

Evolution de la masse de glace et formation de poches d'eau dans la glacière dynamique des Diablotins (Préalpes fribourgeoises)

Morard Sébastien¹, Bochud Martin² & Delaloye Reynald¹

Résumé: Le Gouffre des Diablotins est le plus profond réseau karstique des Préalpes fribourgeoises. En 1991, la zone de l'entrée inférieure de la grotte était libre de glace. Cependant, une importante et rapide augmentation du volume de glace fut observée en 1994-1995, bouchant presque entièrement la galerie depuis l'entrée inférieure. Entre 1996 et 2007 la glacière fut probablement partiellement ennoyée et des structures de glace très variées se sont formées durant cette période. Des mesures continues du climat hypogé initiées en juin 2009 ont montré le rôle prédominant des conditions atmosphériques hivernales à la fois dans la mise en place d'une circulation d'air par effet de cheminée et dans les modifications saisonnières de la masse de glace. Une nouvelle phase d'ennoisement de la glacière semble se produire depuis novembre 2011.

Introduction

Avec 652 mètres de dénivellation, le Gouffre des Diablotins est actuellement le plus profond réseau karstique des Préalpes fribourgeoises. L'entrée supérieure du gouffre se situe à 2092 m s. m sur l'arête des Bimis et débute par un puits vertical profond de 150 mètres (objet FR032, Spéléo-Club des Préalpes Fribourgeoises SCPF). A -105 mètres, le puits rencontre une galerie horizontale (appelée "galerie inférieure" dans la suite de cet article) qui remonte vers l'entrée inférieure de la grotte située à 2007 m s. m au milieu d'une paroi rocheuse (objet FR030, SCPF) (fig. 1). L'accès aux parties profondes du Gouffre des Diablotins se fait par une ouverture située à l'intersection des galeries provenant des deux entrées.

Le présent article se concentre sur la zone des entrées du Gouffre des Diablotins qui se singularise notamment par la forte présence de glace. BOVEY (1995) signalait ainsi que les 2/3 du puits vertical étaient recouverts de glace durant les années 1990, et qu'un névé persistait durant l'été au fond du puits. L'état actuel de l'englacement du puits vertical n'est pas connu, la galerie provenant de l'entrée inférieure étant obstruée par de la glace depuis les années 1994-1995. L'accès au puits vertical par l'entrée supérieure nécessite une très longue et difficile expédition qui n'a pu être entreprise par manque de temps. L'article souhaite se pencher sur les causes possibles de l'évolution de la masse de glace dans la galerie inférieure ainsi que de sa morphologie particulière.

La connaissance actuelle de l'état de l'englacement des Diablotins se limite donc à la galerie inférieure, dont la glace s'étend de façon discontinue sur environ une trentaine de mètres. Le volume total est estimé à environ 100 m³. Nous avons séparé cette partie de la grotte en

6 secteurs (fig. 1) : depuis l'entrée inférieure, où une accumulation de neige se forme durant l'hiver, la galerie est déglacée sur environ 15 mètres (secteur 1) jusqu'à la première masse de glace significative, le "bouchon de glace" (secteur 2). Le "couloir des deux docteurs" faiblement englacé lui succède (secteur 3), puis vient la "salle de la cheminée", secteur occupé par le volume de glace le plus important (secteur 4). La galerie est aujourd'hui obstruée au niveau du "toboggan de glace" (secteur 4) et "du puits de glace" (secteur 5), empêchant l'accès à la jonction des galeries inférieure et supérieure (secteur 6). Des mesures climatiques (température, humidité, vitesse et direction du courant d'air) initiées en 2009 ont montré qu'actuellement la galerie inférieure est fortement ventilée par un effet de cheminée. Lorsque la température de l'air extérieur franchit un seuil de +2.5 °C, la circulation d'air passe d'un régime de soufflage à un régime d'aspiration et vice versa. La deuxième caractéristique majeure du climat hypogé est que l'air demeure à 0 °C et à 100 % d'humidité en période de soufflage d'air (été), alors que l'hiver se caractérise par un fort refroidissement et un assèchement la cavité. Durant la période hivernale, les parois sont également sèches et la glace présente d'évidentes morphologies liées à des processus de sublimation (MORARD, 2011). Les résultats détaillés de ces mesures climatiques peuvent être trouvés chez MORARD et al. (2010) et MORARD (2011).

Evolution de la masse de glace (1983-2007)

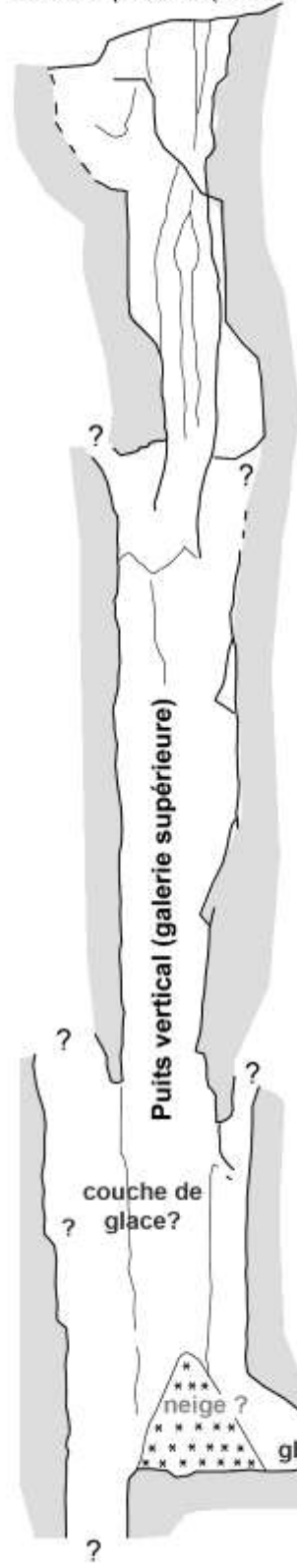
Le caractère original de la glacière des Diablotins réside dans les rapides modifications de sa masse de glace observées lors des 20 dernières années et rapportées dans les archives du SCPF. Lors de la découverte du gouffre en août 1983, la galerie inférieure était complètement bouchée par de la glace. La situation était tout autre en août 1991 et en 1992, puisque la cavité était presque entièrement déglacée. Une exploration intense du réseau karstique débute alors et les spéléologues atteignent une profondeur de -652 m en août 1992.

¹ Unité de Géographie, Université de Fribourg, Chemin du Musée 4, CH-1700 Fribourg

² Spéléo-Club des Préalpes fribourgeoises (SCPF), CH-1700 Fribourg

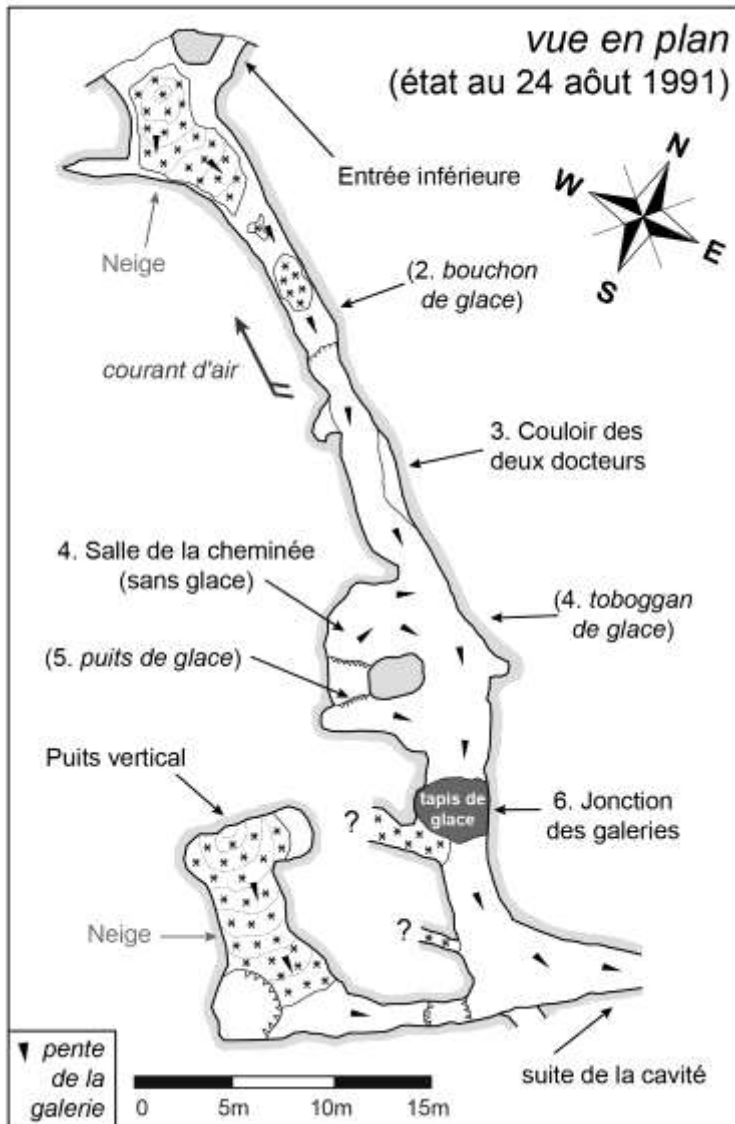
vue en coupe (état au 21 novembre 2009)

Entrée supérieure (2'092 m. s.m.)

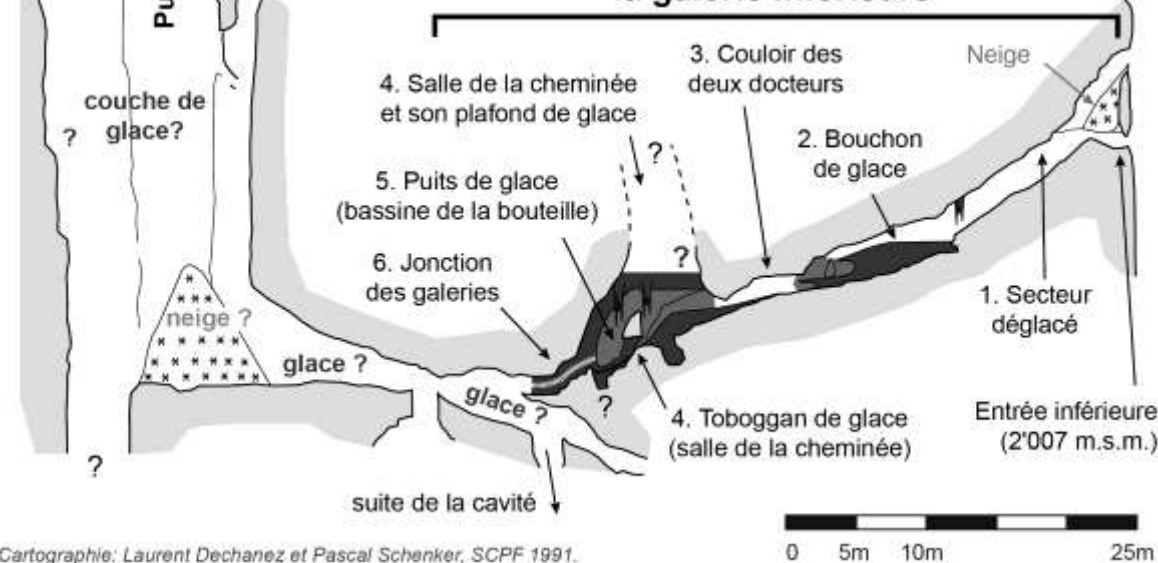


Glacière des Diablotins

vue en plan (état au 24 août 1991)



la galerie inférieure



Cartographie: Laurent Dechanez et Pascal Schenker, SCPF 1991.

Figure 1: Vue en plan et en coupe de la zone des entrées du Gouffre des Diablotins. Notez la différence d'englacement entre 1991 et 2009.

En juillet 1993, une corde est installée dans la salle de la cheminée pour accéder par une vire à la jonction menant au pied du puits de l'entrée supérieure ainsi qu'à la suite de la cavité (galerie Art-Belion et méandre du Torticolis), de la glace commençant à obstruer l'accès par le bas de la salle de la cheminée. Cependant « depuis 1994, l'exploration de la grotte a été rendue difficile par l'accumulation très importante de glace dans la galerie inférieure. Depuis 1995, la glace bouche complètement cette galerie ainsi que la zone de jonction avec le puits venant de l'entrée supérieure » (BOVEY, 1995). Depuis lors et encore aujourd'hui, il n'a plus été possible d'atteindre les voies d'accès au Gouffre des Diablotins depuis l'entrée inférieure. Entre 1997 et 2001, d'importantes quantités d'eau liquide mélangée à de la glace ont été observées au niveau de l'actuel bouchon de glace (SCPF, comm. pers). Un tuyau y fut installé pour tenter d'évacuer l'eau, sans succès, puisque la galerie inférieure était toujours ennoyée en 2005. Depuis 2007 en revanche, un courant d'air était à nouveau perceptible, laissant présager une possible réouverture de la galerie inférieure.

En d'autres termes, le volume du culot de glace dans la grotte a fortement augmenté au cours des années 1990, ce qui, au regard de l'évolution climatique (fort réchauffement à partir de la décennie 1980) s'avère un comportement pour le moins singulier. Par ailleurs, la modification de la masse de glace des Diablotins représente un phénomène particulier qui ne se retrouve pas dans les grandes glaciers dynamiques des Alpes autrichiennes (par ex. SPÖTL, 2008) ou les glaciers stato-dynamiques du Jura (par ex. LUETSCHER, 2005) où les volumes de glace présents dans les cavités ont tendance à demeurer beaucoup plus stables ou à diminuer progressivement. Relevons cependant qu'une importante augmentation du volume de glace a aussi été observée entre 1976 et 2001 dans la glacier dynamique des Pingouins au Sanetsch à 2300 m s. m. (BORREGUERO et al., 2009).

Evolution saisonnière de la masse de glace (2009-2012)

La galerie inférieure a été visitée à 8 reprises entre juin 2009 et novembre 2011. Différentes observations et mesures ont ainsi permis de caractériser plus spécifiquement les variations du volume de glace. Une mesure de la hauteur de la surface de glace par rapport au plafond de la galerie est réalisée au niveau du bouchon de glace (MORARD, 2011). Les variations observées les plus marquées pour les différents secteurs (bouchon de glace, salle de la cheminée, puits de glace) de la galerie inférieure sont illustrées sur la figure 2.

Bouchon de glace

Le bouchon de glace est la première masse de glace que l'on rencontre environ à 20 m de l'entrée inférieure des Diablotins. Les eaux de percolation proviennent de deux sources différentes à cet endroit : tout d'abord, un petit névé se forme proche de l'entrée inférieure en hiver. La galerie des Diablotins étant d'origine phréatique, il est possible qu'un apport non-négligeable d'eau pourrait venir de la fonte de la neige accumulée durant l'hiver dans l'entrée inférieure. La deuxième source d'eau liquide provient de différentes fissures débouchant notamment au niveau du bouchon de glace où s'est formée une magnifique colonne de glace. Alors que le volume de glace augmente de façon significative durant la période printanière et estivale, l'hiver se caractérise par une perte relative de glace. A cet emplacement le niveau de glace s'est en effet abaissé de 6 centimètres entre octobre 2009 et mars 2010 malgré des températures continuellement négatives, mais en la présence d'un (courant d') air très sec. En hiver, la colonne de glace se caractérise par un aspect très clair et "rongée", morphologie typique de glace ayant subi un processus de sublimation (MORARD, 2011).

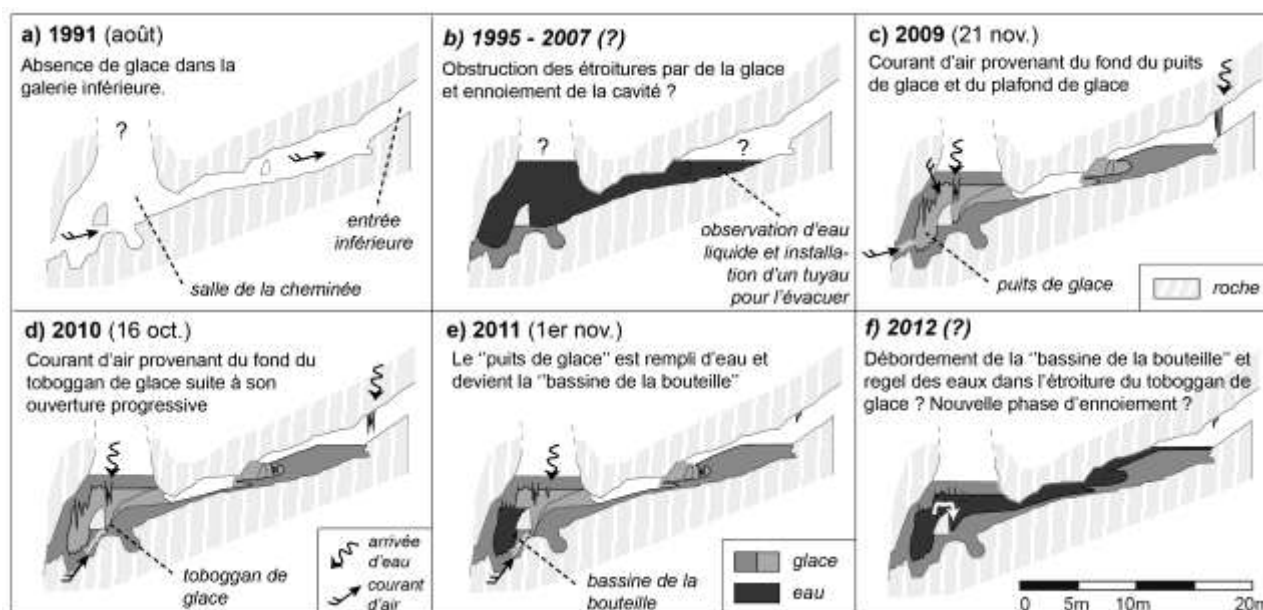


Figure 2: Evolution saisonnière de l'état d'englacement et d'ennoisement, ainsi que de la position des courants d'air entre 2009 et 2012. L'état sans glace de 1991, ainsi que l'état probable de la glacière en 1995 ainsi que des scénarii possibles pour 2012 sont également présentés.

Entre le bouchon de glace et le couloir des deux docteurs, la masse se compose de glace ancienne légèrement opaque et présentant des petites cavités en forme de U renversé, ainsi que de glace basale beaucoup plus claire dont l'origine est liée à l'écoulement d'eau depuis l'amont du bouchon de glace. En mars 2010 la roche était apparente en bordure de la glace ancienne. Mais dès mai 2010, le regel des eaux de percolation a transformé l'accès au couloir des deux docteurs en véritable torrent de glace très glissant.

Le bouchon de glace présente ainsi de fortes variations saisonnières et interannuelles. Si les premières observations laissaient présager une diminution et une ouverture de la galerie, les mesures effectuées entre juin 2010 et mars 2012 tendent à montrer que la masse de glace s'est à nouveau élevée à cet endroit, ainsi que dans le secteur rejoignant le couloir des deux docteurs.

Salle de la cheminée et toboggan de glace

Aujourd'hui le plus grand volume de glace dans la glacière des Diablotins se situe dans la salle de la cheminée, une grande salle située directement à l'aplomb d'un puits vertical selon le relevé topographique du SCPF de 1991. A cet endroit un étonnant plafond de glace – qui n'existait pas en 1996 – fut observé pour la première fois en octobre 2009 (fig. 3A). La corde fixe installée en 1993 traversait le plafond et était prise dans la masse de glace. Si la variation du niveau de glace est relativement importante au niveau du bouchon de glace, il n'en va pas de même dans la salle de la cheminée. En effet dans cette partie de la grotte, la perte de glace est quasi-continue depuis le début des observations en octobre 2009. Deux indices viennent l'attester : premièrement l'accès au puits de glace nécessite l'installation de vis à glace dans la grande masse gelée latérale de la salle de la cheminée. Le fait que la profondeur du trou percé diminue de visite en visite indique une perte du volume de glace. Deuxièmement le fond du toboggan de glace n'a cessé de s'ouvrir depuis mars 2010, découvrant une petite galerie par laquelle souffle un courant d'air.

Des arrivées d'eau proviennent du plafond comme le montre la présence de grandes stalactites dans la salle de la cheminée. Leur position n'est cependant pas constante indiquant des modifications des zones de percolations, peut-être liées à l'état d'englacement des fissures. Le 21 novembre 2009 de l'eau ruisselait le long des parois et des stalactites, et un courant d'air fut senti en provenance des bords du plafond de glace. Ces ruissellements n'étaient plus audibles en mars 2010 et le courant d'air provenait cette fois de la base du toboggan de glace par de petits trous nouvellement formés dans la glace. Le 21 novembre 2011 une nouvelle stalactite s'était développée au milieu du plafond de glace creusant la masse de glace principale, alors que les grandes stalactites présentes les années précédentes en bordure de la salle étaient en cours de disparition (fig.3A).

Le puits de glace et la bassine de la bouteille

La salle de la cheminée se poursuit par le puits de glace, profond d'environ 5 mètres. Le 21 novembre 2009 un courant d'air était perceptible au travers d'un canal décimétrique situé au fond du puits de glace (MORARD et al., 2010). En 2010 ce petit orifice était cependant bouché et aucun courant d'air ne passait dans le fond du puits de glace. A cet emplacement la modification la plus spectaculaire fut observée le 1er novembre 2011 lorsque le puits de glace se trouvait entièrement rempli d'eau liquide (fig. 3B-C) ! Dans ces circonstances, il fut renommé "la bassine de la bouteille". Une partie de cette eau liquide débordait et percolait le long de la masse de glace latérale de la salle de la cheminée avant de s'évacuer à travers l'ouverture du toboggan de glace. En conclusion, on retiendra donc que les pertes et gains de volume de glace sont complexes et ne semblent pas être uniformément répartis dans les différents secteurs de la galerie inférieure.

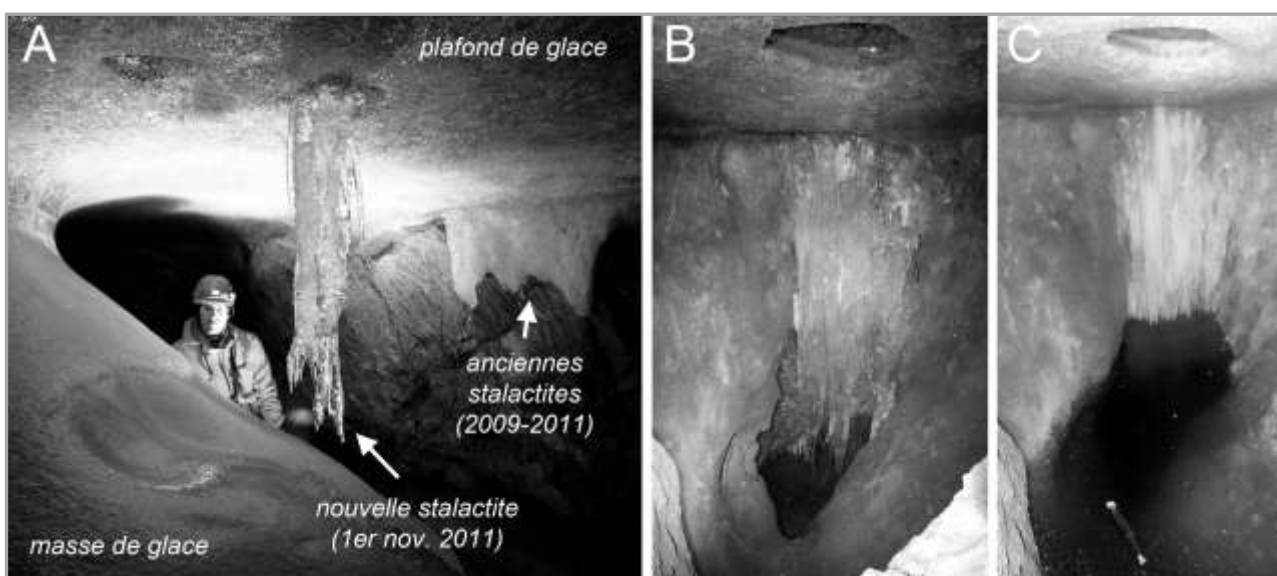


Figure 3 : A : Salle de la cheminée le 1er novembre 2011, B : Puits de glace le 9 mars 2010, C : Puits de glace (renommé bassine de la bouteille) le 1er novembre 2011.

Interprétation

Modifications des conditions hivernales au début des années 1990 ?

Les deux premières années de mesure en continu indiquent que les modifications du climat et de la masse de glace dans la galerie inférieure semblent en partie dépendantes des conditions hivernales (MORARD et al., 2010, MORARD, 2011). Un tel couplage a également été montré par exemple par SPÖTL (2008) pour les gigantesques glaciers dynamiques de Dachstein-Rieseneishöhle et d'Eisriesenwelt (Autriche) ou par LUETSCHER (2005) pour les glaciers en piège à air froid du Jura. Sur la base des données météorologiques des stations du Moléson (température et humidité de l'air) et de Château d'Oex (enneigement) (voir la reconstruction chez MORARD 2011), on peut remarquer que les hivers successifs 1988/1989, 1989/1990, 1991/1992 et 1992/1993 furent doux, peu enneigés et avec un air relativement sec. Ces années correspondent à la période sans glace de la galerie inférieure durant laquelle l'exploration du Gouffre des Diablotins a eu lieu. Au contraire les hivers 1993/1994 et 1994/1995 furent plus froids, avec un taux d'humidité de l'air plus élevé et un enneigement généreux, conditions en principe favorables à l'accroissement de la masse de glace reporté durant ces années dans les archives du SCPF.

Il est plus difficile d'expliquer les causes de l'évolution de la masse de glace entre 1997 et 2005, lorsque la galerie inférieure était – pour autant que les archives du SCPF soient correctes – ennoyée et qu'aucun courant d'air n'était perceptible. Il est possible que suite aux hivers froids et enneigés 1994 et 1995 de la glace ait rempli les fissures et les étroitures (toboggan de glace) entre la salle de la cheminée et la jonction des galeries. En effet lors de nos observations, il fut remarqué que les emplacements des arrivées d'eau pouvaient varier d'une année à l'autre, les stalactites se formant sur des zones de fissures ou dans la salle de la cheminée n'étant pas toujours situées au même endroit. On peut imaginer ainsi que lorsqu'une zone de percolation demeure active, l'eau peut également geler dans les fissures en atteignant le secteur sur-refroidi de la grotte et de ce fait bloquer l'écoulement d'eau. Lors de la prochaine période de percolation (à la fonte des neiges) l'eau devra emprunter un autre chemin pour s'évacuer dans la grotte. De même, les étroitures situées au débouché de la salle de la cheminée sont des endroits potentiellement critiques pour le fonctionnement hydrique et atmosphérique de la glacière. En cas d'englacement et de blocage du drainage des eaux, une poche d'eau peut se former durant les années suivantes, au moins pendant l'été. La circulation d'air pourrait ainsi être fortement perturbée, voire momentanément interrompue. Quoi qu'il en soit, après que l'éventuelle poche d'eau signalée par les spéléologues se soit vidée (depuis 2006-2007 ?), le passage d'un courant d'air a sculpté dans la masse de glace les différentes structures (coups de gouge, etc.) qui peuvent être observées aujourd'hui.

Origine du plafond de glace dans la salle de la cheminée ?

Un des aspects les plus spectaculaires de la glacière des Diablotins se trouve dans la salle de la cheminée où un important volume de glace et un surprenant plafond de glace se sont formés entre 1997 et aujourd'hui (fig. 3A). En se basant sur les archives du SCPF et la morphologie de la glace, une hypothèse peut être avancée pour expliquer sa formation.

L'origine de la glace peut être attribuée au gel d'un volume d'eau stagnante. Un cycle de remplissage d'une cavité par de l'eau, puis de formation de "glace de lac" et enfin de vidange de la poche d'eau a été reporté par TURRI et al., (2003) dans la glacière de Moncodena (Lombardie). Dans ce cas de figure, le gel débute à l'interface air-eau et se propage vers le bas tant que de l'eau liquide est disponible. Un événement similaire a-t-il pu se produire dans la glacière des Diablotins par le regel d'une partie de l'eau stagnante trouvée par les spéléologues entre 1996 et 2005 ? Cela pourrait expliquer d'une part la morphologie "plate" du plafond de glace pourtant situé à l'aplomb d'une cheminée, ainsi que la présence de bulles dans la masse de glace (MORARD, 2011). Les dernières observations du 1er novembre 2011 semblent venir confirmer cette hypothèse (fig. 3). En effet le remplissage s'effectue actuellement dans un premier temps dans le puits de glace (ou bassine de la bouteille), puis il est envisageable que cette eau froide déborde dans la salle de la cheminée pour éventuellement venir boucher la galerie étroite où s'enfonce le toboggan de glace. Dans le cas où ces exutoires arriveraient à être bouchés par de la glace, une poche d'eau pourrait alors se former et remonter vers l'actuel bouchon de glace. Entre 1997 et 2001 d'importantes quantités d'eau liquide avaient en effet été observées à cet endroit. Le courant d'air serait alors stoppé, jusqu'à ce que l'eau liquide arrive à se frayer un chemin à travers la base de la masse de glace. La glacière serait ainsi peut-être sujette à des cycles d'englacement – ennoisement – déglacement, dont les causes et le timing semblent complexes et ne sont dans tous les cas pas clairement définies aujourd'hui.

Conclusion

Les résultats acquis lors de ces premières années d'étude dans la Glacière des Diablotins ont permis d'améliorer la compréhension des effets d'une circulation d'air par effet de cheminée à l'intérieur d'un système ventilé. On notera notamment que :

- L'évolution de la masse de glace des Diablotins connaît des modifications rapides et hétérogènes selon les secteurs de la galerie inférieure. La masse de glace dans les Diablotins a également tendance à décroître essentiellement durant l'hiver par sublimation, alors que de la nouvelle glace de congélation apparaît essentiellement au printemps et durant l'été.

- Lorsque la cavité n'est pas totalement obstruée par de la glace, une circulation d'air par effet de cheminée se met en place. Les conditions hivernales semblent ainsi capitales pour l'évolution de la masse de glace et du climat hypogé. Alors que l'état déglacé de la galerie inférieure au début des années 1990 s'est produit suite à des hivers doux et peu enneigés, le fort accroissement de la masse de glace en 1994 et 1995 fait suite à des hivers froids et bien enneigés.
- Il semble que les étroitures situées au niveau de la salle de la cheminée puissent se boucher rapidement entraînant un ennoisement progressif de la galerie inférieure. Dans ce cas, la ventilation se trouve modifiée voire interrompue, entraînant un changement drastique du climat souterrain. Le suivi à long terme de la galerie inférieure devrait permettre de mieux quantifier ces diverses variations spectaculaires.

Remerciements

Nous remercions très chaleureusement la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles, ainsi que le Fond de Recherche de l'Université de Fribourg pour leur soutien financier au projet "Glacière des Diablotins".

Bibliographie

- BORREGUERO M., PAHUD A., FAVRE G., HEISS G., SAVOY L., BLANT M. (2009) : Lapi di Bou : recherches et explorations spéléologiques 1974-2009. No spécial des revues Cavernes et Hypogées, 214 p.
- BOVEY M. (1995) : Gouffre des Diablotins. Akten des 10. Nationalen Kongresses für Höhlenforschung, Breitenbach, Suisse, 170-172.
- LUETSCHER M. (2005) : Processes in Ice Caves and their Significance for Paleoenvironmental Reconstructions. SISKI, La Chaux-de-Fonds: 154 p. ISBN 3-908495-19-9.
- MORARD S. (2011) : Effets de la circulation d'air par effet de cheminée dans l'évolution du régime thermique des éboulis froids de basse et moyenne altitude. PhD thesis, Fac. Sciences, Univ. Fribourg, GeoFocus 29.
- MORARD S., BOCHUD M., DELALOYE R. (2010) : Rapid changes of the ice mass configuration in the dynamic Diablotins ice cave – Fribourg Prealps, Switzerland. The Cryosphere, 4, 489-500, doi:10.5194/tc-4-489-2010.
- SPÖTL C. (2008): Kryogene Karbonate im Höhleneis der Eisriesenwelt. Die Höhle, 59. Jg., Heft 1-4/2008, 26-36.
- TURRI S., CRITERIO M., BINI A., MAGGI V., UDISITI R., STENNI B. (2003): Etude glaciologique et climatologique des cavités glacées du Moncodeno (Grigna septentrionale, province de Lecco, Lombardie). Karstologia, 42(2) : 37-44