

PREMIER
CONGRÈS INTERNATIONAL
DE SPÉLÉOLOGIE

PARIS

1953



TOME II

COMMUNICATIONS

Section I. — Hydrogéologie et Morphologie karstique

Section II. — Physico-Chimie, Météorologie et Cristallographie

Sur quelques modalités de formation et d'évolution des dépôts cristallins dans les cavités de haute altitude (2)

Résumé

Au cours de diverses explorations en haute altitude (3.000 m), nous avons constaté dans différentes cavités la présence de cristaux de gypse en position particulière (sur et sous masse de glace), de même que de nombreuses variétés de cristallisation de la glace. Nous rappelons ici ces différents éléments et posons les différents problèmes relatifs à ces constatations.

Au cours de recherches hydrospéléologiques dans le Haut-Massif calcaire du Marboré (1), nous avons été conduits à nous intéresser aux conditions de formation et d'existence des importantes masses glaciaires et de quelques cristallisations minérales qui ornent les cavités de ces hautes montagnes. La région étudiée se situe au Sud du Cirque de Gavarnie (Hautes-Pyrénées), et s'étend surtout en Espagne, sur les pentes méridionales de la ligne de crête joignant le Casque (3.005 m) au Mont Perdu (3.356 m), à une altitude moyenne d'environ 2.900 m. Nous ne rapportons ici que quelques observations, faites surtout à la grotte Devaux, à la grotte Casteret, aux grottes de la Combe des Isards et à l'aven du Marboré. Dans toutes ces cavités, des conditions physiques particulières, inhérentes à l'altitude, ont dirigé la formation des concrétions glaciaires et minérales. Trois facteurs paraissent déterminants : la température, la pression, le degré hygrométrique.

1° LA TEMPÉRATURE

Les différentes mesures effectuées par J. DEVAUX [2] à l'entrée de la grotte Devaux l'ont conduit à considérer que les zones profondes du massif calcaire devaient avoir constamment une température d'environ 0°. De plus, les thermomètres laissés à demeure par J. DEVAUX et J. ROSH [3] ont varié depuis environ vingt-cinq ans entre -3° et +1°. Or, chaque fois que nous avons pu pénétrer profondément à l'intérieur de la masse calcaire, nous avons noté des températures

(2) Communication présentée le 9 septembre 1953.

(1) Spéléo-Club Alpin Languedocien, Montpellier.

en résulte les mêmes conséquences que celles constatées par F. TROMBE [5] à la grotte du Riusec (Haute-Garonne) : sol poudreux, absence d'humidité sur les surfaces rocheuses, possibilité d'évaporation de solution et dépôt de cristaux de sel dissous (gypse de la grotte Devaux).



Ces quelques données physiques sont générales. Elles se compliquent dans le détail de l'intervention de facteurs particuliers.

Nous nous proposons d'étudier leur influence sur le dépôt des formations glaciaires et de cristaux de gypse trouvés dans quelques-unes des cavités du massif.

I. FORMATIONS GLACIAIRES

La glace présente, dans les grottes marboréennes, des formations certes importantes par leur masse, mais localisées. Son importance apparaît même minime par rapport au développement des grandes percées hydrologiques de la région. Ce n'est, à l'échelle, qu'un petit amas glacé concentré à la sortie des cavités.

La condition première de formation de la glace est une température inférieure à 0°. Nous avons vu que seules les galeries soumises à l'influence de la température externe possèdent toujours cette condition. La variation de cette influence en fonction des facteurs locaux nous permet de distinguer trois types de cavités à formations glaciaires.

a) *Cavités pénétrant profondément dans la masse calcaire*, type : système lapiaz marboréen-grotte Devaux. Nous l'avons déjà étudié en détail. En été, par suite des courants d'air, la température est supérieure à 0°. Donc, pas de glace. Aux points de sortie, l'influence de la température externe peut favoriser le dépôt de glace, mais toujours localisé et relativement peu important. Ainsi, à la grotte Devaux, la glace disparaît graduellement à environ 200 mètres de l'entrée. On observe d'abord d'épaisses masses de glace, qui s'amenuisent pour ne former bientôt qu'une mince pellicule, puis quelques cristaux de givre sur les parois.

b) *Cavités se développant à faible distance de la surface*, type : système lapiaz des Isards-grotte Casteret. Il possède les caractéristiques suivantes :

Faible différence d'altitude entre le lapiaz et la sortie de la grotte. Le courant d'air est, par suite, peu important et le réchauffement, en régime de circulation d'été, négligeable.

La grotte reste dans toute sa longueur près de la surface, c'est-à-dire sous l'influence de la température extérieure, et des importants refroidissements nocturnes (surtout en été). Au total, grotte froide, abondamment alimentée par les eaux de fonte des névés tout proches, et possédant sur tout son développement d'importantes formations glaciaires. Divers puits s'ouvrent dans les galeries. Ils jouent le rôle de piège à air froid et sont entièrement glacés.

c) *Cavités mixtes*, type : grotte des Isards. Cette grotte fait partie d'un système joignant les hautes pentes de la Tour du Marboré à un point de sortie probable quelque part dans la muraille du Cirque de Gavarnie. Elle se développe, par suite de la configuration du terrain, assez près de la surface. Aussi elle possède de très belles formations glaciaires, dues à l'influence des froids extérieurs. Une différence d'altitude notable entre la sortie et l'entrée du système provoque un violent courant d'air qui, en régime de circulation d'été, réchauffe sensiblement la cavité à tel point que l'on peut voir de petits ruisseaux de fonte à la surface des masses glacées.

Ce type mixte, à la limite de l'influence des courants chauds de l'été et de la température externe, peut présenter, suivant les conditions locales, des cavités plus ou moins entièrement glacées.

toujours supérieures à 0°. *Il apparaît donc nécessaire de considérer deux zones de répartition de température à l'intérieur des cavités.*

Zone profonde : La température semble y être déterminée par des circulations d'air. La masse calcaire a été tellement brisée par les mouvements tectoniques que l'on ne connaît actuellement aucune cavité profonde qui ne communique avec l'extérieur par plusieurs passages. Ceux-ci vont influencer par leur position sur le régime de circulation d'air.

Zone externe : Les cavités proches de la surface subissent l'influence de la température externe. Comme à cette altitude la température moyenne annuelle externe est inférieure à 0°, les diverses grottes de cette zone demeurent constamment aux alentours de 0° et seront aptes à posséder des formations glaciaires. De plus, la glace intervient, suivant son importance, comme agent réfrigérant permanent. Dans les galeries non aérées, elle empêche toute variation et stabilise la température.

De toutes façons, dans les deux zones, les températures sont basses. Le carbonate de calcium dissous dans l'eau étant beaucoup plus soluble à froid qu'à chaud tendra à rester en solution à faible température. *Il s'ensuit, dans les différentes cavités, une absence presque complète de concrétions de calcite.*

2° LA PRESSION

Les différences de pression dues à la dénivellation séparant les diverses entrées des systèmes hydrologiques, et l'instabilité des températures en haute altitude, produisent des courants d'air violents, dont F. TROMBE [5] a reconnu l'existence saisonnière et donné les lois.

Hiver : Courant d'air remontant le système. L'air extérieur engouffré est très froid, toute la cavité est soumise à un régime glacé certainement bien inférieur à 0° ; mais l'absence d'eau de fonte empêche toute formation de glace. De plus, la neige bloque les entrées et tend à empêcher toute circulation d'air.

Été : Air descendant des lapiaz surchauffés vers les résurgences. Cet air se refroidit graduellement au parcours des cavités qu'il traverse. Ainsi, dans le système aven du Marboré-grotte Devaux, nous avons noté, le 31 juillet 1953, à peu près aux mêmes heures, les températures suivantes :

Aven du Marboré :	galerie non aérée	6°9
	galerie aérée	5°8
Grotte Devaux :	galerie aérée	5°6
	galerie non aérée	0°5

Ces températures établissent bien la distinction entre zone profonde et zone externe des cavités. Dans ce système elles ont les conséquences suivantes :

Aven du Marboré : absence totale de concrétions.

Grotte Devaux : importantes formations glaciaires dans les premières salles, disparaissant à environ 200 mètres de l'entrée.

3° DEGRÉ HYGROMÉTRIQUE

La courbe de variation de la tension de vapeur d'eau saturante en fonction de la température montre la présence, à faible température, d'une atmosphère peu chargée en humidité. La quantité maximum de vapeur d'eau dissoute dans l'air est très faible, même pour des degrés hygrométriques proches de 100 %. Il

Dans ces divers systèmes, les formations glaciaires peuvent apparaître sous plusieurs variétés. Ces variétés sont des formes polymorphes de la glace. Leur structure cristalline reste encore à étudier en détail, ainsi que leurs conditions de cristallisation. Nous nous bornerons, ici, à les décrire sous leur forme macroscopique. On peut distinguer quatre variétés :

1° *Glace compacte* : Elle a été appelée à tort « glacier souterrain » par N. CASTERET [6]. Elle occupe le plancher des galeries, quelquefois sur plusieurs mètres d'épaisseur. Elle a l'aspect bleuté et vitreux d'un glacier de surface et provient de la solidification directe des eaux de fonte dans les galeries.

2° *Glace en concrétion* : Cette variété prend des formes en tous points semblables aux concrétions classiques de calcite. On trouve ainsi des stalactites avec canalicule d'alimentation, rideau, cascade et plancher stalagmitique, qui donnent

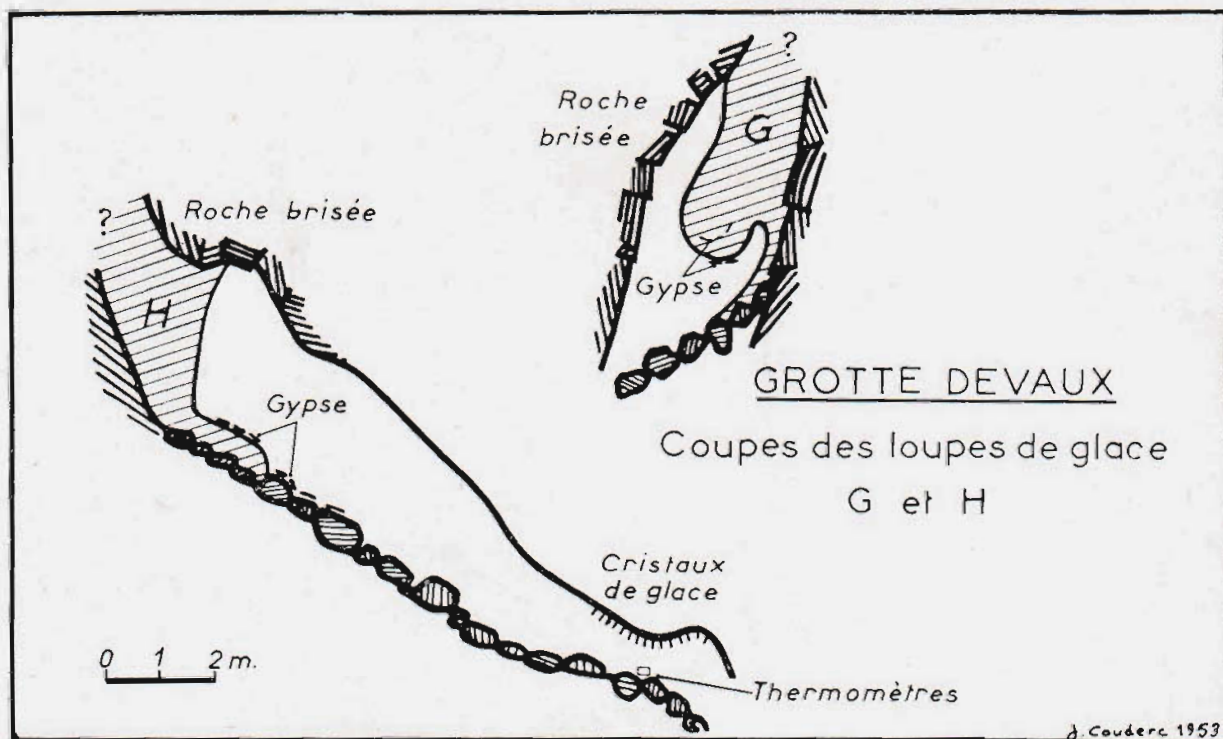


FIG. 1

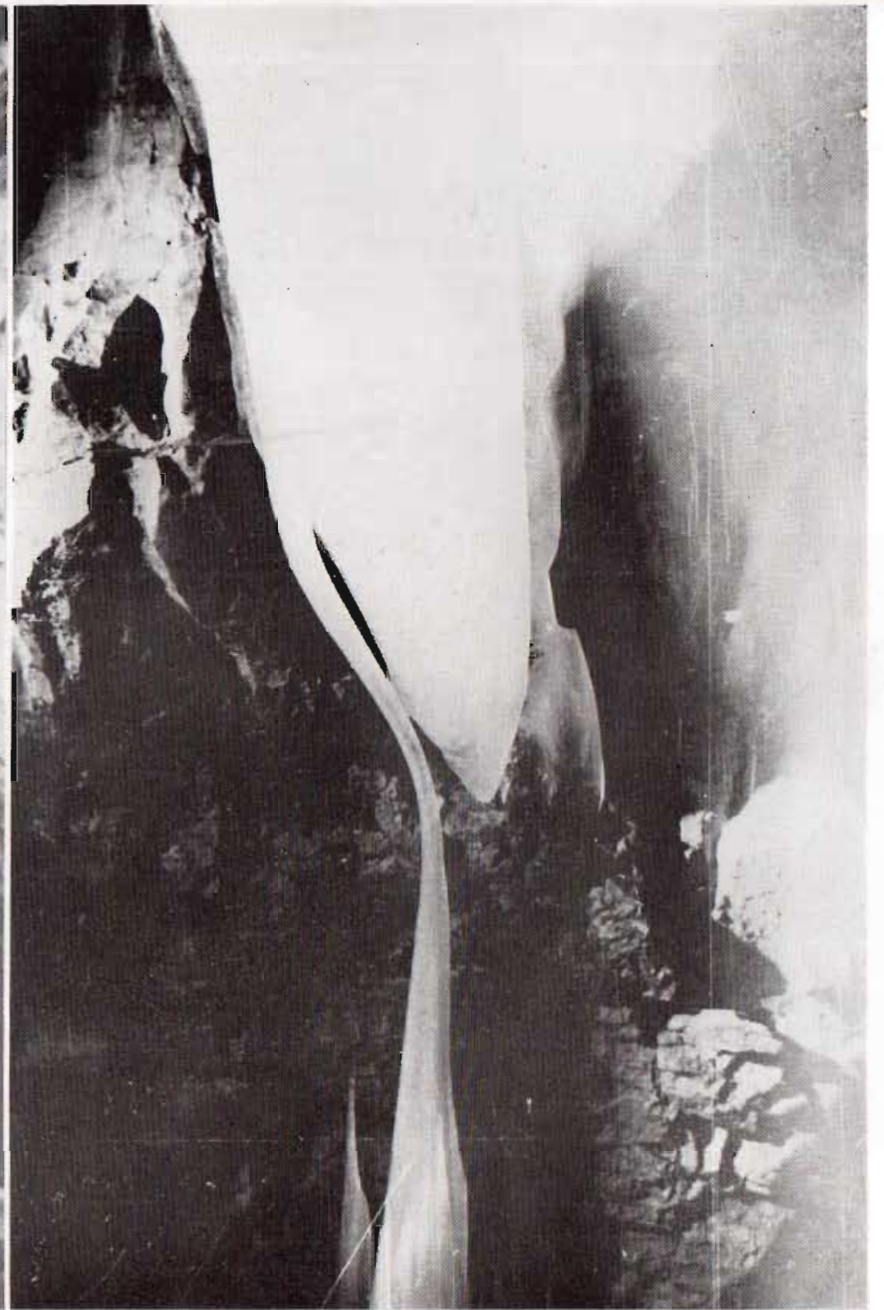
à la cavité un aspect de grotte concrétionnée habituelle. Ces concrétions se forment à partir d'eaux de percolation qui assurent aussi leur croissance.

3° *Glace transparente* : C'est une forme cristallisée très curieuse, signalée pour la première fois par J. DEVAUX, en 1929, sous le nom de « glace translucide ». Nous ne conserverons pas cette appellation, car elle définit mal la pureté, la limpidité, et surtout la transparence de ces imposantes masses glacées. On ne connaît rien du mode de cristallisation de la glace transparente, ni des facteurs particuliers qui l'ont conditionnée. On peut la voir passer latéralement à des formations de glace compacte. Elle apparaît alors comme une ségrégation particulièrement pure de la glace compacte.

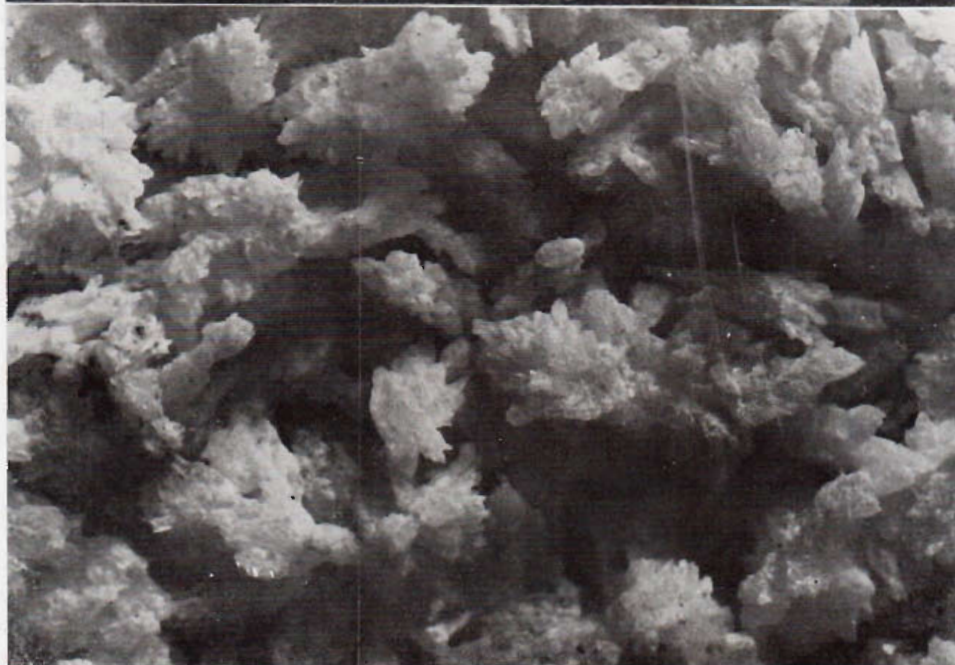
Partout où nous l'avons rencontrée, cette glace transparente se montre sous forme de langue descendant de cheminées du plafond, et tend à combler la galerie, que l'on voit parfois se poursuivre à travers sa masse sur une dizaine de mètres. Ce fait, vérifié sur tous les dépôts, nous permet de proposer une hypothèse simple d'évolution des masses de glace transparente, sans pour cela expliquer leur structure cristalline particulière : une petite arrivée d'eau, dans une cheminée, se solidifie, et graduellement la glace augmente son épaisseur jusqu'à



Glace compacte au plancher et coulées de glace



Stalactite de glace
(Clichés J.-L. PLISSON).



GROTTE DEVAUX. — Couloir tapissé de grands cristaux de glace, plancher en glace compacte (Cliché J. MORACHINI), en haut ; cristaux de gypse (Cliché P. DUBOIS), en bas.

obstruer la cheminée. Son poids et sa plasticité l'entraînent alors vers le bas, jusque dans la galerie, où existent toutes les formes, depuis d'énormes pandeloques de quelques dizaines de tonnes, jusqu'à la langue de glace occupant le plancher, et bientôt toute la section de la galerie. La masse de glace exerce alors des pressions énormes sur les parois, qu'elle disloque, et forme ainsi de gros éboulis, véritables « moraines souterraines ».

L'évolution de ces masses glacées est encore en cours, du fait de la pesanteur, et du dégel qui peut faire reculer leur front.

4° *Cristaux de glace* : Cette dernière variété est d'une très grande beauté. Sa formation apparaît assez courante. On en signale souvent dans les galeries de mines percées à haute altitude. Les cristaux se présentent sous forme de phénocristaux, à faces bien caractérisées, atteignant parfois plusieurs centimètres de côté. Ils ont une allure hexagonale et montrent de magnifiques stries d'accroissement. On les trouve, soit isolés, soit réunis dans un fouillis de formes plus ou moins arborescentes et du plus bel effet.

Tous les auteurs attribuent aux cristaux de glace une formation par condensation de la vapeur d'eau de l'air. Ils semblent s'enrichir par des séries de condensation successives. Ainsi, dans beaucoup de mines, on a observé leur croissance à partir de condensations dues à des inversions fréquentes de courant d'air. Dans les cavités marboréennes, les cristaux se développent apparemment à l'abri de tout courant d'air, dans des diverticules colmatés, au bout de quelques dizaines de mètres, par des masses de glace transparente. Mais ils sont placés vers l'entrée du diverticule, pas très loin de son débouché dans les galeries aérées. A ce point, on note la rencontre de deux masses d'air, l'une immobile et très froide, l'autre continuellement en mouvement et plus chaude. Il doit en résulter des condensations qui sont très certainement à l'origine des cristaux. De plus, les cristaux paraissent évoluer assez rapidement : là où J. DEVAUX [2] avait signalé en 1928 de magnifiques échantillons, nous n'avons retrouvé, en 1953, que d'assez petites cristallisations. Il est donc normal de leur attribuer une date de formation postérieure à la mise en place actuelle de la glace translucide.

Signalons enfin que les phénomènes de condensation en galeries non aérées peuvent résulter aussi de changements brusques de pression, entraînant un brusque changement de température.

Ces quelques considérations sur les phénomènes glaciaires internes ne sont pas définitives. Les problèmes les plus importants sont à résoudre. Seul un appareillage de mesure précis (thermomètres et baromètres enregistreurs), et des expériences fréquentes, effectuées à demeure, sont actuellement capables de nous renseigner de façon précise sur les conditions physico-chimiques régnant à l'intérieur des cavités. Plus difficile encore sera l'étude des différentes variétés cristallographiques de la glace. Les rayons X permettront seuls de préciser la structure de ces variétés.

II. CRISTALLISATIONS DE GYPSE

En dehors des formations glaciaires, les dépôts cristallins internes sont rares dans les cavités du Haut-Marboré. Les seuls connus actuellement sont des cristaux de gypse, découvert par J. DEVAUX dans la grotte Devaux. Mais ces cristaux sont très localisés et confinés dans un petit diverticule de la grotte, au milieu de masses de glace transparente. Ce sont des cristallisations de grande beauté, surtout remarquables par leur blancheur et leur pureté. Elles se montrent sous deux variétés distinctes :

Phénocristaux : Gros cristaux à faces bien différenciées, ils présentent les formes du prisme monoclinique, dans lequel on reconnaît les faces p , m , $g1$ (notation HAÛY-LÉVY), et possèdent très souvent une direction d'allongement suivant l'axe binaire. On peut aussi noter quelques macles suivant $h1$. Les cristaux sont

réunis pour former de grandes plaques de gypse de quelques décimètres de côté. La surface de ces plaques est recouverte par une légère couche d'un blanc laiteux, due probablement à la formation d'albâtre gypseux par altération. Les plaques de gypse se trouvent posées sur des bombements de la glace ou sur des gros blocs encombrant la galerie, sans toutefois adhérer à leur support. Il semble que le gypse se soit formé à la surface de la glace transparente, quelques plaques ayant ensuite glissé sur le plancher de la galerie.

Gypse lenticulaire : Variété de gypse sous forme de granules d'un blanc foncé, sans apparence cristalline. Ces petites lentilles sont indifféremment collées sur les planchers, les parois ou les toits de glace. On en observe même à quelque 50 cm à l'intérieur de la glace.

Les divers problèmes posés par l'existence de ce gypse sont nombreux et loin d'être résolus. On sait que le gypse se forme à partir de solution de sulfate de calcium. Le sulfate de calcium, plus soluble à chaud qu'à froid, laisse déposer une quantité importante de cristaux par abaissement brusque de la température.

Il n'entre pas dans le cadre de ce texte de présenter dans le détail le délicat problème de l'origine du sulfate de calcium. Indiquons simplement qu'on ne connaît actuellement dans le massif calcaire aucune autre trace de ce sel. Il paraît donc provenir d'un remaniement local de fragments de pyrite épigenisée, très abondants dans certaines assises de la région. Plus précisément, on trouve quelques traces de formations pyriteuses dans un niveau schisteux proche de la grotte Devaux. Dans la cavité, des galeries recoupent à deux reprises ce même niveau. Le processus de transformation est bien connu [5] : oxydation et hydratation de la pyrite, réaction des produits formés sur le calcaire. On obtient du sulfate de calcium et des oxydes de fer. Mentionner enfin que J. RÖSH [4] envisage une origine possible, par transformation à partir d'une fine poussière gris-jaunâtre recouvrant toutes les parois rocheuses de la grotte Devaux. Cette poussière est, soit un résidu d'érosion, soit une formation d'altération des parois. Quelques échantillons sont à l'étude au laboratoire. Nous venons de voir que le gypse se dépose, à partir d'une solution de sulfate de calcium, par abaissement de température. Les cristaux de la grotte Devaux sont plus ou moins mêlés à des formations de glace transparente. Il a donc pu se produire une cristallisation presque simultanée de gypse, puis de glace, par refroidissement d'une arrivée d'eau riche en sulfate de calcium. Le gypse reste alors comme un corps étranger transporté par la glace. Mais il n'est pas davantage exclu d'envisager une formation postérieure à la mise en place de la glace, qui a alors joué le simple rôle d'agent réfrigérant. De toutes façons, il semble que les dépôts de gypse ont une double cause :

— abaissement de la température ;

— faible humidité de l'air, qui a dû favoriser l'évaporation de la solution de sulfate. Quant à la pureté du gypse, il faut très certainement l'attribuer à son inaptitude à former des solutions solides avec d'autres minéraux, pouvant entrer dans la solution de sulfate de calcium (hydroxydes de fer, par exemple), ce qui lui permet de cristalliser pratiquement à l'état pur.

Nous terminons là cette rapide esquisse des conditions de formation et d'existence des dépôts cristallins dans les cavités de haute altitude, en rappelant que nous nous sommes bornés uniquement à faire le point des connaissances déjà acquises, à les compléter dans une certaine mesure, et à poser les problèmes les plus importants à résoudre. Notre étude n'a rien de définitif, et notre but sera atteint si elle sert simplement d'introduction et de base aux travaux de futurs chercheurs.

Bibliographie

1. DU CAILAR (J.), COUDERC (J.), DUBOIS (P.). — La source du Gave de Pau. *Annales de Spéléologie*, 1953.
DU CAILAR (J.) et Col. — Recherches hydro-spéléologiques sur le Marboré. *Premier Congrès international de Spéléologie et Bull. Soc. Languedocienne de Géogr.*, Montpellier, 1953.
2. DEVAUX (J.). — La grotte des Sœurs de la Cascade. *La Nature*, février 1929.
3. RÖSCH (G. et J.). — Visite à la grotte Devaux. *La Montagne*, n° 268, mai 1935.
4. RÖSCH (J.). — La grotte Devaux à Gavarnie. *Bulletin de la Section du S.C. du C.A.F.*, n° 39^{1^{er}}, octobre 1949.
5. TROMBE (F.). — *Traité de Spéléologie*, pp. 117, 118, 136, 137, 224.
6. CASTERET (N.). — Quelques phénomènes hydro-spéléologiques dans les Pyrénées. *La Montagne*, n° 282, octobre 1936.

Discussion

M. BARRET : L'eau et la calcite cristallisant dans des systèmes différents mais donnant des macroformes analogues, ces macroformes sont donc indépendantes des lois de la cristallisation et ne dépendent que des lois régissant l'écoulement des fluides donnant naissance aux concrétions dont les formes sont communes à la glace et à la calcite.

M. TROMBE fait remarquer que, au-dessous de 3° C., il se forme de l'hydrocalcite qui cristallise dans le même système que la calcite et la glace ; seuls les paramètres sont différents.

M. TROMBE constate d'une manière générale la mauvaise adaptation des appareils de mesures physiques usuels aux conditions d'utilisation sous terre. Un programme de construction d'appareils spécialement étudiés serait à envisager.
