

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	10 (1868-1870)
<b>Heft:</b>	64
 <b>Artikel:</b>	Recherches sur la condensation de la vapeur aqueuse de l'air au contact de la glace et sur l'évaporation
<b>Autor:</b>	Dufour, C. / Forel, F.-A.
<b>Kapitel:</b>	31-40
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-256587">https://doi.org/10.5169/seals-256587</a>

### Nutzungsbedingungen

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

### Conditions d'utilisation

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

### Terms of use

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

**Download PDF:** 13.01.2026

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

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 avions 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 châle 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 avions 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.		
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 devient 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 reconnaissions.

**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 faisions 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	5,46	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	5,49	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 sec<sup>8</sup>, 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 indiquerons 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			

<sup>8</sup> 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  $0^{\circ}$ . 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  $0,078\text{mm}$  et l'expérience XXIV nous avaient donné une valeur horaire de condensation de  $0,144\text{mm}$ .

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 ( $4,53 \text{ mm}$ ), 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 aplatie. 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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> Que la valeur de cette condensation est assez considérable.

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

1<sup>o</sup> La quantité de vapeur d'eau condensée;

2<sup>o</sup> Le dessèchement de l'air en contact avec la glace;

3<sup>o</sup> L'effet de la chaleur latente dégagée par la condensation.

Reprendons successivement ces trois points de vue :

**40.** 1<sup>o</sup> La quantité d'eau condensée à la surface du glacier est considérable; nous ne pouvons pas nous hazarde 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  $+ 1^{\circ}$

»	0,100	id.	$+ 2^{\circ}$
»	0,150	id.	$+ 3^{\circ}$

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 Genève<sup>9</sup>.

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.

**A 1. 2<sup>e</sup>** 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 dessication 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

<sup>9</sup> 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<sup>m</sup>,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 hazarder à calculer ; mais cette remarque me commande à ce point de vue une réserve dont nous ne voulons pas sortir.