

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/316683294>

Climatologie de la grotte des Pingouins

Chapter · January 2009

CITATIONS
0

READS
132

2 authors, including:



[Miguel Borreguero](#)

16 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

SEE PROFILE

Climatologie de la grotte des Pingouins

Miguel Borreguero et André Pahud



Photo: André Pahud

Glace annuelle proche de l'entrée dans la grotte des Pingouins.

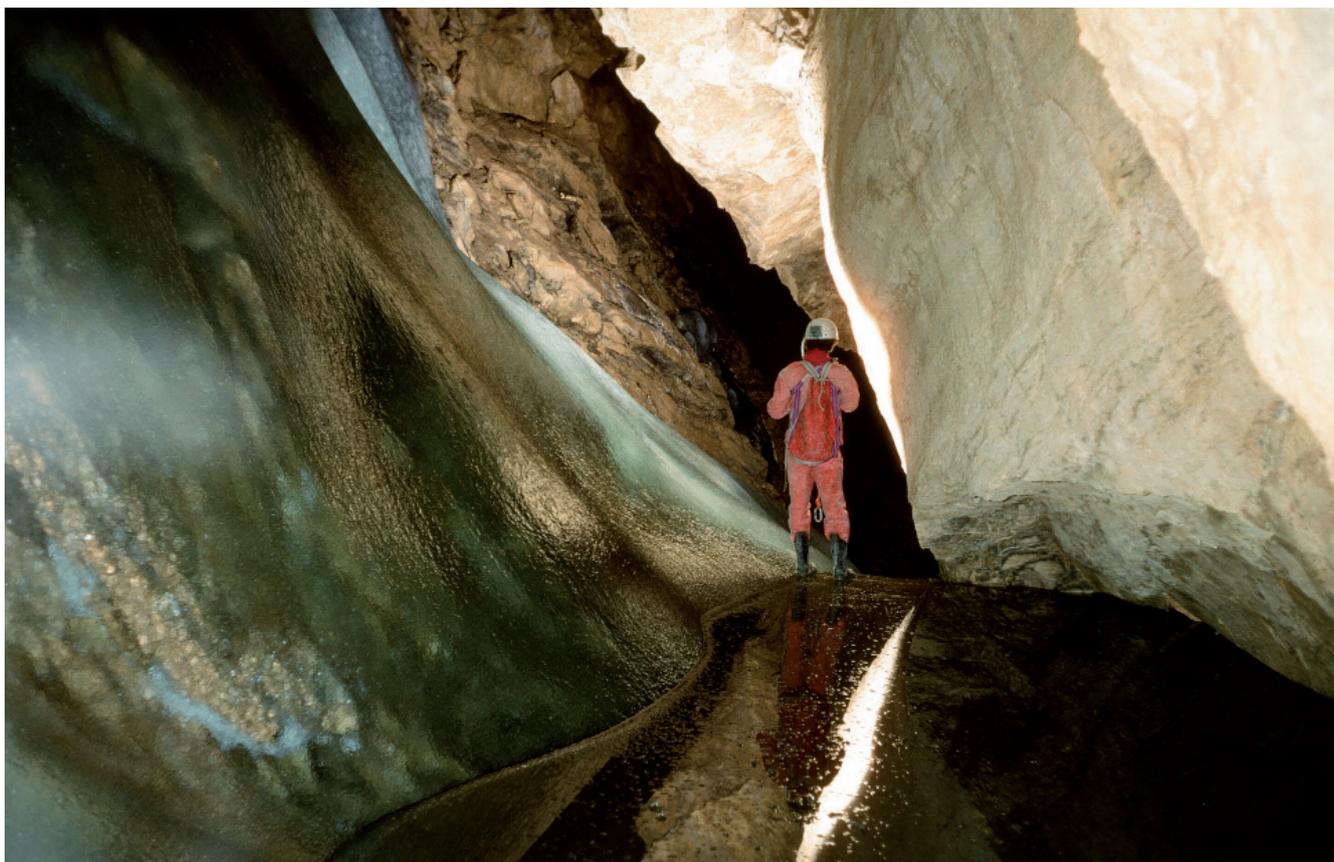


Photo: André Pahud

22a. Extrémité aval de la Salle du Glacier en 1989.



Photo: André Pahud

22b. Extrémité aval de la Salle du Glacier en 2009. Remarquer la fonte de la glace et les blocs tombés sur la glace.

Appareillage et observations

Des acquiiseurs de température ont été installés dans la grotte des Pingouins dès 1998, à des altitudes comprises entre 2258 et 2376 m (voir description de la grotte dans le chapitre consacré aux cavités). Ces acquiiseurs mesurent la température de l'air à cadence horaire, avec une résolution de 0,1° C. En été 2009, nous avons récolté plus de 320'000 données de température.

En novembre 2008, nous avons également installé un « zéphyromètre » (voir encadré correspondant) au point haut de la cavité, près du thermomètre T1. Cet appareil mesure et enregistre la vitesse et le sens du courant d'air toutes les 15 minutes avec une résolution d'environ 3 mm/s.

Parallèlement à ces mesures, qui sont actuellement encore en cours, nous avons également utilisé les températures de l'air enregistrées à la station supérieure du téléphérique du barrage du Sanetsch [cf. figure p. 72] par la Kraftwerk Sanetsch AG ainsi que, pour certaines périodes, les vitesses et orientations du vent enregistrées par Météo Suisse à la station des Diablerets I (arrivée du téléphérique) et les hauteurs d'enneigement enregistrées par l'ENA à la station des Diablerets II (point bas des pistes).

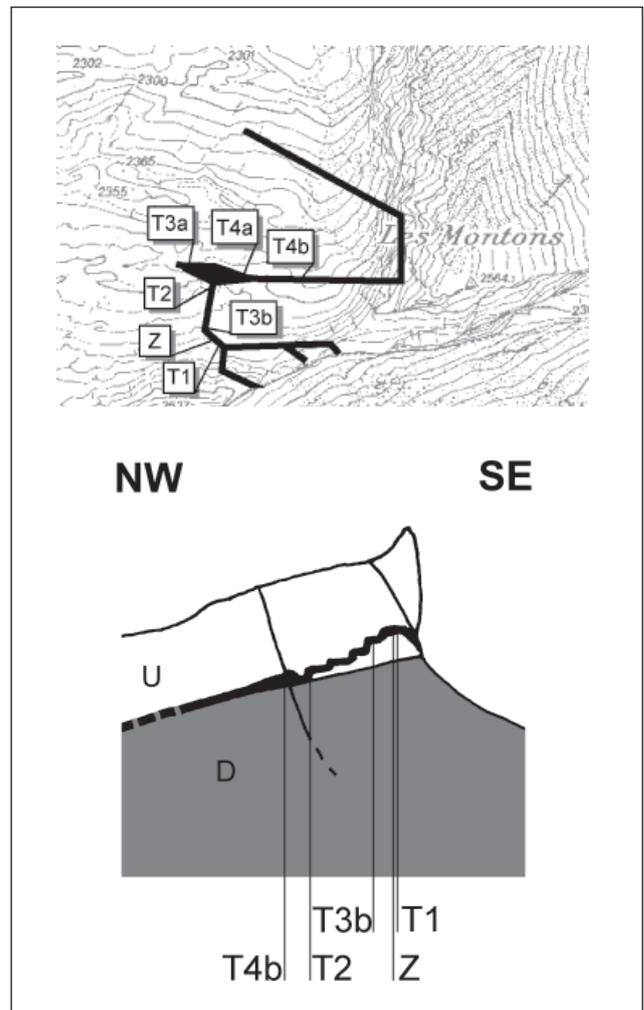
L'ensemble de ces mesures, ainsi que des observations complémentaires dans la cavité nous ont permis de mieux comprendre les mécanismes thermodynamiques dans cette cavité, dont une partie importante se trouve à une température inférieure à 0° C, ainsi que la dynamique des accumulations souterraines de glace de regel.

Mesures de températures

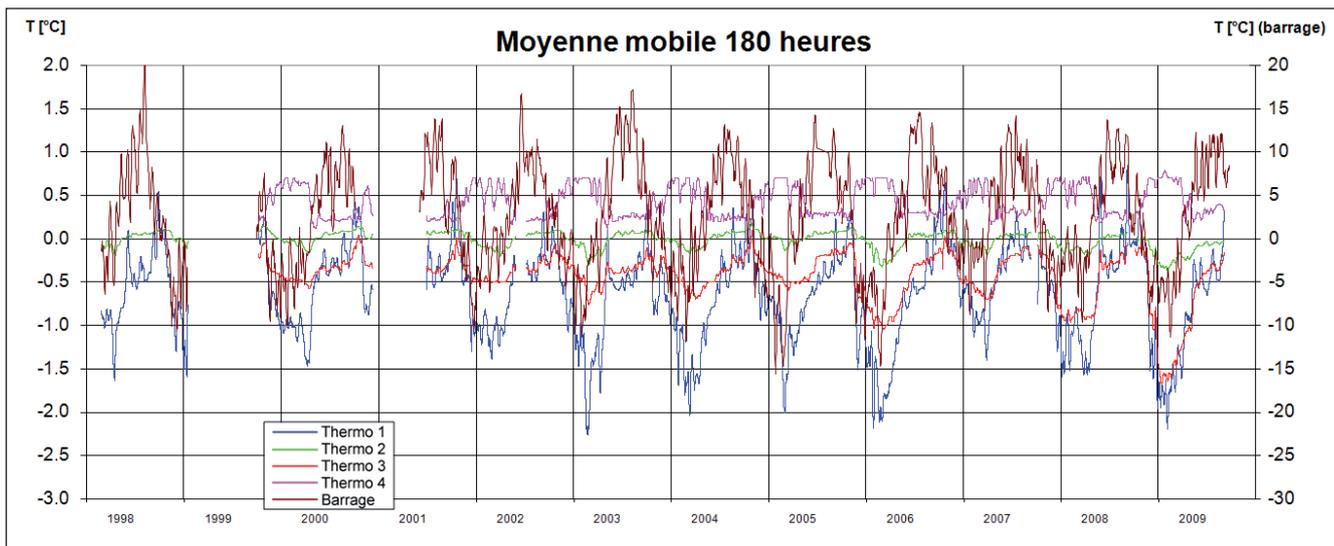
Les thermomètres acquiiseurs ont été mis en place au milieu des galeries, à des emplacements de section réduite, où le courant d'air est plus marqué. Ces emplacements sont les suivants (voir aussi figures 23 et p. 72) :

Point de mesure	Description	Section (approx.)	Altitude (approx.)
T 1	Point haut connu de la cavité. Galerie sèche, sans argile, ni glace, ni arrivée d'eau.	10 m ²	2376 m
T 2	Point bas du méandre menant au Glacier. Faible écoulement d'eau temporaire. Premières glaces du Glacier env. 5 m en aval.	5 m ²	2264 m
T 3b	Avant le deuxième puits dans le méandre menant au Glacier. Aucun écoulement d'eau, mais glace relique à 5 m.	2 m ²	2334 m
T 4b	Resserrement dans la galerie en aval du Glacier. Sol constitué de blocs et d'argile. Pas d'écoulement d'eau (suintements?).	5 m	2258 m

Les courbes des températures mesurées aux quatre points de mesure sont en figure 24.



23. Situation des points de mesure dans la grotte des Pingouins. U : Urgonien, D : Couches de Drusberg, T1 à T4b : Thermomètres enregistreurs, Z : Zéphyromètre



24. Chronique des températures 1998-2009.

Observations complémentaires

Les nombreuses incursions dans cette grotte nous ont permis d'effectuer toute une série d'observations intéressantes en rapport avec l'englacement de la grotte et donc, indirectement, avec la température.

Ces observations peuvent être résumées comme suit :

- Dans la zone d'entrée, on observe des variations d'englacement aussi bien saisonnières qu'à long terme; l'apparition ou l'augmentation des chutes de pierres suggère un réchauffement des parois en profondeur et/ou des cycles gel/dégel plus marqués.
- Dans le méandre entre les points T 2 et T 3b, on observe une lente remontée des venues d'eau et de la formation de glace qui leur est associée selon le processus suivant : une nouvelle venue d'eau apparaît et dépose de la glace dès son arrivée dans la cavité, du fait que la température des parois est encore inférieure à 0°C. Après quelques mois ou après une saison, la venue d'eau tarit, soit parce que la glace a fini par obstruer l'orifice par lequel elle arrive, soit parce que l'eau peut s'infiltrer à plus haute altitude. Une nouvelle venue d'eau apparaît alors dans le méandre. Parallèlement, la glace formée dans le bas est érodée par le courant d'air (par sublimation), puis les parois se réchauffent progressivement et des blocs s'en détachent lorsqu'elles dégèlent [cf. figures 22 a et b].

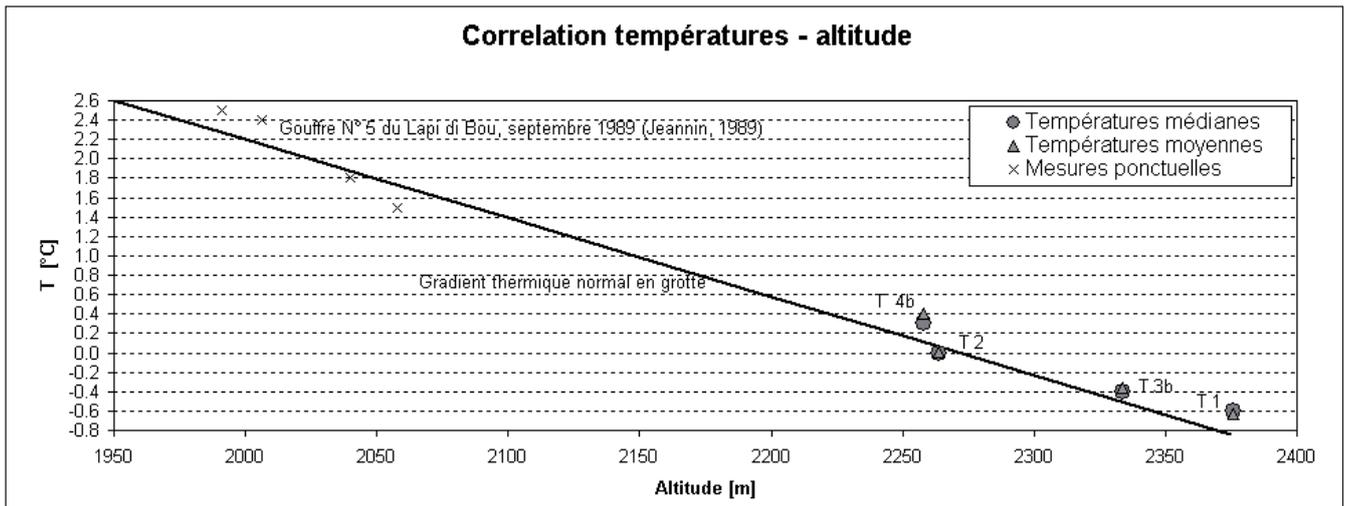
Par ailleurs, le Lac Gelé (près de l'entrée) et le lac à la base de la Salle à Manger (entre T 3b et T 2) ont gelé à cœur depuis les parois vers le centre (la glace est bombée en leur centre, signe que c'est le cœur du lac qui a gelé en dernier ; voir l'exemple de la figure 25), ce qui implique que le refroidissement est venu des parois. L'observation des parois gelées sous le niveau de l'eau dans le Lac Gelé va également dans ce sens. Dans ces deux cas, la roche était donc à une température inférieure à 0°C au moment de la prise des lacs.

Dans la grotte G3, située à 2490 m d'altitude le long de la même falaise que les Pingouins et contenant une accumulation de glace de regel d'une centaine de mètres cubes, nous avons observé, en mai 2001, une augmentation importante du volume de la glace par rapport à 1976. Cette augmentation est attribuée



Photo: Miguel Borreguero

25. Exemple de glace bombée : cette gouille profonde, mais de faible largeur, située au fond d'un méandre, a gelé depuis les bords et la surface. Le gel de la dernière bulle d'eau liquide, au cœur de la gouille, a donné lieu à un bombement tellement important que la glace superficielle a fini par éclater en étoile. La zone blanche de la glace doit sa couleur aux innombrables microfissures dues à la pression de gel. Les arêtes de la glace éclatée ont ensuite été émousées par la sublimation due au courant d'air. Le mousqueton donne l'échelle.



26. Gradient altimétrique.

au réchauffement du terrain à faible profondeur et à l'ouverture de fissures auparavant colmatées par la glace (= fonte du permafrost), ce qui permet à une quantité supérieure d'eau de s'infiltrer en profondeur, où elle gèle en raison de la température de la roche qui reste, pour l'instant, inférieure à 0°C .

Les données ainsi acquises permettent des interprétations à plusieurs niveaux.

Gradient altimétrique

Le gradient altimétrique déterminé sur la base des températures moyennes aux quatre points de mesure dans la cavité est de $-8,1^{\circ}\text{C}$ par km [figure 26]. Rappelons que le gradient adiabatique sec est de $-9,75^{\circ}\text{C}$ par km et le gradient adiabatique saturé de $-6,0^{\circ}\text{C}$ par km à cet endroit. Dans l'atmosphère, le gradient altimétrique moyen est de l'ordre de $-6,5^{\circ}\text{C}$ par km. Le gradient mesuré dans la grotte des Pingouins est donc relativement élevé (en valeur absolue) et proche du gradient sec. Cela pourrait être dû à l'absence de circulations d'eau dans toute la partie de la cavité située au-dessus de l'isotherme 0°C .

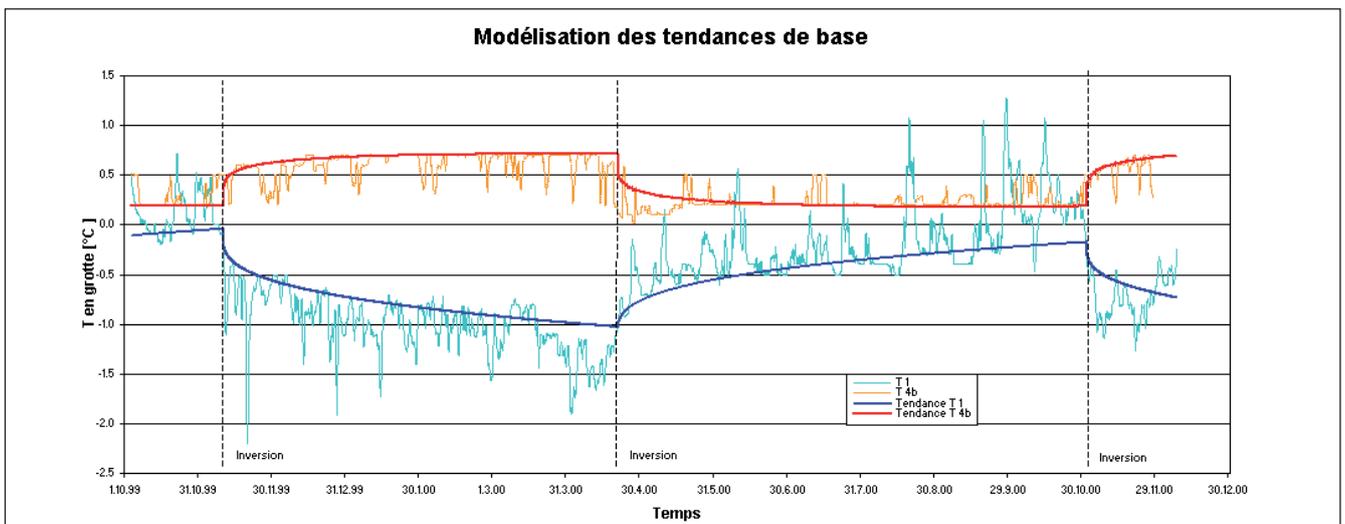
Le Glacier, qui se développe à l'altitude de $T 2 \pm 10\text{ m}$, se trouve assez précisément au niveau de l'isotherme 0°C actuelle.

Evolution dans le temps

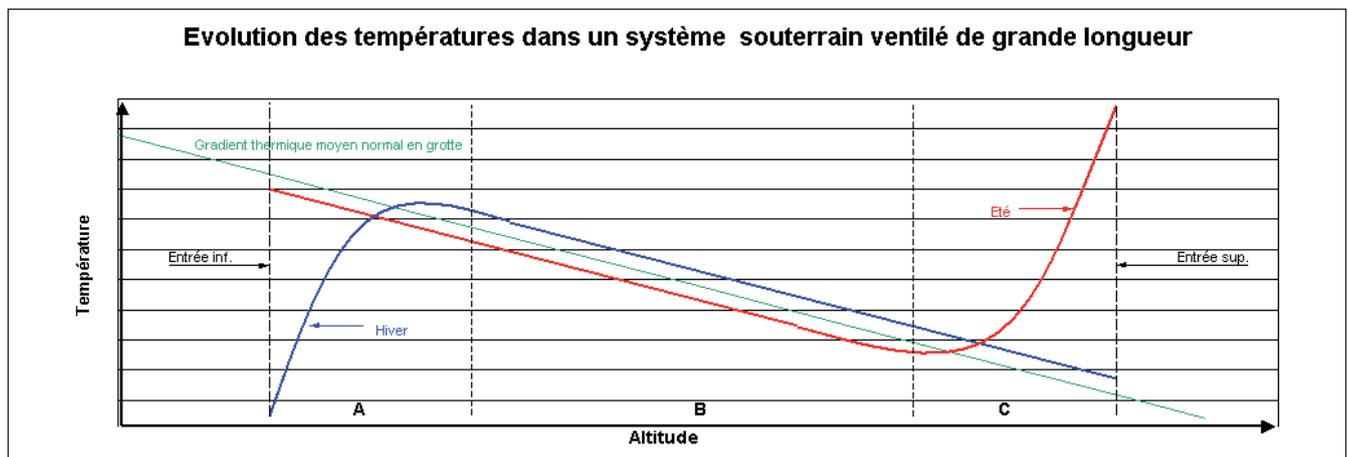
L'interprétation des chroniques peut, elle aussi, se faire à plusieurs niveaux. Nous avons distingué la tendance de base, les variations fines, la corrélation entre les différents points de mesure ainsi que l'influence du vent et de l'enneigement.

Tendance de base

A première vue, les courbes de la figure 24, et notamment du point T 1, suggèrent une tendance de base sinusoïdale, comme on a l'habitude de l'observer pour les températures extérieures. En fait, la réalité est tout autre ! Si on y regarde de plus près, les courbes des points T 1 et T 4b montrent des inversions plus ou moins franches, entre lesquelles les courbes suivent des croissances logarithmiques de signe opposé [figure 27]. Cela tient au fait que la grotte constitue un système thermodynamique tout à fait particulier (voir encadré).



27. Modélisation des tendances de base de l'évolution des températures.



28. Evolution des températures dans un système souterrain ventilé de grande longueur (entre deux entrées très éloignées).

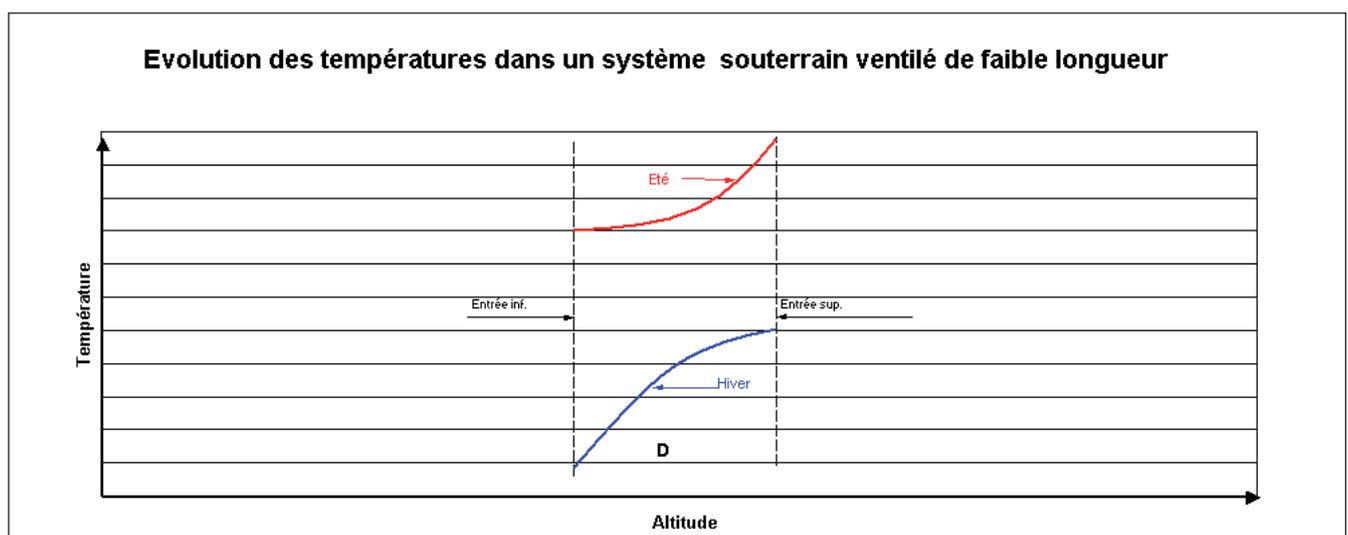
Comme les températures moyennes (ou, mieux, médianes) des points T 1 à T 4b sont très proches ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), l'inversion a lieu pratiquement au même moment, à savoir lorsque la température de l'air extérieur bascule au-dessus ou au-dessous de $-0,1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Toutefois, cette inversion ne se fait pas à chaque basculement, mais seulement si ce basculement dure un certain temps. En effet, en hiver, la température extérieure peut monter momentanément à plusieurs degrés au-dessus de zéro sans que la circulation d'air hypogée s'inverse durablement. Ce comportement suggère que cette circulation d'air possède une certaine inertie.

Au point T 1, la tendance de base accuse une forte amplitude et suit une évolution semblable à celle des températures extérieures. Cela indique que la source de chaleur/froid est à une température très différente de celle du point de mesure. Dans ce cas précis, seul l'air extérieur est à même de constituer la source de chaleur/froid. Ce point est donc très proche d'une ou de plusieurs entrées.

Aux points T 2 et T 3b, la tendance de base suit globalement l'évolution des températures extérieures, mais de façon fortement amortie. Ils sont donc relativement proches d'une entrée.

L'emplacement T 2 présente toutefois une particularité : il est au point bas d'un méandre situé entre deux entrées qui sont toutes deux à des altitudes plus élevées. De ce fait, l'air qu'il reçoit en hiver provient d'une altitude plus élevée et est par conséquent nettement plus froid, malgré le fait qu'il provient d'une « entrée inférieure » et qu'il a parcouru un trajet souterrain relativement important. En hiver, la source de froid est constituée, dans ce cas, non seulement par l'air extérieur, mais aussi par les parois des galeries situées à une altitude plus élevée.

Au point T 4b, la courbe de base accuse une faible amplitude et suit une évolution inverse par rapport aux températures extérieures. De plus, elle se stabilise très rapidement à, respectivement, $0,7$ et $0,2^{\circ}\text{C}$. Cela signifie que la source de chaleur/froid est à une température peu différente de celle du point. Les températures maximale et minimale mesurées à ce point ne sont plus le reflet de la température extérieure, mais uniquement le reflet des températures de la roche dans les portions de galerie, respectivement, en amont et en aval du point de mesure. Dans le cas du point T 4b, ce sont donc les parois des portions de galerie, respectivement, en aval et en amont qui jouent le rôle de source chaude/froide.



29. Evolution des températures dans un système souterrain ventilé de faible longueur (entre deux entrées relativement proches).

Réchauffement climatique

Si on s'intéresse à la durée des tranches entre les inversions [figure 30], on constate qu'elles ne sont pas égales. Ce déséquilibre en faveur de la tranche estivale constitue un indice important de réchauffement climatique. En effet, si le système thermodynamique souterrain était en équilibre avec la température extérieure, les deux tranches devraient être de durées égales, du moins en moyenne sur plusieurs années.

De 1998 à 2008, la température moyenne estivale au point T 4 (palier de température estival) a augmenté de 0,10° C [figure 24].

Thermodynamique d'un système souterrain ventilé

Lorsqu'une cavité possède au moins deux entrées à des altitudes différentes, elle adopte un comportement thermodynamique bien particulier, que l'on peut schématiser comme suit : en hiver, l'air à l'intérieur de la cavité est plus chaud que l'air extérieur, ce qui donne lieu à un courant d'air allant de l'entrée inférieure vers l'entrée supérieure, par convection thermique. En été, c'est exactement l'inverse. L'évolution des températures le long d'une telle cavité est illustrée en figure 28.

En hiver, l'air extérieur froid pénètre par l'entrée inférieure dans la cavité, où il est réchauffé progressivement au contact des parois (zone A de la figure 28) ; en été, c'est l'air extérieur chaud qui pénètre par l'entrée supérieure dans la cavité, où il est refroidi au contact des parois (zone C de la figure 28).

Dans la partie centrale de la cavité, la température des parois est à peu près constante au cours de l'année et égale à la température annuelle moyenne à l'altitude correspondante (zone B de la figure 28). Dans cette partie, la température annuelle moyenne suit le gradient altimétrique normal. Toujours dans cette partie centrale, la température est légèrement plus élevée en hiver, parce que le courant d'air y amène de l'air venant de zones plus basses en altitude, où l'air est plus chaud ; en été, c'est l'inverse.

Lorsque la cavité est de faible longueur, la température de l'air extérieur n'arrive pas à s'équilibrer avec la température des parois (zone D de la figure 29).

De 1992 à 2004, les manifestations de dégel des parois (chutes de pierres et de blocs observées) sont remontées d'environ 2265 à 2280 m d'altitude. Avec un gradient thermique mesuré de -8,1° C par km, cela correspond à un réchauffement d'environ 0,12° C, soit 0,10° C en dix ans, ce qui confirme l'observation ci-dessus.

Ce réchauffement ne peut pas nécessairement être mis en parallèle avec le réchauffement climatique de l'atmosphère, dans la mesure où il peut être fortement influencé par l'ouverture aléatoire de galeries ou d'entrées auparavant bloquées par le gel. Si on veut malgré tout le comparer au réchauffement de l'atmosphère, on peut relever qu'avec 0,10° C en dix ans, il est nettement plus lent que le réchauffement atmosphérique (0,4° C à 0,7° C par décennie sur les trente dernières années en Suisse, d'après MétéoSuisse), ce qui est parfaitement logique et peut être attribué, d'une part, à la grande inertie thermique de la roche et, d'autre part, à la chaleur latente de fusion pour la partie englacée du karst, située au-dessus de l'isotherme 0° C.

En 2008, une venue d'eau est apparue près du point T 3, et de la glace a commencé à se former. En raison de ce nouvel apport d'eau, du givre a également commencé à se former sur les parois du méandre en amont et en aval de ce point, jusqu'au point T1. Auparavant, les parois du méandre étaient sèches.

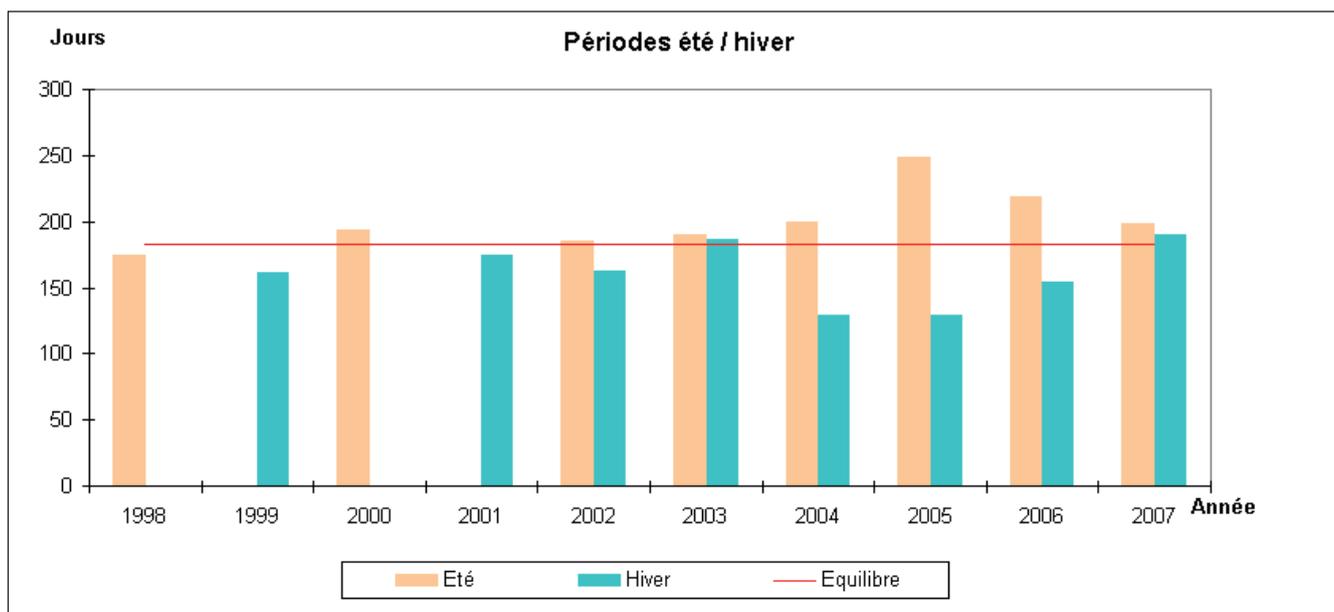
A partir de 2008, et de manière encore plus marquée en 2009, on observe une amplitude nettement plus élevée des variations de température saisonnières aux points T 1 et T 3, notamment pour les basses températures, ainsi qu'un net abaissement de la température moyenne annuelle à ces deux points ainsi qu'au point T 2 [figure 24]. Cela est sans lien avec l'évolution de la température extérieure, mais est dû à de nouvelles venues d'eau dans le méandre entre T 2 et T 3, avec formation de glace aux environs du point T 3 et de givre au point T 1 (y compris sur les acquiseurs de température) : l'évaporation de l'eau et la sublimation de la glace provoquées par le courant d'air entraînent un refroidissement « artificiel » à ces deux points.

Cette dernière observation permet, indirectement, les constats suivants :

- En l'absence de venues d'eau (notamment avant 2008), le courant d'air dans le méandre entre T 2 et T 3 est nettement sous-saturé en humidité, puisqu'il sublime visiblement la glace et ne forme pas de givre. Cela concorde avec le gradient altimétrique élevé observé (cf. ci-dessus).
- En présence d'eau (liquide ou solide), ce courant d'air refroidit sensiblement la cavité, par évaporation ou sublimation.

Analyse détaillée des différentes courbes

Au point T 1, on constate de nombreuses variations de température de faible amplitude, ainsi que des pics isolés de forte amplitude. Aucune de ces variations ne montre une corrélation nette avec la température extérieure. On observe toutefois une variabilité plus élevée en hiver



30. Durée des périodes avec régimes de circulation d'air, respectivement, « hiver » et « été ». Certaines périodes ne figurent pas en raison de mesures incomplètes.

qu'en été, ce qui suggère que l'entrée aspirant en hiver est plus proche de ce point que l'entrée aspirant en été.

Au point T 2, on observe une très faible variabilité et aucune corrélation avec les autres points de mesure en été, et une très faible corrélation avec le point T 1 en hiver. Sa variabilité est également légèrement plus élevée en hiver. D'autre part, on remarque des paliers de température bien marqués à 0° C. Ces paliers sont liés à la chaleur latente de fusion/cristallisation de l'eau; rappelons que ce point est situé à quelques mètres seulement du Glacier.

Au point T 3b, on observe une variabilité élevée et une forte corrélation avec le point T 1 en été, alors que cette variabilité et cette corrélation sont très faibles en hiver. En été, le courant d'air est donc probablement descendant en T 3b, soit depuis le point T 1, soit depuis une source de chaleur commune aux points T 1 et T 3b. Depuis 2006, on observe toutefois une variabilité et une corrélation avec le point T 1 nettement plus forte, en hiver. Cela est probablement dû à l'ouverture d'entrées auparavant bouchées par la glace ou des névés (fonte du permafrost,

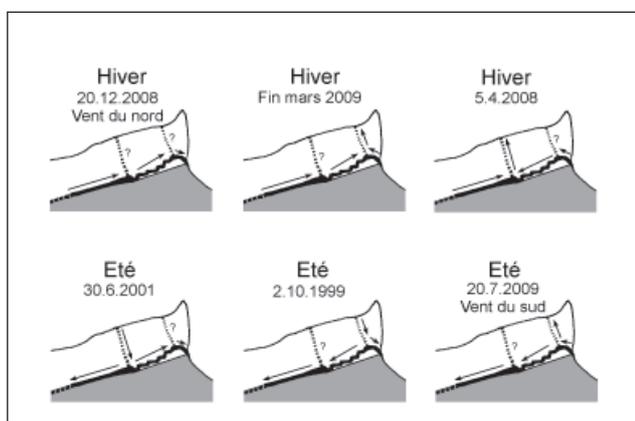
voir ci-dessous).

Au point T 4b, on observe une très belle corrélation inverse avec la température extérieure : en hiver, une courte période de chaleur suffit à faire inverser le courant d'air, ce qui provoque une diminution subite de la température en T 4b (pic vers le bas). En été, c'est exactement l'inverse.

Déductions possibles concernant les circulations d'air

Sur la base des « comportements » thermiques décrits ci-dessus, on peut attribuer aux points de mesure les contextes suivants, par rapport aux systèmes souterrains ventilés schématisés [cf. figures 28 et 29] :

Point de mesure	Contexte
T 1	D
T 2	A
T 3b	C / D depuis 2006 ?
T 4b	B

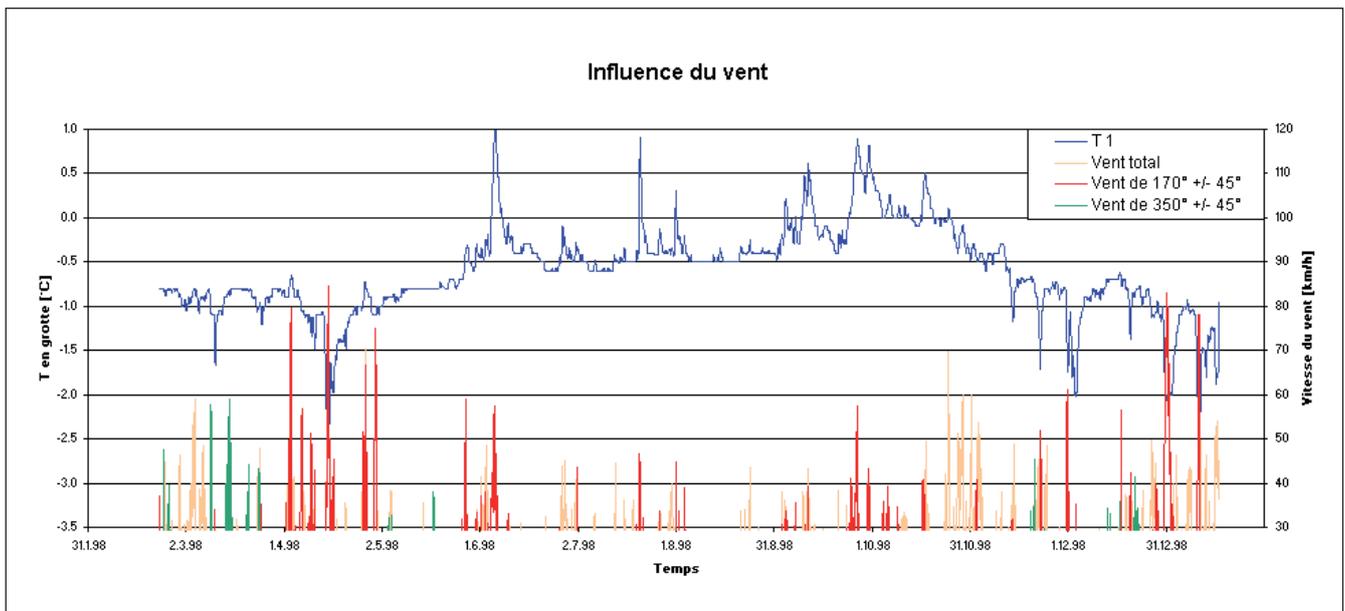


31. Circulations d'air observées.

Influence du vent déduite des mesures de température

Si on observe la figure 32, on constate sans peine que les pics de température au point T 1 (ainsi que T 3b) sont parfaitement corrélés avec les pointes de vent orienté sud¹ à nord, plus rarement nord à sud. De plus, aucun autre phénomène ne permet d'expliquer ces pics de température en T 1. Cette corrélation est relativement logique, lorsqu'on sait que la paroi dans laquelle s'ouvre l'entrée principale des Pingouins est orientée

¹ Par simplification, nous parlons de « sud » et « nord », bien que ces directions comprennent les vents provenant, respectivement, de 160 +/- 50° et de 340 +/- 45°.



32. Chronique des températures avec vent aux Diablerets.

pratiquement au sud. D'autres entrées, actuellement non identifiées, sont supposées sur le Lapi di Bou, celui-ci étant orienté pratiquement au nord.

Mesures de courant d'air

En figures 33 à 35, nous avons représenté les valeurs de courant d'air près du point T1 [cf. figure 23], ainsi que l'intensité et la direction nord / sud du vent à la station des Diablerets I (arrivée du téléphérique) enregistrées par l'ENA.

Par fort vent du sud, le courant d'air est entrant² et peut atteindre des valeurs comprises entre 1,2 et 2 m/s, voire plus³. Par fort vent du nord, le courant d'air est sortant, mais reste à des valeurs moins élevées que par vent du sud. Rappelons que l'entrée de la cavité est située dans une paroi orientée pratiquement au sud. Ces observations correspondent à celles effectuées plus haut sur la base des mesures de température.

En l'absence de vent du nord ou du sud de plus de 15 km/h environ, les courants d'air sont principalement thermiques, par convection naturelle, et ne dépassent pas 40 cm/s. En régime de circulation hivernal, ces courants d'air sont presque toujours entrants. Cela suggère l'existence d'une entrée plus haute que les trois entrées actuellement connues, ce qui correspond aux hypothèses émises sur la base de nos observations des températures.

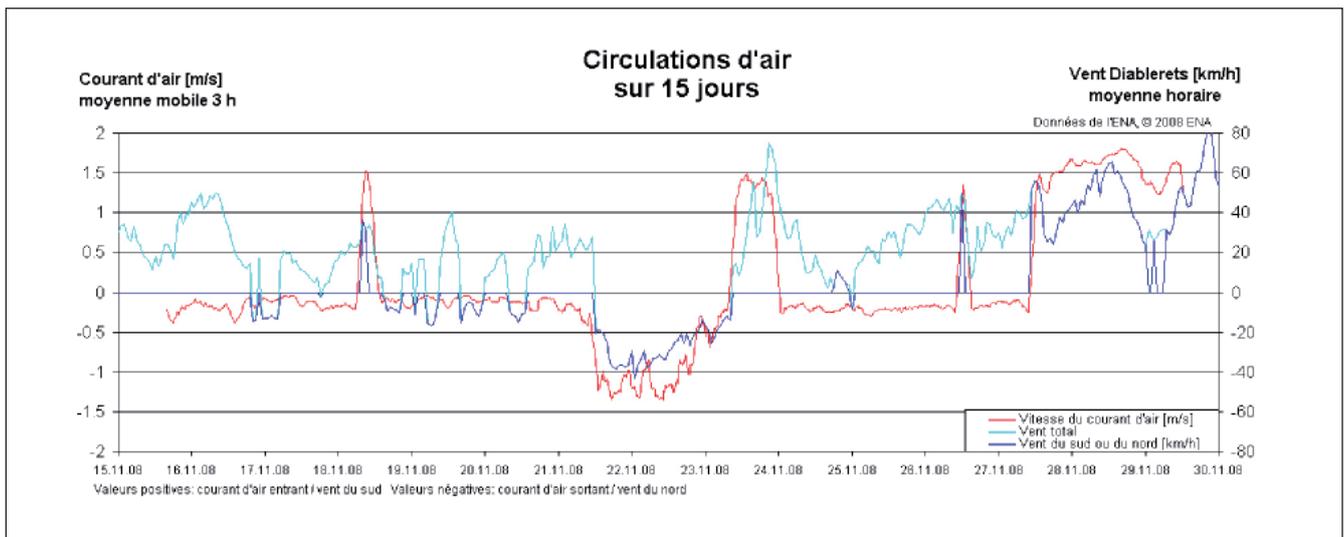
² Par rapport aux trois entrées actuellement connues de la cavité, toutes situées dans la paroi de la Lé, à des altitudes relativement proches.

³ Du fait que notre courbe d'étalonnage est encore peu fournie pour les valeurs élevées, celles-ci sont encore peu étayées et pourraient notamment être plus élevées qu'admis ici.

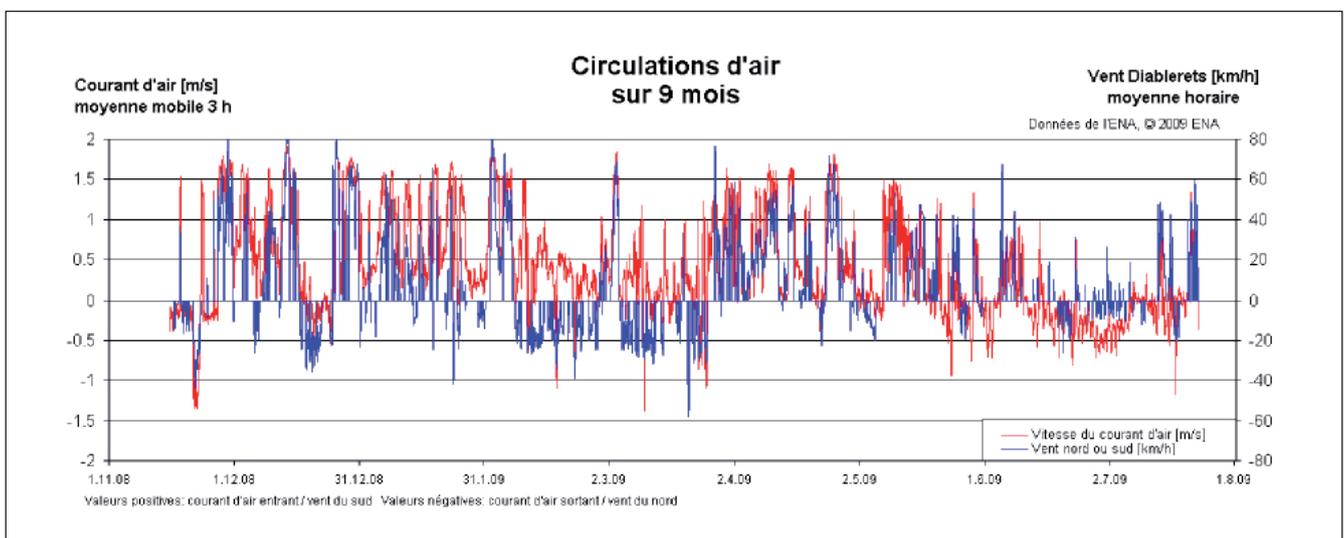
Globalement, on observe donc, d'une part, des courants d'air thermiques, généralement entrants en hiver et sortants en été, de 5 à 40 cm/s et, d'autre part, des courants d'air de 1 à 2 m/s, voire plus, induits par le vent, principalement par le vent venant du sud et, de manière moins marquée, par le vent venant du nord. En février et mars, c'est-à-dire au plus froid de l'hiver, le courant d'air reste entrant malgré un léger vent du nord. Fin juin et début juillet, c'est l'inverse : le courant d'air reste sortant malgré un léger vent du sud.

En termes de débit, et en admettant une section d'environ 2,3 x 0,5 m au point de mesure, on obtient un débit moyen de 0,65 m³/s (qui n'a pas grande signification, vu les différents régimes de ventilation décrits ci-dessus), avec des pointes jusqu'à 2,3 m³/s. Durant cette première période de mesure de huit mois, le volume d'air total ayant passé par cette galerie (dans les deux sens) atteint environ 14 millions de m³, dont plus de 80% sont dus au vent (vitesse du courant d'air supérieure à 40 cm/s). Si l'on extrapole le volume d'air total sur une année, on obtient environ 20 millions de m³ (dans les deux sens), ce qui est considérable. Ces chiffres sont bien sûr provisoires et peuvent être biaisés par le fait que cette première période de mesure ne s'étend pas sur une année complète. La mesure d'un cycle annuel complet permettra d'obtenir des chiffres plus fiables.

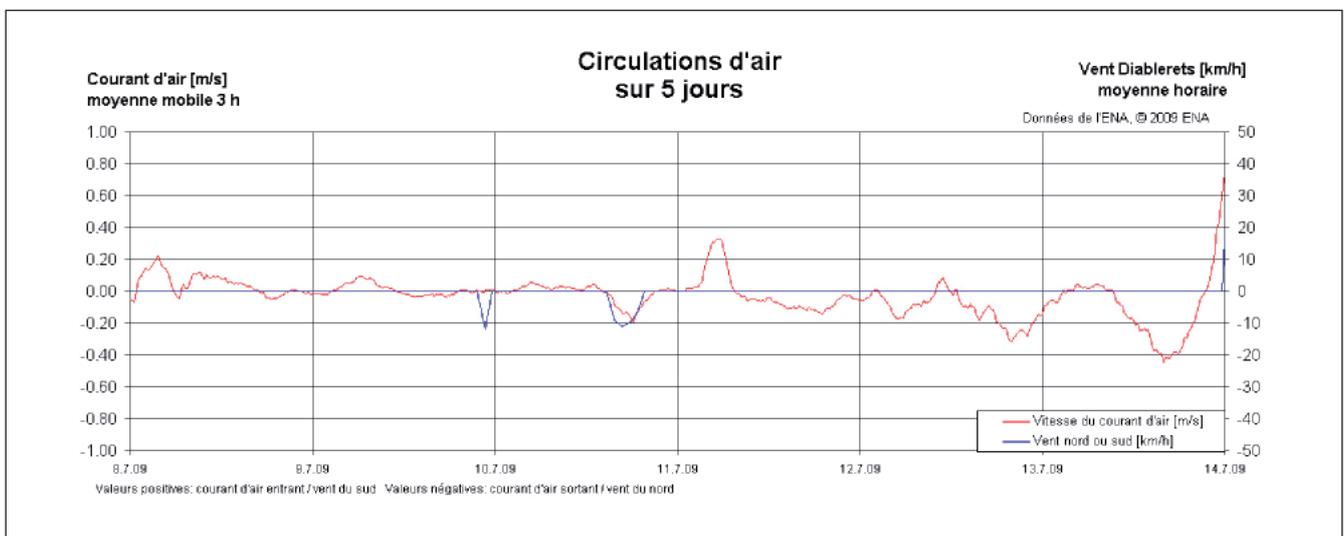
Durant nos incursions, aussi bien dans la grotte des Pingouins que dans le Collecteur (N° 5 / 44), nous avons souvent observé des inversions du sens du courant d'air (thermique) en cours de journée ou en fin de journée. Ces inversions journalières sont attribuées à la variation de l'ensoleillement, d'une part, lorsque le soleil commence à frapper le lapiaz, dont l'orientation est principalement N, et d'autre part, lorsque le soleil se couche. Les enregistrements du 8 au 14 juillet 2009 [figure 35], durant lesquels le vent est particulièrement faible, illustrent bien ce phénomène. Accessoirement, on remarque sur ces enregistrements



33. Chronique des circulations d'air dans la grotte des Pingouins du 15 au 29 novembre 2008. Le 23 novembre, on observe un pic de courant d'air lié à des vents particulièrement forts, mais venant de 230 à 240°, ce qui correspond à peu près à l'orientation de la falaise. Ce vent provoque malgré tout un fort courant d'air entrant.



34. Chronique des circulations d'air dans la grotte des Pingouins du 15 novembre 2008 au 23 juillet 2009.



35. Chronique des circulations d'air dans la grotte des Pingouins du 8 au 14 juillet 2009

que le courant d'air devient, en moyenne journalière, de plus en plus sortant, à mesure que la température extérieure augmente. Cela correspond, logiquement, à l'augmentation de la convection thermique avec l'augmentation de la différence de température entre l'air extérieur et l'air de la cavité.

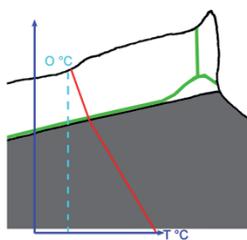
Sur la base des courants d'air, des vents, des températures et de nos observations sur place, on peut établir les schémas de circulation illustrés en figure 31. On constate qu'il faut invoquer au moins deux nouvelles entrées. La plus haute d'entre elles pourrait être la grotte des Manchots, située à

l'aplomb des galeries entre T 1 et T 3b.

De ces schémas, il ressort clairement que nous avons affaire à plusieurs systèmes de circulation relativement indépendants :

- les circulations dans les galeries très éloignées de toute entrée (point T 4) sont liées presque exclusivement à la convection thermique et s'inversent deux fois par an en fonction de la température extérieure, avec éventuellement un coup de pouce du vent au moment de l'inversion,
- les circulations dans les galeries proches d'entrées

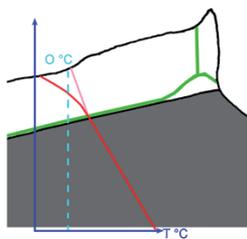
Formation de glace de regel à grande profondeur dans le karst



Situation stable

Dans une situation climatique stable, le gradient de température (en rouge) est égal au gradient atmosphérique dans la zone ventilée du karst (en blanc) et au gradient géothermique dans les terrains marneux imperméables (en gris foncé).

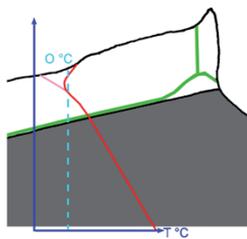
Les circulations d'eau dans le karst ne sont pas entravées, aussi longtemps que la température reste supérieure à 0°C.



Refroidissement climatique

Lors d'un refroidissement climatique de longue durée (p.ex. glaciation), les terrains vont commencer à se refroidir depuis la surface. Ce sont donc les terrains superficiels qui vont geler en premier, donnant lieu à la formation d'un permafrost.

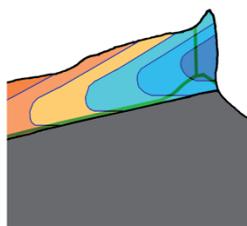
Les circulations d'eau sont bloquées en surface par le permafrost. En dessous du permafrost, le karst reste sec.



Réchauffement climatique

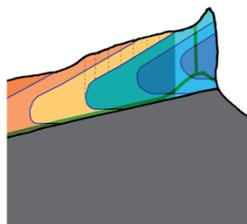
Lors d'un réchauffement climatique de longue durée suivant une période froide (p.ex. fin de glaciation), les terrains vont commencer à se réchauffer depuis la surface. Le permafrost va fondre et s'ouvrir.

L'infiltration d'eau est à nouveau possible depuis la surface. Mais comme le karst situé sous le permafrost reste à une température inférieure à 0°C, cette eau va geler en profondeur, donnant lieu à la formation de glace de regel.



Zone de regel

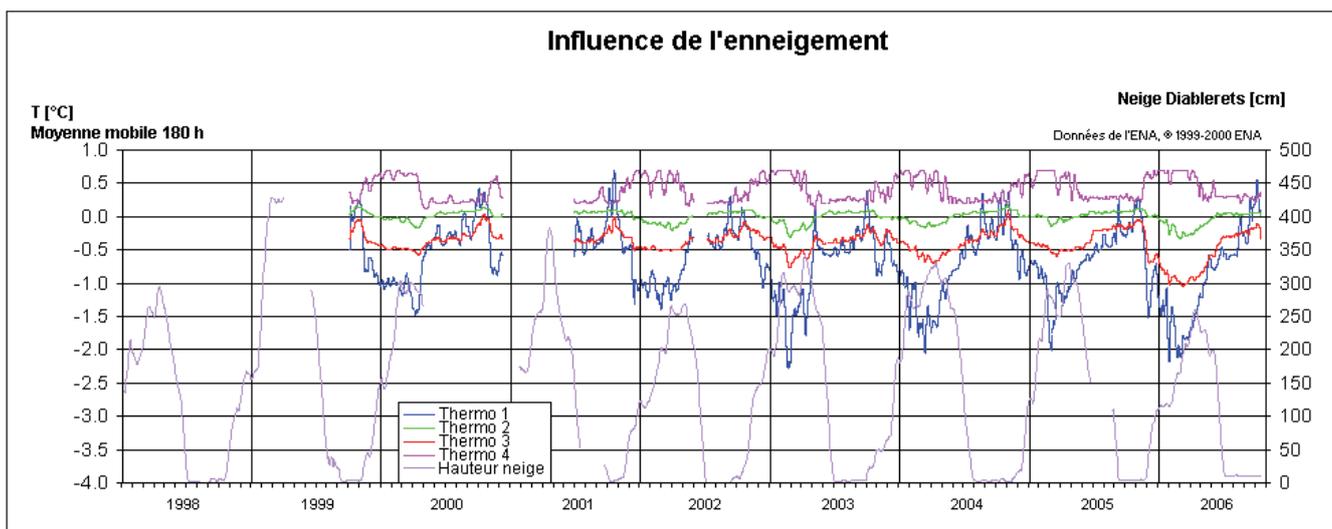
L'inversion de température le long d'un profil vertical observée lors d'un réchauffement climatique peut aussi être représentée par les isothermes dans le karst. Dans la figure ci-contre, les zones où la température est inférieure à 0°C sont en bleu. On constate qu'à une certaine profondeur, l'eau d'infiltration va rencontrer une zone où la température est inférieure à 0°C, et va par conséquent geler. Cette zone de regel est grisée sur la figure ci-dessous.



A mesure que le réchauffement climatique progresse, cette zone de regel va monter en altitude, permettant la formation de nouvelle glace de regel à des altitudes plus élevées et provoquant la fonte de la glace de regel dans le bas de la précédente zone de regel.

Dans ce contexte, la glace de regel est donc un phénomène transitoire et éphémère.

En vert : tracé simplifié de la grotte des Pingouins.



36. Chronique des températures avec enneigement.

(points T 1 et T 3) sont fortement influencées par le vent,

- les circulations dans le méandre de raccord (entre les points T 3 et T 2) sont soumises à la fois aux influences du vent et de la convection thermique.

Dans ce sens, il convient de souligner que les courants d'air enregistrés par le zéphyromètre près du point T 1 et leur interprétation spécifique ne s'appliquent, pour l'essentiel, qu'au système de circulation dans les galeries entre les trois entrées actuellement connues et l'entrée supérieure soupesée.

Influence de la neige

Durant les années 2006 et 2007, les variations de températures aux points T 3b et T 2 montrent des amplitudes nettement plus élevées, notamment en hiver. Nous nous sommes alors demandés si cela pouvait être mis en relation avec un plus faible enneigement, qui favoriserait les circulations d'air.

En effet, lors de nos randonnées à ski sur le lapiaz, nous avons constaté que les trous souffleurs avaient tendance à se boucher au cours de l'hiver, notamment lors de tempêtes de neige par temps de fœhn, lorsque la température extérieure est supérieure ou égale à celle des cavités, ce qui provoque l'aspiration de la neige (régime de ventilation estival). Et une fois le trou souffleur bouché, celui-ci est rapidement comblé de neige soufflée et reste fermé jusqu'au printemps. Un faible enneigement pourrait donc favoriser les circulations d'air.

La comparaison de l'enneigement avec les chroniques de température [figure 36] ne permet toutefois pas de mettre en évidence une influence particulière de l'enneigement sur les températures mesurées. A contrario, cela tend à confirmer l'influence de la fonte du permafrost, et notamment la fonte de bouchons de glace observée dans plusieurs cavités, ce qui permet une augmentation générale des circulations d'air ainsi que de nouvelles infiltrations d'eau, dont nous avons vu qu'elles entraînent un important refroidissement de la cavité, en combinaison avec le courant d'air.

Formation de la glace de regel

Ces mesures et observations nous ont également permis de mieux comprendre la dynamique des accumulations de glace de regel à grande profondeur dans le karst. (cf. encadré).

Il en ressort qu'une telle accumulation de glace de regel est un phénomène transitoire et éphémère, associé à un réchauffement climatique consécutif à une période froide.



Photo: Miguel Borreguero

37. Traces de mouvement de la masse de glace contre une paroi. On observe des stries et des éclatements de la roche et de croûtes stalagmitiques.

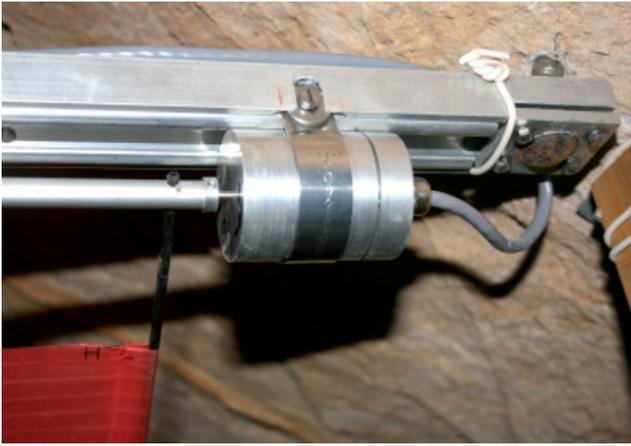


Photo: André Pahud

38. Zéphyromètre : détail de l'axe et du logement du capteur magnétique absolu.

Ainsi, le Glacier pourrait s'être formé à la fin du « Petit Age Glaciaire » ou à la faveur d'augmentations passagères de la température durant cette période. Rappelons que ce « Petit Age Glaciaire » correspond à un refroidissement entre environ 1590 et 1860, avec trois poussées glaciaires plus marquées respectivement au début du XVII^e siècle, vers 1820 et vers 1850-1860 (N. THÉOBALD, 1972). Sur le lapiaz du Tsanfleuron (J.-M. GARDAZ, 1992), situé à quelques kilomètres au sud, on trouve une moraine frontale attribuée à la dernière avancée de 1860 et située entre 2300 et 2600 m d'altitude environ (pour l'essentiel vers 2400 m). Au pied nord des Montons, à une altitude comprise entre 2200 et 2400 m, et en contrebas de la grotte de la Goulotte vers 2500 m, se trouvaient des névés permanents jusqu'à la fin des années 1990. En août 2001, on a découvert, à 2490 m d'altitude, un corps avec, en poche, des pièces de monnaie frappées 1850. Ce corps a dû être recouvert de neige et rester prisonnier du névé jusqu'à sa découverte. Ces névés pourraient ainsi correspondre à la poussée glaciaire de 1850-1860.

D'autre part, sachant que la glace de regel ne peut se former qu'à une altitude proche de l'isotherme 0° C, la glace de regel persistante que l'on observe actuellement



Photo: André Pahud

39. Zéphyromètre : lecture des valeurs enregistrées au moyen d'un ordinateur portable. L'acquisiteur de données a été placé dans le cylindre en inox fermé par un disque en plastique noir, à droite de l'ordinateur.

à des altitudes nettement plus élevées, notamment dans la grotte des Pingouins, est nécessairement fossile et liée à des épisodes climatiques anciens plus chauds.

Relevons encore que les raisonnements et conclusions ci-dessus ne s'appliquent, pour l'essentiel, qu'à des systèmes ventilés (voir encadré) ; les glaciers situés parfois très loin en dessous de l'isotherme 0° C sont liés à d'autres phénomènes.

Le « zéphyromètre », un développement original pour la mesure des courants d'air

La cavité étant relativement difficile d'accès, il nous fallait un appareillage capable de mesurer les courants d'air avec une précision élevée et pendant une longue période, donc avec une faible consommation d'énergie et un nombre minimum de canaux de mesure. Aucun appareillage disponible dans le commerce ne répondant suffisamment à ces deux impératifs, nous avons développé notre propre appareillage, que nous avons baptisé « zéphyromètre » (fig. 38 et suivantes). Ce prototype a été développé en 2006-2008 et installé en novembre 2008.

Il s'agit d'une voile tendue sur des baguettes rigides et fixée sur un axe horizontal tournant librement. Cet axe est couplé à un aimant permanent placé en face d'un capteur magnétique absolu fixe, lui-même relié à un acquisateur de données du commerce. Le capteur magnétique permet de lire la position de la voile avec une précision et une résolution élevées. En l'absence de courant d'air, la voile pend verticalement vers le bas. En présence d'un courant d'air, elle est déviée d'un côté ou de l'autre, suivant le sens du courant d'air. L'appareillage a été étalonné pour diverses vitesses de courant d'air au moyen d'un anémomètre thermique.

Cette réalisation est aussi un cas exemplaire de collaboration interdisciplinaire : le concept de base est de M. Borreguero et A. Pahud, la conception et la réalisation de toutes les parties mécaniques, y compris le dispositif de fixation, est de A. Pahud, la fixation a été réalisée par A. Pahud et F. Casanova et la configuration de l'électronique et une partie de sa réalisation sont de M. Demierre.



Photo: André Pahud

40. Zéphyromètre en place. Remarquer la déflexion de la voile, due à un fort courant d'air lié, ce jour-là, au fœhn.

Morphologie glaciaire souterraine

A quelques endroits, on peut observer des traces de mouvement du Glacier contre une paroi [cf. figure 37]. Cela montre que la masse de glace de regel a bougé, du moins par le passé, et qu'on peut dès lors s'attendre à ce que ce mouvement ait eu des conséquences sur la morphologie de la cavité (bris de concrétions, petites moraines locales). Par extension, on peut s'attendre à ce que des masses de glace comparables, formées durant des périodes plus froides dans des cavités à plus basse altitude, aient également provoqué des « morphologies glaciaires » spécifiques, notamment des chutes de blocs et des stalactites brisées. Des bris de stalactites attribués à l'action de la glace ont été décrits, récemment, par KEMPE S. (2008).

Accessoirement, on constate aussi que les phénomènes de gélifraction ne sont de loin pas confinés aux zones d'entrée, comme on le croit parfois, mais simplement liés à la remontée de l'isotherme 0° C. Des cailloutis de gélifraction peuvent donc s'observer à tout endroit d'une cavité ayant été, à un moment donné de son histoire, à une température inférieure à 0° C. Dans les cavités actuellement recoupées par l'isotherme 0° C, ce phénomène peut même s'avérer dangereux, cela d'autant plus que l'on ne s'y attend pas nécessairement.

Perspectives

Afin de consolider nos hypothèses, notamment en ce qui concerne le réchauffement climatique, nous allons poursuivre nos mesures de température. Les mesures du courant d'air devraient également nous permettre de préciser le comportement des courants d'air à l'entre-saison et de mieux comprendre les différents systèmes de circulation d'air. Enfin, des datations de la glace du Glacier ou d'autres grottes de la région (G3), par exemple au moyen de la calcite cryogénique, seraient intéressantes, dans la mesure où elles pourraient apporter des informations complémentaires quant au mécanisme de formation de cette glace de regel.

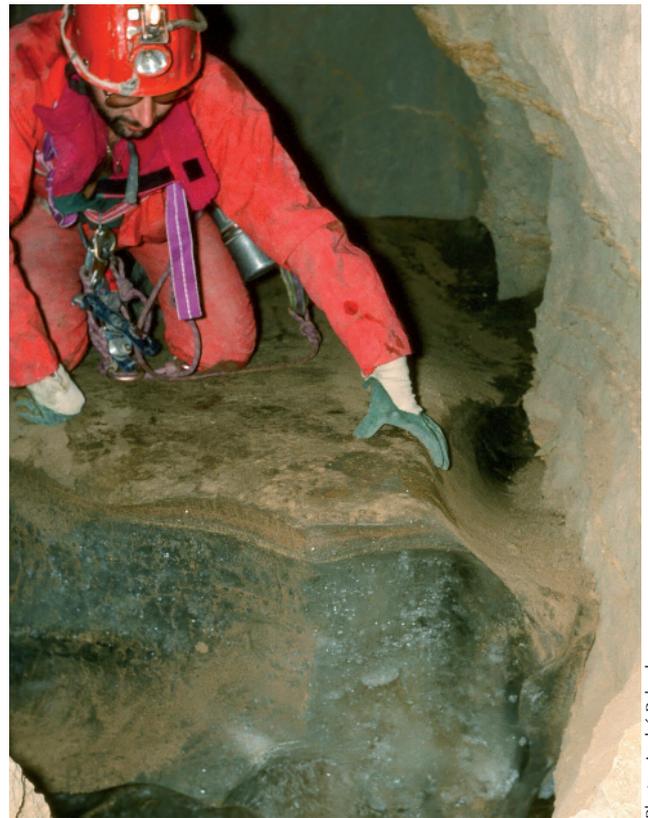


Photo: André Pahud

41. Glace fossile avec plusieurs couches de poussière près de la surface et en surface. Ces couches résultent de la concentration des poussières dispersées dans la glace, par sublimation de cette dernière en surface. Le front de la masse de glace est également dû à la sublimation par le courant d'air. Dans le méandre de raccord de la Grotte des Pingouins, vers 2330 m d'altitude, en septembre 1988.