

La glacière naturelle de Saint-Georges (VD, Suisse) : histoire et fluctuations d'un glacier souterrain

Autor(en): **Brulhart, David**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **87 (2000-2001)**

Heft 3

PDF erstellt am: **27.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-281401>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La glacière naturelle de Saint-Georges (VD, Suisse): histoire et fluctuations d'un glacier souterrain

par

David BRULHART¹

Abstract.—BRULHART D., 2001. The natural ice cave of Saint-Georges (VD, Switzerland). history and fluctuation of an underground glacier. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 76.3: 261-276.

The fluctuations of the Saint-Georges natural ice cave (Switzerland) have been reconstructed on the basis of historical documents. The results are surprising and reveal a significant regression of its underground glacier in the first half of the 19th century, in spite of optimal climatic conditions. A last progression was also measured between 1865 and 1890 approximately, when alpine glaciers were already withdrawing. This astonishing progression results from local factors such as extraction of ice or deforestation. The late progression is due to several factors: thermal inertia of the surrounding rock, slowing down of ice exploitation, significant snowfalls.

Keywords: natural ice cave, ice, speleology, quaternary, subterranean climatology, commerce of ice, climatic modifications, Saint-Georges, Jura.

Résumé.—BRULHART D., 2001. La glacière naturelle de Saint-Georges (VD, Suisse): histoire et fluctuation d'un glacier souterrain. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 76.3: 261-276. Les fluctuations de la glacière naturelle de Saint-Georges (Vaud, Suisse) ont été reconstituées sur la base de documents historiques. Les résultats sont étonnants. Ils révèlent que le glacier souterrain subit une importante régression dans la première moitié du

XIX^e siècle, malgré des conditions climatiques optimales, et une ultime progression entre 1865 et 1890 environ, parallèlement au retrait des glaciers alpins. Cette étonnante progression s'explique par des facteurs locaux tels que l'extraction de glace et les déboisements; quant à la progression tardive, elle est liée à l'inertie thermique de la roche encaissante qui retarde momentanément les effets du réchauffement atmosphérique, au déséquilibre occasionné par la diminution de son exploitation de glace et aux importantes chutes de neige qui caractérisent la fin du XIX^e siècle dans le massif jurassien.

Mots-clés: glacière naturelle, glace, spéléologie, quaternaire, climatologie souterraine, commerce de la glace, changements climatiques, Saint-Georges, Jura.

DÉFINITION DES GLACIÈRES NATURELLES

Les glacières naturelles sont des cavités qui fabriquent de la glace et qui parviennent à la conserver toute l'année, même en été. Pour permettre leur genèse et leur maintien, plusieurs facteurs doivent être réunis. Il faut tout d'abord que le climat soit suffisamment froid et enneigé durant l'hiver afin d'assurer le refroidissement de la caverne et la fabrication de la glace, frais et sec en été pour permettre sa conservation.

Les glacières se développent ainsi un peu partout de par le monde, des planchers sous-glaciaires aux régions de moyenne montagne. Elles restent toutefois des phénomènes relativement rares, malgré l'étendue apparente de leur aire de répartition. Dans le Jura vaudois, on estime que seuls 2 à 3 % des cavités contiennent de la glace en permanence (BRULHART 1998). Il s'agit de cavités anormalement froides, fonctionnant en poches à air froid, en tubes à vent ou de manière mixte, capables d'absorber par gravité ou par aspiration la rigueur de l'hiver et de maintenir en été une température proche de 0° C. D'autres facteurs biologiques, topographiques, morphologiques et géologiques peuvent encore influencer le développement d'une glacière (BRULHART 1998). Pour optimiser l'accumulation de neige, d'eau d'infiltration et du froid durant l'hiver, un vaste orifice orienté dans la direction des vents froids, ouvert dans une dépression, des roches fracturées et peu de végétation semblent offrir des conditions idéales. Au contraire, pour minimiser la fonte estivale, un orifice réduit, orienté au nord, situé sur une crête, peu de fractures et une épaisse couverture végétale réduisent considérablement l'intrusion des rayons du soleil et de l'eau de pluie, qui apportent un surplus de calories. Ces différents facteurs exercent par conséquent une action antagoniste suivant la saison.

Selon MARTEL (1894), la forme idéale serait celle d'un entonnoir ou d'un sablier car elle permet d'accumuler beaucoup de neige tout en protégeant la glace des chaleurs de l'été. Pour TROUILLET (1885), le rôle de la végétation est capital pour le maintien de la glace dans les régions de moyenne montagne, car elle régule l'eau du sol et diminue d'éventuelles inondations estivales.

FORMATION ET FUSION DE LA GLACE

La glace se forme durant la mauvaise saison, dès que le froid pénètre dans la caverne, permettant de congeler l'eau d'infiltration (glace de regel) et de conserver la neige accumulée, qui finit par se tasser, par se compacter et par former un véritable glacier souterrain (glace de névé). La période optimale se déroule généralement au début du printemps, lorsque l'eau de fonte du manteau neigeux pénètre tranquillement, par infiltration ou par ruissellement au sein d'une caverne encore fortement refroidie. Durant le reste de l'hiver, l'eau est généralement congelée dans les fissures de la roche et la neige n'est pas suffisamment humide et compacte pour se transformer en glace.

Avec l'accroissement des infiltrations d'eau de fonte, issues du manteau neigeux, débute une longue période de fusion au milieu du printemps. Elle s'accroît légèrement durant l'été lorsque les températures souterraines et les parois rocheuses atteignent quelques degrés au-dessus du point de congélation. Cette augmentation de la température est liée au réchauffement atmosphérique qui influence par convection et par conduction le climat souterrain de la caverne. La glace devient excessivement humide et se retire progressivement des parois rocheuses.

Puis avec le retour de la mauvaise saison, le processus recommence, le froid s'installe au fond de la caverne, l'eau se congèle, la neige se compacte, permettant à la glacière de se renouveler constamment.

DYNAMIQUE GLACIAIRE ET BILAN DE MASSE ANNUEL

La différence entre la quantité de glace formée durant la mauvaise saison et la quantité de glace fondue durant le reste de l'année, autrement dit, le bilan de masse annuel, détermine la dynamique de la glacière. Lorsque le bilan est négatif, la glace régresse, voire disparaît totalement. Au contraire si le bilan est nul, la glace reste stable, au même niveau que celui de l'année précédente. Enfin, lorsque le bilan est positif, la glace augmente de volume et s'insinue dans des secteurs autrefois vierges. Au bout d'un certain nombre d'années, on observe une alternance de couches sombres et de couches claires. Les premières sont composées de débris organiques et minéraux qui se déposent sur la glace durant l'été, alors que les secondes sont formées par de la glace. En comptabilisant les couches claires, on peut estimer l'âge des couches inférieures du glacier. Le chiffre obtenu est souvent approximatif car plusieurs couches peuvent s'amalgamer ou être interrompues par des failles. Il ne correspond en aucun cas à l'âge de la glacière en raison du processus de renouvellement évoqué plus haut, mais nous renseigne toutefois sur les capacités de la caverne à fabriquer et conserver de la glace.

DIFFÉRENTS TYPES DE GLACIÈRES

Selon l'origine dominante de la glace, on distingue trois principaux types de glacières (MAIRE 1990):

–Les glacières dynamiques à glace de névé (fig. 1) qui se forment par compaction de neige accumulée au sein d'un gouffre (cavité subverticale ou oblique) et qui ressemblent étroitement aux glaciers alpins; la glace est généralement constituée de gros cristaux visibles à l'œil nu et subit d'importants mouvements.

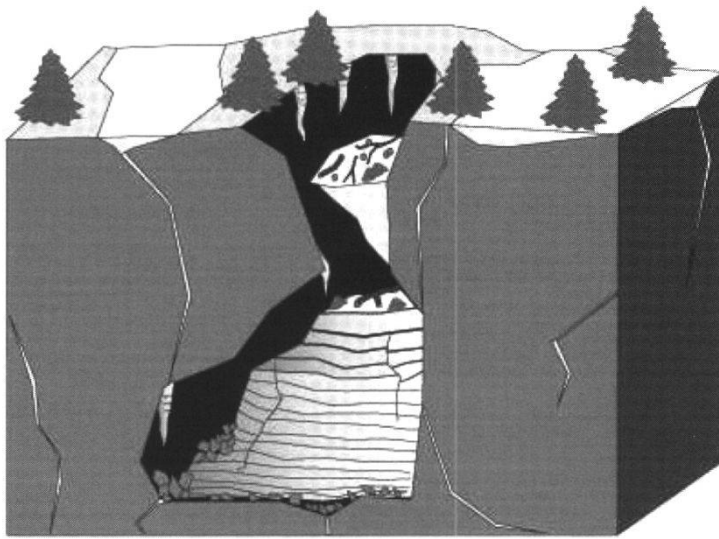


Figure 1.–Glacière dynamique à glace de névé (BRULHART 1998).

–Les glacières statodynamiques à glace de regel (fig. 2), qui se développent dans des grottes (cavités subhorizontales), par congélation progressive des infiltrations d'eau; la glace est transparente et amorphe, et relativement stable.

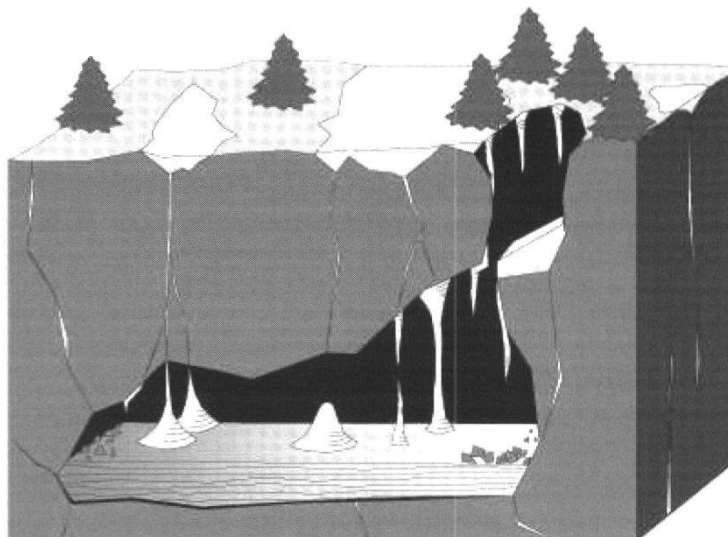


Figure 2.–Glacière statodynamique à glace de regel (BRULHART 1998).

–Les glacières proglaciaires à glace de glacier (fig. 5 et 6, voir p. 269), qui se forment par intrusion directe de glace de glacier dans des cavités situées au niveau du plancher sous-glaciaire. Nous aurons l’occasion d’en reparler plus tard, lorsque nous aborderons la genèse de la glacière de Saint-Georges.

PROBLEMES RELATIFS À LA RECONSTITUTION DES STADES GLACIAIRES ET MÉTHODE DE TRAVAIL

Reconstituer les stades glaciaires des glaces souterraines est souvent problématique:

–Les fluctuations des glaces souterraines, qu’elles soient annuelles ou mesurées sur quelques décennies, sont beaucoup plus faibles que celles des glaciers alpins, de l’ordre de quelques décimètres à quelques mètres en moyenne dans les glacières jurassiennes. Seules les plus importantes d’entre elles sont donc mesurables.

–Si les fluctuations sont de faible ampleur, elles sont également insuffisantes pour laisser des traces sédimentaires ou morphologiques significatives, susceptibles d’être traduites en progression ou en régression de la masse de glace.

Rares sont les glacières jurassiennes qui parviennent à déposer une moraine de retrait car elles transportent uniquement quelques fragments rocheux ainsi que des détritiques organiques; lorsque une moraine se forme grâce à un apport abondant de blocs issus des parois de la caverne, elle est rapidement disséminée par les eaux de fonte du glacier. Quant à l’action érosive de la masse de glace, qu’elle soit chimique (corrosion) ou mécanique (abrasion, gélifraction), son interprétation ne permet guère de supposer des stades glaciaires clairs et précis car elle ne se limite pas aux seules assises rocheuses mais s’exerce dans la cavité tout entière, froide et chargée d’humidité. La gélifraction pourrait même être optimale dans le secteur localisé sous l’orifice en raison des fortes variations thermiques qui le caractérisent (alternance d’intrusions de froid et de chaud), alors qu’au fond de la glacière, la fraîcheur reste stable. Seuls quelques rares cycles de gel/dégel ont généralement lieu au niveau du glacier (BRULHART 1998).

–La masse de glace se renouvelle toujours au bout d’un certain nombre d’années, et cela d’autant plus vite que son volume initial est faible. Dans le Jura, les plus vieilles strates de glace ont généralement quelques dizaines, voire une centaine d’années pour les plus importantes d’entre elles (STETTLER 1971). Autant dire que le prélèvement d’une carotte de glace et son analyse ne permettrait pas de remonter au-delà de la fin du XIX^e siècle.

–Les glacières ont rarement fait l’objet d’études systématiques durant les siècles passés (manque d’intérêt auprès des chercheurs, difficultés d’accès,

etc.) limitant de ce fait le nombre de documents historiques à disposition (mensurations, croquis, photographies, etc). C'est néanmoins sur la base de sources historiques que nous aborderons les fluctuations des glaces souterraines au sein de la glacière de Saint-Georges.

LA GLACIÈRE DE SAINT-GEORGES

Choix de la glacière étudiée

La glacière de Saint-Georges se prête particulièrement bien à la reconstitution de ses principaux stades glaciaires. Elle est en effet l'une des seules grottes englacées du Jura vaudois suffisamment documentée. Les informations dont nous disposons restent toutefois ponctuelles et les périodes intermédiaires relativement obscures.

Les premières études apparaissent au début du XIX^e siècle déjà, et constituent pour la plupart d'excellents travaux. Au contraire, les publications de la première moitié du XX^e siècle sont à prendre avec précaution car il s'agit davantage de portraits anecdotiques.

Contrairement à la majorité des autres glacières du Jura vaudois, une route carrossable assure la liaison depuis le village de Saint-Georges, et trois échelles remises en état périodiquement facilitent son exploration, ne nécessitant aucun matériel particulier de prospection.

Description de la glacière de Saint-Georges

Localisée sur le versant sud du Mont Tendre, à 1290 mètres d'altitude, la glacière de Saint-Georges figure sur la carte topographique au 1:25'000 de la Suisse, feuille 1241 Marchairuz (508.075/153.430).

Elle s'ouvre à partir de deux orifices distincts, taillés dans les calcaires du Portlandien, protégés en partie par une couverture végétale éparse.

En pénétrant dans la caverne durant la période estivale, la glace n'est pas toujours visible au premier coup d'œil. Elle constitue pourtant la majorité du plancher, un plan rectangulaire de 23 mètres de long sur 10 mètres de large, recouvert en grande partie d'éboulis. Il est situé à 20 mètres sous la surface et mesurait une dizaine de mètres d'épaisseur lors du dernier relevé spéléologique de 1989 (fig. 3). Il existe un étroit passage situé entre la roche et le glacier qui conduit au fond de la caverne, à -29 mètres. Cette petite « rimaye », localisée au-dessous de l'orifice a été creusée par les infiltrations d'eau de pluie durant l'été. Son entrée n'est pas toujours accessible car elle est parfois colmatée partiellement par de la neige. Un petit névé pérenne d'un mètre de haut s'élève également au bas de l'échelle inférieure.

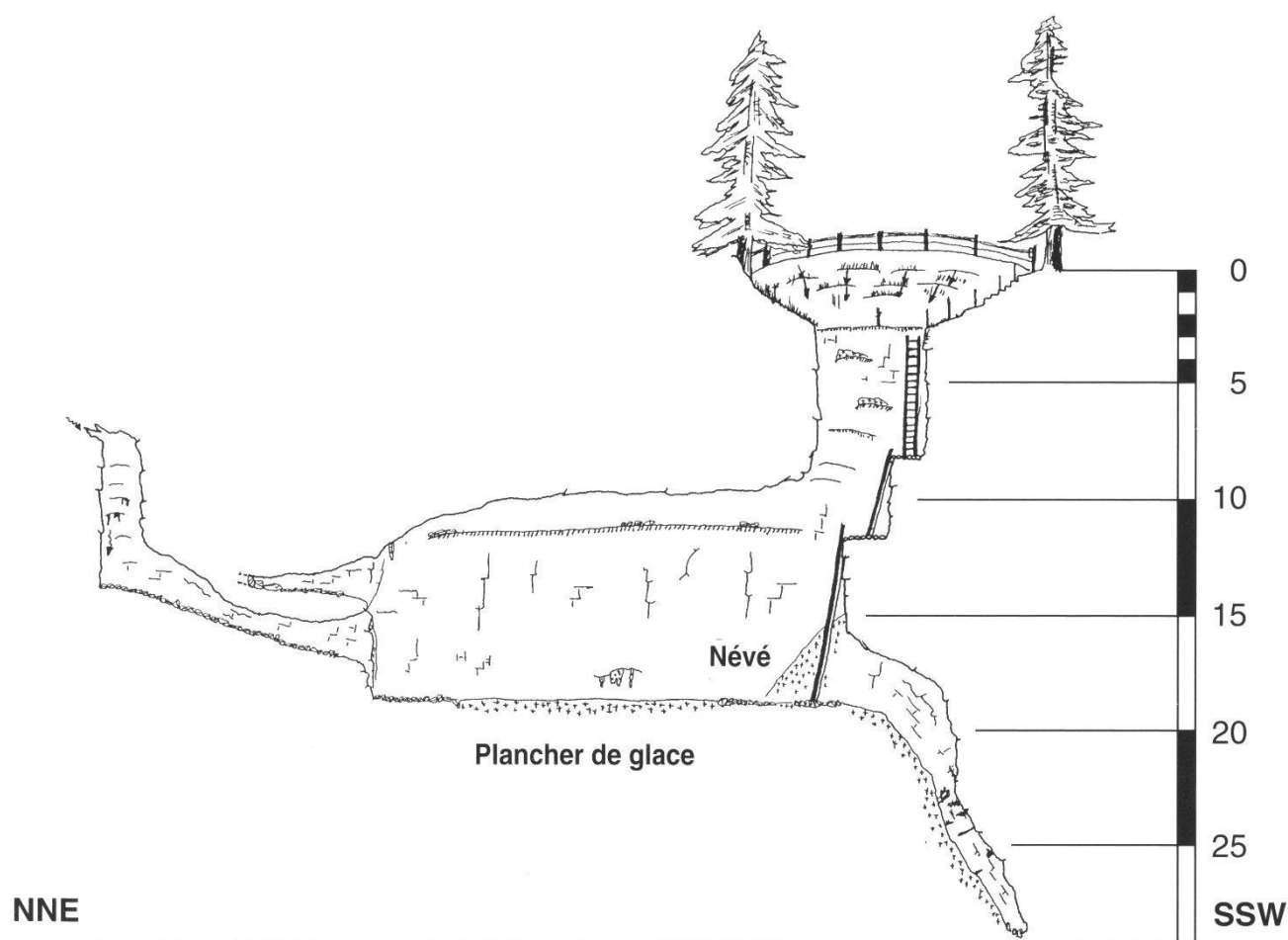


Figure 3.—Relevé (modifié) de la glacière de Saint-Georges en 1989 par Gaube et Perrin (comm. pers.)

PRINCIPAUX STADES GLACIAIRES DE LA GLACIÈRE DE SAINT-GEORGES

En se basant sur les différentes sources historiques, on constate qu'autrefois, le plancher tout comme le névé étaient beaucoup plus épais et que la glace recouvrait également de manière pérenne certaines parties de la caverne aujourd'hui vierges.

Cette diminution s'est produite en plusieurs phases et ne semble pas avoir été continue dans le temps.

Nous avons défini cinq périodes principales en fonction de la dynamique glaciaire et des facteurs à l'origine de cette dynamique (fig. 4).

I) une période d'évolution naturelle jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, avec des périodes de progressions et de régressions suivant les conditions climatiques.

II) une période de régression généralisée de plus de 10 mètres durant la première moitié du XIX^e siècle, liée à l'extraction de glace, et à une moindre mesure aux déboisements.

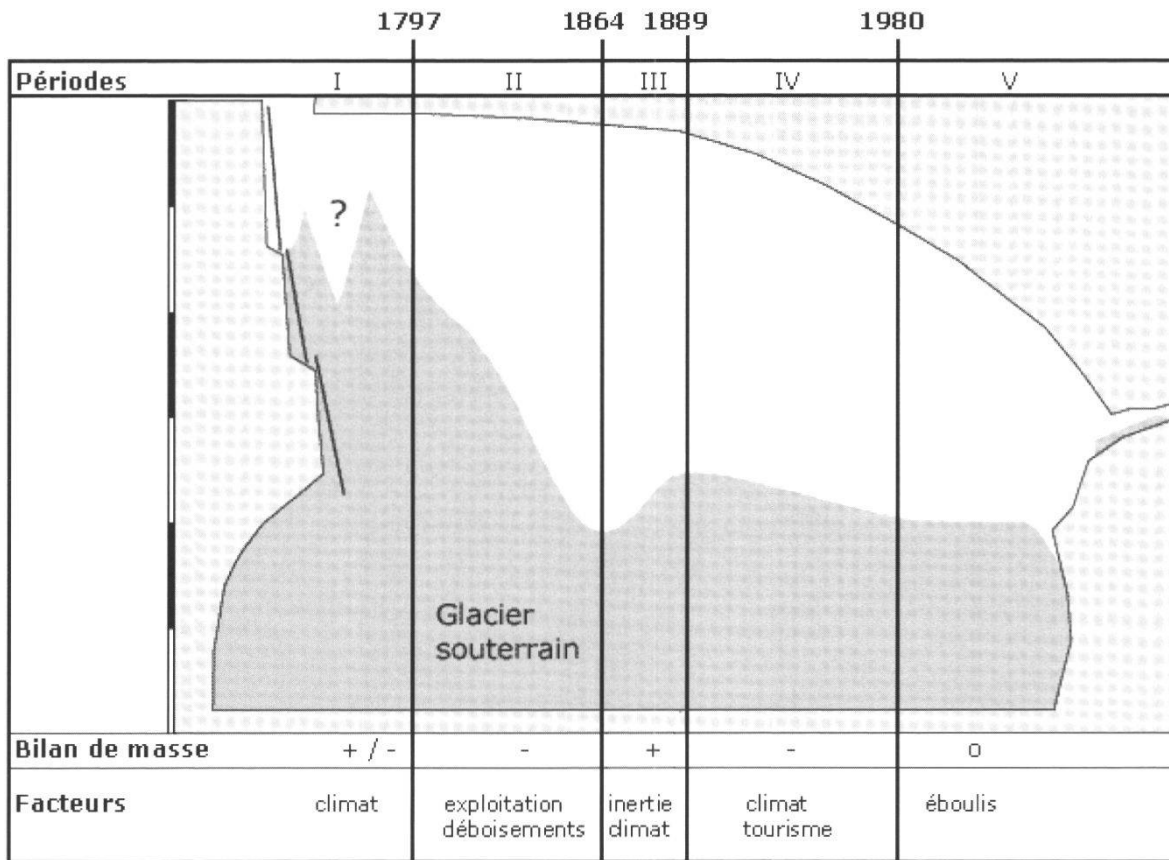


Figure 4.-Principaux stades glaciaires de la glacière de Saint-Georges (infographie: D. Brulhart).

III) une période probable de convalescence et de progression éphémère de deux à trois mètres durant le dernier tiers du XIX^e siècle, suite à la diminution de son exploitation, et cela malgré des conditions climatiques défavorables (fin du Petit Age Glaciaire).

IV) une période de régression de quelques mètres durant les deux premiers tiers du XX^e siècle en raison des modifications climatiques et des touristes, qui contribuent au réchauffement de la caverne.

V) une période de stabilisation au cours des années 1980 grâce aux éboulis répartis sur la surface du plancher de glace servant d'amortisseur thermique.

Période I: Évolution naturelle

Cette période d'évolution naturelle est méconnue à défaut de témoignages historiques ou de traces morphologiques et géologiques. On pense que la glacière de Saint-Georges existe depuis la fin de la dernière glaciation, lorsque la région étudiée était recouverte d'une épaisse calotte glaciaire (ARN et CAMPY 1990). La glace s'est développée par congélation progressive de l'écoulement sous-glaciaire ou par intrusion directe de glace de glacier au fond du gouffre (fig. 5 et fig. 6) selon les exemples observés de nos jours (MAIRE 1990).

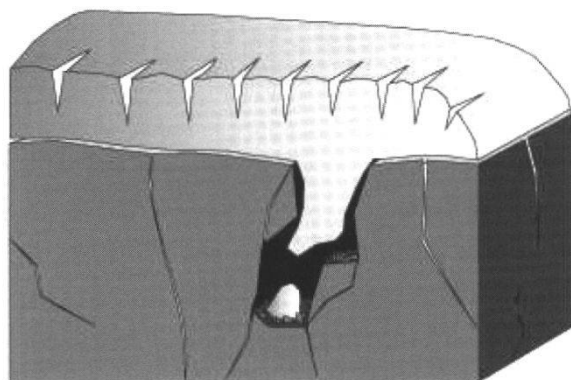


Figure 5.—Injection de glace de glacier (BRULHART 1998).
Grâce à sa plasticité, la glace basale de la calotte jurassienne pénètre dans les orifices s'ouvrant au niveau du plancher sous-glaciaire.

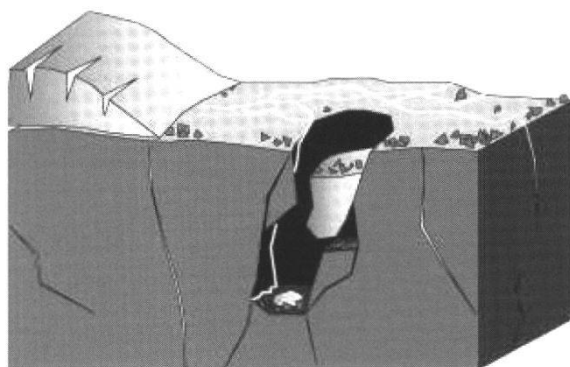


Figure 6.—Formation d'une glacière proglaciaire à glace de glacier (BRULHART 1998).
Au Tardiglaciaire, le glacier se retire, abandonnant un bouchon de glace au sein de la caverne. Sa conservation et son renouvellement est possible uniquement dans les gouffres non-absorbants, anormalement froids et alimentés par d'importantes précipitations de neige tels que celui de la glacière de Saint-Georges. La glace de glacier est alors progressivement remplacée par de la glace de névé.

Durant le Postglaciaire (10'000 BP à aujourd'hui), la glace se renouvelle constamment. Toutefois, rien ne garantit sa pérennité, notamment lors des phases d'optimum climatique. Ces différentes périodes de réchauffement ont peut-être provoqué le retrait partiel ou total du glacier souterrain. Dès 1600 (début du Petit Age Glaciaire), le froid qui s'installe en Europe continentale favorise son développement (bilan de masse positif). D'autres glacières jurassiennes décrites à cette époque, notamment celle de Chaux-les-Passavant près de Besançon présentent une quantité de glace largement supérieure à celle qu'on observe actuellement. TROUILLET (1885) nous livre un historique complet des descriptions effectuées au sein de cette glacière.

Période II: Surexploitation et déboisements

Après de nombreux millénaires d'évolution naturelle, la glacière de Saint-Georges subit l'influence de la présence humaine à proximité. Elle attire l'attention des villageois et de petites entreprises régionales dès la fin du XVIII^e siècle pour son précieux contenu. On vient y tailler la glace pour subvenir aux besoins des aubergistes, des distilleries, des hôpitaux et de quelques riches habitants de la région lémanique.

L'exploitation débute probablement vers 1797 (PICTET 1822) et se prolonge activement jusqu'au milieu du XIX^e. Elle continue de manière plus sporadique durant le dernier tiers du XIX^e et prend définitivement un terme au début du XX^e siècle suite à la généralisation des armoires frigorifiques et à la fabrication de glace industrielle.

Durant sa plus forte activité, l'extraction était de l'ordre de 70 tonnes par an (BROWNE 1865, BARON 1969), soit de 25 cm/an sur l'ensemble du plancher. Largement supérieure au renouvellement naturel, elle conduit à un abaissement drastique du plancher comme l'attestent les différentes sources.

En 1822, le plancher se situe à -11 mètres environ (27 pieds et 18 pouces) et deux échelles ayant au total 46 échelons sont nécessaires pour descendre au fond du gouffre (PICTET 1822). En 1857, ce même plancher se situe à -20 mètres. Il diminue donc de 9 mètres en 35 ans, doublant la taille de la caverne.

Entre 1857 et 1864, le plancher continue à diminuer, probablement de 1 à 2 mètres puisque l'exploitation est de la même intensité (BROWNE 1865).

On ne connaît malheureusement ni la hauteur de la glace en 1797, ni même l'ampleur de l'extraction au tout début de son exploitation. A supposer qu'elle soit identique à celle de la période 1822-1864, le plancher serait situé à -5 mètres de la surface, soit quelque 16 à 17 mètres plus hauts qu'en 1864.

Les conditions climatiques de l'époque étaient-elles compatibles avec cette estimation ? On peut toutefois supposer que le plancher devait se localiser entre ces deux valeurs (-11 et -5 m), vers -8 mètres de la surface environ.

Les déboisements occasionnés à proximité de la caverne participent également à la fusion accélérée de la glacière durant l'été, selon le témoignage de certains villageois (THURY 1861), au point que les orifices furent recouverts de branchages pour limiter l'intrusion des rayons du soleil (PICTET 1822, BROWNE 1865).

Toutefois, l'influence réelle des déboisements a probablement été surévaluée par une population locale, soucieuse de l'état de santé de la glacière en raison de son importance économique. De plus, les coupes de bois peuvent également exercer une action bénéfique durant la période hivernale puisqu'elles libèrent l'entrée des orifices, augmentant l'accumulation de neige au fond du gouffre (BRULHART 1998).

Période III: Convalescence et progression éphémère de la glacière

Durant le dernier tiers du XIX^e siècle, l'exploitation devient de plus en plus sporadique. Elle est même interrompue entre 1889 et 1896. Quant au plancher, ce n'est plus la principale source d'exploitation; une épaisse pellicule de glace de regel recouvrant la paroi rocheuse située au pied de l'échelle inférieure attire désormais l'attention des exploitants (BALCH 1900).

La glacière profite de cette accalmie pour s'élever à nouveau, et cela malgré des conditions climatiques changeantes (fin du Petit Age Glaciaire). Plusieurs arguments ont été pris en compte pour formuler cette hypothèse.

Le plancher de glace se situe actuellement à -20 mètres, soit au même niveau que celui mesuré par THURY (1861) en 1857, et même au-dessus des estimations suggérées pour 1864. Toutefois la glacière n'est pas restée stable durant les derniers 150 ans puisque le plancher n'a cessé de diminuer au cours du XX^e siècle (voir période IV). Autrement dit, à supposer que les observations des savants du XIX^e siècle soient exactes, ce qui semble probable vu la similitude des mesures chez THURY (1861) et BROWNE (1865) et la précision de leurs exposés, seule une élévation du plancher permet d'expliquer cette anomalie.

Plusieurs glacières ont prouvé, au cours des siècles passés, leur capacité de se reconstituer très rapidement lorsque le stress –en l'occurrence l'exploitation– disparaît. La glacière de Chauv-les-Passavant, dévastées au cours du XVIII^e siècle par le Duc de Lévi est parvenue en moins de 15 ans à reformer son glacier souterrain (TROUILLET 1885). Néanmoins, pour se reconstituer, il est nécessaire que le climat soit favorable.

Depuis 1860, les glaciers alpins ont pour la plupart commencé à régresser. La glacière de Saint-Georges se comporterait-elle différemment ? Nous manquons malheureusement d'études analogues pour véritablement appréhender le comportement des glacières naturelles. Si on s'accorde à dire qu'elles régressent aujourd'hui pour la plupart, le début de cette régression n'a pas été déterminé de manière aussi systématique que pour les glaciers alpins. Certains auteurs ont en effet démontré que le volume de la glace pouvait jouer un rôle important et notamment en entretenant une fraîcheur suffisante au fond du gouffre (RACOVITZA 1967, STETTLER 1971). La glacière de Saint-Georges était-elle suffisamment volumineuse pour entretenir à elle seule son microclimat ?

Il semblerait que ce soit avant tout le déséquilibre occasionné par l'interruption de son exploitation qui permette d'expliquer cette étonnante progression. Le plancher de glace se situe au-dessous du niveau qui aurait été déterminé en temps normal par le microclimat de la caverne, dans un secteur particulièrement froid. La glace bénéficie ainsi de conditions idéales pour se reconstituer et pour minimiser la fusion. L'inertie thermique de la roche

encaissante joue également un rôle. La chaleur n'est transmise que lentement au sein de la caverne, et ce n'est que lorsque la tendance s'affirme que la température augmente et que la glace finit par fondre. Enfin, malgré le réchauffement climatique, les hivers à la fin du XIX^e siècle restent frais et enneigés. La majorité des lacs jurassiens étaient gelés chaque hiver sur une dizaine de centimètres d'épaisseur. Seuls quelques hivers trop doux sont mentionnés dans les annales (GOLAY 1890). Les abondantes chutes de neige ont donc probablement participé à la progression du glacier.

Période IV: Régression

Malgré une courte période de reconstitution, la glace finit par régresser. Le glacier se situe probablement entre -17 et -18 mètres lorsque le bilan de masse annuel devient négatif. Cette estimation est tirée d'une photographie inédite datant de 1889, appartenant à l'ancien garde-forestier, Monsieur Terry. Nous nous sommes également basés sur le nombre d'échelons de l'échelle inférieure (23) et nous avons supposé que leur espacement était identique à celui de l'échelle actuelle (environ 30 cm) afin de déterminer la profondeur du plancher.

La régression est particulièrement importante depuis la deuxième guerre (fig. 7). Entre 1945 et 1980, le garde-forestier que nous avons cité précédemment, chargé du maintien de la glacière, fut contraint de changer l'échelle inférieure à deux reprises car elle devenait trop courte, au fur et à mesure de l'enfoncement du plancher.

Cette diminution résulte essentiellement du réchauffement climatique et de la diminution des précipitations de neige. Les déboisements ainsi que le tourisme jouent peut-être également un rôle dans ce retrait.

Au milieu du XX^e siècle, la glacière de Saint-Georges constitue une certaine attraction touristique. Les visiteurs sont nombreux et provoquent une élévation de la température de quelques degrés dans un rayon de plusieurs mètres au sein de la caverne en pénétrant au fond du gouffre. Leur influence reste néanmoins minime car la glacière n'a pas connu de véritable développement touristique; dans les années 1970, seule une centaine de visiteurs s'y rendent chaque année (BARON 1969). Signalons toutefois l'exemple de Chaux-les-Passavant, explorée par quelque 25'000 visiteurs par an. Située à moins de 600 mètres, cette glacière a été particulièrement affectée durant le XX^e siècle par les modifications climatiques ainsi que par une inondation importante en 1910. En ajoutant le réchauffement exercé par les touristes, le glacier a tellement diminué que les propriétaires du site ont été contraints d'installer des canons à neige pour assurer sa pérennité (BRULHART 1998).

La régression de la glacière de Saint-Georges ne concerne pas uniquement le plancher de glace. Le névé s'amenuise également considérablement.

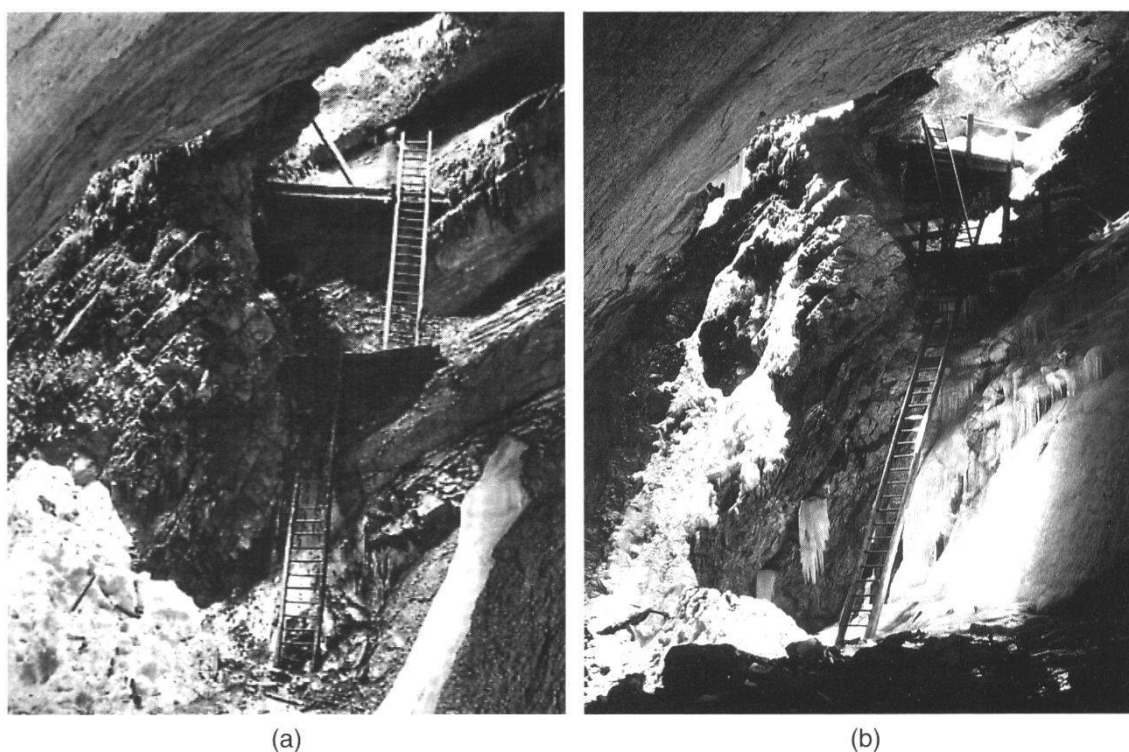


Figure 7.—Vues de la glacière de Saint-Georges avant 1939 et en 1998. La photo (a), non datée, provient d'une carte postale envoyée en 1939. Elle illustre l'état de la glacière entre la fin du XIX^e siècle et le début de la deuxième guerre. L'échelle inférieure comptabilise environ 25 échelons. La photo (b) a été réalisée par S. Godin au printemps 1998. L'échelle comprend désormais 34 échelons, ce qui correspond à un enfoncement de 2 à 3 mètres du plancher.

Véritable stalagmite de neige durcie au milieu du XIX^e siècle (THURY 1861), il ne constitue plus qu'un faible amas, dont le volume varie d'une année à l'autre en fonction de la neige tombée durant l'hiver. Quant à la pellicule de glace, exploitée dans la dernière moitié du XIX^e siècle, elle ne se forme plus qu'au printemps. Les températures ne sont plus suffisamment fraîches pour garantir sa conservation au cours de l'été.

Le rétrécissement du névé a eu des conséquences très importantes sur la dynamique de la glacière et sur la structure de la glace. Alimentée essentiellement jusqu'à la fin du XIX^e siècle par de la neige, qui se tasse et se transforme en glace par diagenèse glaciaire classique, cette glacière dynamique à glace de névé, pour reprendre la terminologie de MAIRE (1990), assure désormais son renouvellement par congélation des infiltrations d'eau et de la fusion du névé. Cette évolution n'en fait pas pour autant une glacière statodynamique à glace de regel, mais plutôt une forme intermédiaire. La glace macrocristalline qui constituait la majorité du plancher jusqu'au début du XX^e siècle est progressivement recouverte et remplacée par de la glace de regel, transparente et amorphe.

Période V: Stagnation

Au cours des années 1980 environ, le plancher semble s'être stabilisé à -20 mètres de la surface. Le relevé topographique de 1989 ainsi que nos mesures effectuées en été 2000 coïncident. La glace aurait-elle atteint un état d'équilibre? Si son renouvellement a été fortement diminué en raison des faibles chutes de neige, les éboulis et les débris minéraux répartis sur le plancher de glace semblent toutefois protéger le glacier en formant une couverture thermique, et ralentir ainsi la fusion. L'hypothèse d'un bilan de masse nul devra être vérifiée durant les prochaines décennies.

CONCLUSION

Si la reconstitution proposée reste approximative, elle permet toutefois de démontrer que la glacière de Saint-Georges ne se comporte pas de la même manière que les glaciers alpins, que le climat n'est pas le facteur déterminant à l'origine des fluctuations de la glace et qu'il agit tardivement sur son bilan de masse annuel en raison de l'inertie thermique de la roche encaissante, du déséquilibre occasionné par l'abandon de son exploitation, et des fortes chutes de neige qui caractérisent les hivers de la fin du XIX^e siècle dans le massif jurassien.

Nous avons mis en évidence le rôle fondamental que l'extraction a pu jouer sur la hauteur du plancher. Il est intéressant de souligner que la glacière subit sa plus importante régression (-9 mètres en 35 ans) à une époque où les conditions climatiques sont optimales. C'est en effet durant la première moitié du XIX^e siècle que les glaciers alpins connaissent leur ultime progression.

L'influence secondaire des déboisements et du tourisme a également été suggérée, mais elle reste minime comparativement à l'extraction et au réchauffement climatique.

Il existe encore d'autres facteurs susceptibles d'influencer le bilan de masse annuel et la dynamique des glaces souterraines.

Dans une étude précédente (BRULHART 1998), nous avons mis en évidence que les glacières sont également sensibles aux bâchages naturels ou artificiels de l'orifice principal, qui empêchent le refroidissement et l'alimentation de la caverne (cas de la glacière de Druchaux par MAILLEFER et JEANNIN 1991), aux inondations estivales qui apportent un surplus de calories (cas de la glacière de Chaux-les-Passavant par TROUILLET 1885), aux effondrements (cas de la glacière de la Genolière par BROWNE 1865) et aux désobstructions (cas du Creux-Percé en Bourgogne par SESIANO 1996) qui modifient définitivement le microclimat de la caverne. En d'autres termes, on constate que les fluctuations des glaces souterraines dépendent le plus souvent d'un grand nombre de facteurs,

qui se superposent ou qui interagissent. Chaque glacière évolue par conséquent à sa manière, indépendamment des autres cavernes englacées. Il nous est dès lors impossible d'élaborer un modèle fiable, adapté à l'ensemble des glacières naturelles.

Si l'impact de ces différents facteurs font des glacières des formes fragiles, susceptibles de disparaître en quelques années seulement, elles constituent malgré tout les accumulations de glace pérenne de plus basse altitude en Europe continentale. Leur avenir n'est donc pas aussi précaire que celui des glaciers alpins. Elles risquent toutefois de ne plus être en mesure de se développer dans les régions de moyenne montagne durant le prochain siècle si le réchauffement du climat s'intensifie, mais elles auront toujours la possibilité de se concentrer en altitude, et notamment dans les zones en voie de déglaciation qui offrent des conditions climatiques idéales pour leur développement.

Leur fragilité nécessite malgré tout de prendre certaines mesures, afin d'éviter de modifier accidentellement ou volontairement leur microclimat. De nombreux spéléologues ont parfois livré des luttes acharnées pour contourner la glace, ou tout simplement pour l'éliminer afin de mener à terme leurs prospections. Des randonneurs et des paysans ont également souvent utilisé les cavernes comme dépotoir. Afin de protéger son glacier souterrain, la glacière de Saint-Georges a été récemment intégrée dans l'Inventaire des géotopes d'importance nationale (1999).

BIBLIOGRAPHIE

- ARN R. et CAMPY M., 1990. Un problème de paléogéographie glaciaire au maximum würmien dans la zone circumalpine: le glacier jurassien. *Bull. Soc. neuch. Sc. nat.* 113: 115-131.
- BALCH E.S., 1900. *Glaciers or freezing caverns*. Allen, Lane & Scott, Philadelphia. 337 p.
- BARON P.-J., 1969. *Spéléologie du canton de Vaud*. Editions Attinger, Neuchâtel. 546 p.
- BROWNE G. F., 1865. *Ice caves of France and Switzerland: a narrative of subterranean exploration*. Longmans Green, Londres. 315 p.
- BRULHART D., 1998. *Glacières du Jura vaudois*. Mémoire de Licence, Institut de Géographie, Université de Lausanne (non publié).
- GOLAY H., 1890. *La Vallée de Joux de 1860 à 1890*. Etude et Documents n°11, Editions le Pèlerin (1979), Les Charbonnières. 52 p.
- ASSN, groupe de travail pour la protection des géotopes de Suisse, 1999. *Inventaire des géotopes d'importance nationale*. *Geologia Insubrica* 4.1: 29-48.
- MARTEL E.-A., 1894. *Les Abîmes*. Delagrave, Paris. 578 p.
- MAILLEFER A. et JEANNIN P.-Y., 1991. *La Glacière du Creux d'Enfer de Druchaux*. Berolle VD. *Stalactite* 41.1: 3-24.
- MAIRE R., 1990. *La haute montagne calcaire*. *Karstologia, Mém. n° 3*. 731 p.
- PICTET A., 1822. *Mémoire sur les Glacières Naturelles du Jura et des Alpes*. *Bibl. Univ., Sciences et Arts, Genève* 20: 261-284.
- RACOVITZA G., 1967. *Nouvelle contribution à l'étude du topoclimat de la grotte «Ghetarul de la Scarisoara»*. *Ann. Spéol.* XXII (4): 757-786.

- SESIANO J., 1996. L'abîme du Creux-Percé en Bourgogne: les causes de la disparition de cette célèbre glacière. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 84.1: 1-7.
- STETTLER R., 1971. La Glacière de Monlési. Actes du 4^e congrès national de spéléologie, FNRS, Neuchâtel: 138-149.
- THURY J.-M., 1861. Étude sur les glacières naturelles. *Arch. Sc. phys. nat. (Genève)* 10: 97-153.
- TROUILLET L., 1885. La Glacière de Chaux-les-Passavant. Notice historique et scientifique. Imprimeries Dodivier et Cie, Besançon.

Manuscrit reçu le 28 février 2001