

M

Note sur les eaux de fonte des glaciers
de la Haute Maurienne
Leur action sur les carbonates

par Camille EK,
Liège.

Extrait de la Revue Belge de Géographie
Quatre-vingt-huitième année - 1964 - Fascicules 1-2

NUMERO SPECIAL
KARST ET CLIMATS FROIDS

Note sur les eaux de fonte des glaciers de la Haute Maurienne Leur action sur les carbonates

par Camille EK,
Liège.

Summary.

Some pH measurements carried out in Savoy (France) on glaciers and in outflowing streams have shown that the water is strongly alkaline (pH between 7.65 and 8.90).

Highest pH values are found at the edge of the glacier snout. Upwards towards the névé, and downwards along the outflowing stream, pH becomes lower and lower (figs. 2 to 6).

One of the streams studied runs on pure limestone, beneath the glacier snout, and another on impure siliceous dolomitic limestone; others flow over calcitic micaschists. All waters had very low calcareous concentrations (62 mg/l or less).

It is assumed that the cause of high pH and low (and slow) solution action is the escape of CO₂ during ice compaction and ice movements.

After a flow of several kilometers, pH in the streams is still alkaline, and calcareous content small (fig. 7); this is thought to be due to the slow CO₂ diffusion rate from air to water.

Glacier melt-water in Savoy, in September 1964, was thus not very aggressive towards limestone.

Résumé.

Quelques mesures de pH ont été faites en Maurienne (Savoie) sur des glaciers, au front des glaciers, et dans quelques cours d'eau proglaciaires. Les pH les plus élevés s'observent à hauteur du front du glacier; en amont, vers le névé, comme en aval, vers la vallée de l'Arc, la basicité de l'eau diminue.

Lorsqu'elles coulent sur un substratum contenant du calcaire, les eaux de fonte étudiées en dissolvent peu.

La cause des pH élevés et de la faiblesse de la dissolution est le départ du CO₂ lors de la cristallisation et de la compaction de la glace.

Comme, après quelques Km de parcours, le pH reste élevé et la teneur en calcaire faible, il est vraisemblable que la diffusion du CO₂ de l'air dans l'eau est très lente. Les eaux de fusion des glaciers étudiés sont donc peu agressives vis-à-vis des roches carbonatées.

Que M. le Professeur P. Macar, qui m'a aidé de ses conseils et qui a bien voulu relire le manuscrit, trouve ici l'expression de ma vive gratitude. A M. H. Roques aussi je veux dire ma reconnaissance : c'est à lui que je dois notamment l'idée des calculs de pression partielle de CO₂ que l'on trouvera dans ce travail.

La haute Maurienne, bassin du cours supérieur de l'Arc, est située en Savoie, dans la zone interne des Alpes occidentales.

Quelques caractères des eaux de fonte des glaciers y ont été étudiés — principalement le pH et la teneur en carbonates — sur les glaciers et dans leurs affluents, au mois de septembre 1964 (1).

L'étude a montré que les eaux provenant de la fusion de la glace sont nettement basiques, et que leur agressivité est très faible vis-à-vis des roches carbonatées.

Observations et mesures.

Le présent travail n'est basé que sur l'étude d'une soixantaine de points, dont la plupart sont décrits dans les tableaux I à X.

(1) Les observations ont été faites avec le concours de MM. A. Pissart et G. Seret, du Laboratoire de Géologie et Géographie physique de l'Université de Liège, et de plusieurs étudiants en géographie de la même Université, au cours d'un Camp d'Etudes à Lans-le-Villard (Savoie).

Ces points sont répartis en quatre endroits de la haute Maurienne (fig. 1) :

- A. Le secteur du Glacier des Evettes, près de la frontière italienne, au S. des sources de l'Arc.
- B. Le secteur du Glacier du Grand Pissailas et du Glacier de la Jave, près du col de l'Iseran.
- C. Le torrent provenant du Glacier de la Mahure, dans le Massif de la Vanoise, au N. de Termignon.
- D. L'Arc même, à 2 km en amont de Lans-le-Villard.

Le beau temps qui durait depuis plusieurs semaines s'est maintenu pendant la durée des mesures, sauf les 5 et 6 septembre, où quelques précipitations ont légèrement dilué les eaux étudiées.

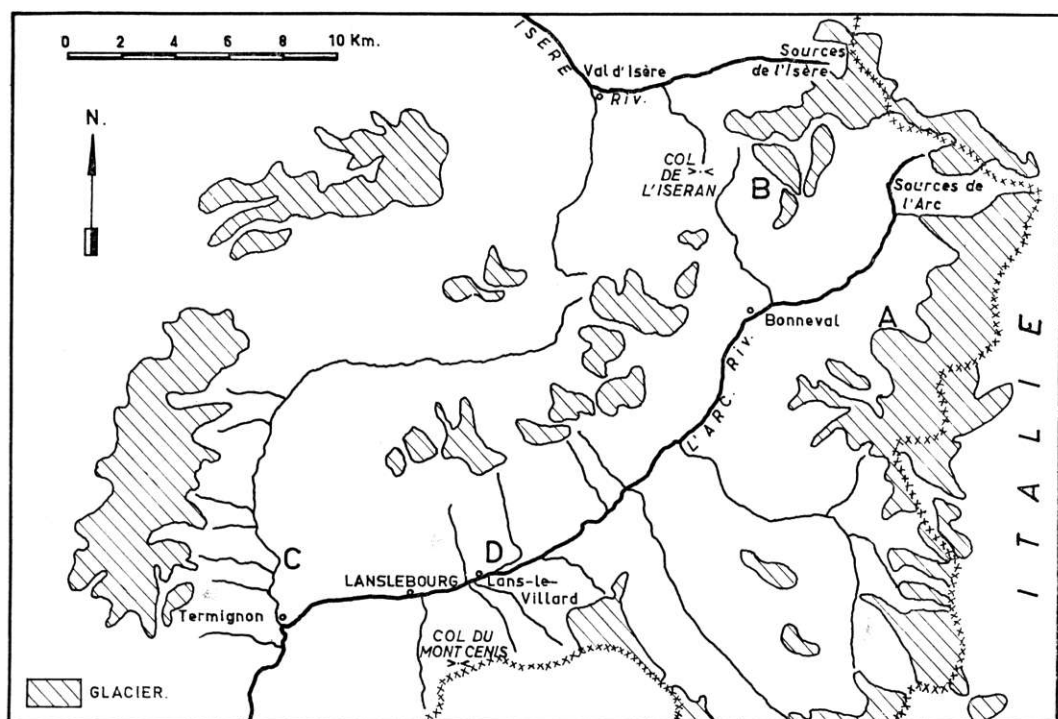


Fig. 1. — Schéma de localisation des secteurs étudiés.

A : Secteur des Evettes; B : Secteur du col de l'Iseran; C : Secteur du glacier de la Mahure; D : Secteur de la vallée de l'Arc.

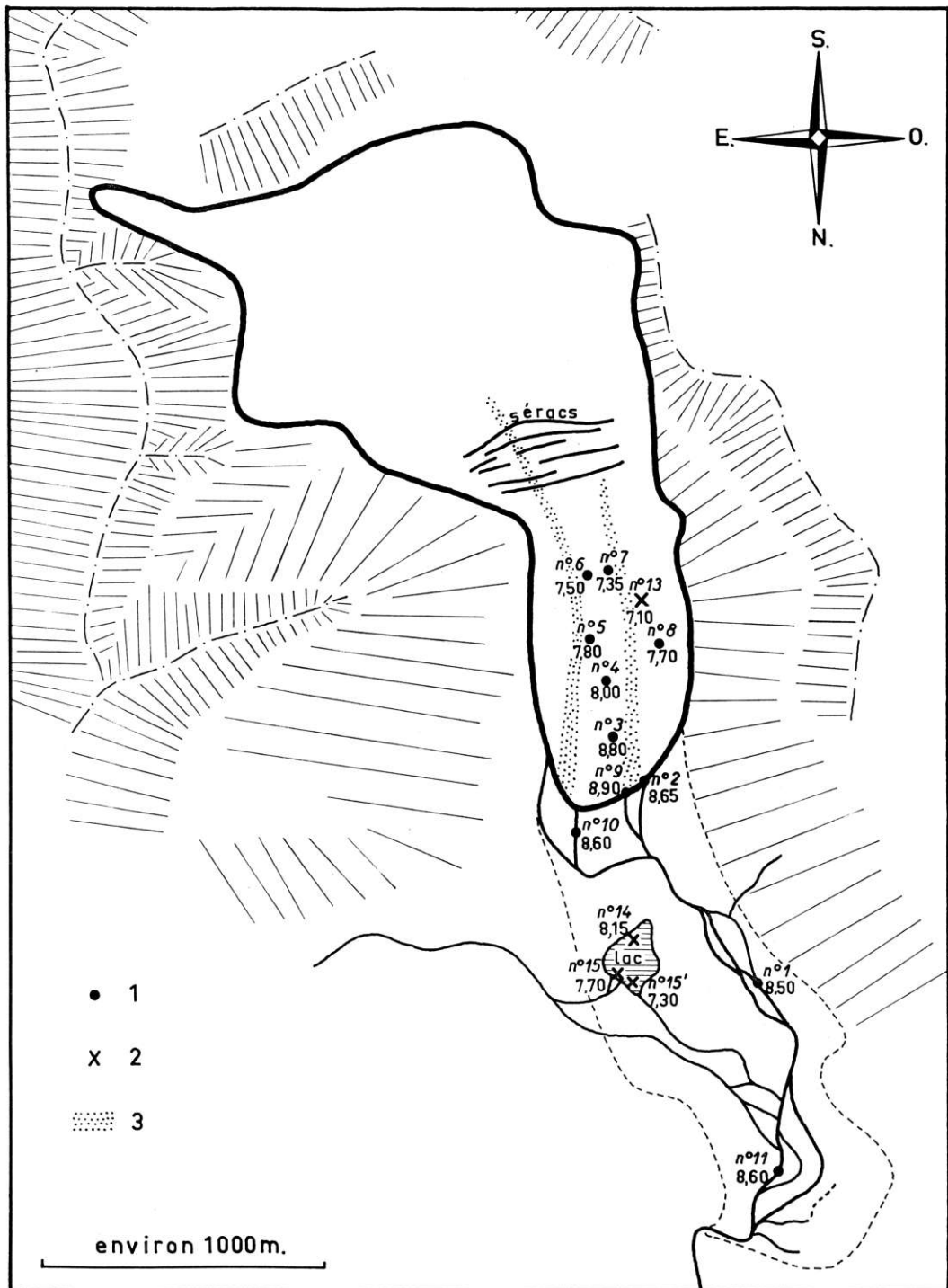


Fig. 2. — Le Glacier des Evettes. Mesures du 2 septembre.
 1 : Localisation des mesures rapportées dans le tableau I; 2 : Localisation des mesures rapportées dans le tableau II; 3 : Moraine médiane.

A. *Au Glacier des Evettes.*

Le Glacier des Evettes repose principalement sur les schistes lustrés, sur des gneiss et des serpentines. Les schistes lustrés sont ici des calc-schistes constitué essentiellement de calcite, muscovite et quartz (E. Raguin, 1931).

Exposé au N., le Glacier des Evettes, en régression comme tous ceux de la région, a encore une superficie de l'ordre de 4 Km²; il jouxte une série de glaciers de la même importance.

La langue du Glacier des Evettes est divisée en trois parties par deux longues moraines médianes (zones pointillées sur les figures 2 et 3); ce sont ces trois parties qui, pour la commodité, sont nommées dans les tableaux I à V partie ouest, partie médiane et partie est.

Mesures du 2 septembre 1964.

La plupart des mesures sont présentées dans le tableau I, mais on a rassemblé dans le tableau II quelques mesures relatives à des points situés en dehors de la circulation principale de l'eau, à partir du névé vers le torrent proglaciaire; ces points ne s'intègrent donc pas dans l'évolution générale du courant liquide qui prend naissance sur le glacier.

Les tableaux I et II montrent que tous les pH mesurés sont supérieurs à 7 et que la plupart sont même supérieurs à 8.

La figure 2 localise les différents pH relevés le 2 septembre; une évolution générale s'y dessine nettement.

Le pH du torrent proglaciaire, sur les quelques 2 Km de la longueur qui en a été étudiée, est d'environ 8,60. Au contact même du glacier, c'est-à-dire à l'extrémité aval des bédrières et torrents sous-glaciaires qui alimentent les divers bras de l'affluent, le pH peut monter jusque 8,90. Au-delà, sur le glacier, le pH décroît assez régulièrement en direction du névé. Les points les plus hauts atteints, situés à plus d'un Km en amont de l'extrémité actuelle de la langue, montrent que les filets d'eau de fonte qui y circulent ont un pH de 7,35 et 7,50. Le glacier est par endroits criblé de petits trous assez peu profonds dans lesquels de l'eau est accumulée; la circulation y est lente sinon nulle; ils sont probablement dûs à l'enfoncement dans la glace de cailloux qui reposaient dessus; dans un de ces trous, qui contenait environ 1 l l'eau, un pH de 7,10 a été mesuré.

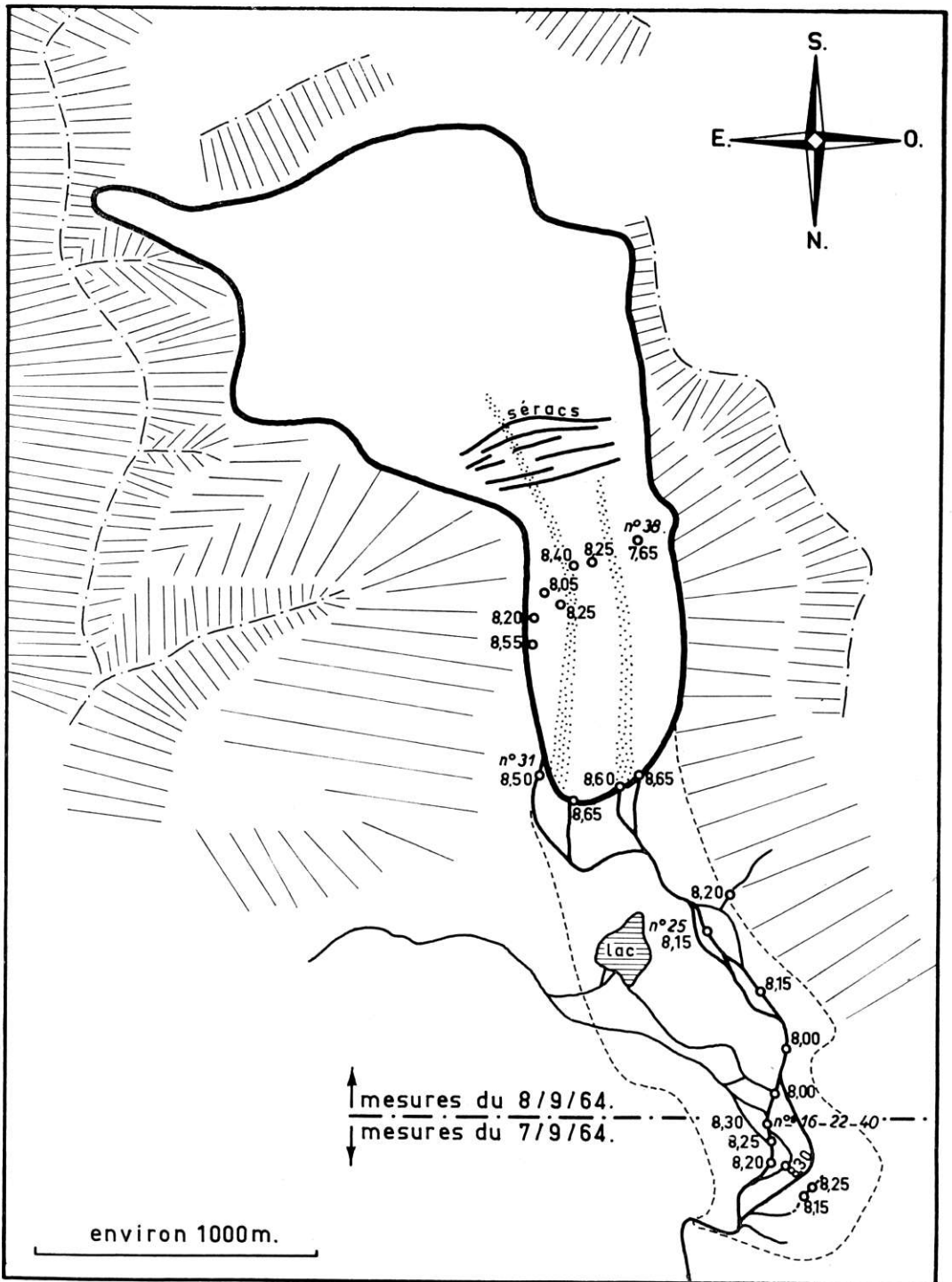


Fig. 3. — Le Glacier des Evettes. Mesures des 7 et 8 septembre.
 Un certain nombre de numéros de mesures ont été notés à titre de repères; les autres points pourront être identifiés dans les tableaux III et IV par leur pH.

Il apparaît donc que dans les eaux de fonte, le jour des observations, le pH, faiblement basique au moment de la fonte, devenait de plus en plus basique vers le bas du glacier, et passait par un maximum (8,60 à 8,90) à l'extrémité de la langue, pour décroître ensuite dans le torrent proglaciaire.

Quelques pH ont été mesurés en dehors de cette circulation générale; ils sont donnés dans le tableau II.

Mesures des 7 et 8 septembre 1964.

Ces mesures sont consignées dans les tableaux III et IV et repérées sur la carte 3.

Le tableau III montre que, dans le torrent proglaciaire, le caractère basique de l'eau s'atténue de l'amont vers l'aval. Le fait est moins net dans les bras secondaires, à circulation plus lente (point 19) que dans les chenaux importants.

L'accentuation progressive mais très nette de la basicité vers l'amont se confirme dans les mesures 22 à 31 du tableau IV. Les pH les plus élevés mesurés se situent à la langue même du glacier, aussi bien dans les torrents provenant des bédrières que dans les courants sous-glaciaires, et apparemment sans qu'il y ait une influence notable du débit.

Sur le glacier même, les pH sont moins élevés qu'à l'extrémité de la langue et, d'une manière générale, ont tendance à diminuer vers l'amont. Le pH le plus bas, 7,65, a été observé au point le plus amont atteint ce jour-là. Les points 32 à 34 montrent que l'évolution du pH est sensible même sur une distance de quelque 100 m seulement dans un même filet d'eau.

La comparaison des mesures 16, 22 et 40 montre que, dans le torrent proglaciaire, le pH augmente au cours de la journée, passant de 8,00 le matin à 8,30 ou 8,40 au milieu de l'après-midi, en même temps que le débit et la coloration grise (2) augmentent notablement par suite du rythme journalier de la fusion. Si l'on considère les différences des pH mesurés et les heures auxquelles ils ont été pris, on voit cependant

(2) Lors des mesures ici rapportées, cinq échantillons d'eau ont été prélevés, qui ont notamment montré que la coloration grise est due à du matériel sablonneux et limoneux qui se dépose au fond des flacons après peu d'heures de repos.

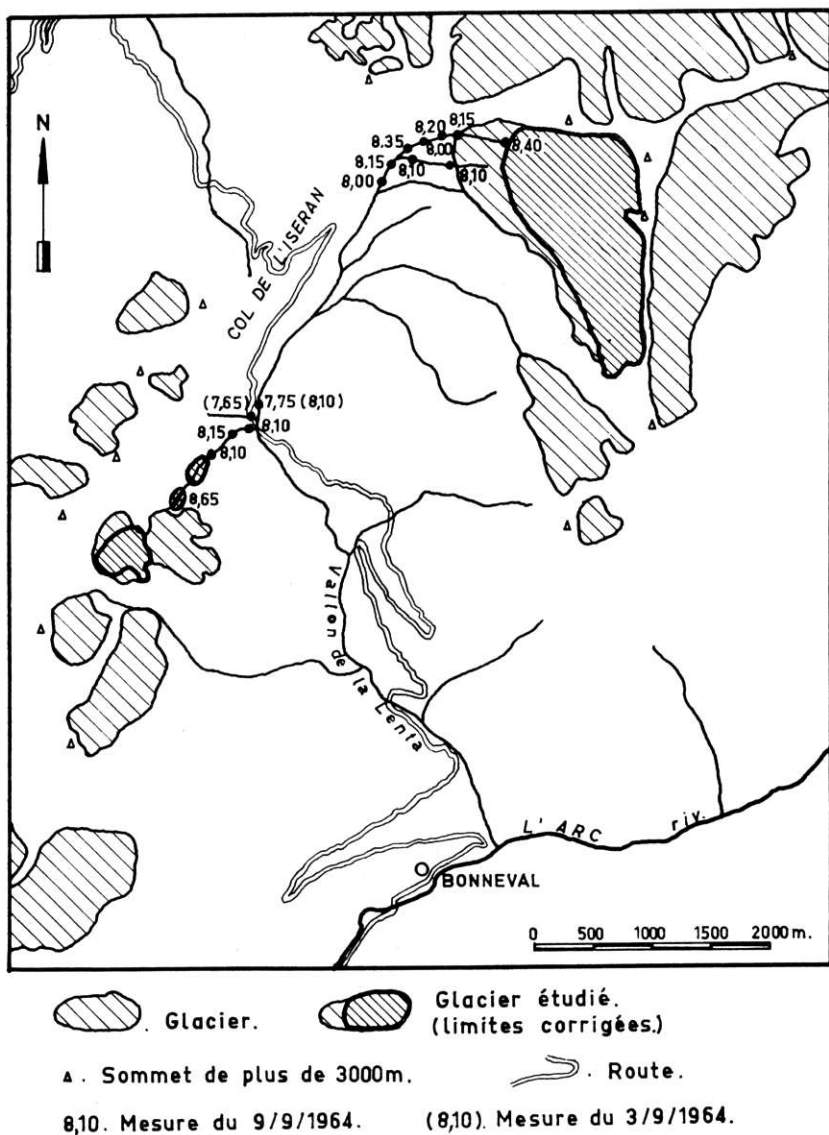


Fig. 4. — Le secteur du col de l'Iseran.

Au N.E., le Glacier du grand Pissailas; à l'O., les culots de glace morte de la Jave; les contours des glaciers étudiés ont été corrigés d'après des photos aériennes de 1956.
Les points sont repérés par leur pH.

que la variation journalière n'affecte *en rien* le sens des changements de pH tel qu'il ressort des observations rapportées.

La nature du substratum est faiblement calcaire. Dans le tableau V sont consignées quelques mesures de teneur de l'eau en substances alcalines, et de résistivité. Les T.A.C. (3) sont faibles : si l'on convient d'exprimer en mg CaCO_3 par litre la teneur en carbonates des eaux étudiées, cette teneur varie entre 13 et 34 mg/l. A titre de comparaison, disons que ces teneurs sont *inférieures* à celles qu'ont en général les eaux qui circulent en Belgique *sur* ou *dans* les roches siliceuses du Dévonien inférieur de l'Ardenne septentrionale. Or, aux Evettes, la calcite peut se trouver en cristaux et en veines dans les schistes lustrés qui constituent pour une part non négligeable (vraisemblablement la moitié) le lit même du glacier et qui abondent dans les moraines; celles-ci montrent d'ailleurs aussi quelques rares cailloux de calcaire blanc.

B. *Au col de l'Iseran.*

Le col de l'Iseran sépare les bassins de l'Isère (au Nord) et de l'Arc (au Sud). Des mesures ont été faites sur le versant mauriennais, dans un affluent de l'Arc et sur deux des glaciers qui l'alimentent (tableaux VI, VII et VIII).

Le vallon de la Lenta est logé dans une étroite bande de cargneules (calcaires magnésiens) gypsifères; les mesures de T.A.C. du 3 et du 9 septembre 1964 (tableau VI, 41 et tableau VII, 55) donnent respectivement les chiffres fort faibles de 57 et 62 mg CaCO_3 /l. Certes une grande partie du débit provient d'affluents qui ont coulé surtout sur les schistes lustrés, mais ceux-ci sont calcitiques.

C'est dans un ruisseau d'alpage affluent de la Lenta qu'a été mesurée la plus forte teneur en calcaire de ce secteur : 88, après 400 m de parcours de l'eau sur schistes lustrés puis 400 m sur cargneules gypsifères.

Le Glacier du grand Pissailas.

Le Glacier du grand Pissailas repose essentiellement sur des calc-schistes : les « schistes lustrés ». La carte géologique de E. Raguin et

(3) Titre alcalin complet : mesuré suivant la méthode standardisée N.B.N. 343, mais avec HCl 0,033 N. au lieu de 0,1 N. en raison des très faibles teneurs observées.

F. Hermann (1930) indique en outre la présence d'une mince bande de gneiss et un petit affleurement de roches vertes.

D'une superficie d'environ 2 Km², le glacier est exposé à l'O. et fait partie d'un ensemble de glaciers.

Des mesures ont été faites depuis la langue du glacier jusqu'à un point déjà cité dans le vallon de la Lenta, qui recueille notamment les eaux des torrents proglaciaires; le point aval des observations est situé à quelque trois kilomètres en aval du glacier. Voir tableau VII et la carte 4.

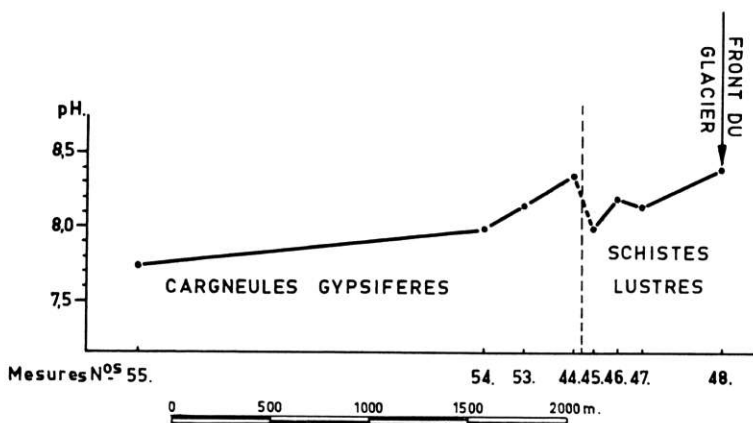


Fig. 5. — L'évolution des pH au long du ruisseau de Pers, torrent proglaciaire du grand Pissailas.

Le graphique (fig. 5) montre les variations de pH au long du cours d'eau principal étudié.

Le pH, égal à 8,40 au bas du glacier, descend assez régulièrement vers l'aval à partir de la naissance du torrent proglaciaire; une seule irrégularité s'observe : à l'aval de l'arrivée du torrent sur les roches carbonatées du Trias, le pH remonte brusquement.

La comparaison des mesures 43 et 53 montre qu'ici aussi le pH en un point augmente au cours de la journée, ou si l'on préfère, que les hauts pH s'étendent vers l'aval durant la période diurne.

L'eau du ruisseau sous-glaciaire principal a un T.A.C. de 42 à sa sortie du glacier; à 3 Km en aval, le torrent proglaciaire (qui a reçu il est vrai plusieurs autres affluents provenant en très grande majorité du même glacier) a un T.A.C. de 62 mg/l.

Le Glacier de la Jave.

La Jave n'a plus de glacier que le nom : un pauvre névé de quelques ha est coupé de deux culots de glace morte qui, plus en aval, occupent encore le fond du vallon de la Jave; ces culots sont traversés en tunnel par le même ruisseau, provenant en grande partie d'eau de fonte.

Le névé est exposé au N.-E.; nul glacier important ne le jouxte. Son substratum est constitué de schistes lustrés et de cargneules gypsifères. Les mesures sont rapportées dans le tableau VIII et les pH ont été repris sur un graphique (fig. 6).

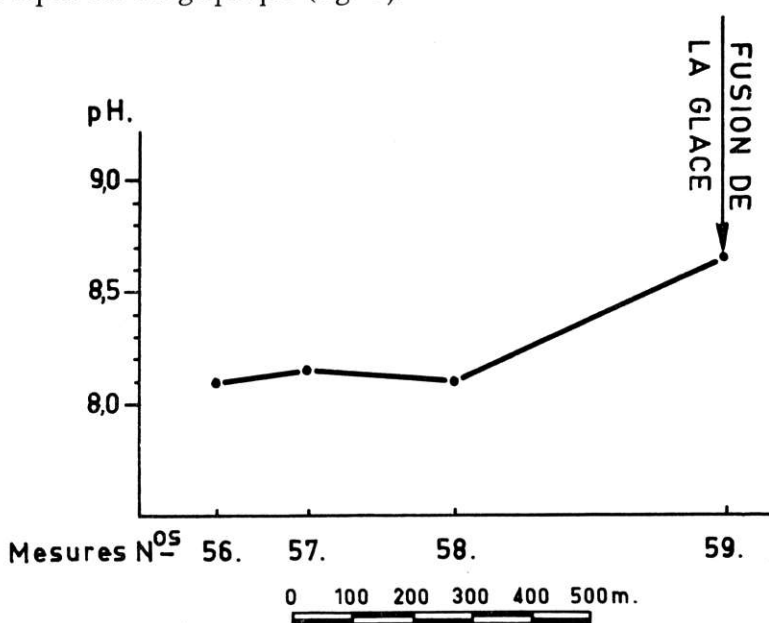


Fig. 6. — L'évolution des pH le long du ruisseau provenant des culots de glace de la Jave.

Ici encore le pH, depuis le culot d'amont de glace morte s'abaisse (de 8,65 à 8,10) vers l'aval.

C. Le torrent du Glacier de la Mahure.

Situé à 2 Km. au N. de Termignon, le torrent du Glacier de la Mahure est le seul cours d'eau étudié provenant d'un glacier situé en

très grande partie sur les calcaires jurassiques du massif de la Vanoise; le torrent effluent parcourt quelques centaines de mètres sur le calcaire puis descend sur des quartzites, des schistes et des amphibolites. A son arrivée dans la plaine, le courant a encore un pH de 8 et son T.A.C. n'est que de 50 (tableau IX).

D. L'Arc en amont de Lans-le-Villard.

Le cours supérieur de l'Arc est alimenté en partie par de nombreux glaciers et en partie par un grand nombre de ruisseaux d'alpages.

Le bassin est constitué de roches très variées où les carbonates sont très modestement représentés (Trias) si ce n'est dans la calcite des schistes lustrés.

L'Arc même coule d'abord dans des gneiss et des micaschistes, puis sur des serpentines et sur les schistes lustrés; un peu en amont de Lans-le-Villard, il passe dans un énorme éboulis, dont une partie est soudée par du carbonate de calcium. On ne peut guère, à cet endroit du cours de l'Arc, considérer qu'il s'agit au point de vue physique et chimique d'une eau proglaciaire.

L'eau avait là, le matin du 11 septembre 1964, un pH de 8,15 et un T.A.C. de 79 (voir tableau X). Au pH considéré, l'eau serait saturée, d'après les courbes établies par Tillmans, par 120 mg de CaCO_3 par litre. Le T.A.C. relativement élevé n'est probablement pas sans rapport, pour une part peut-être modeste, avec l'éboulis consolidé dans lequel des venues d'eau se manifestent, formant d'importants dépôts travertineux. L'eau de ces sourdons a un pH de 7,9 dans les flaques sous-jacentes aux venues; dans les filets d'eau même, le pH est de 7,7 lorsque l'eau passe sur des algues et mousses, et de 8,25 lorsqu'elle ne coule que sur la roche. Le T.A.C. est de 198, l'eau est sursaturée, et c'est ce qu'exprime le dépôt de travertin. Une mesure de dureté a donné le chiffre de 150 mg de CaCO_3 par litre, soit 15 degrés français.

Discussion des résultats.

Les eaux de fonte des glaciers ont la réputation d'être agressives et d'exercer une énergique dissolution au front des glaciers (4).

(4) Les idées exprimées par J. Corbel à ce sujet (Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe, 1957, p. 439 et p. 448 notamment) ont été adoptées par plus d'un auteur.

Certes, les échantillons que nous avons analysés ne sont pas saturés si l'on s'en réfère aux diagrammes classiques de Tillmans (fig. 7). Il est cependant une confusion à éviter, concernant l'agressivité des eaux dont le point représentatif est situé « sous » les courbes de Tillmans (5).

Une eau non saturée en carbonates peut néanmoins être très peu agressive vis-à-vis d'eux. C'est visiblement le cas des échantillons étudiés : les eaux de fusion de la glace (fig. 7, secteur hachuré horizontalement)

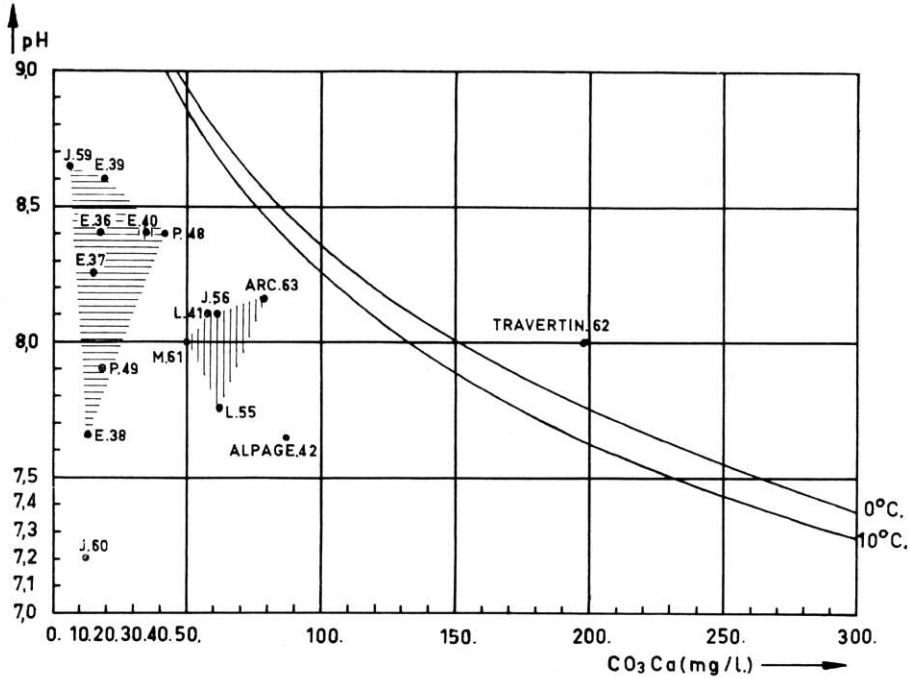


Fig. 7. — pH et T.A.C. de quelques échantillons d'eau.

Hachures horizontales : mesures en secteur glaciaire; hachures verticales : mesures en secteur proglaciaire. Les numéros renvoient aux numéros des mesures dans les tableaux.

sont dans le secteur de non-saturation et sont donc dites agressives. Mais on notera d'abord que, leur pH étant très élevé, la réaction de dissolution du carbonate est lente et limitée.

(5) On ne perd pas de vue ici que les courbes de J. Tillmans sont une approximation, déjà améliorée dans le détail par divers chimistes, et qu'elles supposent en présence seulement l'eau, le carbonate de calcium et le gaz carbonique qui, dans la nature, sont accompagnés d'autres substances.

D'autre part, si l'on considère ensuite sur le même diagramme les points représentatifs des eaux après un certain parcours dans le torrent, on voit que la dureté des échantillons analysés est toujours inférieure à 80 après un parcours variant de 1 à 4 Km. en aval du front du glacier (fig. 7, voir en particulier les points 40, 41, 55, 56, 61). Certes un seul des glaciers considérés, celui de la Mahure, se trouve réellement sur du calcaire franc; les eaux de l'effluent, après plusieurs centaines de mètres, passent sur des roches non calcaires, et, à 2,5 Km. du glacier (tableau IX), leur T.A.C. de 50 mg/l (6) montre qu'elles n'ont guère exercé de dissolution très active au front du glacier (7). Mais l'effluent de la Jave (tableau VIII) circule lui sur les cargneules gypsifères tout au long de son parcours qu'il termine avec un T.A.C. modeste : 61 mg/l.

Si les T.A.C. sont faibles, ils ne sont cependant jamais nuls, même dans les eaux de fonte coulant encore sur le glacier : cela est dû à la présence de roches dans la glace, non seulement dans les moraines, mais également dispersées dans toute la masse du glacier, susceptibles d'être facilement dissoutes vu l'intensité de la fragmentation par le gel.

A partir des T.A.C. et pH mesurés, il est possible de calculer la pression partielle de CO_2 correspondante. Nous avons, avec l'aide de H. Roques, fait ces calculs pour les points desquels pH et T.A.C. étaient connus. Le calcul à faire a été clairement développé par H. Roques (1963, p. 149) et nous ne reprendrons ici que les résultats (8) :

a — *sur les glaciers* : aux Evettes, les eaux coulant sur la glace correspondent aux pressions partielles suivantes :

| N° de la mesure | Lieu du prélèvement | P_{CO_2} calculée |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 36 | filet d'eau | $5,1 \times 10^{-5}$ atm |
| 37 | bédière | $1,1 \times 10^{-1}$ atm |
| 38 | filet d'eau | $3,9 \times 10^{-4}$ atm |

(6) On a mesuré ici le T.A.C. et non la dureté, à cause de l'erreur qu'introduirait la présence de gypse, soluble dans l'eau pure à concurrence de 2,2 gramme/litre à 0°.

(7) C'est l'échec d'une escalade qui nous a empêchés, mes deux compagnons et moi, d'atteindre le glacier, et nous a réduits à prélever l'échantillon à 2,5 Km. en aval de la langue glaciaire.

(8) On notera toutefois que le calcul est rendu approximatif à cause de la très faible dureté des eaux et des pH très élevés (d'après H. Roques, Thèse, 1964, sous presse); pour les points dont le pH est supérieur à 8,3, s'ajoute une erreur de l'ordre de 5 %, du fait que l'on néglige dans le calcul les ions CO_3^{--} devant les ions CO_2H^- . Mais tout ceci ne change rien à l'ordre de grandeur de la pression partielle de CO_2 calculée.

soit une pression partielle à peu près égale ou légèrement inférieure (36 et 37) à celle du CO_2 dans l'air (environ 3×10^{-4});

b — *dans la glace et la neige fondantes* :

| N° de la mesure | Lieu du prélèvement | P_{CO_2} calculée |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 49 | Grand Pissailas | $2,6 \times 10^{-4}$ atm |
| 59 | Jave | $1,6 \times 10^{-5}$ atm |
| 60 | Jave | $9,5 \times 10^{-4}$ atm |

selon qu'il s'agit de stalactites de glace en formation (49), recueillies en morceaux dans un flacon dont l'air ne peut être entièrement exclus, ou de glace déjà ancienne, compactée (59), au sein d'une masse importante, et recueillie au moment même de sa fusion, les résultats sont très différents : presque la pression partielle de CO_2 dans l'air dans le premier cas, *vingt fois moins* dans le second; quant à l'échantillon de neige de l'année (60), il montre une pression partielle triple de celle d'une atmosphère normale;

c — *à la sortie des torrents sous-glaciaires* : deux mesures ont été prises :

| N° de la mesure | Lieu du prélèvement | P_{CO_2} calculée |
|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 39 | Evettes | $7,2 \times 10^{-5}$ atm |
| 48 | Grand Pissailas | $1,9 \times 10^{-4}$ atm |

les pressions partielles de CO_2 , dans les tunnels sous-glaciaires, sont donc nettement inférieures à la pression partielle à l'air libre.

d — *dans les cours d'eau effluents des glaciers* : les pressions partielles remontent progressivement jusqu'à dépasser 3×10^{-4} atm.

| N° de la mesure | Distance du glacier | Température | P_{CO_2} calculée |
|-----------------|---------------------|-------------|----------------------------|
| 40 | 1,3 Km | 5,5° | $1,6 \times 10^{-4}$ atm |
| 56 | 1 Km | 9,5° | $6,7 \times 10^{-4}$ atm |
| 61 | 2,5 Km | 9,8° | $7,0 \times 10^{-4}$ atm |
| 41 | 3 Km | 7,6° | $6,2 \times 10^{-4}$ atm |
| 55 | 3 Km | 8,5° | $1,5 \times 10^{-3}$ atm |

e — *dans les autres cours d'eau* : les pressions partielles sont encore plus élevées, mais elles n'ont rien à voir avec la fonte de la glace :

| N° de la mesure | Lieu du prélèvement | P_{CO_2} calculée |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|
| 42 | ruisseau dans un alpage | $2,4 \times 10^{-3}$ atm |
| 62 | sourdon d'eau incrustante | $3,3 \times 10^{-3}$ atm |
| 63 | l'Arc | $7,3 \times 10^{-4}$ atm |

Les pressions partielles de CO_2 correspondant aux pH et T.A.C. mesurés sont donc très faibles dans l'eau de fusion de la glace compactée, et restent faibles dans les eaux s'écoulant sur le glacier et sous le glacier.

Conclusions.

Les eaux étudiées sont nettement basiques. En l'espace de quelques kilomètres, les eaux des glaciers ont dissous peu de calcaire et leur pH reste supérieur à 7,6 (9). Ces eaux font preuve ainsi d'une très faible agressivité.

Les eaux supra-glaciaires, sous-glaciaires et proglaciaires de la haute Maurienne ne présentaient donc pas, en septembre 1964, les qualités que l'on a parfois attribuées aux eaux de fusion des glaciers.

De nombreuses observations, en d'autres lieux, à d'autres moments, sont nécessaires pour établir ou controuver l'éventuelle généralité des phénomènes décrits. Mais, malgré le nombre très restreint des mesures faites, on nous permettra de tenter déjà une explication des faits observés.

Si la neige peut contenir beaucoup de CO_2 (J. Williams, 1949), si l'eau de fonte des plaques de neige est acide (H. Roques, 1962), si l'agressivité de la neige a été maintes fois reconnue, il n'en va pas de même pour la glace dont le CO_2 est progressivement exclu, lors de la cristallisation et de la compaction.

L'expulsion du CO_2 — et l'inclusion du CO_2 restant sous forme de bulles de gaz dans la glace et non plus sous forme dissoute — font que l'eau de fusion du glacier n'a guère de gaz carbonique dissous — en tout cas moins qu'une eau normale. Les bulles disparaissent d'ailleurs de la glace avec le temps (10).

Le fait que les pH les plus élevés se localisent au front des glaciers est dû à ce que la glace de l'extrémité aval de la langue est la plus vieille et donc normalement la plus dégazée; c'est là aussi que l'eau de fonte est la plus nettement glaciaire (non nivale). Les calculs de P_{CO_2} présentés dans les pages précédentes confirment nettement ces vues.

(9) A l'aval des points considérés, le réchauffement de l'eau et l'apport des ruisseaux des alpages font perdre aux cours étudiés leur caractère proglaciaire.

(10) Concernant l'expulsion progressive de l'air et du CO_2 de la glace, voir J. Tricart et A. Cailleux, 1962, et les références qu'ils citent (en particulier pp. 135 à 137 et 213).

Quant à la très faible agressivité des torrents proglaciaires, la cause en est très probablement que le temps nécessaire à la diffusion d'une quantité suffisante de CO_2 dans l'eau est, dans la région étudiée et au moment considéré, supérieur au temps au bout duquel l'eau a perdu sa basse température et son caractère d'eau de glacier.

Appendice.

Remarque sur l'existence d'un gradient des pressions partielles de CO_2 .

En 1956, H. Roques introduisait la notion d'un gradient des pressions partielles de l'acide carbonique dans les régions karstiques. Un simple coup d'œil sur la carte de la figure 2 montre qu'il suffirait de quelques mesures additionnelles pour pouvoir établir sur la carte des courbes d'égal pH; la mesure du pH et du T.A.C. en chaque point permettrait alors de tracer directement des courbes d'égal pression partielle de CO_2 . Il est certain que la méthode d'étude proposée par H. Roques trouve une extension justifiée, dans les trois dimensions, sur les glaciers.

On se rappellera d'autre part que H. Schoeller a noté que la teneur en calcaire des eaux des sources diminue avec l'altitude (*l'Eau*, 1950, pp. 77-79 : cité par J. Tricart et A. Cailleux, 1962); il a observé une diminution progressive et concomitante de la teneur des eaux en CO_2 au fur et à mesure qu'on s'élève en altitude (1950); il relie cette modification à une variation précédemment établie par lui en fonction de la latitude : l'augmentation de la teneur en CO_2 dissous des eaux souterraines, des régions tempérées vers les régions chaudes (H. Schoeller, 1941). Il explique l'ensemble de ces observations par les variations de CO_2 d'origine biologique dans le sol. Le présent travail prolonge en quelque sorte les recherches de Schoeller vers des régions encore plus élevées, encore moins riches en CO_2 d'origine organique, et dans un milieu — le glacier — qui s'avère pauvre en CO_2 de quelque origine.

Remarque sur l'évasion du CO_2 .

Il faut insister ici sur la grande différence entre la glace, sans guère de CO_2 , et la neige, où le CO_2 , déjà expulsé des cristaux (J. Williams, 1949) subsiste en grande quantité dans les vides; la fonte de neige modifie donc notablement les résultats des mesures.

L'expulsion du CO₂ de la glace est par ailleurs assez facile à mettre en évidence en laboratoire (C. Ek et A. Pissart, 1964).

*Laboratoire de Géologie et Géographie physique
de l'Université de Liège.*

REFERENCES

- EK C. et PISSART A., 1964 — Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. C.R.A.S., sous presse.
- RAGUIN E. et HERMANN F., 1930 — Feuille de Tignes de la Carte géologique de la France au 1/50.000, et notice explicative, Paris, 48 p.
- RAGUIN E. et HERMANN F., 1931 — Feuille de Lanslebourg de la Carte géologique de la France au 1/50.000, et notice explicative, Paris, 48 p.
- ROQUES H., 1956 — Sur l'existence d'un gradient karstique des pressions partielles de l'acide carbonique. C.R.A.S., t. 242, pp. 3100-3102.
- ROQUES H., 1962 — Considérations théoriques sur la chimie des carbonates et application aux eaux de fonte des névés et aux eaux de pluie. *Annales de Spéléologie*, t. XVII, pp. 463-467.
- ROQUES H., 1963 — Sur la répartition du CO₂ dans les karsts (2^e mémoire). *Annales de Spéléologie*, t. XVIII, pp. 141-184.
- SCHOELLER H., 1941 — L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses. *Bull. Soc. géol. France* (5), t. 11, pp. 267-289.
- SCHOELLER H., 1950 — Les variations de la teneur en gaz carbonique des eaux souterraines en fonction de l'altitude. C.R.A.S., t. 230, pp. 560-561.
- TILLMANS J., 1932 — Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser. 2^e éd., Halle.
- TRICART J. et CAILLEUX A., 1962 — Le modelé glaciaire et nival. Paris, 1962.
- WILLIAMS J., 1949 — Chemical weathering at low temperatures. *Geogr. Rev.*, pp. 129-135.

Note ajoutée en cours d'impression.

On trouvera de nombreux renseignements dans l'ouvrage suivant, qui vient de sortir de presse :

- ROQUES H., 1964 — Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate. *Annales de Spéléologie*, t. XIX, pp. 255-484.



Photo 1. — Le Glacier des Evettes, vu du Nord.
On remarque les deux moraines médianes, la vaste plaine proglaciaire
et, à l'avant-plan, une zone marécageuse.



Photo 2. — Le ruisseau de Pers — affluent du Glacier du grand Pissailas — entaillant
les cagneules gypsifères du Trias.

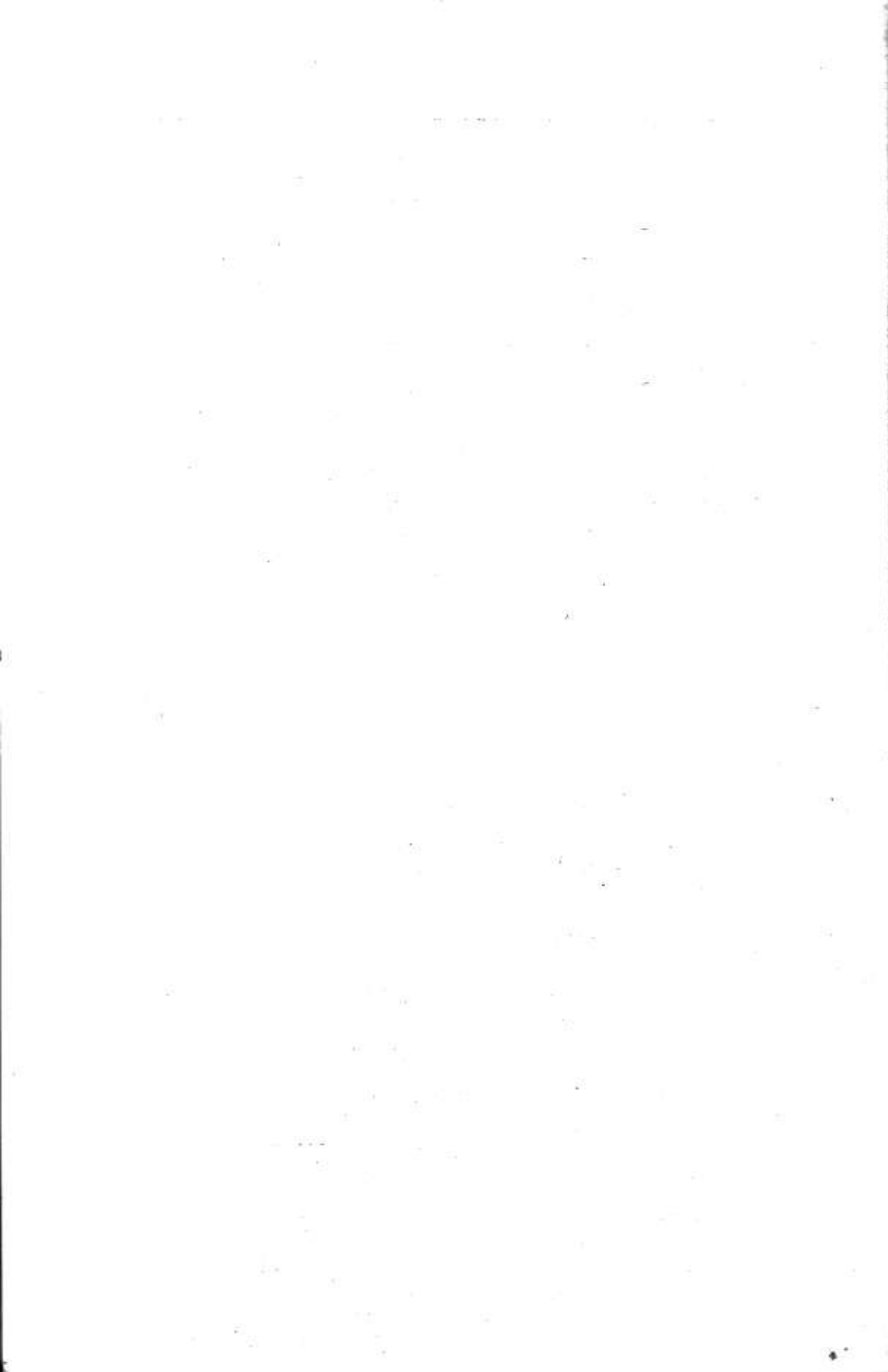


TABLEAU I
GLACIER DES EVETTES, le 2 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Tempér. | Débit | pH |
|----|--|--------------|---------|------------|----------------|
| 1 | Torrent proglaciaire, à 600 m à peu près en aval de la langue du glacier. | 11.30 (b) | 4° | 150 (a) | 8,50 |
| 2 | Issue du torrent sous-glaciaire, à sa sortie de la moraine, au front de la partie ouest. | 12.00 (b) | 0,5° | 100 | 8,65 |
| 3 | Filet d'eau de fonte, sur le glacier, à 100 m à peu près de son extrémité aval. | 13.00 | 0° | 1 | 8,80 |
| 4 | Filet d'eau de fonte, sur le glacier, en amont du précédent. | 13.15 | 0° | 5 | 8,00 (c) |
| 5 | Bédière de la partie médiane du glacier. | 13.30 | 0° | 50 | 7,80 (c) |
| 6 | Filet d'eau de fonte, à 2/3 du chemin vers les séracs. | 13.40 | 0° | 2 | 7,50 (c, d) |
| 7 | Filet semblable au précédent, mais à 100 m à l'ouest. | 13.50 | 0° | 1 | 7,35 (c, e) |
| 8 | Bédière, à son entrée dans un moulin (f), sur la partie ouest. | 14.30 | 0° | 10 | 7,70 |
| 9 | Résurgence glaciaire de plusieurs bédières, dont le n° 8. | 15.00 | 0° | 50 | 8,90 |
| 10 | Torrent à 100 m en aval de la langue (g). | 15.10 | 2° | 50 | 8,60 |
| 11 | Un bras du torrent, juste en amont de l'ancienne moraine terminale. | 16.00 | 5° | 200 | 8,60 |
| 12 | Ruisseau torrentueux au flanc de la montagne, face aux Ecots (h). | 17.30 | | 2 | 8,40 |

REMARQUES.

- (a) débits évalués en litres par seconde.
 (b) eau de glacier : toute grise.
 (c) pH très instable, probablement car eau non tamponnée du tout.
 (d) après être passé par un maximum de 8,70.
 (e) après être passé par un maximum de 8,20.
 (f) moulin gigantesque, de plus de 15 m de profondeur et probablement plus de 50 m.
 (g) situation intermédiaire entre les points 1 et 2 mais sur un courant plus oriental.
 (h) sur l'alpage, versant exposé N; ne provient pas directement du glacier.

TABLEAU II

GLACIER DES EVETTES, le 2 septembre 1964

| N° | Lieu | Heure | Tempér. | pH |
|----|---|-------|---------|----------------|
| 13 | Petit trou dans la glace, rempli d'eau (a) contenance environ 1 l. | 14.10 | 0° | 7,10 |
| 14 | Petit lac à environ 500 m du glacier rive côté amont. | 15.30 | | 8,15 |
| 15 | Même lac, au bord du cône de déjection de son affluent (b). | 15.45 | | 7,30 à 7,70 |

REMARQUES.

(a) l'eau est apparemment immobile, il y a beaucoup de ces trous dans la glace, dûs probablement à l'enfoncement des cailloux vers la moraine de fond.

(b) végétation abondante de mousses et autres plantes très basses.

TABLEAU III

GLACIER DES EVETTES, le 7 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Tempér. | Débit | pH |
|----|--|-------|---------|-------------------|------|
| 16 | Torrent proglaciaire, dans l'élargissement amont de sa plaine (b). | 16.30 | 4,1° | 120 (a) (c) | 8,30 |
| 17 | Idem, vers le milieu de l'élargissement médian de la plaine (b). | 16.45 | 3,4° | 300 (c) | 8,25 |
| 18 | Idem, presque contre l'ancienne moraine terminale, extrémité aval du même élargissement. | 16.50 | 3,8° | 300 (c) | 8,20 |
| 19 | Idem, dans un bras minuscule au même endroit. | 17.00 | 3,5° | 5 (c) | 8,30 |
| 20 | Dans la plaine inférieure (plan des Evettes) bras presque stagnant dans les marécages. | 17.10 | 6,5° | 1 | 8,15 |
| 21 | Même endroit, mais au milieu de la végétation algaire. | 17.15 | 6,5° | 1 | 8,25 |

REMARQUES.

(a) débits évalués en litres/sec.

(b) zone morainique.

(c) débit pour le bras envisagé; le débit total des différents bras du torrent est de l'ordre de 800 l/sec.

TABLEAU IV

GLACIER DES EVETTES, le 8 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Tempér. | Débit | pH |
|----|---|-------|---------|-----------|------|
| 22 | Même point que 16 de la veille. | 08.30 | 3,5° | (a) 30 | 8,00 |
| | | | | (b, c) | |
| 23 | Rapides juste en amont de 22. | 08.35 | 2,3° | 500 | 8,00 |
| 24 | Même torrent, un peu plus en amont. | 09.00 | 1,8° | 400 | 8,00 |
| 25 | Même torrent, 200 m environ en amont de 24. | 09.20 | 2,2° | 200 | 8,15 |
| | | | | (c) | |
| 26 | Même torrent, 200 m à peu près en amont de 25. | 09.50 | 2,5° | 300 | 8,15 |
| | | | | (c) | |
| 27 | Ruisseau de fonte d'un névé affluent du torrent. | 10.00 | 5,0° | 0,3 | 8,20 |
| 28 | Point aval de la bédrière principale de la partie ouest du glacier (d). | 11.20 | 0,0° | 40 | 8,65 |
| 29 | Résurgence du torrent sous-glaciaire de la même partie. | 11.30 | 0,1° | 75 | 8,60 |
| 30 | Point aval de la bédrière de la partie médiane (pas de cours souterrain). | 11.40 | 0,5° | 100 | 8,65 |
| 31 | Point aval de la bédrière de la partie est (pas de cours souterrain). | 11.45 | 1,2° | 100 | 8,50 |
| 32 | Sur la partie est, petite bédrière, à 200 m environ de l'extrémité du glacier. | 12.35 | 0,0° | 10 | 8,55 |
| 33 | Même partie, à 100 m au S.-O. du précédent, filet d'eau courante dans une mince crevasse. | 12.40 | 0,0° | 0,1 | 8,20 |

| N° | Lieu | Heure | Tempér. | Débit | pH |
|----|--|-------|---------|------------|------|
| 34 | A 100 m encore en amont du point 33, même crevasse. | 12.50 | 0,0° | 0,05 | 8,05 |
| 35 | Bédière principale de la partie est. | 12.55 | 0,0° | 20 | 8,25 |
| 36 | A la limite orientale de la partie médiane (e), filet dans une mince fissure. | 13.30 | 0,0° | 1 | 8,40 |
| 37 | Bédière principale de la partie médiane, à la hauteur du point 36 (voir e). | 13.40 | 0,1° | 25 | 8,25 |
| 38 | Partie ouest; un des tributaires principaux de la bédière de cette partie (f). | 14.00 | 0,1° | 2 | 7,65 |
| 39 | Même point que 29 : résurgence du torrent sous-glaciaire de la partie ouest. | 14.25 | 0,2° | 75 | 8,60 |
| 40 | Même point que 16 et 22 : torrent proglaciaire. | 15.00 | 5,5° | 105 (g) | 8,40 |

REMARQUES.

- (a) débits évalués en litre/sec.
- (b) la veille à 16,30, le débit était de 120 l/sec. : influence du rythme journalier de la fonte. L'eau est, le matin, beaucoup plus claire, presque limpide.
- (c) le débit noté ici ne concerne que le bras envisagé; le débit total est de l'ordre de 500 l/sec.
- (d) après un très court passage souterrain sous la modeste moraine frontale actuelle.
- (e) à plus de la moitié du chemin depuis l'extrémité aval de la langue vers les séracs.
- (f) point le plus en amont atteint ce jour; situé aux 2/3 du chemin de la langue vers les séracs.
- (g) on voit que, du matin au soir, le débit et le pH augmentent.

TABLEAU V

GLACIER DES EVETTES, le 8 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC | Résist. |
|----|--|-------|-------|-------|------|------------|------|---------|
| | (a) | | | | | en labo | | |
| | | | | | | (b) | (c) | (d) |
| 36 | Sur glacier : filet d'eau dans fissure. | 13.30 | 0,0° | 1 | 8,40 | 8,60 | 17,6 | 100 |
| 37 | Sur glacier : bédrière. | 13.40 | 0,1° | 25 | 8,25 | 8,20 | 14,8 | |
| 38 | Sur glacier : un des tributaires d'une bédrière. | 14.00 | 0,1° | 2 | 7,65 | 7,60 | 13,4 | |
| 39 | Résurgence de torrent sous-glaciaire. | 14.25 | 0,2° | 75 | 8,60 | 8,50 | 19,4 | 73 |
| 40 | Torrent proglaciaire. | 15.00 | 5,5° | 105 | 8,40 | 8,40 | 34,0 | 90 |

REMARQUES.

(a) voir la localisation précise dans le tableau VI.

(b) le pH a été repris en laboratoire, après un séjour des flacons, hermétiquement fermés, de 5 heures dans une caisse thermiquement isolée; pour l'étude, on préférera ici se référer au pH pris sur le terrain, l'électrode plongeant dans le courant d'eau.

En laboratoire, le pH des 3 échantillons pris sur le glacier (36, 37, 38) s'abaisse d'environ 1/2 unité de pH par rapport aux pH notés après une vive agitation du récipient, tandis que les deux derniers échantillons ont un pH stable malgré l'agitation. Précision des mesures de pH, en laboratoire et sur le terrain = 0,1 unité pH; reproductibilité des mesures = 0,05 unité pH.

(c) titre alcalin complet, mesuré avec du HCl 0,03 N, et exprimé conventionnellement en mg CaCO₃ par litre d'eau.
Précision : ± 3 mg/l.

(d) résistivité, mesurée après 24 heures d'équilibrage thermique des flacons à 18° C, et exprimée en Ω/M²/M; le résistimètre employé ne peut mesurer de résistivité supérieure à 100 Ω/M²/M. Précision : ± 1.

TABLEAU VI

VALLEE DE LA LENTA, le 3 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC |
|----|--|-------|-------|-------|------|------------------------|-----|
| 41 | Ruisseau de la Lenta, juste en amont du premier pont de la route de l'Iseran en partant du col vers l'Arc (b). | 17.00 | 7,6° | 1250 | 8,1 | en labo 7,65 (a) | 57 |
| 42 | Au même endroit, dans un ruisseau affluent de droite venant d'un alpage (c). | 17.30 | 2,2° | 175 | 7,65 | 7,60 (a) | 88 |

REMARQUES.

(a) après longue agitation.

(b) sur gypse et cargneule gypsifère; provient pour les 3/4 du Glacier du Grand Pissailas.

(c) la source est dans les schistes lustrés; après environ 400 m, le ruisseau passe sur le Trias gypsifère, sur un parcours de 400 m à peu près, avant sa confluence avec la Lenta. Analyse à la confluence.

TABLEAU VII
GLACIER DU GRAND PISSAILLAS ET VALLEE DE LA LENTA,
le 9 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC | Résist. |
|----|---|--------------|-------|-------|------|-------------|-----|-------------|
| | | | | | | en labo | | |
| 43 | Ruisseau de Pers (torrent proglaciaire) à 1 Km en aval de la langue. | 11.00 (a) | 4,5° | 15 | 8,00 | | | |
| 44 | Le même, 250 m en amont du point 43. | 11.15 (a) | 4,5° | 12 | 8,35 | | | |
| 45 | Le même, 100 m en amont du point 44. | 11.30 (a) | 5,7° | 12 | 8,00 | | | |
| 46 | Le même, 150 m en amont du point 45. | 11.45 | 6,7° | 12 | 8,20 | | | |
| 47 | Le même, 150 m en amont du point 46. | 12.00 (a) | 6,5° | 12 | 8,15 | | | |
| 48 | Le même, à la résurgence du torrent sous-glaciaire. | 12.20 (a) | 0,0° | 10 | 8,40 | 8,25 | 42 | >100 (b) |
| 49 | Stalactites de glace prélevées au même point à l'entrée du tunnel du torrent. | 12.30 | 0,0° | 0 | | 7,90 (e) | 18 | |
| 50 | = 47; mesures faites pour vérification. | 12.45 | 6,5° | 12 | 8,10 | | | |
| 51 | Affluent du ruisseau de Pers; mais l'eau sourd de la moraine (d). | 13.00 (e) | 9,0° | 2 | 8,10 | | | |
| 52 | Même affluent, 100 m avant sa confluence avec le ruisseau de Pers. | 13.15 | 10,6° | 4 | 8,00 | | | |
| 53 | = 43. | 14.30 (f) | 12,5° | 25 | 8,15 | | | |
| 54 | Même torrent, 200 m en aval de 53. | 15.00 | 12,5° | 25 | 8,00 | | | |
| 55 | = 41, même torrent, 2 Km en aval de 54. | 15.40 (g) | 8,5° | 1100 | 7,75 | 7,70 | 62 | 27,2 |

REMARQUES.

- (a) eau grisâtre à cause de la présence d'un sablon gris en suspension dans le courant.
 (b) l'échelle de lecture du résistivimètre employé a pour limite supérieure 100 $\Omega/M^2/M$.
 (c) le pH descend à 7,70 après vive agitation.
 (d) l'eau de ce ruisseau a donc fait un parcours souterrain depuis le glacier.
 (e) eau claire.
 (f) eau nettement plus grise que le matin.
 (g) l'eau est plus claire que le 3-9-1964.

TABLEAU VIII

GLACIER ET RUISSEAU DE LA JAVE, le 9 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC | Résist. |
|----|--|--------------|-------|-------|-------------|--------------------|-----|---------|
| 56 | Extrémité aval du ruisseau du glacier de la Jave. | 16.00 (a) | 9,5° | 10 | 8,10 | en labo 8,10 | 61 | 72,8 |
| 57 | Même ruisseau; 150 m en amont du point 56. | 16.15 | 6,6° | 10 | 8,15 | | | |
| 58 | Même ruisseau; 250 m en amont de 57, à la sortie d'un tunnel dans la glace morte. | 16.30 | 3,0° | 10 | 8,10 | | | |
| 59 | Glace fondante; 450 m en amont de 56, dans un tunnel sous un culot de glace morte. | 17.00 | 0,0° | 0,005 | 8,65 (b) | 8,00 | 6 | 100 |
| 60 | Neige fraîche sur glace, au même endroit. | 17.10 | 0,0° | 0 | | 7,20 | 13 | |

REMARQUES.

- (a) eau légèrement grise.
 (b) pH pris dans la mare formée par la chute du filet d'eau.

TABLEAU IX

TORRENT DU GLACIER DE LA MAHURE, le 10 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC | Résist. |
|----|---|--------------|-------|-------|------|--------------------|-----|---------|
| 61 | Aval du torrent venant du glacier de la Mahure (à 2,5 Km du glacier). | 15.00 (a) | 9,8° | 180 | 8,00 | en labo 8,00 | 50 | 76,1 |

REMARQUE.

(a) eau claire.

TABLEAU X

VALLEE DE L'ARC, le 11 septembre 1964.

| N° | Lieu | Heure | Temp. | Débit | pH | pH | TAC | Résist. |
|----|---|-------|-------|--------|------|--------------------|------------|---------|
| 62 | Venue d'eau dans un travertin, près de Lans-le-Villard. | 9.15 | 9,4° | 0,2 | 7,9 | en labo 8,00 | 198 (a) | 28,2 |
| 63 | Arc au même endroit. | 9.30 | 5,5° | 20.000 | 8,15 | 8,20 | 79 | 52,4 |

REMARQUE.

(a) dureté totale du même échantillon : 151 ppm (exprimé en ppm CaCO₃).

