

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg
Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles
Band: 99 (2010)

Artikel: La glacière des Diablotins : évolution rapide d'une masse de glace souterraine au cœur des Préalpes fribourgeoises
Autor: Morard, Sébastien / Bochud, Martin / Delaloye, Reynald
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308888>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 29.01.2026

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

La glacière des Diablotins: évolution rapide d'une masse de glace souterraine au cœur des Préalpes fribourgeoises

SÉBASTIEN MORARD¹, MARTIN BOCHUD^{2,3}, REYNALD DELALOYE¹

¹ Unité de Géographie, Département des Géosciences, Université de Fribourg

² Unité des Sciences de la Terre, Département des Géosciences, Université de Fribourg

³ Spéléo-Club des Préalpes Fribourgeoises (SCPF), Fribourg

Résumé – Zusammenfassung - Abstract

La glacière des Diablotins: évolution rapide d'une masse de glace souterraine au cœur des Préalpes fribourgeoises

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. L'hiver se caractérise par un fort refroidissement et un assèchement de la glacière avec une diminution significative du volume de glace par sublimation. A contrario, la masse de glace augmente et demeure stable durant le printemps et l'été à la suite de la congélation des eaux de fonte de la neige.

Die Diablotins Eishöhle: schnelle Veränderungen in einer unterirdischen Eismasse im Herzen der Freiburger Voralpen

Die Diablotinshöhle ist das tiefste karstische Höhlensystem der Freiburger Voralpen. Im Jahre 1991 war die untere Eingangszone der Höhle eisfrei. Von 1994-1995 wurde danach ein bedeutender und schneller Zuwachs der bereits vorhandenen Eismasse festgestellt. Diese verschloss die Galerie vom unteren Eingang her fast vollständig. Zwischen 1996 und 2007 wurde die Eishöhle vermutlich teilweise überflutet, was zur Bildung verschiedener Eisstrukturen führte. Seit Juni 2009 zeigen kontinuierliche klimatische Messungen, dass die jeweilige Wetterlage im Winter eine bestimmende Rolle für die Effizienz der Luftzirkulation durch den sog. Kamineffekt, und somit auch für die saisonalen Schwankungen der Eismasse einnimmt. Der Winter verursacht eine starke Abkühlung und Austrocknung der Grotte, und führt damit zu einer starken Abnahme der Eismasse durch Sublimationsprozesse. Im Gegenteil dazu bleibt die Eismasse im Frühling und im Sommer stabil oder nimmt sogar zu, nachdem das Schmelzwasser wieder gefroren ist.

The Diablotins ice cave: rapid changes of underground ice mass in the Freiburg Prealps

The Gouffre des Diablotins is a deep cave system located in the Swiss Prealps. In 1991, the lower entrance zone of the cave was almost free of ice. Nevertheless the ice volume sharply increased in 1994-1995, plugging almost totally the gallery from the lower entrance. The ice cave has also probably experienced a flooded period between 1996 and 2007 and very heterogeneous ice surface morphologies and textures have formed. Continuous cave climate measurements initiated in June 2009 showed the predominant role of winter atmospheric air conditions to drive both the efficiency of chimney-effect air circulation and seasonal modifications of the ice mass. The winter is characterized by a strong cooling and drying of the ice cave, with a significant decrease of the ice mass due to sublimation. Conversely, the ice mass increases and remains stable during the spring and summer seasons following the refreezing of snowmelt water.

1. Introduction

Les glacières sont des grottes renfermant de la glace pendant toute l'année. LUETSCHER (2007) les définit également comme un système caractérisé par une anomalie thermique négative au sein d'un massif karstique. L'étude de ces grottes glacées en Suisse se focalise essentiellement dans la chaîne du Jura, où une douzaine de cavités explorées contiennent de la glace pérenne et du pergélisol (LUETSCHER 2005). Les plus importantes sont les glacières de Monlési (6000 m³) et de St-Livre (1200 m³), glacières en piège à neige et à air froid (glacières dites «statiques»). Malgré un nombre respectivement important de cavités et de réseaux souterrains, les quelques glacières recensées dans le canton de Fribourg sont en revanche peu étudiées, notamment en raison d'une accessibilité (très) difficile, nécessitant de longues approches et de bonnes connaissances des techniques alpines (SCPF 2009).

Les composantes du système «glacières» sont la glace, les eaux de percolation, la présence de neige, la roche encaissante et l'atmosphère souterraine (LUETSCHER et al. 2008). Diverses études ont notamment montré le rôle primordial joué par les circulations d'air dans les modifications du climat hypogé et dans la préservation et la formation de glace souterraine dans des environnements où la température moyenne annuelle de l'air est nettement positive (Saar 1956, LISMONDE 2002, LUETSCHER et al. 2008). En milieu alpin, LUETSCHER & JEANNIN (2004) considèrent que l'effet de cheminée, processus de ventilation provoqué par l'existence d'un gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur des cavités souterraines à plusieurs entrées dénivelées, influence de manière majeure le régime thermique des glacières dites dynamiques. La ventilation par effet de cheminée se caractérise par une renverse du courant d'air: on parle de régime «hivernal» lorsque de l'air chaud est expulsé dans les parties hautes du système poreux et que de l'air extérieur froid est aspiré par ses ouvertures inférieures. Inversement, le régime «estival» se caractérise par une décharge gravitaire d'air froid dans les parties basses du système, entraînant un afflux d'air extérieur plus chaud par ses entrées supérieures. En conséquence, l'entrée basse du système présente une anomalie thermique négative par rapport à la température de l'air extérieur – endroit favorable à la formation et la préservation de glace – alors qu'une anomalie positive est observée aux entrées supérieures. Ce processus est aussi effectif dans les terrains sédimentaires poreux et permet la préservation de conditions de sol anormalement froides dans les éboulis et les glaciers rocheux fossiles situés à

basse altitude (MORARD et al. 2010a). Dans le canton de Fribourg, il en existe de nombreux sites comme le glacier rocheux du Gros Chadoua ou les éboulis froids des Drudzes et de Vudèche (MORARD et al. 2008).

Le présent article se concentre sur le cas particulier de la glacière des Diablotins, dont le volume de glace a fortement augmenté au milieu des années 1990. La galerie inférieure de la glacière des Diablotins a été instrumentée et a fait l'objet d'une étude approfondie depuis juin 2009. L'objectif de cette publication est de présenter les principaux résultats de cette première année de mesure et de déterminer l'importance des processus ayant actuellement cours dans la glacière et déterminant le climat souterrain et l'évolution saisonnière de la masse de glace.

2. La glacière des Diablotins

Le réseau karstique du Gouffre des Diablotins s'ouvre sur les flancs de la chaîne des Bimis vers 2000 m.s.m., dans le vallon des Morteys, à l'est du Vanil Noir. La température moyenne annuelle de l'air y est d'environ +2.8°C (mesurée à la station météorologique du Moléson, 1974 m.s.m.). Les hivers se caractérisent par des températures moyennes de $-2.2 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$. L'accumulation de neige est en moyenne de 3 - 4 m dans le vallon Morteys, son épaisseur pouvant néanmoins varier très fortement localement entre les crêtes soufflées par le vent et les pieds de versant où d'énormes névés peuvent se former durant l'hiver.

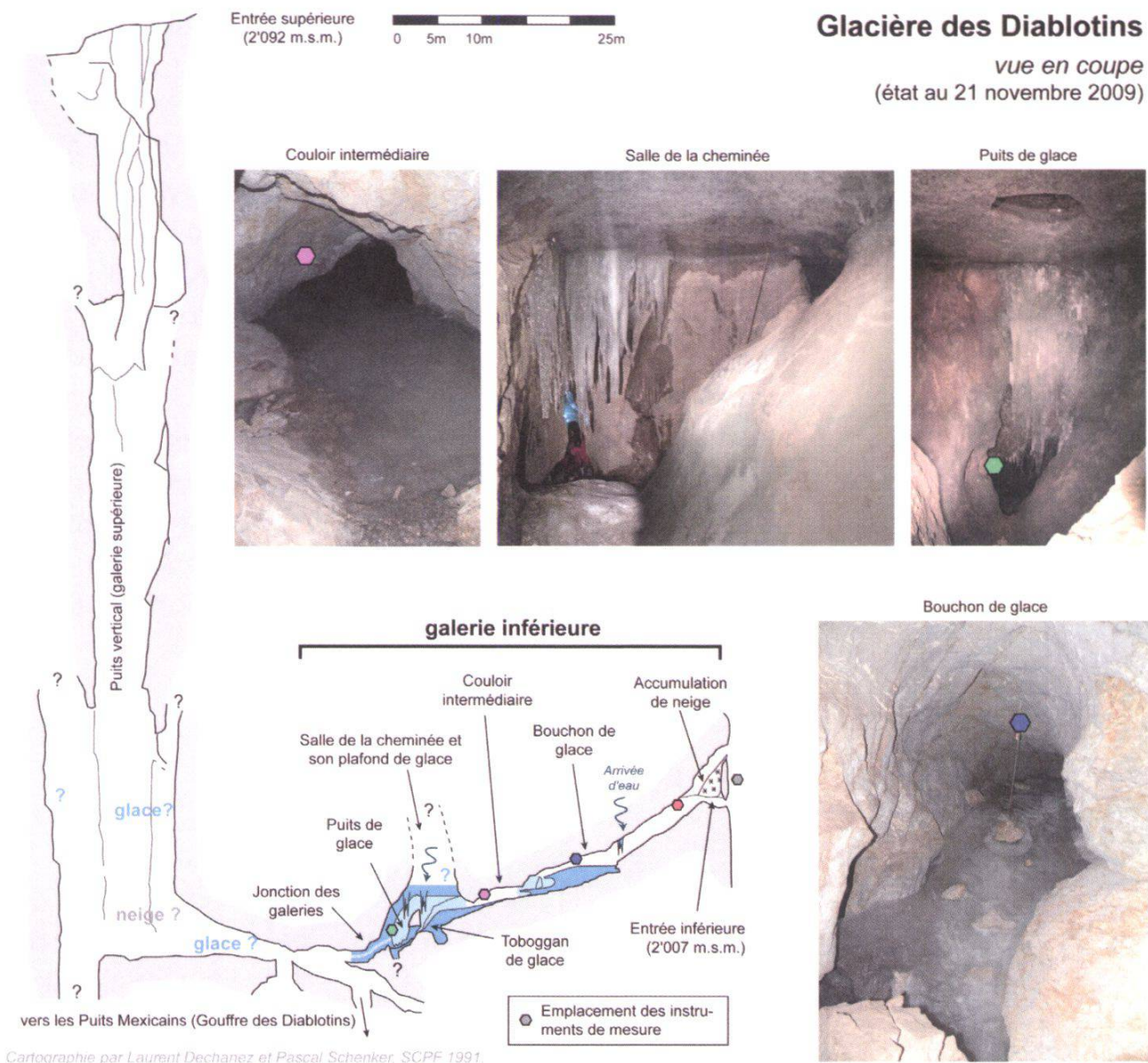


Figure 1: Vue en coupe de la glacière des Diablotins et répartition connue de la masse de glace en novembre 2009. Les mesures effectuées depuis juin 2009 se sont concentrées dans plusieurs secteurs de la galerie inférieure. Les pastilles indiquent la position des instruments de mesure.

Avec 652 mètres de dénivellation, le Gouffre des Diablotins est actuellement le plus profond réseau karstique de la région (SCPF 2009). L'entrée supérieure du gouffre se situe à 2092 m.s.m. et débute par un puits vertical sur une profondeur de 150 mètres (objet FR032, SCPF 2009). 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 2009) (fig.1). L'accès aux parties profondes du Gouffre des Diablotins (BOVEY

2005) se fait par une ouverture située à l'intersection des galeries provenant de deux entrées («jonction des galeries» sur fig.1).

La zone des entrées se singularise notamment par la forte présence de glace. BOVEY (1995) signalait ainsi que les 2/3 du puits vertical sont recouverts de glace. Actuellement, la glace s'étend de façon discontinue dans la galerie inférieure, séparée en 6 sections (fig.1) : depuis l'entrée inférieure, la galerie est déglacée sur environ 15 mètres jusqu'à la première masse de glace significative, le «bouchon de glace». Le «couloir intermédiaire» faiblement englacé lui succède, puis vient la «salle de la cheminée». La galerie est aujourd'hui totalement obstruée au niveau du «toboggan de glace» et «du puits de glace», empêchant l'accès à la jonction intermédiaire des galeries inférieure et supérieure. La grotte forme également un « L » entre les entrées supérieure et inférieure, configuration a priori favorable à la mise en place d'une circulation d'air par effet de cheminée. La présence de forts courants d'air en été est en effet reportée par BOVEY (1995).

2.1 Evolution de la masse de glace depuis 1990

Le caractère original de la glacière des Diablotins réside dans les surprenantes et rapides modifications de sa masse de glace observées lors des 20 dernières années. En effet, les archives du SCPF rapportent que la galerie inférieure (fig.1) était libre de toute glace en août 1991. Une exploration intense du réseau karstique débute alors et les spéléologues atteignent une profondeur de -652 m en août 1992. 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 (Puits mexicains), 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, 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. 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 est à nouveau perceptible.

En d'autres termes, le volume du culot de glace dans la grotte a fortement augmenté au cours des années 1994-1995, ce qui, au regard de l'évolution climatique actuelle (fort réchauffement à partir de la décennie 1980) s'avère un comportement pour le moins singulier. Par ailleurs, une telle évolution de la masse de glace des Diablotins représente un phénomène unique qui ne se retrouve pas dans les glaciers du Jura par exemple, où les volumes de glace présents dans les cavités ont tendance à demeurer beaucoup plus stables ou à diminuer progressivement ces dernières décennies (LUETSCHER 2005, LUETSCHER et al. 2008).

2.2 Instrumentation de la glacière des Diablotins en 2009-2010

Afin de comprendre cette évolution singulière de la masse de glace, des visites plus fréquentes de la galerie inférieure ont été entreprises dès juin 2009. Un projet de recherche a été lancé dans le courant de l'été 2009 dans le but d'identifier les principaux processus actuellement en cours dans la glacière des Diablotins.

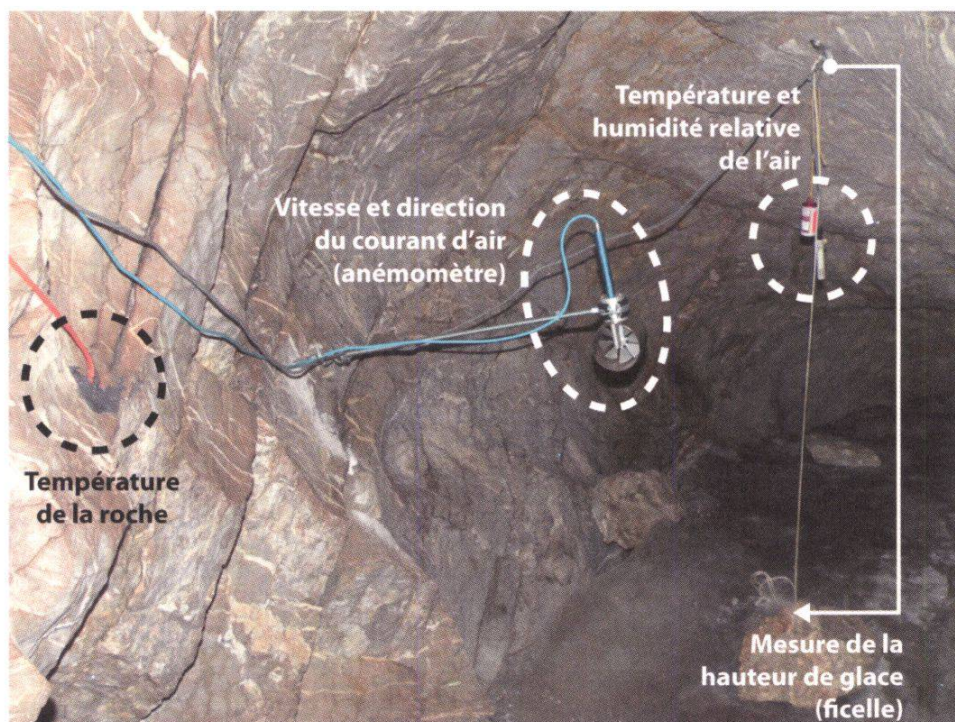


Figure 2: Aperçu des instruments au niveau du bouchon de glace. Les câbles sont reliés à une station météorologique autonome (MADD Technologies).

La galerie inférieure a ainsi été équipée d'une station météorologique (MAAD Technologies, JDC Electronics, mesure chaque heure) et de divers capteurs autonomes (UTL-1, Geotest AG, mesure chaque 2 heures ; iButton, mesure chaque 3 heures) à 5 emplacements différents (fig.1 et tab.2) : à l'extérieure de la cavité, proche de l'entrée inférieure et dans trois secteurs de la partie englacée de la galerie inférieure, à savoir au niveau du bouchon de glace, dans le couloir intermédiaire et dans le puits de glace après la salle de la cheminée. Les températures de l'air et de la roche, l'humidité relative de l'air, la vitesse et la direction du courant d'air (anémomètre) au niveau du bouchon de glace (fig.2 & tab.1) sont ainsi enregistrés. La station météorologique a malheureusement été victime d'un problème de calendrier dès le 21 novembre 2009, entraînant une prise de mesure chaque 10 heures en lieu et place d'une heure. Depuis lors, l'anémomètre n'a plus fonctionné correctement.

Une ficelle installée sur le bouchon de glace permet de mesurer les variations de hauteur de la masse de glace lors des visites. Des mesures ponctuelles de vitesse et de direction du courant d'air sont aussi réalisées lors des visites à l'aide d'un anémomètre portable (GEOS). Aucune mesure n'a en revanche été effectuée dans l'entrée supérieure et le puits vertical en raison d'une accessibilité difficile et d'un manque de temps. L'exploration de ce secteur est cependant prévue pour les prochaines années.

2.3 Modifications saisonnières de la masse de glace entre juin 2009 et octobre 2010

La galerie inférieure a été visitée à 6 reprises entre juin 2009 et octobre 2010 (tab.2). La glacière des Diablotins se caractérisent par une distribution très hétérogène de glace (fig.1), dont le volume total est estimé à environ 100m³.

- 14 juin 2009 : une accumulation de neige occupait la cavité proche de l'entrée inférieure. Un bouchon de glace obstruait presque totalement la galerie 20m plus bas. Un fort courant d'air froid (-0.3°C, 2.5-3 m/s) soufflait par une petite ouverture au sommet du niveau de glace et les parois de la cavité étaient entièrement couvertes de givre.
- 31 octobre 2009 : après une première période de temps froid et neigeux à la mi-octobre, une deuxième visite de la glacière allait permettre de poursuivre l'exploration plus en profondeur dans la galerie inférieure.

En effet, la surface du bouchon de glace s'était abaissée de 4cm par rapport au 14 juin et plus à son extrémité. Il fut ainsi possible d'atteindre la salle de la cheminée dans laquelle un étonnant plafond de glace – qui n'existait pas en 1996 – s'était formé. La corde installée en 1993 était prise dans la masse de glace. Tout au long de la galerie, de nombreux coups de gouge sont taillés dans la glace (LISMONDE 2002).

- 21 novembre 2009 : alors que la surface du bouchon de glace avait encore diminué de 2 cm, l'exploration s'est poursuivie avec un équipement adéquat jusque dans le puits de glace situé après la salle de la cheminée. La galerie y était cependant totalement obstruée pas de la glace, à l'exception d'un canal décimétrique par lequel sortait un courant d'air. La jonction avec le puits vertical et les galeries d'accès au Gouffre des Diablotins n'a pu être atteinte.
- 9 mars 2010 : l'entrée inférieure était partiellement bouchée par de la neige. A l'intérieur de la galerie inférieure, le courant d'air était aspirant. Surtout, le bouchon de glace avait encore diminuait de volume, 10 cm d'épaisseur ayant été perdu par rapport au 14 juin 2009 ! Cette perte de glace en hiver se généralisait à l'ensemble des secteurs de la galerie inférieure. La surface de la glace était également "sale" et couverte d'une fine couche de poussières.
- 22 mai 2010 : de la nouvelle glace de congélation – très claire – s'est formée sur le sol de la galerie inférieure entre le bouchon de glace et la salle de la cheminée (fig.3). Le courant d'air est à nouveau expulsé par l'entrée inférieure.
- 16 octobre 2010 : l'été touche à sa fin et pourtant le volume de glace a encore augmenté par rapport au mois de mai. Le niveau de la surface du bouchon de glace au point de mesure est même supérieur à juin 2009. L'accès à la salle de la cheminée est toujours possible mais devient délicat (fig.3).

Un dernier fait surprenant qui pourra intéresser les biologistes est à relever : durant toute les visites, des papillons morts ou en état apparent de léthargie, probablement de l'espèce *Triphosa dubitata* – une Géomètre connue pour hiverner dans les grottes (CHITTARO, Y., comm. pers) – ont été observés à même la glace...

Tableau 1 : Types de mesures effectuées dans la galerie inférieure de la glacière des Diablotins. Les mesures en continu ont débuté le 31 octobre 2009, à l'exception de la température de l'air au bouchon de glace mesurée depuis juin 2009.

Types de mesure :	Extérieure de la grotte	Entrée inférieure	Bouchon de glace	Couloir intermédiaire	Puits de glace
Température de l'air	X	X	X	X	X
Humidité relative de l'air	.	.	X	X	.
Température de la roche (10 cm)	.	X	X	.	.
Vitesse et direction du courant d'air	.	.	X	.	.
Niveau de glace	.	.	X	.	.
Comparaison de photos	X	X	X	X	X

Tableau 2: Variation de la distance entre le plafond de la galerie et la surface de glace au niveau du bouchon de glace. Noter la diminution observée durant l'hiver 2010 et l'augmentation du volume de glace entre mai et octobre 2010. Précision de la mesure: $\pm 1\text{cm}$.

Date	Distance glace – plafond (cm)	Changement depuis le 14 juin 2009	Changement par rapport à la date précédente
14.06.09	114	-	-
31.10.09	118	-4	-4
21.11.09	120	-6	-2
09.03.10	124	-10	-4
22.05.10	118	-4	+6
16.10.10	109	+5	+9

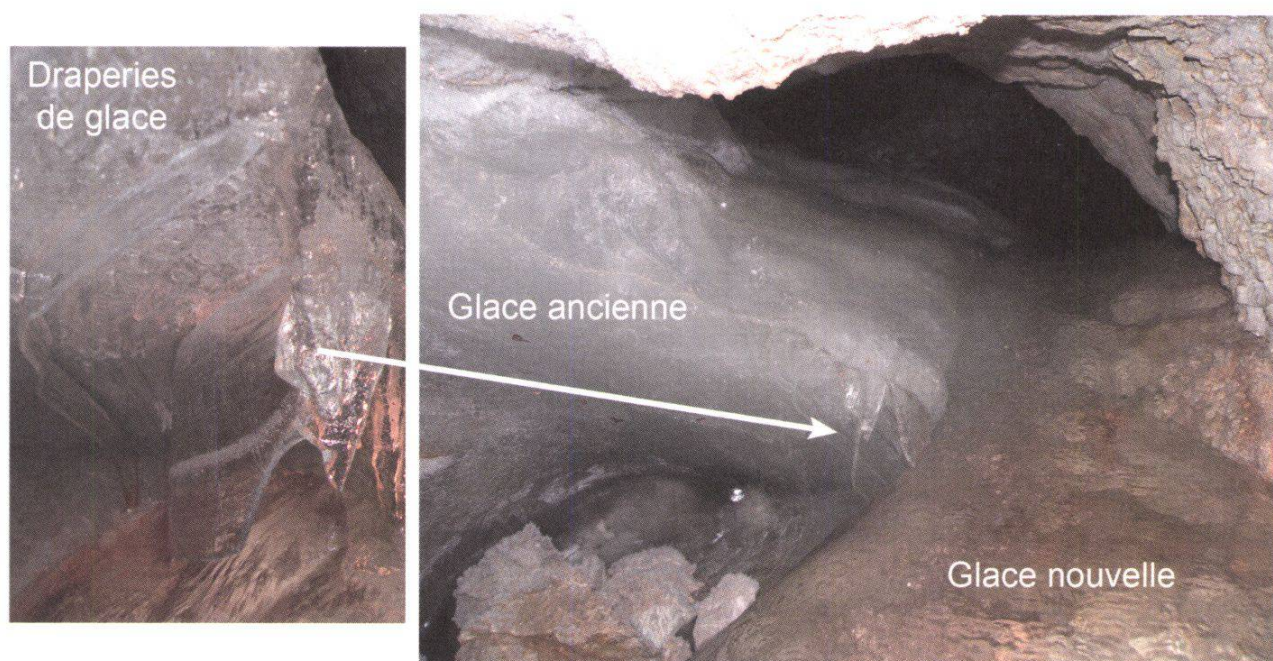


Figure 3: *Glacé ancienne et nouvelle sous le bouchon de glace. De superbes structures en draperie de glace se sont formées probablement sous l'influence du courant d'air (16 octobre 2010).*

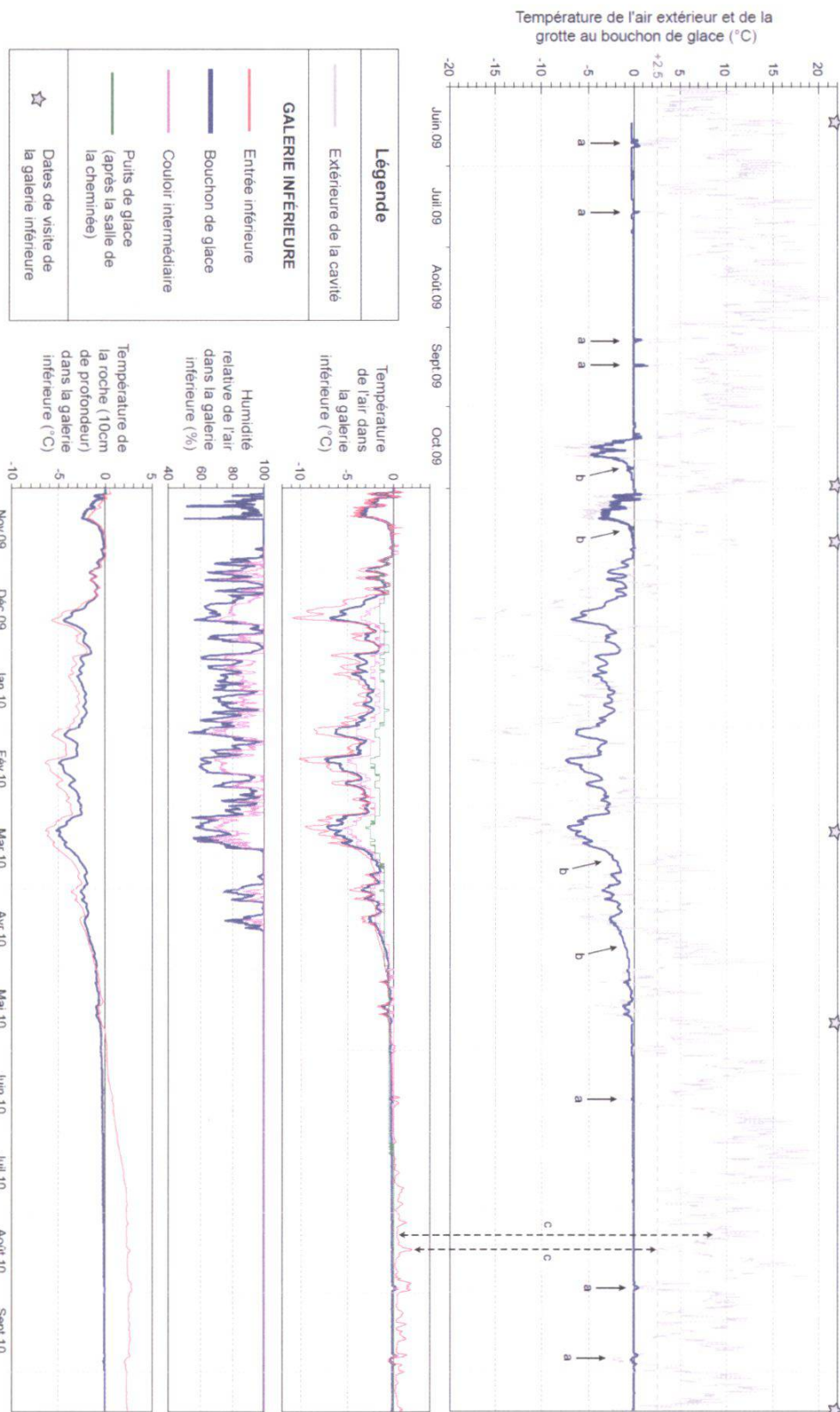


Figure 4: Evolution des températures de l'air, de l'humidité relative et de la roche à l'extérieur de la cavité et dans les différentes sections de la galerie inférieure entre juin 2009 et octobre 2010. Flèches « a » : période d'inversion du courant d'air en été ; flèches « b » : rééquilibrage thermique après une phase d'aspiration ; flèches « c » : comportement thermique inverse entre l'air extérieur et de la galerie inférieure en été.

3. Evolution saisonnière du climat de la galerie inférieure

3.1 Eté : comportement thermique inverse entre l'air extérieur et de la galerie inférieure

Durant la période estivale, un fort courant d'air soufflant en direction de l'entrée inférieure est perceptible, et du givre y recouvre les parois. L'air dans la partie englacée de la galerie inférieure demeure à une température très stable (entre -0.3 et 0°C) et dans un état de saturation permanent ($\text{rH} = 100\%$). Cet état de stabilité apparente est uniquement transgressé durant des épisodes de temps froid, lorsque la température de l'air extérieur passe en dessous d'un seuil d'environ $+2.5^{\circ}\text{C}$ (flèches « a » sur fig.4). De plus fortes variations thermiques sont enregistrées proche de l'entrée inférieure – secteur libre de glace – entre juin et septembre 2010, avec un comportement inverse à l'évolution des températures de l'air extérieures. Autrement dit, plus il fait froid dehors en été, plus les températures de l'air sont chaudes dans la galerie inférieure (flèches « a » et « c » sur fig.4) et vice-versa.

Ces variations thermiques sont aussi décelables dans la roche à 10cm de profondeur proche de l'entrée inférieure : des oscillations de quelques dixièmes de degrés sont effet perceptibles autour d'une valeur moyenne de $+2.3^{\circ}\text{C}$, température moyenne de la roche (et du massif ?) à cet endroit durant la période estivale. En revanche, la roche demeure gelée en permanence durant tout l'été au niveau du bouchon de glace.

3.2 Automne : période de réversibilité du courant d'air

Durant les mois d'octobre et de novembre 2009, le régime thermique de la cavité connaît des modifications significatives (fig.4) en raison de plusieurs événements d'inversion du courant d'air. Le cycle se déroulant entre le 2 et le 12 novembre 2009 est présenté dans la figure 5. Lorsque la température de l'air extérieur est supérieure à $+2.5^{\circ}\text{C}$, la ventilation est en régime de soufflage dans la galerie inférieure, de l'air froid en provenance de l'intérieur de la glacière étant expulsé à des vitesses de $0.5\text{-}0.8\text{ m/s}$ au niveau du bouchon de glace. Le 2 novembre, le courant d'air s'inverse brutalement et des vitesses d'aspiration de $1\text{-}1.5\text{ m/s}$ sont mesurées. Les variations de la température de l'air dans la cavité sont immédiatement calées sur celles de l'air extérieur (figs. 4 & 5).

L'humidité relative passe également d'un état saturé (100%) à des valeurs de l'ordre de 50-70%. La galerie inférieure se refroidit et s'assèche donc durant cette phase d'aspiration. Le 12 novembre, un redoux des températures extérieures entraîne une nouvelle renverse de la ventilation ; de l'air est à nouveau expulsé de la cavité. Les vitesses de soufflage mesurées demeurent en revanche très faibles, l'anémomètre n'ayant probablement pas fonctionné correctement. Il est très intéressant de relever le comportement de la température de l'air au bouchon de glace à la fin de ce cycle. En effet, contrairement au début de la phase d'aspiration, les variations de la température de l'air dans la grotte sont décorrélées par rapport à l'air extérieur. Il faudra ainsi une phase de rééquilibrage de presque une semaine pour que la température de l'air au bouchon de glace se stabilise à nouveau à 0°C. Un événement similaire mais de durée plus importante est également observé au mois d'avril-mai à la fin de l'hiver (flèches « b » sur fig.4).

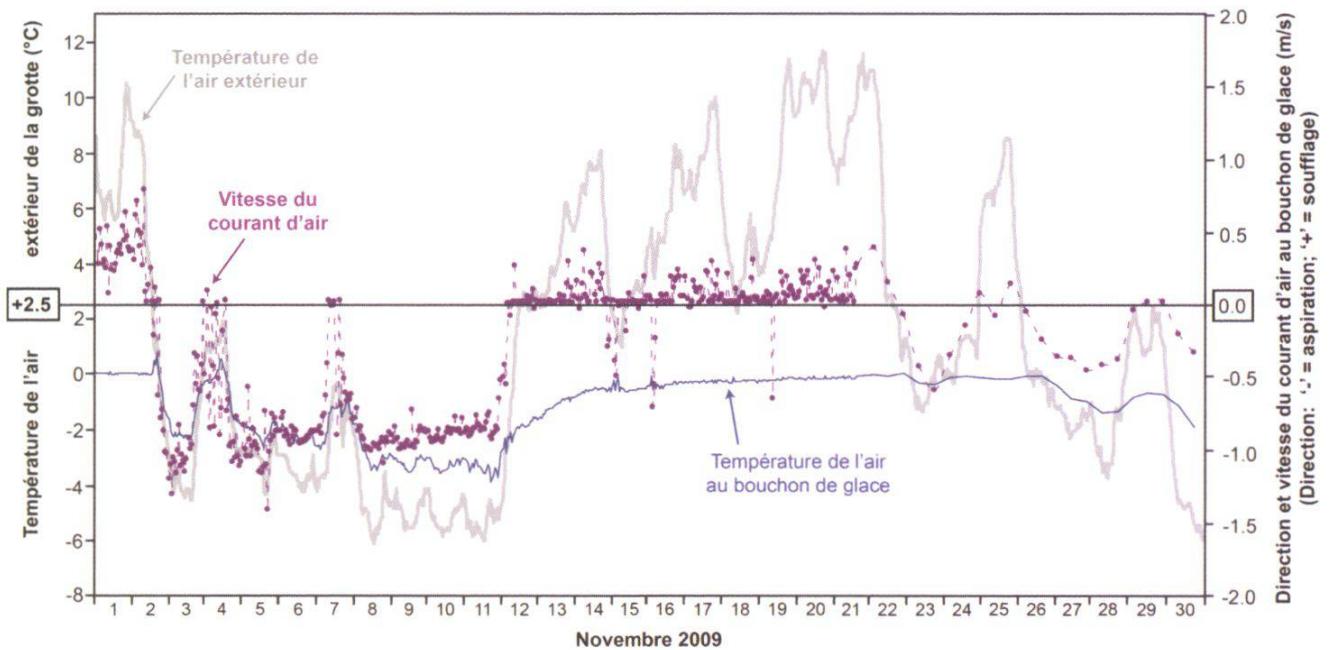


Figure 5: Evolution de la température de l'air extérieur et au niveau du bouchon de glace, ainsi que de la vitesse et de la direction du courant d'air au bouchon de glace. Noter le rapide renversement du courant d'air lorsque la température de l'air extérieur franchit un seuil d'environ +2.5°C.

3.3 Hiver : refroidissement et assèchement de la galerie inférieure

Dès le mois de décembre 2009, le climat de toute la galerie inférieure est dominé – à l’exception de quelques courtes périodes de redoux – par une aspiration quasi-continue d’air extérieur froid et sec. L’ensemble de la grotte se refroidit. Une partie de l’énergie advectée par le courant d’air se transmet également par conduction dans la roche encaissante.

Le refroidissement est le plus intense proche de l’entrée puis s’atténue en direction de la salle de la cheminée. Ainsi, l’air de la grotte «se réchauffe» (tout en demeurant sous le point de congélation) de l’entrée inférieure vers la salle de la cheminée, avec des différences marquées lors des périodes de temps froid, comme à mi-décembre 2009 ou mi-février 2010 (fig.4). En théorie ce réchauffement devrait s’accompagner d’une baisse du taux d’humidité relative (Forbes 1998), or le phénomène inverse est observé dans la glacière des Diablotins puisque l’air s’humidifie entre le bouchon de glace et le couloir intermédiaire. Les variations de l’humidité relative dans la cavité sont relativement similaires aux variations de température et surtout à celles de l’humidité relative de l’air extérieur mesurée au Moléson (MORARD et al. 2010b). Le climat hivernal à l’intérieur de la grotte est ainsi directement couplé aux conditions extérieures.

4. Discussion

La circulation d’air est un acteur majeur de l’évolution du climat hypogé, comme l’ont notamment démontré LISMONDE (2002) ou LUETSCHER et al. (2008). La glacière des Diablotins est un excellent exemple de système fonctionnant sur le principe d’un effet de cheminée et apporte une aide utile à la compréhension des processus se déroulant notamment dans les milieux sédimentaires poreux des environnements périglaciaires de haute montagne (DELALOYE 2004, MORARD et al. 2010a). De nombreuses caractéristiques et effets d’un tel processus de ventilation peuvent ainsi être précisés grâce aux mesures effectuées entre 2009 et 2010 aux Diablotins.

4.1 Signification du seuil thermique d'inversion de la direction du courant d'air

Un comportement inverse entre les variations des températures de l'air extérieur et de la galerie inférieure a été relevé en été, phénomène particulièrement bien visible proche de l'entrée inférieure. Comment l'expliquer ? Durant les journées les plus torrides de l'été, la ventilation se renforce en raison d'un gradient thermique important entre la cavité et l'extérieur. Le courant d'air froid en provenance des parties englacées de la galerie inférieure arrive ainsi à refroidir l'atmosphère et les parois de la grotte proche de l'entrée. Durant les journées estivales plus fraîches, le gradient thermique – et en conséquence la ventilation – diminue, entraînant un réchauffement de l'air proche de l'entrée.

De courtes périodes d'inversion de la direction du courant d'air sont également identifiables dans les données thermiques. En effet, lorsque les températures extérieures sont inférieures à environ $+2.5^{\circ}\text{C}$, l'air dans la partie englacée de la cavité a tendance à se réchauffer, en raison de l'aspiration d'air plus chaud par l'entrée inférieure. LISMONDE (2002) a d'ailleurs montré que le courant d'air se renverse lorsque la température de l'intérieur du système ventilé (la température profonde du réseau souterrain) est égale à celle de l'air extérieur environnant. Cette valeur d'environ $+2.5^{\circ}\text{C}$ rappelle d'ailleurs la température moyenne de la roche en été ($+2.3^{\circ}\text{C}$) ainsi que la température moyenne annuelle de l'air extérieur à 1'970 m.s.m. mesurée au sommet du Moléson (environ $+2.8^{\circ}\text{C}$).

4.2 Importance des processus de sublimation/fonte et de condensation/regel dans l'évolution saisonnière de la masse de glace

Le refroidissement de la roche encaissante et de l'air de la cavité en hiver, ainsi que le gradient thermique entre l'entrée inférieure et le puits de glace, indiquent que d'importants flux d'énergie sont échangés entre l'air, la roche et la glace. En conséquence, un important réservoir de froid est constitué durant l'hiver dans la glacière des Diablotins. Cet effet frigo, provoqué par l'advection d'air extérieur froid, est certainement encore renforcé par l'assèchement de la grotte et la sublimation de la glace durant la période hivernale (absorption de chaleur latente). Malgré des températures continuellement négatives, le volume de glace a en effet diminué en hiver.

L'entier de la galerie inférieure est ainsi sujet à des processus de sublimation. Selon diverses recherches dont les résultats ont été synthétisés par LAW & VANDIJK (1994), le taux de sublimation augmente lorsque l'humidité relative de l'air décroît, lorsque la température augmente vers le point de congélation, et lorsque le courant d'air s'accélère, accroissant de la sorte l'échange de molécules d'eau entre la glace et l'air environnant.

Le comportement a priori contradictoire entre les variations de la température et de l'humidité relative de l'air dans les différents secteurs de la cavité peut s'interpréter comme un effet d'un processus très efficace de sublimation. En s'échauffant, l'air devient plus sec et augmente le taux de sublimation. Mais simultanément la roche et la glace transfèrent leur humidité au courant d'air (LAURIOL et al. 1988), expliquant de la sorte l'augmentation des taux d'humidité relative entre le bouchon de glace et le couloir intermédiaire. L'assèchement de cavités karstiques durant la période hivernale consécutif à l'aspiration d'air extérieur froid et sec est plus intense proche des entrées inférieures (Forbes 1998), mais son effet peut dépasser le kilomètre comme le signalait Lismonde (2002) dans le Trou qui Souffle (Isère, France). GEIGER (1980), OHATA et al. (1994) ou RACHLEWICZ & SZCZUCINSKI (2004) ont également relevé l'importance des processus d'évaporation et de sublimation dans la diminution des volumes de glace souterraine à l'intérieur des glaciers dynamiques.

Alors que le volume de glace diminue durant la période hivernale, le printemps et l'été se caractérisent par la formation et la préservation de la glace hypogée. La glace rencontrée dans la glacière des Diablotins est de la glace de congélation, formée par regel d'eaux de percolation. La source connue la plus importante provient probablement de la fonte de l'accumulation de neige occupant la cavité proche de l'entrée inférieure. Deux autres arrivées d'eau par des fissures ont pu être identifiées grâce à la présence de stalactites de glace : la première se trouve juste avant le bouchon de glace, la deuxième dans la salle de la cheminée. La condensation de l'humidité de l'air contribue également en (très) petite quantité au bilan de masse par la formation de givre.

Même si en théorie de la chaleur doit être advectée en été par les entrées hautes du système, l'état actuel des connaissances ne permet pas de définir précisément les secteurs où la masse de glace est soumise à un processus de fonte. Il est fort probable que ces derniers soient localisés après le puits de

glace, peut-être au niveau de la base du puits vertical ou de la jonction des galeries. Une exploration par l'entrée haute est cependant nécessaire pour répondre à cette question.

La glace dans la galerie inférieure ne semble en effet pas souffrir de fonte significative durant la période estivale. Les températures demeurent en effet négatives dans la zone englacée empêchant la fonte de la glace, et le dégel n'affecte que les premiers mètres de la galerie inférieure. En octobre 2010 le volume de glace était ainsi plus important qu'en mai 2010. La diminution observée au bouchon de glace le 31 octobre 2009 par rapport au 14 juin 2009 est probablement consécutif à une phase d'aspiration liée à une période de temps froid à mi-octobre 2009.

4.3 Causes des variations interannuelles ?

Cette première année de mesures en continu indique que les modifications du climat et de la masse de glace dans la galerie inférieure sont essentiellement dépendantes des conditions hivernales. Un tel couplage a également été montré par SAAR (1956) et 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.

Est-il dès lors possible d'expliquer les fluctuations décennales de la masse de glace des Diablotins ? Trois variables ont été analysées sur la base des données climatiques des stations du Moléson (humidité relative de l'air et température de l'air, exprimée sous la forme de l'indice de gel qui somme les degrés/jours négatifs) et de Château-d'Oex (enneigement). L'hypothèse retenue est la suivante : (1) plus l'air aspiré est sec en hiver, plus le taux de sublimation sera important dans la galerie inférieure ; (2) des hivers très froids sont propices à la formation d'un important réservoir de frigories, favorisant le regel des eaux de percolation, et leur préservation sous forme de glace ; (3) des hivers enneigés fournissent plus d'eau liquide pour l'accroissement du volume de glace. Les valeurs ont été standardisées (ou normalisées) en fonction de la moyenne et de l'écart-type (fig.6). La reconstitution montre que les hivers 1988/1989, 1989/1990, 1991/1992 et 1992/1993 furent doux, peu enneigés et avec un air relativement sec. 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 observée durant ces années.

Cette reconstruction demeure certes grossière, mais elle a néanmoins le mérite de rappeler le rôle primordial joué par les conditions météorologiques hivernales pour la glacière des Diablotins. LUETSCHER et al. (2008) ont également montré que les fluctuations saisonnières et interannuelles du volume de glace reflètent en premier lieu les conditions climatiques hivernales.

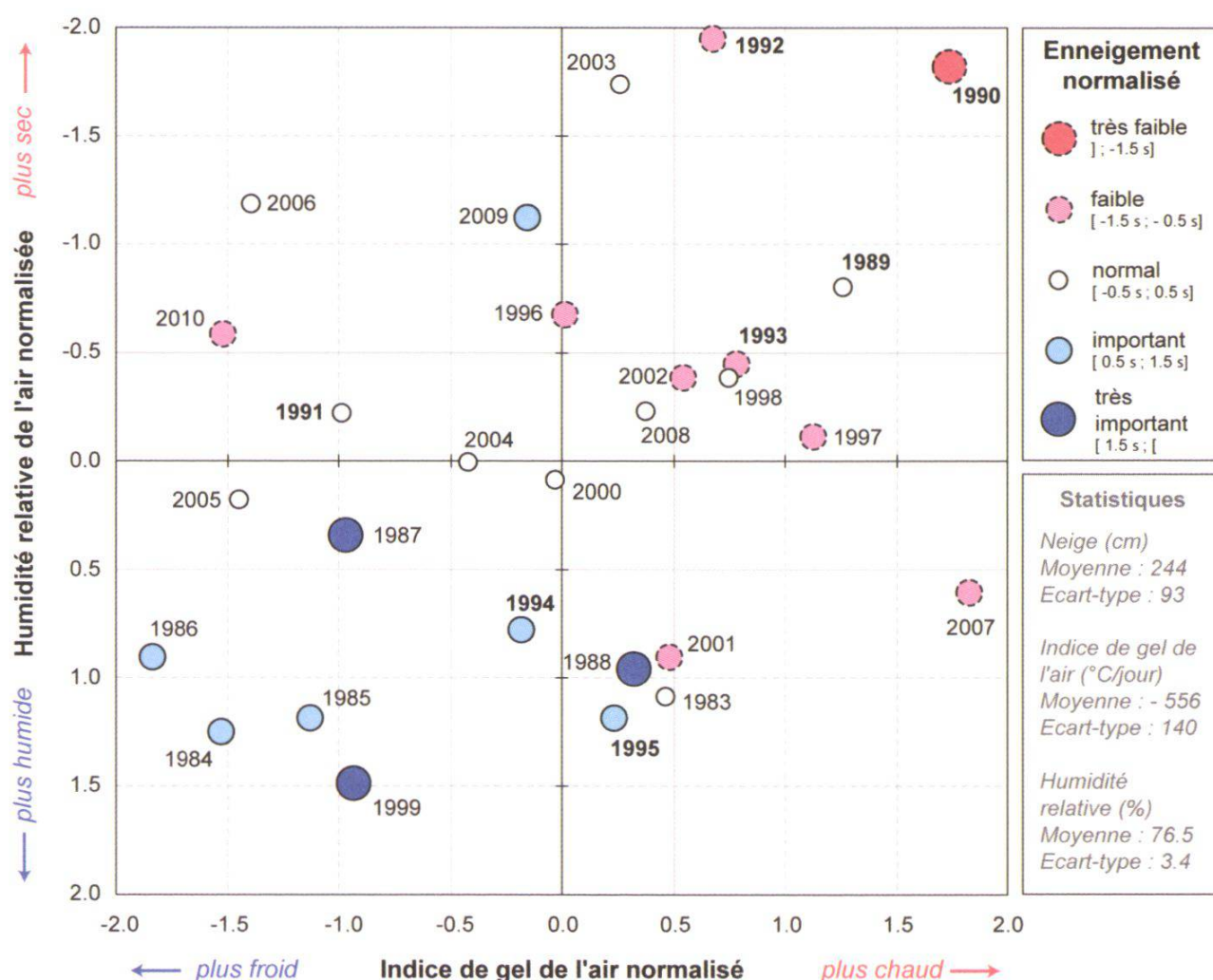


Figure 6: Reconstruction des conditions météorologiques hivernales sur la base des données du Moléson (température et humidité relative de l'air) et de Château-d'Oex (enneigement) de 1983 à 2010 (octobre 2009 – avril 2010). Les valeurs ont été normalisées en fonction de la moyenne et l'écart-type.

4.4 Les petites créatures du Gouffre des Diablotins gardent encore des secrets !

De nombreuses questions essentielles restent cependant ouvertes pour expliquer l'évolution décennale et saisonnière, ainsi que la répartition très hétérogène de la masse de glace dans la galerie inférieure des Diablotins. Notamment : quel est le poids effectif des trois variables hivernales analysées ? Quels sont les processus se déroulant dans le puits vertical joignant l'entrée supérieure ? Quels sont les effets des étroitures sur le courant d'air, et dans quelle mesure un processus de compression/décompression du courant d'air à la sortie des sections étroites de la galerie favorise-t-il le regel des eaux de percolation et de l'humidité de l'air, comme le proposait BOVEY (1995) ?

La ventilation par effet de cheminée a-t-elle été continue entre 1994 et 2007 ? Ou bien la glacière aurait-elle pu évoluer quelques temps en système fermé, sans courant d'air, suite au blocage total des étroitures par de la glace et la formation d'une poche d'eau dans la galerie inférieure ? Si une poche d'eau a pu se former entre 1996 et 2007, la nature et la morphologie particulièrement plate du plafond de glace – alors que ce dernier se trouve dans une cheminée – peuvent-elles s'interpréter comme la formation de «glace de lac» à la surface de l'eau ? Un tel processus complexe n'est pas impossible, il a déjà été reporté par Turri et al. (2003) pour une glacière en Lombardie (Italie).

Quoi qu'il en soit, le maintien et l'amélioration de l'équipement (mesure dans le puits vertical, suivi des variations de la masse de glace à une échelle de temps journalière par capteurs à ultrasons ou webcam, modélisation des flux d'énergie) sont des projets pour le futur. Des analyses plus poussées de la nature de la glace (par ex. TURRI et al. 2003, LUETSCHER 2005) seraient également souhaitables.

5. Conclusion et perspectives

Au terme de cette première année de mesure dans la glacière des Diablotins, différents processus fascinants ont pu être mis en évidence par des mesures ponctuelles ou continues. Le climat hypogé et les fluctuations saisonnières de la masse de glace dans la galerie inférieure sont ainsi essentiellement dépendants des conditions météorologiques hivernales. De la glace se forme

au printemps et en début d'été par le regel des eaux de fonte de la neige. La ventilation hypogée est le deuxième élément clé dans l'évolution actuelle de la glacière. Une circulation d'air par effet de cheminée a ainsi pu être clairement identifiée, avec une renverse s'opérant lorsque la température de l'air extérieur passe un seuil thermique d'environ $+2.5^{\circ}\text{C}$, valeur très proche de la température moyenne annuelle de l'air extérieur.

L'aspiration d'air extérieur froid durant la période hivernale permet la formation d'un important ««frigo»» naturel dans la galerie inférieure, dont le refroidissement est encore accentué par l'absorption de chaleur latente liée à l'évaporation de l'humidité et la sublimation de la glace durant l'hiver. Dans la galerie de l'entrée inférieure des Diablotins la perte de glace entre juin 2009 et octobre 2010 s'est ainsi produite presque exclusivement durant la période hivernale par advection d'air extérieur sec ! Cette dernière observation est pour le moins particulière et un excellent exemple des surprises que peut réserver la circulation d'air dans un milieu poreux.

L'accroissement de la masse de glace observée durant les années 1994-1995 semble être lié au passage d'hivers doux, secs et peu enneigés à des hivers plus froids, humides et enneigés en 1994 et 1995. Après le blocage complet de la galerie inférieure par de la glace, il est possible qu'une poche d'eau souterraine se soit provisoirement formée, expliquant la formation d'un plafond de glace dans la salle de la cheminée.

Les résultats acquis lors de cette première année d'étude ont cependant également soulevés de nombreuses questions, discutées ci-dessus. Un suivi à plus long terme, une exploration et un équipement du puits vertical depuis l'entrée supérieure difficile d'accès, des analyses de glace ou l'installation de capteurs à ultra-sons ou de webcam pour mesurer à court terme les variations du volume de glace sont envisagés pour ces prochaines années. De passionnantes recherches à poursuivre parmi les souffles et les murmures des «petits diables» du Gouffre...

6. 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». Un remerciement

tout particulier à l'ensemble des membres du Spéléo-Club des Préalpes Fribourgeoises pour leur aimable collaboration, ainsi qu'à David Sciboz, collaborateur technique au Département des Géosciences, pour son aide dans la préparation et l'installation des appareils de mesure.

7. Bibliographie

- BOVEY, M. 2005. Gouffre des Diablotins. *Akten des 10. Nationalen Kongresses für Höhlenforschung, Breitenbach, Suisse* : 170-172.
- DELALOYE, R. 2004. Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. *Geofocus* 10 : 240p.
- FORBES, J. 1998. Air temperature and relative humidity study : Torgac cave, New Mexico. *J. Cave Karst Stud.*, 60(1) : 27-32.
- GEIGER, R. (1980). The climate near the ground. *Harvard University Press, Cambridge*.
- LAURIOL, B., CARRIER, L., THIBAudeau, P. 1988. Topoclimatic zones and ice dynamics in the caves of the northern Yukon, Canada. *Arctic*, 41(3) :215-220.
- LAW, J. & VANDIJK, D. 1994. Sublimation as a geomorphic process : a review. *Permafrost Periglac.*, 5 : 237-249.
- LISMONDE, B. 2002. Climatologie du monde souterrain : vent des ténèbres. *Edition du Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère, Tome 1*.
- LUETSCHER, M. 2005. Processes in ice caves and their significance for paleo-environmental reconstructions. *PhD Thesis, Swiss Institute for Speleology and Karst Studies (SISKA)*.
- LUETSCHER, M. 2007. Evolution des glaciers dans un contexte climatique changeant. *Proceedings of the 12th nat. Congress of Speleology, Vallée de Joux, Sept. 2007*: 75-80
- LUETSCHER, M. & JEANNIN, P-Y. 2004. Temperature distribution in karst systems : the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, 16 : 344-350.
- LUETSCHER, M., LISMONDE, B., JEANNIN, P-Y. 2008. Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system : Monlesi cave, Swiss Jura Mountains. *J. Geophys. Res.*, 113, F02025.
- MORARD S., DELALOYE R., DORTHE J., 2008. Indices de fonctionnement de la ventilation des éboulis froids. *Proceedings, Swiss Geomorphological Society (SSGm), Annual Meeting 2007, Samedan, Switzerland*, 44-56.

- MORARD S., DELALOYE R., LAMBIEL C., 2010a. Pluriannual thermal behavior of low elevation cold talus slopes (western Switzerland). *Geographica Helvetica*, Jg. 65, Heft 2, 124-134.
- MORARD, S., BOCHUD, M., DELALOYE R. 2010b. Rapid changes of the ice mass configuration in the dynamic Diablotins ice cave. *The Cryosphere*, 4 : 489-500.
- OHATA, T., FURUKAWA, T., HIGUCHI, K. 1994. Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji ice cave, Japan. Part 1. Seasonal variation and mechanism of maintenance. *Arctic Alpine Res.*, 26(3) : 227-237.
- RACHLEWICZ, G. & SZCZUCINSKI, W. 2004. Seasonal, annual and decadal ice mass balance changes in the ice cave Jaskinia Lodowa w Ciemniaku, the Tatra Mountains, Poland. *Theoretical and Applied Karstology*, 17 : 11-18.
- SAAR, R. 1956. Die Dachstein-Rieseneishöhle nächst Obertraun und ihre Funktion als dynamische Wetterhöhle. *Jb d. oö Musealvereins, Linz*, 263-319.
- SCPF. 2009. Spéléo-Club des Préalpes fribourgeoises. *Site web* : <http://www.scpf.info/>.
- SPÖTL, C. 2008. Kryogene Karbonate im Höhleneis der Eisriesenwelt. *Die Höhle*, 59: 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.