puis la quantité de vapeur d'eau déposée par la condensation, n'était que la quantité excédant la quantité de vapeur contenue à saturation par de l'air à 0° .

L'air aurait été saturé à $+ 2^{\circ},9$.

Or à 0° un mètre cube d'air peut contenir 4,878 grammes d'eau.

à $+ 2^{\circ},9$ id. $5,889$ »

Donc chaque mètre cube d'air pouvait laisser déposer au maximum 1,011 grammes d'eau.

Donc pour 158 grammes il a fallu l'excès de vapeur contenu dans 156 mètres cubes d'air, en admettant que tout cet air était dans les mêmes conditions hygrométriques que celui qui léchait la surface du glacier.

Le même calcul nous donne pour l'expérience n° XIII, du 27 juillet, à 9 h. 35 du matin :

Température de l'air	4°,7.
Humidité relative	0,85.
» absolue	mm5,5.
Température de saturation	2°,5.
Valeur horaire de la condensation . . .	mm0,125.
Epaisseur de la couche d'air desséchée.	146 mètres.

46. Mais, si au lieu de considérer l'état hygrométrique de l'air à la surface du glacier, nous prenons comme air normal l'état hygrométrique de l'atmosphère avant et après l'expérience à l'hôtel du glacier du Rhône (§ 43), nous trouverons qu'il a suffi d'une couche d'air beaucoup moins forte pour fournir la condensation que nous avons constatée.

Le 27 juillet, à l'hôtel du glacier du Rhône nous avons l'état hygrométrique suivant :

Heure.	Température de l'air. C°	Humidité		Température de saturation. C°
		relative.	absolue. mm	
8 h. 00 m.	10,6	0,79	7,58	7,2
11 h. 50 m.	15,3	0,64	8,37	8,6
Moyennes,	12,9	0,71	7,97	7,9

En calculant, comme nous venons de le faire, le volume d'air dans ces conditions, qui a pu livrer les 158 grammes d'eau de l'expérience n° VII, nous trouvons qu'il a suffi de 44 mètres cubes d'air. Si donc, nous supposons l'air tel qu'il était à l'hôtel du glacier du Rhône, transporté sur la surface du glacier, il aurait fallu qu'une couche de 44 mètres de hauteur eût livré, pendant cette heure, tout son excès d'humidité, pour fournir à la condensation que nous avons observée.

46 bis. Il nous a paru intéressant de prouver directement l'action desséchante de la glace sur l'atmosphère, quand celle-ci se trouve dans des circonstances hygrométriques convenables, c'est-à-dire quand la tension de la vapeur y excède 4,60 mm.

A cet effet, le 14 janvier 1871, à Morges, dans une salle dont la température était de 12°,5, nous avons pris un vase cylindrique en verre, qui avait 13 centimètres de diamètre et 20 centimètres de hauteur, et qui contenait par conséquent 2,65 litres. Une planche fut placée comme couvercle, et à cette planche furent suspendus deux thermomètres pour faire psychromètre, et un petit linge mouillé; un linge pareil, coupé au même morceau et en apparence mouillé à un degré égal, était placé ailleurs dans la salle.

Au fond de la cloche de verre nous plaçâmes des morceaux de glace, qui formaient une couche épaisse de 2 centim. à peu près.

Voici l'état hygrométrique de l'air contenu dans le vase de verre, à partir de 11 h. 10 m., heure du début de l'expérience :

HEURE.	THERMOMÈTRE		HUMIDITÉ	
	sec.	humide.	absolue. mm.	relative.
11,10	12°,4	12°,3	10,60	0,99
11,35	9°,8	9°,7	8,92	0,99
12,00	7°,2	5°,7	5,98	0,79
12,45	7°,0	4°,9	5,26	0,70

La diminution de la quantité d'humidité est évidente, surtout par la diminution de la tension de la vapeur. Elle est sensible même sur l'humidité relative ; et cependant à mesure que la température baissait dans la cloche par le voisinage de la glace, l'humidité relative aurait dû augmenter, si la quantité de vapeur, qui y était contenue, était restée la même.

Quant au linge placé dans le vase de verre, à 12 h. 45 minutes, bien que encore un peu humide, il était cependant beaucoup plus sec que celui qui était resté suspendu dans la salle.

47. Nous exprimons donc bien la réalité en attribuant au glacier une puissante action de dessèchement de l'air. Les glaciers et les neiges éternelles agissent, par rapport à l'humidité de l'air des régions avoisinantes, comme pourraient le faire d'immenses éponges imbibées d'acide sulfurique ou des montagnes de chaux vive. Cette comparaison n'est cependant pas parfaitement exacte, car le glacier ne dessèche pas indéfiniment l'air ; il ramène l'humidité absolue à 4,60^{mm}, tension de la vapeur d'eau à 0°. Mais comme cette valeur est, relativement à l'état hygrométrique moyen de l'air, une faible quantité d'humidité absolue, c'est bien une action générale desséchante qu'ont en définitive la glace et la neige de nos Alpes.

48. 3° Le troisième point de vue que nous devons envisager dans la question de la condensation de la vapeur d'eau sur la glace, c'est la chaleur latente. Il y a, dans le changement d'état de la vapeur en eau, dégagement d'une quantité considérable de chaleur latente, à savoir d'une quantité 7,67 fois plus forte que celle qui suffirait à faire fondre le même poids de glace ; autrement dit, il y a assez de chaleur latente pour faire fondre un poids de glace 7,67 fois plus considérable que le poids de l'eau condensée.

Nous avons vu (§ 40) des valeurs horaires de condensation de $0,050^{\text{mm}}$, $0,100^{\text{mm}}$, $0,150^{\text{mm}}$. Nous aurons donc par suite de la chaleur latente dégagée, des valeurs horaires de fusion correspondantes de $0,383^{\text{mm}}$, $0,767^{\text{mm}}$, $1,150^{\text{mm}}$, qui entrent pour une proportion importante dans la valeur de l'ablation à la surface du glacier.

Si nous traduisons ces chiffres en mètres cubes de glace fondues par heure et par kilomètre carré du glacier, nous obtiendrons les chiffres suivants : 383, 767 et 1150 mètres cubes d'eau de fusion, due simplement à la chaleur latente dégagée par la condensation.

Donc la condensation doit être considérée, non-seulement comme agissant puissamment pour l'alimentation des torrents glaciaires, mais comme tendant d'une manière énergique à la fusion des glaciers.

49. Nous formulerons enfin l'action de la condensation dans les 2 aphorismes suivants :

Plus grande sera l'humidité absolue de l'air, plus important sera le débit des torrents glaciaires, plus important aussi sera l'ablation et le retrait des glaciers.

Plus grande sera la surface des neiges et des glaces, plus complète sera l'action de dessèchement de l'air.

50. Nous allons aborder la partie de notre travail qui traite de l'évaporation ; mais nous voulons tout d'abord faire comprendre pourquoi nous avons donné beaucoup moins d'attention à ce phénomène qu'à celui de la condensation.

Nous chercherons à montrer comme quoi le phénomène de l'évaporation sur le glacier n'emprunte rien d'anormal à l'état solide de l'eau, tandis que la condensation est dans des conditions toutes différentes suivant qu'elle se fait sur de l'eau à 0° , ou sur de la glace à 0° , tandis que par conséquent la condensation se fait sur le glacier dans des proportions toutes différentes que sur une surface aqueuse.

51. Pour cela considérons les phénomènes de l'évaporation et de la condensation d'abord sur de l'eau.

Nous plaçons dans une atmosphère dont la température de saturation est à $+20^{\circ}$, un vase plein d'eau à une température de $+15^{\circ}$. D'après les lois de la condensation une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air va se condenser à la surface de l'eau, et par conséquent abaisser le point de saturation de l'air, supposons à 18° . Mais la chaleur latente dégagée par la con-

densation réchauffera l'eau et en élèvera la température, supposons-le jusqu'à 18° . A ce moment les tensions seront devenues égales et le phénomène s'arrêtera, pour ne recommencer dans un sens ou dans l'autre que si l'équilibre est de nouveau troublé.

Inversément, nous plaçons le même vase d'eau à 15° dans une atmosphère d'air dont le point de saturation est à 10° . Il y aura évaporation de la surface de l'eau, absorption de chaleur latente, et refroidissement de l'eau jusqu'à ce que l'air et l'eau aient une tension égale, à 13° par exemple.

Donc, tant que l'eau est entre les températures extrêmes du gel et de l'ébullition, les deux phénomènes de la condensation et de l'évaporation sont directement inverses et opposés dans tous leurs temps.

32. Il en est de même si nous considérons la glace à des températures qui n'approchent pas de la fusion.

Dans un air saturé à -10° , de la glace à la température de -15° condensera de la vapeur d'eau et réchauffera l'air par absorption du calorique latent dégagé par la condensation, jusqu'à ce que les tensions entre la glace et l'air se soient équilibrées, à -13° , par exemple.

De même dans un air saturé à -20° , un bloc de glace à la température de -15° évaporerait et se refroidirait en dégageant du calorique latent, jusqu'au moment de l'équilibre des tensions de la vapeur d'eau de l'air et de la glace, à -18° par exemple.

Donc, tant que la glace reste dans les températures inférieures au point de fusion, les phénomènes d'évaporation et de condensation sont directement inverses, comme nous les avons vus pour de l'eau à 15° .

33. Mais il n'en sera plus de même si nous nous adressons à de la glace à 0° .

Plaçons un bloc de glace à 0° dans une atmosphère dont le point de saturation est à -5° ; il y aura évaporation, refroidissement de la glace jusqu'à ce que, par l'augmentation de l'humidité de l'air et le refroidissement du corps évaporant, l'équilibre entre les tensions ait été rétabli, à -3° par exemple.

Plaçons au contraire le même bloc de glace dans une atmosphère dont le point de saturation est à $+5^{\circ}$; il y aura condensation, dégagement de chaleur latente, mais il n'y aura pas élévation de la température de la glace; il y aura fusion de la glace pour consommer la chaleur latente dégagée par la condensation, mais la glace ne pourra pas, vu sa nature, s'élever au-dessus de

zéro. L'air devra donc faire tout le chemin qui, dans les cas précédents, était fait en partie par l'eau ou la glace, et le point de rencontre entre les tensions ne sera pas, en analogie avec les cas précédents, à $+ 3^{\circ}$, mais à 0° .

Donc, dans le cas de la glace à 0° , les phénomènes de l'évaporation et de la condensation ne sont plus directement inverses. De la glace à 0° se comporte, au point de vue de l'évaporation, comme le ferait, dans des circonstances analogues de la glace à $- 15^{\circ}$ ou de l'eau à $+ 15^{\circ}$; elle se refroidit. Mais de la glace à 0° se comporte différemment, lors de la condensation, que de la glace à $- 15^{\circ}$ ou de l'eau à $+ 15^{\circ}$; elle ne se réchauffe pas comme elle le ferait sous ces deux dernières formes, elle fond. Et par suite, l'air au lieu d'être desséché dans des proportions ordinaires, correspondant à une différence de 5° , dans l'exemple que nous avons choisi, entre les points de saturation des deux éléments en présence, l'air est desséché dans des proportions extraordinaires et ramené, quelle que soit son humidité absolue primitive, au point de saturation à 0° .

§4. Pour avoir le phénomène directement inverse de la condensation à la surface de glace à 0° , il faudrait s'adresser, non pas à l'évaporation de la glace à 0° , mais à l'évaporation de l'eau à 0° ; nous aurions alors le même arrêt dans le changement de température du liquide causé par le dégagement de la chaleur latente nécessaire au changement d'état d'eau en glace.

§5. Mais ce dernier cas ne se présente pas sur les glaciers et les neiges éternelles, et nous ne nous trouvons à la surface du glacier que dans les circonstances suivantes :

1^o Condensation sur de la glace plus froide que 0° ;

2^o Evaporation sur de la glace plus froide que 0° ; — ces deux phénomènes directement inverses, et tendant à se contrebalancer probablement dans leur intensité et dans leurs effets.

3^o Evaporation sur de la glace à 0° ; — ce phénomène ne se séparant que par le degré d'intensité de celui où l'évaporation a lieu sur une surface plus froide que 0° .

4^o Condensation sur de la glace à 0° ; — ce phénomène se différenciant des précédents par l'impossibilité dans laquelle est la glace d'élever sa température, et par suite par l'abaissement nécessaire du point de saturation de l'air à 0° .

§6. Les phénomènes d'évaporation à la surface du glacier ne sont donc pas dans des conditions anormales comme les phé-

nomènes de condensation, c'est ce qui nous excusera si nous ne les avons pas soumis à une étude aussi attentive que les cas de condensation.

Nous avons, pour nos expériences dans l'été de 1870, recherché une station où nous eussions surtout représentées les conditions de la condensation. Celles de l'évaporation ne se sont présentées à nous que deux fois; une fois à notre station sur le glacier inférieur, une autre fois sur le glacier supérieur au-dessus de la cascade de glace, par une altitude d'environ 2350^m.

37. Voici le résumé des expériences faites dans ces conditions d'évaporation; nous indiquerons par un signe négatif, devant la valeur horaire de la condensation, les cas où, avec la balance, nous avons constaté de l'évaporation.

Expérience n°	DATE	HEURE du début de l'exposition.	DURÉE de l'exposition en minutes.	GLACIER	Température de l'air. C°	HUMIDITÉ		Température de saturation. C°	Valeur horaire de la condensation.
						relat.	absol. mm.		
XXX	1 août	0,40 s.	60	inférieur	6,2	0,59	4,3	— 1,2	0,007
XXXI	2 »	11,40 m.	125	supérieur	7,3	0,54	4,2	— 1,3	— 0,044
XXXII	2 »	11,45 m.	125	»	7,3	0,54	4,2	— 1,3	— 0,064
XXXIII	1 »	11,45 m.	60	inférieur	7,2	0,53	4,0	— 1,7	0,015
XXXIV	1 »	11,38 m.	62	»	7,2	0,53	4,0	— 1,7	0,003

38. De ce tableau il résulte que, dans les expériences XXXI à XXXII nous avons bien réellement eu évaporation quand les conditions de l'évaporation étaient remplies; que dans les expériences XXX, XXXIII et XXXIV, au lieu d'évaporation qu'exigeaient les conditions hygrométriques de l'air, nous avons eu augmentation de poids, faible il est vrai, mais cependant augmentation de poids, c'est-à-dire condensation. Cela doit-il rentrer dans les erreurs dues à des causes physiques comme celles que nous avons énumérées plus haut (§§ 35-37)? ne sont-ce pas peut-être des erreurs d'expérimentation et des fautes de pesées? Nous sommes tout prêts à le reconnaître.

39. Nous n'avons pas, pour les raisons que nous venons d'exposer, cherché à étudier spécialement le phénomène de l'évaporation du glacier¹⁰. Pour donner cependant une idée de l'in-

¹⁰ Voyez plus bas §§ 69 et 70.

tensité de ce phénomène et permettre de le comparer avec la condensation que nous avons vue en action, nous allons donner une série d'observations faites avec la balance du 1^{er} au 12 novembre 1870, à Morges, sur une fenêtre exposée au nord. Deux fois par jours, le matin et le soir, nous pesions exactement et en prenant la température, un de nos bassins de cuivre de 200 centimètres carrés de surface, rempli d'eau que nous avons laissé librement évaporer à l'air. Nous en déduisons la valeur horaire de l'évaporation que nous avons traduite en hauteur d'eau, en fractions de millimètre, suivant la règle jusqu'ici employée. Des observations psychrométriques faites au moment de la pesée donnent une idée approximative de l'état hygrométrique de l'air pendant la journée.

(Voir le tableau, pp. 654 et 655.)

60. Les conditions hygrométriques de l'air sont, on le voit, assez semblables à celles que nous avons au mois d'août au glacier du Rhône; on voit aussi dans ce tableau combien est faible la valeur horaire de l'évaporation, même pendant la bise violente des 2 et 3 novembre.

61. Analysons l'une de ces expériences, le n° XXXVI par exemple, qui nous a donné comme valeur horaire d'évaporation — 0,122 mm, la valeur la plus forte de nos 12 jours d'observation. Les moyennes que nous tirons des observations hygrométriques faites au commencement et à la fin de l'expérience sont les suivantes :

Température de l'air,	5°,8.
Humidité relative,	0,64.
» absolue,	mm 4,44.
Température de saturation, . .	— 0°,5.
» de l'eau en évaporation, 4°,9.	

L'air à 5°,8 aurait eu à saturation une tension de 6,90 mm. Il aurait été capable de contenir 7,318 grammes d'eau par mètre cube. Mais comme il n'avait que 4,44 mm de tension, il n'en contenait en réalité que 4,709 grammes par mètre cube. Il pouvait donc enlever à l'eau 2,609 grammes par mètre cube avant d'être saturé. L'eau était réchauffée par la température plus élevée de l'air et marquait 4°,9, la tension de sa vapeur était de mm 6,49.
 La tension de la vapeur d'eau de l'air étant de 4,44,
 il y avait un excès en faveur de l'eau de mm 2,05,
 qui explique l'intensité relative de l'évaporation. La chaleur latente

Numéro de l'expérience.	TEMPS d'évaporation.	Valeur horaire de l'évaporation. mm.	DATE	HEURE	Température de l'air. C°	HUMIDITÉ		Température de saturation. C°	VENT	Intensité du vent.	Température de l'eau. C°
						relative	absolue mm.				
XXXV	Jour	— 0,043	1 novembre	5,05 s.	7,3	0,78	6,13	4,1			6,9
XXXVI	Nuit	— 0,122	2 »	8,05 m.	6,3	0,64	4,55	— 0,1	NE.	2	5,4
XXXVII	J	— 0,069	2 »	8,40 s.	5,4	0,64	4,29	— 0,9	id.	3	4,4
XXXVIII	N	— 0,070	3 »	9,— m.	4,6	0,78	5,15	1,6	id.	3	4,2
XXXIX	J	— 0,038	3 »	10,— s.	4,8	0,72	4,64	0,1	id.	2	4,0
XL	N	— 0,052	4 »	6,45 m.	4,0	0,77	4,71	0,3	id.	2	3,2
XLI	J	— 0,035	4 »	8,25 s.	5,0	0,72	4,72	0,4	id.	2	4,2
XLII	N	— 0,037	5 »	7,05 m.	4,6	0,79	5,05	1,3	id.	1	3,3
XLIII	J	— 0,043	5 »	4,— s.	4,2	0,74	4,60	0,0	id.	1	3,6

XLIV	N	— 0,034	6	»	8,25 m.	3,6	0,74	4,37	— 0,7	id.	1	3,0
XLV	J	— 0,016	6	»	10,20 s.	2,6	0,78	4,38	— 0,7	id.	1	1,9
XLVI	N	— 0,027	7	»	8,30 m.	3,8	0,82	4,93	1,0	id.	1	3,0
XLVII	J	— 0,027	7	»	7,55 s.	4,4	0,74	4,08	0,2	id.	1	3,6
XLVIII	N	— 0,037	8	»	8,— m.	3,1	0,77	4,46	— 0,4	id.	1	2,8
XLIX	J	— 0,013	8	»	10,45 s.	2,7	0,85	4,70	0,3	id.	1	2,3
L	N	— 0,013	9	»	8,45 m.	2,8	0,89	5,03	1,2	id.	1	2,4
LI	J	— 0,008	9	»	10,05 s.	4,6	0,84	5,35	2,1	id.	1	4,0
LII	N	— 0,008	10	»	8,45 m.	4,3	0,86	5,32	2,0	Calme	0	3,2
LIII	J	— 0,044	10	»	4,20 s.	7,8	0,75	5,95	3,7	Pluie SO.	2	7,8
LIV	N	— 0,034	11	»	6,55 m.	4,2	0,76	4,79	0,6	id.	2	3,7
			11	»	5,— s.	4,2	0,70	4,31	— 0,9	id.	3	4,0

absorbée par l'évaporation refroidissait de son côté l'eau, et empêchait qu'elle ne fut réchauffée jusqu'à la température même de l'air, 5°,8. La différence de 0°,9, que nous constatons entre la température de l'eau et celle de l'air, est due au refroidissement produit par l'évaporation.

62. Supposons maintenant, qu'au lieu d'un bassin plein d'eau, nous eussions eu un bloc de glace. Le bloc de glace, soumis à la température élevée de l'air aurait pu fondre, il n'aurait pas pu se réchauffer; sa température, au lieu de s'élever jusqu'à 4°,9, serait restée à 0°. La différence entre les tensions aurait été de 0,16^{mm} seulement, et l'air, vu l'état solide de l'eau à évaporer, n'aurait pu acquérir de lui que 0,169 grammes par mètre cube. L'évaporation eût donc été beaucoup moins active et beaucoup moins forte. L'air aurait pu se charger d'une certaine quantité d'humidité, mais d'une quantité beaucoup moins forte que s'il avait été en contact avec de l'eau.

63. De ces faits nous concluons, que l'évaporation peut exister à la surface du glacier, toutes les fois que la tension de la vapeur d'eau de l'air est moindre de 4,60^{mm}; qu'elle doit exister, toutes les fois que le point de saturation de l'air est plus froid que la surface de la glace; mais que jamais l'évaporation ne peut être très puissante et comparable aux grandes valeurs que nous a présentées la condensation, car jamais cette évaporation du glacier ne pourra élever la tension de la vapeur d'eau de l'air au-dessus de 4,60^{mm}.

L'air peut donc, s'il est très sec, enlever une certaine quantité d'humidité à la surface du glacier, mais jamais l'évaporation de la neige ou de la glace n'élèvera sa tension à plus de 4,60^{mm}, ou son contenu en vapeur d'eau à plus de 4,88 grammes par mètre cube.

64. Nous pouvons, par une autre marche du raisonnement, être conduits à admettre que la condensation apporte aux neiges et aux glaces plus d'eau que l'évaporation n'en enlève. C'est en suivant les grands mouvements de l'atmosphère. Un vent chaud et humide arrive de la Méditerranée, des plaines d'Italie et de France, et vient battre les flancs de nos Alpes. Sa température est de 10, 15, 20 degrés; son humidité absolue est de 8, 10, 15^{mm} de tension. Toute l'humidité que contient cet air en excès de 4,60^{mm}, tension de la glace à zéro, devra, si la durée du contact est suffisante, se condenser en rosée à la surface du glacier, si la pluie et la neige n'ont pas déjà fait descendre à 4,60^{mm} la tension de la va-

peur d'eau de ce vent chaud et humide. Il y aura donc condensation d'une énorme quantité de vapeur d'eau.

Au contraire, qu'un vent du nord froid et sec, venant des plaines de la Russie ou de l'Allemagne, s'élève contre les pentes glacées de nos Alpes, en s'élevant, il se refroidit encore. La capacité hygrométrique qu'il pouvait avoir, faible déjà à cause de sa température relativement basse, est encore diminuée par suite de ce refroidissement; admettons cependant qu'il soit encore capable de faire évaporer la glace, d'enlever encore un peu d'humidité; il ne pourra en aucun cas prendre à la glace une quantité de vapeur d'eau qui élève sa tension à plus de $4,60^{\text{mm}}$. Dans le cas précédent, l'air pouvait perdre beaucoup d'humidité; dans le cas actuel, il ne peut en gagner que peu. La condensation peut donc être considérable, l'évaporation ne le sera jamais.

65. Quant à la chaleur latente absorbée par le changement d'état de glace en vapeur, ou à la production de froid due à l'évaporation, ce phénomène doit être aussi manifeste que celui que nous venons de voir dans l'expérience n° XXXVI. De même que dans de l'air à $5^{\circ},8$ l'évaporation abaissait la température de l'eau jusqu'à $4^{\circ},9$, de même la glace est refroidie lorsqu'il y a évaporation, et sa température s'abaisse au-dessous de la température de l'air.¹¹ C'est ainsi que dans certains cas, par un air très sec, on peut voir, avec un thermomètre à quelques degrés au-dessus de zéro, la surface de la glace rester gelée et ne donner aucun signe de fusion. Ce dernier cas de la persistance de l'état de gel de la surface de la neige ou du glacier, avec un air au-dessus du point de glace, est vrai théoriquement; nous croyons l'avoir remarqué à diverses reprises; mais il mérite de nouvelles constatations, et nous en recommandons l'observation aux ascensionnistes et aux amateurs des hautes Alpes. Il expliquerait du reste bien l'état grenu et poussiéreux de la neige aux hautes altitudes, l'état poussiéreux aussi de la neige des Cordillères de l'équateur.

66. Il expliquerait enfin, combiné avec le dégagement de chaleur latente qui accompagne la condensation, un fait qui a frappé tous les ascensionnistes; nous voulons parler de la rapidité du changement de qualité de la neige, qui, dure et gelée pendant la nuit, devient molle et tendre pendant le jour. Au matin, la neige est excellente, elle porte bien le poids du voyageur, et la croûte

¹¹ Voir § 69, la température du thermomètre mouillé, qui, au-dessous de zéro, se recouvre d'une couche de glace et donne la température de la surface de la neige ou de la glace soumise à l'évaporation.

glacée reçoit à peine l'impression des pas. Tout à coup, nous voulons dire en une demi-heure, en un quart d'heure parfois, la qualité de la neige change subitement ; elle devient tendre, humide, et le voyageur enfonce jusqu'aux genoux au même endroit où il avait facilement passé quelques instants auparavant. Le soir, phénomène inverse : tout à coup aussi, la neige redevient bonne, dure et sèche là où elle était détestable. Et cependant ni les sensations de la peau, ni le thermomètre n'indiquent de sauts brusques dans la température, qui expliqueraient cette rapidité du phénomène ; la température de l'air s'élève lentement, s'abaisse lentement.

Nous trouverons l'explication de cette rapidité de transition dans la combinaison de plusieurs phénomènes naturels : la différence de température de l'air par l'effet ou l'absence des rayons du soleil, l'effet des brises ascendantes et descendantes, et les chaleurs latentes absorbées ou dégagées par l'évaporation ou la condensation. Il est connu qu'au lever du soleil l'air s'élève, et qu'au coucher du soleil il s'abaisse, que le matin il souffle une brise ascendante, que le soir il souffle une brise descendante.¹² Prenons le phénomène à minuit. L'air est froid, au-dessous de zéro, l'air est sec, il y a évaporation, la surface de la neige est gelée. Le soleil se lève, il réchauffe l'air, mais, n'en augmentant pas l'humidité absolue, laisse continuer l'évaporation, et par suite maintient la surface de la neige gelée. Il réchauffe aussi l'air du fond des vallées, le dilate et détermine une brise ascendante ; de l'air plus humide monte le long des croupes de la montagne. Alors le phénomène hygrométrique devient inverse ; alors à l'évaporation succède la condensation ; à l'absorption de la chaleur latente succède son dégagement, et cela dans les proportions que nous avons vues. Alors la surface de la neige, au lieu d'être refroidie et gelée, reçoit une abondante quantité de chaleur latente dégagée par la condensation, et elle fond. La neige devient mauvaise.

Le soir, au moment du coucher du soleil, la brise du soir fait descendre dans la vallée l'air sec qui vient des hauts sommets ; à une atmosphère relativement humide succède un air très sec, à la condensation succède l'évaporation, à la fusion le gel. Or l'inversion des phénomènes hygrométriques a lieu subitement, et c'est ce qui explique la rapidité, l'instantanéité du changement d'état de la neige.

67. En nous basant sur les faits et théories que nous venons d'exposer, nous pouvons résumer l'action hygrométrique du glacier sur l'air et de l'air sur le glacier dans les aphorismes suivants :

¹² *De Saussure* : Voyages dans les Alpes, § 1126. — *Rendu* : Théorie des glaciers de la Savoie, p. 23, etc.

1° Quand l'air contient moins de $4,60^{\text{mm}}$ d'humidité relative, il peut y avoir condensation à la surface du glacier, il peut y avoir évaporation, suivant l'état relatif des tensions de la vapeur d'eau de l'air et de la glace. Ces deux actions tendent à se contrebalancer en intensité, et annullent peut-être leurs résultats au point de vue de l'alimentation des glaciers.

2° Toutes les fois que la tension de la vapeur d'eau de l'air est supérieure à $4,60^{\text{mm}}$, il y a condensation à la surface du glacier.

3° Le résultat total de la condensation et de l'évaporation à la surface du glacier doit être en faveur de la condensation, et cela d'une manière fort notable.

4° Le glacier, par la condensation et l'évaporation, tend à ramener à $4,60^{\text{mm}}$ la tension de la vapeur d'eau de l'air (il n'y a d'exception à cette loi que dans le cas de condensation à des températures inférieures à 0°).

5° Comme, dans nos climats et nos latitudes, la capacité hygrométrique moyenne de l'air est supérieure à $4,60^{\text{mm}}$ de tension, le glacier exerce une action desséchante très puissante sur l'atmosphère.

6° La condensation de la vapeur d'eau, par la chaleur latente qu'elle dégage, tend à lutter contre l'extension du glacier; elle augmente la valeur de l'ablation et la fusion du glacier.

68. La condensation de l'humidité atmosphérique à la surface des corps gelés explique d'une manière satisfaisante l'importance et l'utilité des neiges de l'hiver, pour l'alimentation des sources. Il est d'expérience et de tradition chez les agriculteurs que, après un hiver neigeux, les sources sont abondantes et bien nourries, que, après un hiver pluvieux, par contre, elles tarissent beaucoup plus vite. Ce fait est facile à expliquer. L'eau qui tombe en pluie ne pénètre qu'en partie immédiatement dans le sol; une partie reste à la surface et, par sa nature même, est exposée à l'évaporation; une grande partie se perd en vapeur. L'eau qui tombe en neige est, dans nos climats du moins, dans des conditions bien différentes. Tant que le thermomètre reste au-dessous de zéro, elle se trouve le plus souvent dans les conditions de l'évaporation; mais la capacité hygrométrique de l'air étant, aux basses températures, très faible, cette évaporation est peu considérable. Aussitôt que le thermomètre s'élève au-dessus de zéro, et que la neige commence à fondre, elle est au contraire, en général, dans les conditions de la condensation, et alors, comme les principes que nous avons exposés sont encore applicables ici, la condensation peut être considérable, avoir une valeur importante

et compenser rapidement la quantité de vapeur d'eau que l'évaporation a enlevée.

C'est ce que prouveront les observations suivantes, faites lors d'une chute de neige tombée à Morges en décembre 1870.

69. Nous avons profité d'une abondante chute de neige qui vient d'avoir lieu à Morges, les 4 et 8 décembre, pour étudier les phénomènes d'évaporation et de condensation à sa surface.

Nous donnerons d'abord une idée de l'état thermométrique et hygrométrique de l'air, en indiquant les moyennes des observations assez nombreuses que nous avons faites pendant dix jours. Nous indiquons la température du thermomètre mouillé, qui, lorsqu'il y a évaporation à la surface de la neige, peut être considéré comme donnant la température de la surface glacée.

DATE	Nombre d'observations	THERMOMÈTRE		HUMIDITÉ		Température de saturation.	VENT
		sec	mouillé	absol.	relat.		
		C°	C°	mm.		C°	
Déc. 3	1	— 2,5	— 3,4	3,18	0,84	— 4,8	Neige, vent du midi.
» 4	1 ¹³	— 2,8	— 3,0	3,58	0,96	— 3,3	id.
» 4	1 ¹⁴	— 6,8	— 8,2	1,85	0,67	— 11,6	Vent du nord.
» 5	6	— 6,5	— 7,0	2,29	0,81	— 8,8	id.
» 6	6	— 5,2	— 5,8	2,70	0,87	— 6,9	Brise de terre.
» 7	6	— 3,9	— 4,6	2,96	0,87	— 5,8	id.
» 8	4	— 2,6	— 3,4	3,19	0,85	— 4,8	Neige.
» 9	4	— 1,1	— 2,4	3,33	0,78	— 4,4	Vent du midi.
» 10	4	— 3,0	— 4,1	2,96	0,79	— 6,0	Brise de terre.
» 11	5	— 1,8	— 2,8	3,35	0,83	— 4,2	id.
» 12	6 ¹⁵	+ 0,4	— 0,3	4,14	0,87	— 1,4	id.
» 13	6	+ 3,2	+ 2,9	5,53	0,96	+ 2,7	Dégel.
» 14	2	+ 6,8	+ 6,6	7,14	0,96	+ 6,3	Pluie, vent du midi.
» 15	4	+ 7,5	+ 7,2	7,37	0,94	+ 6,7	Dégel.
» 16	1	+ 8,9	+ 8,8	8,40	0,99	+ 8,7	Pluie et brouillard.

¹³ A 8 h. 10 du matin.

¹⁴ A 9 h. 10 du soir.

¹⁵ La pluie commence dans l'après-midi.

En résumé, pendant cette période de 14 jours, nous avons eu, du 3 au 13 décembre, une première série de jours froids et secs, coupée par les chutes de neige des 3 et 4 et 8 décembre; pendant ce temps la surface de la neige s'est maintenue constamment au-dessous de zéro. Puis une seconde série, du 13 au 16 décembre, de jours chauds et humides, pendant lesquels le dégel et la fonte ont marché avec une grande rapidité.

70. Voyons maintenant ce qu'ont produit ces circonstances hygrométriques sur les phénomènes de l'évaporation et de la condensation.

Nous avons opéré suivant les principes des expériences déjà relatées. Seulement, comme la température était en somme assez basse, nous avons pu laisser nos bassins pleins de neige exposés à l'air pendant de longues suites d'heures, et obtenir ainsi des moyennes plus sûres que celles que nous aurait donné des expériences durant une demi-heure ou une heure. Ces expériences ont été faites sur une fenêtre exposée en plein nord et protégée par un angle de maison contre l'action du vent, en particulier du vent du midi. Cette circonstance expliquera en partie les valeurs très faibles que nous avons trouvées pour la condensation et l'évaporation.

Du 5 au 16 décembre, nous avons fait 35 pesées différentes, qui nous ont servi à étudier sans interruption les phénomènes hygrométriques pendant toute la série des 12 jours. Nous en grouperons les résultats dans le tableau suivant qui indiquera en résumé les sommes des principales valeurs par nous obtenues. Nous emploierons les mêmes notations usitées jusqu'à présent, en donnant, en fractions de millimètre, la hauteur d'eau évaporée ou condensée pendant un temps donné; une deuxième colonne donnera la valeur horaire de l'évaporation ou de la condensation. Le signe négatif placé devant ces chiffres indiquera qu'il y a eu évaporation, le signe positif, condensation.

DÉBUT		FIN		Hauteur d'eau totale évaporée ou condensée.	Valeur horaire de l'évaporation ou de la condensation.
date.	heure.	date.	heure.		
5 déc.	8,40 m.	8 déc.	8,00 m.	— 0,907	— 0,012 E
8 »	8,00 m.	9 »	2,40 s.	— 0,187	— 0,006 E
9 »	2,40 s.	13 »	0,05 s.	— 0,992	— 0,010 E
13 »	0,05 s.	16 »	6,55 m.	+ 2,062	+ 0,031 C

Donc du 5 au 13 décembre, en 196 heures, il s'est évaporé une hauteur d'eau de $2,086^{\text{mm}}$, ce qui donne comme moyenne horaire de l'évaporation — $0,010$.

Du 13 au 16 décembre, en 67 heures, il s'est condensé $2,062^{\text{mm}}$, ce qui donne une moyenne horaire de condensation de $0,031$.

La condensation a surpassé en intensité de plus de trois fois la valeur de l'évaporation, et en 67 heures elle a rendu à la neige à $0,024^{\text{mm}}$ près la quantité d'eau qui lui avait été enlevée en 196 heures.

❧ 1. Si nous calculons l'épaisseur de neige enlevée par l'évaporation, en prenant pour base le poids du mètre cube de neige fraîche à 85 kilogrammes, nous trouverons que les $2,086^{\text{mm}}$ d'eau qui ont été évaporés en 8 jours, correspondent à une épaisseur en neige de 25 millimètres. Ce qui confirme le proverbe populaire disant que « la bise mange la neige. »

❧ 2. Nous terminons en faisant remarquer l'importance que devaient avoir les phénomènes que nous avons constatés sur nos petits glaciers, alors que, à l'époque glaciaire, une immense calotte de glace partait du sommet de nos Alpes, pour aller battre sur les flancs du Jura et s'avancer, dans la vallée du Rhône, jusqu'au-delà de Lyon; dans la vallée du Rhin jusqu'à la limite actuelle des eaux du Rhin et du Danube. Cette immense surface glacée devait condenser la vapeur d'eau avec une énorme intensité et l'action desséchante sur l'air devait avoir un degré, dont nous n'avons plus aujourd'hui d'exemple. Quelle pouvait être l'influence de ce dessèchement de l'air sur la flore et la faune des pays avoisinants, c'est ce que les études paléontologiques et géologiques devraient ne pas négliger.

Nous publions en appendice à l'étude qui précède, les cinq notices suivantes. Les deux premières se rattachent au sujet que nous avons traité; les trois dernières sont des observations et travaux faits par nous pendant notre séjour au glacier du Rhône.

APPENDICE I.

Tableau des dimensions en surface des glaciers du bassin du Rhône, d'après les recherches de la commission fédérale d'hydrométrie ¹.

Nous allons donner un tableau de tous les glaciers du bassin du Rhône, qui ont une étendue de plus de 4 kilomètres carrés, avec leur surface telle qu'elle a été calculée par le Bureau de la commission fédérale d'hydrométrie; pour les glaciers plus petits, nous indiquerons seulement leur surface totale, mais en les ordonnant cependant en bassins secondaires, de manière à bien présenter quelle est la partie de ce bassin qui est recouverte par les glaces et par les neiges.

Pour les autres bassins de la Suisse, nous nous sommes bornés à l'indication de la surface recouverte par les glaciers, sans en faire l'énumération pour chacun d'eux.

Enfin nous terminons par un tableau de la surface des bassins eux-mêmes, avec la fraction de leur surface recouverte par des glaciers, et par quelques notes sur la manière dont les calculs ont été faits et sur les précautions que l'on a prises pour les rendre aussi exacts que possible.

Tableau de la surface des glaciers du bassin du Rhône.

	kilom. □
Glacier du Rhône	23,30
» de Viesch (du Valais)	36,37
Grand glacier d'Aletsch	103,78
Glacier d'Aletsch du milieu.	10,56
» du Geisgrat	4,36
» du Beichfirn et d'Aletsch supérieur	29,06
» du Jægi	8,42
» du Gerenthal	7,38
» de Gries	9,87
<hr/>	
Transport,	233,10

¹ Notice (autographiée) du bureau central de la commission hydrométrique suisse. Berne, mai 1866.

	kilom. □
Transport,	233,10
Glacier du Kaltenwasser	5,22
» du Fletschhorn	5,40
» du Trift	8,57
» du Rothblatt	4,93
» du Seewinen	4,08
» du Schwarzenberg	9,44
» d'Allalin	12,27
» de Fée.	22,19
» du Gassenried	10,20
» du Hohberg	4,54
» du Mellichen	4,20
» de Findelen	20,10
» du Gorner	22,90
» du Monte-Rosa	6,60
» de Grenz	14,20
» des Jumeaux	4,70
Glaciers noirs	5,50
Petit glacier du Mont-Cervin	5,30
Glacier du Théodule supérieur	10,35
» de la Furgen	7,40
» de Z'mutt, Tiefenmatten, Stock et Schœnbühl	23,70
» du Trift près du Gabelhorn supérieur	6,70
» du Hohlicht	11,60
» de Bies	5,80
» d'Ahnén et de Lœtschen	14,27
» de Jægi près du Breithorn.	4,70
» près du Lœtschenthalgrat	18,00
» du Wildstrubel et du Læmmern	22,60
» du Wildhorn (de Dungel)	6,60
» des Diablerets (de Sanfleuron)	13,00
» de Turtmann	21,00
Transport,	569,16

	kilom. □
Transport,	569,16
Glacier du Weissshorn	6,15
» de Moming	8,70
» de Durando-Zinal	19,09
» de Moiry	8,70
» près de la Dent-Blanche (à l'ouest)	8,05
» de Ferpècle	11,10
» du Mont-Miné	13,20
» d'Arolla	11,70
» de Vuibez	8,60
» du Grand-Désert	6,50
» de Durand ou Cheillon	9,30
» de Gétroz	7,10
» de Breney	14,10
» d'Otemma	24,70
» du Mont-Durand	11,10
» de Zessetta	6,00
» de Corbassière	21,90
» de Laneuvaz	7,50
» de Saleinoz	12,60
» du Trient	8,00
» du Buet	4,64
Somme,	797,89

Auxquels il faut ajouter 196 glaciers qui, ayant moins de 4 kilom. carrés de surface, ne sont pas spécialement mentionnés ci-dessus, et qui ont ensemble une surface de 239,38

Surface totale des glaciers dans le bassin du Rhône, 1037,27

Ou en résumé :

	kilom. □
Le Rhône avec ses petits affluents jusqu'à Viège	289,29
La Viège	302,25
La Dranse	153,62
Les petits affluents de Viège à St-Maurice,	281,31
» » de St-Maurice au Léman,	10,80
Total,	<u>1037,27</u>

Pour le bassin de l'Aar on a :

	kilom. □
Bassin de l'Aar depuis son origine jusqu'à Brientz.	160,58
Bassin de la Lütschinen	74,23
» » Kander	45,42
» » Simme	7,01
» » Sarine	7,18
Surface des glaciers dans le bassin de l'Aar,	<u>294,42</u>

Résumé général pour la Suisse.

	Surface des glaciers en kilomètres carrés.	Surface des bassins des fleuves en ki- lomètres carrés	RAPPORT entre la surface des glaciers et la surface totale des bassins des fleuves.
Bassin du Rhin (jusqu'à Waldshut)	265,75	15909,50	1,67 0/0
» de l'Aar jusqu'à Brugg	294,42	11616,82	2,53 0/0
» de la Reuss	145,07	3411,47	4,25 0/0
» de la Limmat	45,26	2414,03	1,87 0/0
» du Rhône (jusqu'à Genève)	1037,27	7994,51	12,98 0/0
» du Tessin.	125,81	6548,09	1,92 0/0
» de l'Inn	182,51	1971,30	9,26 0/0
Surface totale des glaciers de ces bassins	<u>2096,09</u>		
Bassin du Rhin (jusqu'à Bâle)	750,50	35906,65	2,09 0/0

En calculant les surfaces des glaciers, on a toujours soustrait les massifs de rochers, souvent très considérables, qui se trouvaient soit à l'intérieur soit au bord des glaciers, de manière que les chiffres contenus dans ce tableau représentent la surface des territoires continuellement couverts de neige et de glace.

On a mesuré la plus grande partie de ces surfaces de glaciers sur l'Atlas suisse avec le planimètre d'Amsler; et pour les surfaces qui étaient plus petites qu'un kilomètre carré, avec une feuille de papier gélatiné, divisé en carrés de 2^{mm} de côté.

Toutes ces surfaces ont alors été multipliées par le coefficient moyen de correction 1,0131, reconnu nécessaire à cause du retrait des feuilles de l'Atlas.

Il aurait été inutile de poursuivre dans ces calculs une exactitude plus grande :

D'abord, parce que d'une année à l'autre les glaciers éprouvent des mouvements progressifs ou rétrogrades, suivant les circonstances météorologiques, de façon que la surface couverte de glace ou de neige n'est pas absolument invariable.

Ensuite, parce que la difficulté de s'approcher et de se mouvoir sur certains glaciers, n'a pas permis de relever leur contours avec une rigoureuse exactitude.

Ch. DUFOUR.



APPENDICE II.

Notice sur les brises du lac Léman, par le Dr F.-A FOREL.

Si le lecteur a étudié avec attention le tableau hygrométrique que nous avons donné § 69, il aura sans doute été frappé d'un détail, sur lequel je désire insister. Pendant 4 jours, à savoir du 6 au 8 et du 10 au 11 décembre, nous avons eu constamment, à Morges, les conditions hygrométriques de l'évaporation; nous avons eu en réalité dans nos expériences, constamment le phénomène de l'évaporation, et cependant l'air, dont les couches reposaient sur le bassin du Léman, ne se renouvelait pas, et dans notre tableau nous avons dû marquer à la colonne des vents, *brises locales*, et non un vent général.

Il n'y aurait rien eu de bien étrange si, pendant une longue série de jours, nous avions eu constamment évaporation, par un vent du nord soufflant continuellement; la bise, amenant dans notre vallée de l'air desséché dans les plaines du nord, renouvelerait dans ce cas sans cesse l'air, et remplaçant sans cesse l'air qui se serait chargé d'humidité par le fait de l'évaporation, fournirait aux surfaces aqueuses, de l'air toujours avide d'humidité. Mais le fait que, pendant une série de jours, en n'ayant pour conditions de mouvement de l'atmosphère que des brises locales, qui déplacent seulement l'air d'un district à l'autre de notre vallée, que pendant plusieurs jours de suite nous ayons à constater une évaporation continue, il y a là un phénomène qui demande explication.

Et dans le fait, si nous abordons le problème par le calcul, nous verrons que l'air aurait dû être en réalité bien vite saturé.

Prenons par exemple, le 7 décembre, où nous avons eu pendant toute la journée une brise locale.

La moyenne de 6 observations nous donne pour la température de l'air, entre minuit et 9 heures du soir, — 3⁰,9. A cette température l'air aurait à saturation 3,41^{mm} de tension de vapeur d'eau, ce qui, traduit autrement, signifie qu'il pourrait contenir par mètre cube 3,616 grammes d'eau à l'état de vapeur.

Or la moyenne des 6 observations psychrométriques de cette journée nous donne pour la tension de l'humidité atmosphérique 2,97^{mm}, ou 3,151 grammes par mètre cube.

La différence entre ces chiffres, soit 0,465 grammes, est la quantité d'eau que l'air pouvait, ce jour-là, absorber par mètre cube, avant d'être saturé.

D'une autre part nous avons eu constamment, le 7 décembre, évaporation à la surface de la neige, à savoir, une évaporation moyenne de 0,019^{mm} par heure. Or une couche d'eau de 19 millièmes de millimètres correspond à un poids de 19 grammes d'eau par mètre carré de surface. Il y avait donc, par heure et par mètre carré de la surface de la neige, évaporation d'un poids de 19 grammes d'eau à l'état de vapeur.

Ces 19 grammes auraient suffi pour saturer, vu l'état hygrométrique de l'air que nous venons d'étudier, une couche d'air de 43 mètres d'épaisseur. En une heure une couche d'air de 43 mètres aurait été saturée par le fait de l'évaporation à la surface de la neige, en 24 heures une couche de 1032 mètres.

Et cependant le psychromètre indiquait une sécheresse à peu près toujours constante.

Ce phénomène s'explique tout naturellement par la direction du courant d'air.

Pendant tout ce temps, nous avons à Morges une brise, un vent local, mais une brise soufflant constamment de la terre sur le lac, des collines vaudoises sur la plaine du Léman. Pendant tout ce temps un courant d'air descendant obliquement du pied du Jura et des collines entourant le lac, amenait constamment un air toujours renouvelé, partant des hauteurs, c'est-à-dire d'une région plus froide, et descendant dans une région plus chaude. La température de l'air s'élevant, sa capacité hygrométrique augmentait aussi, et l'évaporation pouvait continuer sans cesse, de nouvelles couches d'air non saturé remplaçant celles qui venaient de se charger d'humidité.

En réalité cette brise de terre est constante alors que le sol est couvert de neige, et s'explique par la théorie générale des brises.

Le lac présente une large surface, dont la température en hiver ne descend, pour le grand lac du moins, jamais au-dessous de 4° C. Sa température est donc, relativement à la terre couverte de neige, beaucoup plus élevée. Les couches d'air, au contact de la surface du lac, sont réchauffées, s'élèvent, et déterminent un appel qui attire, de tous les côtés, l'air plus froid des rives du lac.

Toutes les fois donc que la terre est couverte de neige, et qu'il ne règne pas de vents généraux, il souffle sur les bords du lac une brise de terre, que je demande à nommer *Morget de neige* ¹.

¹ L'on nomme, sur la rive vaudoise du lac Léman, *Morget*, la brise de terre qui souffle le soir, la nuit et la matin. *Morget* vient peut-être du nom de la ville de Morges où ce vent souffle avec le plus d'intensité, peut-être aussi du verbe patois *s'emmourger*, partir du port, mettre à la voile.

Je profiterai de cette notice pour signaler encore deux brises, qui n'ont pas encore été décrites sur notre lac, et dont la constance est aussi facile à expliquer.

En automne, la chaleur des eaux du lac, relativement à la température de la terre, détermine un appel du lac à la terre, une brise de terre qui souffle toute la journée et non plus seulement pendant la nuit comme en été, lorsque l'équilibre général entre les températures de la terre et de l'eau est établi. Je l'appellerai *Morget d'automne*.

Au printemps, les eaux du lac s'échauffent moins rapidement que la terre, et la température de la surface du lac est relativement froide. L'appel est alors inverse et se dirige de la terre au lac; il souffle alors une brise du lac qui dure plus longtemps et est en général plus énergique que la brise du lac normale de l'été, connue sous le nom de *Rebat*. — Par suite cependant des relations bien connues du maximum de densité de l'eau, la surface du lac se réchauffe plus vite au printemps qu'elle ne se refroidit en automne; la surface du lac est relativement plus chaude en automne, relativement moins froide au printemps. Aussi cette brise de lac, que je nommerai *Rebat du printemps*, est moins prononcée et moins facile à observer que le *Morget d'automne*.

Je reconnais en somme, sur les bords de notre lac, les brises suivantes :

1^o *Rebat*, brise de lac, soufflant en été, de 10 à 4 heures du jour;

2^o *Morget*, brise de terre, soufflant en été, de 6 heures du soir à 8 heures du matin;

3^o *Rebat du printemps*, brise de lac, régnant au printemps, plus au moins toute la journée;

4^o *Morget d'automne*, brise de terre, régnant en automne, jour et nuit;

5^o *Morget de neige*, brise de terre, régnant jour et nuit, alors que le sol est couvert de neige.

Il y aurait encore à indiquer, pour être complet, les *airs de pluie* qui soufflent, en s'irradiant comme d'un centre, à partir du point où tombe par un temps calme, une averse de pluie.



APPENDICE III.

Note sur la température de la source du Rhône ,

par Ch. DUFOUR, professeur à Morges.

Derrière l'hôtel du Glacier du Rhône, il sort de terre une source d'eau tiède que l'on appelle la source du Rhône, tandis que l'on ne donne pas ce nom à l'affluent bien plus important qui sort du glacier lui-même et qui est bien réellement l'origine du fleuve. Mais, comme le fait déjà observer de Saussure, cette source chaude au bord d'un glacier avait frappé les habitants de la contrée, qui lui avaient attribué plus d'importance qu'au cours d'eau principal. Il dit que cette source sort derrière deux monticules, auprès desquels sont les cabanes des bergers. Il est facile de reconnaître les deux monticules dont parle le grand voyageur; les cabanes des bergers y sont encore, seulement on ne les regarde plus, maintenant qu'il y a un excellent hôtel dans leur voisinage immédiat. Or en cet endroit il y a plusieurs sources plus ou moins abondantes. De Saussure dit qu'il a toujours trouvé pour la plus considérable une température de $14\frac{1}{2}$ degrés Réaumur.¹

Le 1^{er} août 1870, à 7 heures du matin, nous avons pris la température de cette source en divers endroits, aussi près que possible des points où elle sort de terre, et la moyenne de nos observations a donné $17^{\circ},9$ C. En réduisant en degrés centigrades le chiffre trouvé un siècle auparavant, on arrive à la même valeur. Seulement, nous croyons devoir indiquer ici une correction qu'il faut faire au thermomètre de de Saussure, qui était probablement le même que celui de Deluc. Pour le zéro, Deluc mettait bien son thermomètre dans la glace fondante, et ce point était le même que le nôtre; mais il mettait 80° au point qu'atteignait l'instrument dans l'eau bouillante à Genève, à une pression barométrique moyenne de $730,89^{\text{mm}}$. Un thermomètre ainsi gradué aurait marqué $80^{\circ},874$ dans l'eau bouillante sous la pression de 760^{mm} .² Pour réduire en degrés centigrades les $14\frac{1}{2}$ degrés Réaumur, il faut donc multiplier ce chiffre par le rapport $\frac{100}{80,874}$ et l'on trouve alors $17^{\circ},9$, exactement la température que nous avons trouvée aussi pour la source la plus abondante.

Cette constance remarquable de la température d'une source thermale pendant une période de 87 ans, nous a semblé mériter d'être signalée.

¹ De Saussure : Voyages dans les Alpes, § 1719.

² Communication de M. Jamin à l'Académie des sciences de Paris. Séance du 4 juillet 1870.

Pour les sources plus faibles, de Saussure dit qu'il a trouvé une température inférieure ; nous avons trouvé au contraire une température plus élevée, car tandis que la source principale nous donnait $17^{\circ},9$, d'autres sources, qui jaillissaient dans le voisinage, nous donnaient $19^{\circ},0$ et $19^{\circ},3$. Mais comme dans cet endroit il sort de terre plusieurs filets d'eau, nous ne sommes pas certains d'avoir expérimenté aux mêmes sources que lui.

Cette eau est utilisée actuellement pour des bains, et pendant notre séjour au glacier, un voyageur, qui était arrivé à l'hôtel assez gravement indisposé, en a ressenti les salutaires effets.

Mais il arrivera peut-être un moment où cette eau tiède pourra rendre des services d'un autre ordre : l'hôtel est à une distance assez faible du glacier ; en 1870, il en était à 612 mètres ; en 1856, à 280 mètres, et en 1818 seulement à 180 mètres, à en juger du moins par une des moraines qui remonte probablement à cette époque. Or il pourrait revenir des années durant lesquelles le glacier, au lieu de reculer, comme il l'a fait dans les derniers temps, avancerait de nouveau autant et plus qu'en 1816 et en 1817 ; alors l'hôtel courrait un danger sérieux, et risquerait fort d'être renversé, comme l'ont été tant d'autres constructions dont les glaciers ont pris la place. Mais, avec leur source d'eau thermale, les propriétaires de cet hôtel pourront toujours se mettre à l'abri du danger. En effet, quand le glacier avancera d'une manière inquiétante, on pourra utiliser cette eau pour en fondre l'extrémité, ou du moins pour la scier en blocs qui tomberont dans le Rhône et iront fondre dans les régions inférieures.

Sans doute, le point où les sources chaudes sortent de terre, est plus bas que celui où elles devraient attaquer la surface du glacier, mais avec une force motrice telle que celle que donne le Rhône à quelques pas de l'hôtel, il sera toujours facile d'établir à peu de frais un moteur hydraulique, capable de faire arriver l'eau chaude jusqu'au-dessus du redoutable envahisseur, pour en trancher l'extrémité ; il suffira de temps en temps d'aller changer l'arrangement des conduites qui amèneront cette eau, pour sauver d'une destruction complète un hôtel d'une très grande valeur.

Il faut convenir qu'ils ne sont pas nombreux dans le monde, les points où l'on peut se défendre contre l'invasion d'un glacier par une source d'eau chaude qui sort de terre à quelques mètres de son extrémité.



APPENDICE IV.

Notice sur les pierres enchâssées dans la glace du glacier du Rhône, par le Dr F.-A. FOREL.

Le dogme de l'immaculée pureté de la glace des glaciers, après avoir longtemps régné sans contestation, aussi bien dans l'opinion du public que dans les dissertations des naturalistes, a dû céder devant l'évidence des faits. Plus ou moins dans tous les glaciers, l'un a pu reconnaître en effet, enfouis, enchâssés dans la glace, des corps étrangers de volume divers, des blocs, des cailloux, des galets, des pierres, du gravier, du sable, de la poussière, et même des débris de corps organisés. C'est sur un détail de la situation de ces corps enchâssés dans la glace vive du glacier du Rhône, que je veux attirer l'attention.

En attaquant avec le pic la paroi de glace de la crevasse où nous étions installés pour les expériences ci-dessus relatées, j'ai rencontré quatre pierres de grosseurs diverses, enchâssées dans la glace, et j'ai reconnu qu'elles présentaient toutes les quatre la particularité suivante : chacune d'elles était libre dans une cavité creusée aux dépens de la glace. Au lieu d'être pressée de tous les côtés, par la glace qui l'entourait, la pierre était libre par sa face supérieure et reposait au fond d'une cavité cylindrique, verticale, formant voûte au-dessus d'elle, dont la section horizontale avait la figure même de la pierre, dont la hauteur variait de 5 à 10 centimètres. Il semblait que la pierre se fût enfoncée au milieu d'un corps mou, en laissant au-dessus d'elle un vide, comme témoin de son passage, et j'ai même été tenté d'expliquer ainsi la formation de cette cavité, en supposant que l'action prolongée de la pesanteur du corps lourd de la pierre avait pu, pendant la longue série d'années que dure le voyage du glacier, faire fléchir la masse faiblement plastique de la glace, et laisser ainsi la pierre s'affaisser de quelques centimètres au sein de la glace qui l'entourait. Je donnerai plus bas une autre explication de ce phénomène, mais je ne sais pas mieux décrire cette position des pierres enchâssées au fond de leur cavité cylindrique, qu'en racontant cette première tentative d'interprétation.

J'ai cherché à vérifier si ce fait était constant, et partout où la surface du glacier était assez salie pour que je pusse espérer la présence de pierres enchâssées, j'ai creusé la glace vive pour en

chercher. J'ai ainsi trouvé une quinzaine de pierres gisant au milieu de la glace, et dans tous les cas j'ai pu constater la présence d'une cavité au-dessus de la pierre.

Ces pierres étaient de dimensions fort diverses, variant depuis la grosseur d'une noisette jusqu'à un diamètre de 30 centimètres. Leur position, relativement à la surface générale du glacier, était aussi fort différente; j'ai trouvé les unes en creusant la surface même du glacier, à quelques centimètres de profondeur; j'en ai trouvé d'autres en attaquant la paroi des crevasses, et cela même à une assez grande profondeur, au-dessous de la superficie générale, à 2, 3 et 4 mètres. Mais toutes avaient cela de commun dans leur situation, c'est qu'elles étaient toutes assez près de la paroi de glace; c'est que vu le mode de recherche que j'étais obligé d'employer, et ne pouvant creuser très profondément, je n'ai constaté la position que des pierres distantes de moins de 40 centimètres de la surface de la glace, soit de la surface inférieure du glacier, soit des parois des crevasses.

Dans ces limites c'est-à-dire à moins de 40 centimètres de profondeur à partir de la paroi de glace, que ce soit verticalement au-dessous de la surface du glacier, que ce soit horizontalement jusqu'à 3 et 4 mètres de profondeur dans des crevasses, je puis dire que toutes les pierres que j'ai trouvées enchâssées dans la glace du glacier du Rhône présentaient la particularité que je viens de décrire.

Les pierres situées plus profondément, plus loin de la surface, présentent-elles le même fait dans leur position? C'est ce que je ne puis affirmer. Si même l'interprétation que je vais donner de cette situation est exacte, je répondrais négativement à cette question. Et, le fait est, que depuis que l'on creuse des grottes artificielles dans les glaciers, soit pour en extraire la glace destinée à la consommation, soit pour faire admirer aux touristes la douceur incomparable de la lumière azurée qui a traversé la glace, je ne sache pas que l'on ait jamais constaté dans la position des pierres qu'ont certainement rencontrées les travailleurs, l'anomalie que je signale.

Une expérience de Dollfuss-Ausset¹ me servira à expliquer le phénomène qui nous occupe. Voulant vérifier le zéro d'un thermomètre, il le plaça dans un vase de bois en plein soleil du mois de septembre 1862, au Pavillon de l'Aar; la boule était enfoncée

¹ Dollfuss-Ausset. Matériaux pour l'étude des glaciers, t. V p. 456. Paris 1864.

sous une couche de 3 centimètres de neige de névé; le thermomètre marquait $+ 0^{\circ},4$. Une nouvelle vérification faite le lendemain matin à l'ombre lui prouva que le zéro de son thermomètre était cependant juste. L'action des rayons solaires avait réchauffé, à travers la neige, la boule du thermomètre.

Pour exagérer cette action, Dollfuss fixa la boule d'un thermomètre dans un flacon rempli de suif fondu, noirci par du charbon pilé très fin; il recouvrit le tout d'une couche de neige, et, le plaçant alternativement à l'ombre et au soleil, il lut sur l'échelle thermométrique, dans le premier cas 0° , dans le second $+ 4^{\circ},0$.

J'ai répété cette expérience, dans les conditions suivantes. J'ai d'abord fixé la boule d'un thermomètre à mercure dans un tube de verre de 1 centimètre de diamètre et 7 centimètres de long, rempli de cire fondue, et noircie avec du charbon pilé. Je l'ai laissé reposer dans de la neige pendant 12 heures, de manière à ce que le thermomètre et son enveloppe fussent bien descendus à zéro.

Je choisis ensuite un bloc de glace de rivière de 15 centimètres d'épaisseur dans lequel je pratiquai à l'aide d'un jet d'eau chaude, un trou perforant de 2 centimètres environ de diamètre. J'en fermai l'orifice inférieur au moyen d'un bouchon de neige fortement tassée, je plaçai dans le trou la boule de mon thermomètre, entouré de sa chemise de cire noire, et j'en obturai l'orifice supérieur, autour du tube du thermomètre, avec un second bouchon de neige. J'eus soin d'entourer tout le tube extérieur du thermomètre d'une masse de neige, et je m'arrangeai pour faire les lectures à l'échelle du thermomètre en pratiquant de 5 en 5 minutes, un trou au travers de l'enveloppe de neige qui entourait de toutes parts l'instrument. Je plaçai tout cet appareil aux rayons du soleil, le 8 janvier 1871, à 10 heures 10 minutes du matin.

A ce moment la paroi de glace qui entourait la boule du thermomètre avait à son point le plus faible une épaisseur de deux centimètres environ. Je vis bientôt le thermomètre monter rapidement, et je pus faire les lectures suivantes :

à heures 10,10	matin	$+ 0^{\circ},0$
10,22	»	$9^{\circ},4$
10,33	»	$12^{\circ},4$
10,37	»	$13^{\circ},5$
10,42	»	$14^{\circ},2$
10,47	»	$15^{\circ},1$
10,52	»	$15^{\circ},5$
10,56	»	$16^{\circ},0$
11,01	»	$16^{\circ},4$
11,09	»	$16^{\circ},8$

A la fin de l'expérience, la paroi de glace avait encore une épaisseur de un centimètre environ; le diamètre du trou foré dans la glace s'était notablement élargi.

En une heure de temps, le thermomètre, que j'avais ainsi placé dans un milieu absolument entouré de toutes parts de glace, s'était donc élevé, par l'action seule des rayons solaires traversant la paroi de glace, à une température de $16^{\circ},8$.

Pendant ce temps la température à l'ombre était de $1^{\circ},4$ et un thermomètre à mercure, exposé en plein soleil, oscillait entre $8^{\circ},4$ et $10^{\circ},3$.

Je cherchai ensuite à répéter la même expérience en remplaçant la paroi de glace par une paroi de neige. Pour cela, après avoir entouré tout le bloc de glace d'une forte couche de neige, je brisai la paroi de glace qui séparait de l'extérieur le trou dans lequel était placé le thermomètre, et je la remplaçai par une couche de neige fortement tassée, de deux centimètres environ d'épaisseur. Je fis alors, par le même procédé, les lectures suivantes, l'exposition au soleil ayant commencé à 11 h. 17 m. du matin :

à heures 11,22	le thermomètre marquait	$5^{\circ},7$
11,27	»	$5^{\circ},8$
11,32 ²	»	$6^{\circ},2$
11,41	»	$4^{\circ},5$
11,50	»	$4^{\circ},9$
12, 5	»	$6^{\circ},3$

Enfin, après avoir séché la boule noircie de mon thermomètre, je l'exposai dans l'air libre aux rayons directs du soleil, et je pus lire :

à heures 12,10	$10^{\circ},0$
12,20	$25^{\circ},2$
12,50	$31^{\circ},8$

En résumé je conclurai de ces expériences que la glace de rivière est assez fortement diathermane, que la neige l'est beaucoup moins, et comme la glace des glaciers est par sa structure, intermédiaire entre ces deux formes d'eau congelée, je crois pouvoir admettre pour elle un certain degré de diathermanéité.

² Après la lecture de 11 h. 32, la neige, formant écran au devant de la boule du thermomètre, s'était imbibée d'eau de fusion et commençait à devenir un peu transparente. Je renforçai alors la couche de neige en y ajoutant une épaisseur d'un centimètre environ de neige fraîche; c'est ce qui explique l'abaissement de température que l'on peut remarquer à la lecture de 11 h. 41 m.

De ces observations et expériences, je tire l'explication suivante de la formation de la cavité dans laquelle reposent les pierres enchassées du glacier du Rhône.

La chaleur directe des rayons du soleil et la chaleur réfléchie par les parois de rochers qui encaissent le glacier³, pénètrent plus ou moins à travers la glace, et venant se condenser sur le corps opaque de la pierre enchassée dans la glace, peuvent en élever la température. La pierre, du moment que sa température s'élève quelque peu au-dessus de zéro, commence à fondre la glace autour d'elle, l'eau de fusion s'écoule par les fissures capillaires qui caractérisent la glace des glaciers, et la pierre s'enfonce peu à peu. C'est précisément la marche contraire de ce qu'avait imaginé Agassiz, pour expliquer l'exhaussement dans le sein du glacier des blocs et pierres qu'il contient et leur apparition à la surface.

Pour éprouver la justesse de cette explication, j'ai institué l'expérience suivante, que j'ai répétée plusieurs fois avec des résultats toujours identiques.

Le 8 janvier 1871, je remplis de neige un bassin de cuivre de 7 centimètres de profondeur; je sème à sa surface une vingtaine de petites pierres, de la grosseur d'une noisette, et de différentes couleurs; je recouvre le tout d'une couche de 2 à 3 centimètres de neige fortement tassée, et j'expose le tout aux rayons du soleil à 11 heures 40 minutes du matin. Au bout de 45 minutes d'exposition au soleil, je place le bassin, recouvert d'une plaque métallique dans un mélange de neige et de sel, et le laisse geler fortement. Quelques heures après, je dissèque attentivement avec un canif la neige contenue dans le bassin, et retrouve l'une après l'autre les pierres qui y étaient enchassées.

J'ai constamment obtenu les résultats suivants :

1^o Les pierres blanches (spath calcaire ou quartzite) n'avaient pas fondu la neige autour d'elles, ou ne l'avaient fondue qu'à un degré minime.

2^o Les pierres noires (calcaire) avaient, par la fusion de la neige, développé autour, et surtout au-dessus d'elles, une cavité parfaitement comparable à celles que j'ai décrite autour des pierres enchassées du glacier du Rhône.

³ La quantité de chaleur réfléchie par les rochers peut-être considérable, si l'on en juge par la fusion rapide de la rive droite du front du glacier (voir notre plan).

3° La cavité produite ainsi autour de la pierre, était plus ou moins profonde suivant l'intensité de la coloration de la pierre et suivant sa distance de la surface libre de la neige. La hauteur la plus forte que j'ai constatée dans ces cavités a été de 5 millimètres environ.

Ces expériences combinées avec l'élévation de température de la boule noircie d'un thermomètre enchâssé dans la glace, confirment d'une manière très satisfaisante, l'interprétation que j'ai donnée de la formation de la cavité des pierres du glacier du Rhône.

Je vais maintenant utiliser ces observations pour expliquer, d'une manière plus exacte, à ce que je crois, que cela n'a été jusqu'à présent fait, un petit détail que présente à l'observation la surface des glaciers.

Tous ceux qui ont étudié un peu attentivement les glaciers, ont été frappés de la singulière anomalie que présentent certaines pierres reposant à la surface du glacier. Là où celle-ci est recouverte par le gravier irrégulier qui la salit, on peut généralement remarquer un certain nombre de pierres de ce gravier qui au lieu de reposer comme la grande généralité des cailloux sur la surface même de la glace ou dans de légères dépressions de quelques millimètres de profondeur, sont situées au fond de trous verticaux de 5 à 10 centimètres de profondeur. Un nombre relativement très petit des pierres qui recouvrent une surface donnée, présente ce caractère, et cette position est assez frappante pour avoir souvent été décrite. Tous les auteurs qui s'en sont occupé, l'expliquent par la fusion de la glace, causée par une absorption inégale de la chaleur solaire; certaines pierres, disent-ils, absorbant une grande quantité de chaleur, se réchauffent puissamment, et alors fondent la glace au-dessous d'elles, jusqu'à ce qu'elles se trouvent placées au fond d'un puits vertical. A ce moment, soustraites à l'action directe des rayons solaires par les parois du trou au fond duquel elles gisent, elles ne s'échauffent pas plus que la glace qui les entoure. Celle-ci disparaît ensuite sous l'influence de l'ablation, et la pierre réapparaît petit à petit à la surface, pour recommencer à s'enfoncer, alors qu'elle aura de nouveau été échauffée par les rayons du soleil.

Le nombre relativement très-faible de pierres offrant cette position anormale au fond de puits verticaux aurait dû avertir du peu de justesse de cette interprétation. Je n'ai point fait de dénombrement précis à cet égard, mais j'exprimerai l'impression que m'a fait ce nombre relatif, en disant que, sur le glacier du Rhône, c'était moins du 5 pour cent des pierres de la surface, qui gisaient dans ces puits verticaux de 1 à 10 centimètres de profon-

deur. Or si la théorie jusqu'à présent adoptée était exacte, toutes les pierres colorées de la surface du glacier devraient être dans ce cas et présenter tous les degrés intermédiaires entre un enfouissement nul et un enfouissement maximum.

N'avons-nous pas, au contraire, dans ce que je viens de décrire, dans l'existence, au-dessus des pierres enchassées, d'une cavité creusée aux dépens de la glace, n'avons-nous pas là l'explication toute simple des puits verticaux, dont je discute à présent l'origine? Que l'ablation vienne à enlever la glace jusqu'au niveau de la partie supérieure de la cavité d'une pierre enchassée, la pierre apparaîtra au fond de son trou, tout-à-fait dans les mêmes conditions que nous observons à la surface du glacier. La rareté des pierres enchassées dans la glace concorde bien avec le petit nombre des pierres de la surface, qui gisent au fond de puits verticaux.

L'on m'objectera que l'échauffement, par l'action des rayons solaires, des graviers isolés à la surface du glacier doit faire fondre la glace au-dessus d'eux et les faire enfoncer. — Je le reconnais; c'est un fait incontestable, et prouvé par les creux profonds de quelques millimètres, dans lesquels sont incrustés tous les grains de sable, tous les graviers isolés à la surface des glaciers, prouvé encore par la dépression que forme sur le glacier le corps d'un insecte ou la feuille morte que le vent y a portée; j'utilise même, on l'a vu, cette élévation de température qui doit avoir lieu, même au travers d'une couche de glace, pour expliquer la formation de la cavité des pierres enchassées. Mais j'estime que la valeur de l'ablation doit être en somme plus rapide que celle de l'enfoncement dû à cette cause, et que, en définitive, l'échauffement d'un corps opaque ne peut pas à la surface du glacier l'enfoncer à plus de quelques millimètres dans la glace.⁴

En résumé, j'attribue à l'échauffement par les rayons solaires, agissant à travers la glace la formation de la cavité qui domine les pierres enchassées dans la glace.

J'attribue à la mise au jour, par les progrès de l'ablation de cette cavité, l'existence à la surface du glacier des trous verticaux profonds au fond des quels gisent des pierres isolées.

⁴ Dans quelques circonstances exceptionnelles, cet enfouissement des corps opaques placés à la surface, peut cependant peut-être dépasser en rapidité la valeur de l'ablation. Ainsi le cas où un soleil très intense réchaufferait fortement les corps opaques, tandis que la sécheresse extrême de l'air maintiendrait, par le froid dû à l'évaporation, la surface du glacier gelée; l'ablation serait alors presque nulle, la glace n'étant attaquée que par l'action de l'évaporation, l'enfoncement des corps opaques pourrait par contre être assez important.



APPENDICE V.

Plan du front du glacier du Rhône et de ses moraines frontales, levé le 30 juillet 1870, par Ch. DUFOUR et F.-A. FOREL.

La plaine d'alluvions et de débris erratiques, qui s'étend au pied du glacier du Rhône, montre des traces assez évidentes d'anciennes moraines, pour que nous ayons cru utile de consacrer quelques heures au relevé trigonométrique de ses principaux détails.

S'il est en effet un phénomène naturel qui puisse avec quelque sûreté donner des indications exactes sur l'état thermométrique et hygrométrique d'une époque ou d'un siècle, c'est l'état du plus ou moins grand avancement des glaciers. M. L. Dufour, dans ses notes sur le problème de la variation du climat¹, a bien montré l'utilité que l'on pourrait tirer d'observations précises de l'état des glaciers.

Nous trouvons dans les auteurs que nous avons sous la main quelques faits plus ou moins détaillés sur l'état d'avancement du glacier du Rhône dans les cent dernières années. Mais faute de mesures précises, nous ne pouvons les comparer à l'état actuel.

Il n'est en effet pas possible de rien tirer du dessin, plus que fantastique, quoique dessiné d'après nature, par F. Meyer, qui forme la planche XII. de Gruner². La petite maison située à gauche du dessin doit correspondre à peu près à la situation actuelle de l'hôtel.

Dans de Saussure³ nous trouvons les observations suivantes faites par Besson : « M. Besson observa en 1777, au bas du glacier du Rhône, trois moraines, dont l'une était à 34 toises de l'extrémité du glacier, l'autre à 85 toises, et la troisième à 120. Il suit de là qu'à trois époques différentes le glacier a reculé et qu'il était alors diminué de 120 toises. Les bergers assurèrent même à M. B. que depuis 20 ans il reculait continuellement. » La description

¹ Bull. soc. vaud. sc. nat., X, p. 370 sq.

² Histoire naturelle des glaciers de Suisse, traduite de Gruner, par de Kéralio. Paris 1770, p. 148, tab. XII.

³ *De Saussure* : Voyages dans les Alpes, §1722, t. III, p. 485. Neuchâtel 1796.

que nous donne, en 1783, de Saussure, du glacier inférieur, saisissante d'exactitude et de vérité, comme tout ce qu'a écrit ce grand peintre de la nature, correspond passablement à l'état actuel des choses. Voici ce qu'il dit : « Ce glacier descend hérissé de pyramides de glace, variées par leurs grandeurs et par leurs formes ; il se resserre ensuite pour passer entre deux rochers, après quoi il s'élargit de nouveau en éventail et vient former un immense segment de sphère, du sommet duquel partent, comme d'un centre, de profondes crevasses, couleur d'aigue marine, qui aboutissent à sa circonférence. Au bas de ce segment s'ouvrent deux arches, aussi de glace, d'où sortent avec impétuosité deux torrents qui, après s'être réunis, viennent porter à la source du Rhône le premier tribut qu'elle reçoive. »

Pour appliquer cette description à l'état du glacier en 1870, nous n'aurions qu'à changer cette dernière phrase et la remplacer par la suivante : Au bas de ce segment s'ouvre, sur la rive gauche du glacier, une grande voûte de glace qui donne passage à un torrent impétueux. Ce torrent provient en partie des eaux du glacier de Gratschlucht (situé entre le Blauberg et le Længisgrat), lesquelles passent en tunnel sous la coquille du glacier du Rhône, en partie des eaux de fusion du glacier du Rhône lui-même. Les eaux de fusion du milieu et de la portion de droite du glacier du Rhône forment un ou deux petits ruisseaux qui vont s'unir au torrent principal.

Le frontispice du troisième voyage de de Saussure⁴ semble indiquer un état d'avancement du glacier, plus considérable que ce qu'il est aujourd'hui ; ce dessin semble faire avancer le front du glacier jusque près de la source thermale du Rhône. Mais il serait plus qu'imprudent de tirer une conclusion d'une figure aussi imparfaite.

De Charpentier⁵ ne nous donne pas d'indications bien précises, sauf cependant la donnée générale que jusqu'en 1840, l'année 1818 a offert, pour l'ensemble des glaciers de la Suisse, et pour le glacier du Rhône en particulier, l'état d'avancement le plus considérable du siècle. Une excellente lithographie, dessinée d'après nature en 1817, par M. Lardy, nous servira pour la détermination de l'une des moraines que nous avons retrouvées.

Venetz⁶ a constaté, au devant du glacier du Rhône, la présence, en 1826, de neuf anciennes moraines, dont les quatre ou cinq dernières ont seules conservé leur forme caractéristique.

⁴ Loc. cit., p. 439.

⁵ *De Charpentier* : Essai sur les glaciers, p. 363, pl. 8. Lausanne 1841.

⁶ Cité par E. Desor. *Excursions et séjours dans les glaciers*. Neuchâtel 1844, p. 130.

Desor⁷ enfin, en 1839, nous parle d'une série de digues ou d'anciennes moraines qui indiquent autant de retraits successifs du glacier.

Quel ne serait pas l'intérêt d'un plan exact, nous indiquant année par année la position relative du front du glacier, nous donnant ainsi d'une manière graphique le résumé général de l'ensemble si compliqué de facteurs thermométriques, hygrométriques et anémométriques qui se combinent pour faire avancer ou reculer les glaciers.

Nous appelons de tous nos vœux des travaux dans cette direction faits, année par année, sur les principaux glaciers des Alpes, et nous les recommandons spécialement aux membres du club alpin suisse, qui a entrepris avec ardeur et bonne volonté l'étude intéressante de nos montagnes.

Nous avons, pour ce qui regarde le glacier du Rhône, constaté les faits suivants :

Tout d'abord le glacier est, en 1870, dans une période de retrait fort prononcée. Sur une surface large de 300 mètres au devant de son front, nous n'avons rien trouvé qui puisse s'appeler une moraine frontale. Un ramassis de blocs et de cailloux déposés au hasard par la fonte du glacier qui les soutenait, les traces de l'érosion des ruisseaux et torrents formés par les eaux de fusion, voilà tout ce que présente à l'observateur cette large surface qui s'étend entre le front du glacier et la première moraine frontale.

Si de cette zone on descend la vallée en se dirigeant vers l'hôtel du glacier du Rhône, l'on rencontre successivement trois enceintes demi-circulaires dont la concavité regarde le glacier, et qui sont évidemment d'anciennes moraines. Nous les avons figurées sur notre plan, et nous avons pu déterminer l'âge de 2 d'entre elles.

La première moraine, en descendant, date de 1856. Les habitants du vallon, et en particulier le propriétaire de l'hôtel, M. Seiler, ont pu nous l'affirmer positivement. Cette moraine de 1856 était distante, en juillet 1870, d'environ 320 mètres du front du glacier. Donc depuis 14 ans le glacier est en retrait et s'est reculé d'une distance de 330 mètres soit en moyenne de 23 mètres par an.

La deuxième ligne de moraine, distante de 420 mètres environ du front actuel du glacier du Rhône, date de 1818. Pour la déter-

⁷ Id. p. 129.

mination de cette date, nous n'avons pas eu de témoignages aussi positifs que pour la précédente; mais nous croyons cependant pouvoir nous fonder :

1° Sur le dire vague des habitants du vallon.

2° Sur l'état de la végétation qui recouvre cette moraine. Les plantes et les arbrisseaux l'ont envahie et recouverte beaucoup plus que la moraine de 1856; la végétation y est cependant moins avancée que dans la plaine qui est située au-dessous d'elle.

3° Sur le fait que l'année 1818 a été, pour la grande généralité des glaciers des Alpes, l'époque d'avancement maximum dans notre siècle.

4° Enfin, nous nous appuierons sur le dessin de Lardy (pl. 8 de Charpentier), qui nous donne, pour le glacier en 1817, une figure correspondant parfaitement à ce que nous pouvons nous représenter, en supposant le glacier refoulant notre moraine de 1818.

Quant à la ligne de moraines sur lesquelles sont construites les cabanes de bergers, au-dessus du pont de la route stratégique de la Furka, nous n'avons pas pu essayer d'en déterminer la date.

En résumé, en prenant pour point de repère l'angle SE. de l'hôtel du glacier du Rhône, nous dirons que

la moraine de 1818 en est distante d'environ	. . . .	180 ^m
» 1856 id.	. . . .	280 ^m
le front du glacier, le 30 juillet 1870, en est distant d'environ		600 ^m

Quelques notes encore sur notre plan et sur la manière dont nous l'avons établi.

Nous avons commencé par mesurer à la chevillière deux lignes de base réunissant les stations *A* et *B* (extrémités sud des moraines de 1818 et de 1856), et les stations *B* et *D* (cette dernière à l'est de la précédente).

La ligne <i>AB</i> mesurait	. . .	115,99 ^m .
» <i>BD</i> »	. . .	176,46 ^m .

De ces trois stations, nous avons mesuré, à l'aide d'un bon sextant, et avec des vérifications suffisantes, les angles des triangles *ABC* et *BDC*, réunissant les stations *A*, *B* et *D* et la station *C*, située à l'extrémité nord de la moraine de 1856. Nous avons ensuite calculé la valeur de la ligne *BC*, et avons trouvé

en la calculant par le triangle <i>ABC</i>	. . . . .	286,41 ^m ,
» » <i>BCD</i>	. . . . .	286,56 ^m .

Ces valeurs se rapprochent assez pour que nous ayons pu, avec sécurité admettre pour la ligne *BC*, qui nous a servi de base pour la triangulation générale, une valeur de 286,50^m.

Des points *B* et *C* nous avons ensuite déterminé trigonométriquement, à l'aide du sextant, la position des onze points qui sont désignés sur notre plan par un petit cercle.

Afin de faciliter pour l'avenir un travail de ce genre, nous avons fait planter en terre, aux deux points *B* et *C* de nos stations principales, deux forts piquets en mélèze, et nous les avons recouverts d'un petit cairn en pierres sèches. Le piquet planté au point *B* est long de 48 centimètres, il porte sur l'un de ses côtés un trait à la scie, à 14 centimètres de la tête. Le piquet planté au point *C* est long de 52 centimètres, il a sur l'un de ses côtés 2 traits à la scie, l'un à 10 centimètres et l'autre à 15 centimètres de la tête.

L'échelle de notre plan (*pl. 29*) est au $\frac{1}{4000}$.



Plan du front
du
GLACIER DU RHÔNE
*et de ses
Molaines frontales.*
levé le 30 Juillet 1870.

