

Michel DOUAT et  
Maurice DUCHÊNE

International Centre for the  
Exploration of the Himalayas

ICEHimalayas@aol.com  
mcm.douat@wanadoo.fr  
mauduchene@aol.com

# Recherches préliminaires sur les cavités glaciaires du Népal, témoins de la fonte des glaciers himalayens

**RÉSUMÉ :** Les cavités intra-glaciaires et les phénomènes pseudo-karstiques associés ont fait l'objet de nombreuses publications. Dans l'Himalaya du Népal, entre 4000 et 5600 m, la zone d'ablation des glaciers (glaciers noirs) présente des dépressions lacustres et des cavités dont le fonctionnement hydrologique peut être mis en relation avec leur fonte accélérée. Des observations convergentes sur huit zones glaciaires du Népal central et oriental ont été menées en parallèle avec des observations plus poussées sur le Glacier sud de l'Annapurna de novembre 2007 à novembre 2010. Dans ce glacier, nous avons exploré 1000 m de conduits intra-glaciaires

et observé des relations entre les lacs supraglaciaires et des cavités ainsi que des phénomènes d'ennoiement épisodiques de ces cavités par des remontées d'eau suivies de vidanges brutales.

**MOTS-CLÉS :** cavité glaciaire, cryo-karst, glacier noir, réchauffement climatique, Himalaya, Népal,

**ABSTRACT:** PRELIMINARY INVESTIGATIONS ON GLACIAL CAVES IN NEPAL: EVIDENCE FOR MELTDOWN OF HIMALAYAN GLACIERS. Glacier caves and associated pseudo-karstic phenomena were treated by numerous publications. In the Nepalese Himalaya, between 4000 to 5600 m asl, the ablation area of glaciers covered by

scree presents lake depressions and caves, whose hydrological functioning can be put in relationship to accelerated melting. Concordant observations on eight glacial areas of Central and Eastern Nepal were combined with in-detail investigations (2007-2011) on the Southern Annapurna glacier. There, we explored 1000 m of intraglacial tubes, and we observed the relationship between supraglacial lakes, caves, and phenomena of episodic flooding of these caves by the effects of lake jökulhlaup.

**KEY-WORDS:** glacial cavity, cryo-karst, glacier covered by scree, global warming, Himalaya, Nepal.

## Introduction

En 2007 et 2008, lors de prospections spéléologiques dans les zones calcaires jurassiques de la haute chaîne de l'Himalaya du Népal central et oriental(1), de nombreuses cavités s'ouvrant à la surface des glaciers ont été repérées. Un premier inventaire des phénomènes pseudo-karstiques dans la glace a été effectué et plusieurs explorations et topographies ont été réalisées. Les glaciers prospectés sont essentiellement situés sur le versant sud de la chaîne entre 4 000 m et 5 600 m d'altitude. Exposé directement aux vents de mousson, ce versant méridional reçoit d'abondantes précipitations neigeuses (> 1 500 mm/an à 4 000 m) alors que le versant nord de la chaîne, en position d'abri, connaît un climat semi-aride [Zurick, 2005].

Dans le secteur des Annapurnas,

tion avec des montagnards népalais ont révélé des comportements hydrodynamiques originaux qui ont conduit à étendre le domaine des recherches à d'autres zones du Népal afin de mieux appréhender la situation altitudinale, le fonctionnement hydrologique et l'évolution morphologique de ces cavités. Ces investigations de terrain s'inscrivent en amont des travaux des chercheurs qui étudient les risques liés à la fonte rapide des glaciers himalayens [Bajracharya et al., 2007].

## I. Situation des secteurs étudiés

Les huit grandes zones glaciaires du Népal visitées de novembre 2007 à décembre 2009 sont localisées à proximité des frontières chinoise (Tibet) et indienne (Sikkim) (figure 1). Ces reconnaissances nécessitent des marches

d'approche de 8 à 14 jours aller-retour pour des séjours sur site de 4 à 10 jours seulement. La plupart des reconnaissances concernent la zone d'ablation correspondant à la partie aval des glaciers. Ce sont des « glaciers noirs » recouverts de débris rocheux, de sables et de dépôts éoliens fins. Ils présentent de nombreux lacs supraglaciaires. Les cavités glaciaires sont nombreuses ainsi que d'autres phénomènes pseudo-karstiques. Ces glaciers noirs himalayens sont actuellement en forte régression [Armstrong, 2010].

## A. Népal central

Quatre secteurs ont été visités : Annapurna, Himlung Himal, Manaslu-Nemjung Himal et Langtang.

Dans le secteur des Annapurnas, les grottes glaciaires sont nombreuses. Sur le front du glacier du Shya Gang (Thorung La Pass), à 5 100 m d'altitude

(1) Expéditions Lost Valleys : expéditions interclubs FFS de reconnaissance du potentiel karstologique de la haute chaîne de l'Himalaya (Népal Central). Parrainage de la Fédération Française de Spéléologie. Participants des clubs spéléo français (ARSIP, GS Haut Pyrénéen de Tarbes, GS Pyrénées, AVEN, Terre et Eau) et belge (CS Basse Sambre). Compte rendu de l'expédition 2007 en ligne sur le site internet de ICE Himalayas : <http://www.ice-himalayas.org/> rubrique expéditions. Compte rendu expéditions 2009 et 2010 en cours.

Figure 1 : Situation des glaciers reconnus. 1 : Annapurna (glacier Sud) ; 2 : Himlung Himal (glacier de Pangrè) ; 3 : Manaslu (glaciers de la Kechakyu Khola, de Ponkar et de Svacha) ; 4 : Langtang (glacier de Lirung Tsang) ; 5 : Cho Oyu (glacier Ngozumba) ; 6 : Everest (glacier du Khumbu) ; 7 : Lothse (glaciers du Lothse Sar et de l'mja) ; 8 : Kangchenjunga (glacier du Yalun).

Situation of the investigated glaciers. 1 : Annapurna (glacier Sud) ; 2 : Himlung Himal (glacier de Pangrè) ; 3 : Manaslu (glaciers de la Kechakyu Khola, de Ponkar et de Svacha) ; 4 : Langtang (glacier de Lirung Tsang) ; 5 : Cho Oyu (glacier Ngozumba) ; 6 : Everest (glacier du Khumbu) ; 7 : Lothse (glaciers du Lothse Sar et de l'mja) ; 8 : Kangchenjunga (glacier du Yalun).

Photo 1 : Le glacier de Ngozumba, le plus long du Népal (19 km). On aperçoit l'Everest (8848 m) au fond, l'Ama Dablam (6856 m) à droite et le lac de Gokyo (4750 m) au premier plan au débouché d'une ancienne crevasse du glacier.

Actuellement, la surface du glacier est située 50 m plus bas que le lac. Cliché M. Duchêne.

The Ngozumba glacier, the longest of Nepal (19 km).

Mt Everest (8848 m) is seen in the background, Ama Dablam (6856 m) at the right, and Gokyo lake (4750 m) in the front, at an old spillover of the glacier. At present, the glacier surface is 50 m lower than the lake.



au nord de l'Annapurna, une petite grotte-résurgence, à écoulement temporaire, mesure 30 m de développement. En revanche, dans le Glacier sud de l'Annapurna, des cavités plus vastes ont été découvertes entre 4000 et 4250 m d'altitude. Certaines sont de grande ampleur comme Baraph Guphaa Annapurna 1 (BGA1) d'une profondeur de 95 m et de 235 m de développement. Ce glacier montre un comportement hydrodynamique original avec des variations du niveau d'eau de 85 m dans la principale cavité. Ce fonctionnement particulier a conduit à faire huit reconnaissances supplémentaires sur ce glacier pendant quatre ans à différentes époques de l'année.

Dans le secteur de l'Himlung Himal (haute vallée de la Phoo Khola), le glacier de Pangrè présente de vastes entrées de grottes et des lacs supra-glaciaires entre 4600 et 4800 m d'altitude. La moraine latérale nord du Pangrè qui domine maintenant la vallée présente deux traces de crevaisons récentes.

Dans les secteurs situés entre le Manaslu et le Nemjung Himal, trois glaciers ont été

visités : Kechakyu Khola, Ponkar et Svacha. On y a observé des grottes supra-glaciaires et des lacs intra-morainiques, notamment deux grands lacs formés au débouché de trois glaciers. Dans le secteur du Langtang, le glacier de Lirung Tsang fond très rapidement ; il recèle quelques petites cavités de faible développement.

## B. Népal oriental

Quatre secteurs ont également été visités : Cho Oyu, Everest, Lothse et Kangchenjunga (figure 1).

Le glacier Ngozumba, le plus long du Népal, se situe au sud du Cho Oyu (8201 m). Il mesure 19 km de long et plus d'un kilomètre de large par endroits. La surface des lacs supra-glaciaires du Ngozumba a fortement augmenté depuis 2000. Nous y avons exploré de nombreuses petites grottes supraglaciaires de faible développement (20 à 50 m), mais des grottes plus importantes ont déjà été explorées [Gulley et Benn, 2007]. Des lacs juxtaglaciaires importants (photo 1) sont actuellement coincés entre les flancs de la vallée et la moraine latérale. Le Ngozumba a beaucoup fondu ces dernières années. Ainsi, les lacs de Gokyo, alimentés par de petits glaciers latéraux, sont maintenant situés 50 m au-dessus de la surface du glacier, d'où un risque de rupture de la moraine et de déversement des lacs dans le glacier selon un processus inverse à ce qui se passe habituellement. Une grotte a été également repérée dans le glacier du Pharilaptse sous le Renjo Pass.

Dans les secteurs de l'Everest (glacier de Khumbu), les phénomènes pseudo-karstiques sont nombreux. Ainsi l'eau de fonte superficielle a formé une bédrière encaissée évoluant en canyon, creusé dans la glace, long de 1 km et profond de 20 à 25 m (photo 2). Le torrent temporaire se perd dans une grotte qui traverse une colline de glace. La résurgence présente des grottes étagées actuellement non fonctionnelles. En aval, l'eau disparaît dans



Photo 2 : Canyon long d'un kilomètre environ sur le glacier du Khumbu. Il résulte du surcreusement d'une bédrière. Il se perd dans un petit système perte – résurgence horizontal de faible développement. Cliché M. Duchêne. *A kilometeric canyon on Khumbu glacier. It is the result of an overdeepening of a glacial rill. Its waters are lost in a small horizontal ponor-sink system.*



Photo 3 : Grotte de décollement du glacier sur la paroi du Nuptse vers 6700 m d'altitude en octobre 2008. Cliché M. Duchêne. *Glacier lift caves on the Nuptse wall, at about 6700 m asl, in October 2008.*

une nouvelle perte. Un « canyon » affluent provient d'une grande grotte glaciaire située sous la paroi sud du Nuptse. Sur le glacier du Khumbu, on observe aussi de nombreuses petites grottes de faible développement (20 à 50 m) et de grandes entrées non explorées. Des lacs supraglaciaires, de plus de 100 m de long, se développent dans des dépressions et se déversent dans des porches similaires à l'entrée de BGA1 dans l'Annapurna.

Dans le flanc englacé du Nuptse, vers 6700 m, on observe une vaste grotte localisée entre la paroi et le glacier (photo 3). Cette entrée paraît liée principalement à un décollement du glacier à cause de la rupture de pente. On y observe de grandes stalactites de glace de regel. D'autres cavités de ce type ont été repérées à haute altitude, comme sur le Pumori (6000 m) et sur l'Ombagaichen (6200 m). Sur le glacier du Lothse, des cavités ont été repérées sur des photos aériennes en amont de la zone visitée. Dans la partie aval des glaciers du Lothse Shar et de l'Imja, il existe de nombreux systèmes pertes-résurgences de faible développement. De grandes entrées sont à explorer plus en amont.

Dans le secteur du Kangchenjunga (8586 m), une courte reconnaissance a permis de repérer plusieurs grottes dans le glacier Yalun. Le glacier du Kangchenjunga recèle aussi plusieurs cavités dont une vaste entrée, de 40 x 25 m, située au fond d'une dépression de 100 m de profondeur.

## II. Typologie des cavités et des phénomènes cryo-karstiques observés

Les explorations dans les glaciers du Népal central et oriental mettent en évidence des phénomènes cryo-karstiques déjà décrits [Eraso et Pulina, 1994; Mavlyudov, 2006; Jobard et Dzikowski 2009; Gulley 2009]. Nous avons classé nos observations en

fonction de leur localisation et de leur origine : formes supraglaciaires, intraglaciaires et sous-glaciaires ainsi que les spéléothèmes de glace et autres dépôts.

### A. Les phénomènes supraglaciaires

En raison de la fusion de la glace couverte de débris, la physionomie de surface de certains glaciers noirs présente une remarquable convergence de forme avec les karsts tropicaux à dolines jointives (cockpit karsts) de Jamaïque, de Nouvelle-Guinée et de Chine (photo 4).

Les lacs supraglaciaires, nombreux, peuvent couvrir de quelques centaines de m<sup>2</sup> jusqu'à plusieurs hectares. Généralement, leur

Photo 4 : Le glacier du Khumbu qui présente par endroits des morphologies de surface rappelant des karsts tropicaux à dolines jointives. Cliché M. Duchêne. *In some sites, the Khumbu glacier presents morphologies that remind of tropical cockpit karst.*





Photo 5 : Dépression occupée par un lac à la surface du Glacier sud de l'Annapurna. Un réseau de galeries (BGA 5) s'ouvre dans la paroi de la dépression.

Cliché M. Duchêne.

*Lake-filled depression at the surface of the Southern Annapurna Glacier. A cave network (BGA 5) opens in the wall of the depression.*

au débouché d'une ancienne  
prévision du glacier.  
Actuellement, la surface du  
glacier est située 50 m plus bas  
que le lac. Cliché M. Duchêne.

Photo 6 : Pénitents de glace sur l'Imja glacier. Cliché M. Duchêne.

*Ice penitents on Imja glacier.*



profondeur est inconnue sauf lors des phases de vidange. On a pu ainsi estimer la profondeur de certains lacs à plusieurs dizaines de mètres. Des observations montrent qu'ils peuvent se vidanger très rapidement. Sur le Glacier sud de l'Annapurna, ces lacs à vidange rapide sont toujours associés à des cavités intraglacières dans lesquelles on observe les indices de ces chasses d'eau.

- Comme sur les glaciers alpins ou dans les régions polaires, l'eau de fusion superficielle forme des *bédières* qui peuvent se transformer ici en véritables petits canyons de 10 à 25 m de profondeur (photo 2). Certaines se perdent dans des grottes, mais nous n'avons pas, jusqu'à maintenant, observé de moulins, ces pertes verticales actives à la surface des glaciers.

- Les petits systèmes pertes-résurgences et les grottes sub-horizontales inactives sont fréquents. Ce sont des cavités de faible développement, localisées juste sous la surface du glacier. Elles sont à évolution rapide et peuvent disparaître d'une année à l'autre en fonction de l'évolution de la topographie.

- Les dépressions superficielles, en forme de vastes entonnoirs (jusqu'à plusieurs hectares et 100 m de profondeur), sont souvent remplies de blocs; elles présentent une partie verticale qui fait face la plupart du temps à l'amont du glacier. Une ou plusieurs entrées étagées de grottes s'ouvrent fréquemment dans la partie verticale de la dépression. Des lacs temporaires de niveau variable peuvent occuper ces dépressions (photo 5). Ils sont alimentés par la fonte des abords de la dépression, mais aussi par de probables remontées d'aquifères piégés dans les glaciers. Ces lacs se vidangent dans les grotte-pertes situées au fond des dépressions. Des effondrements internes des glaciers peuvent aussi être à l'origine de certaines dépressions.

- Les pénitents de glace et les tables glaciaires sont les formes d'ablation les plus spectaculaires. Sur les glaciers du secteur de l'Everest, on peut observer des pénitents plurimétriques liés à la sublimation [Lliboutry, 1954] (photo 6) et des tables glaciaires (photo 7) mesurant 2,5 m de hauteur et supportant des blocs de 10 tonnes. La hauteur de ces socles, par nature instables, montre la fusion rapide de la surface des glaciers himalayens.

## B. Les cavités intraglacières et les phénomènes sous-glaciaires

Les phénomènes intraglacières sont de plusieurs types: tubes, puits, grottes, pertes, résurgences.

- Les grands tubes inclinés, jusqu'à 30 m de diamètre, constituent les cavités les plus remarquables. Ils rappellent les conduits « vauclusiens » des réseaux karstiques et pénètrent profondément dans les glaciers.

- Les puits verticaux inactifs, sondés jusqu'à 40 m, s'ouvrent à la surface des glaciers au fond de petites cuvettes semblables à des dolines à bords très pentus. Leurs abords sont très instables (débris rocheux non stabilisés) et rendent leur exploration problématique. Les moins profonds correspondent à des effondrements de voûte de galeries, les autres peuvent être d'anciennes pertes (moulins inactifs). Ces puits ne sont pas associés actuellement à des bédières.

- Les grottes horizontales, souvent étagées, s'ouvrent au fond ou en paroi des dépres-

sions. Les étages sont reliés par des puits (5 à 30 m) ou des rampes à forte pente. Les morphologies des parties internes de ces cavités sont essentiellement des méandres et des laminoirs.

Les phénomènes sous-glaciaires sont peu accessibles. On observe des pertes de contact entre le substrat rocheux et le glacier, mais elles n'ont pas encore été explorées. Comme dans les Alpes, les résurgences proglaciaires sont peu pénétrables. Nous en avons observé une, pénétrable sur une faible distance, à 5 100 m d'altitude sur le glacier du Shya Gang au nord de l'Annapurna. Les grandes résurgences proglaciaires situées plus bas, entre 3 800 et 4 800 m d'altitude, présentent des porches a priori pénétrables, mais très instables. A haute altitude, les grottes de décollement sur rupture de pente n'ont pas été explorées à cause des difficultés d'accès et des risques de chutes de séracs.

Les morphologies observées dans ces cavités glaciaires sont très semblables à celles des cavités karstiques : galeries en trous de serrure et en méandres avec banquettes, conduites forcées horizontales parfois étagées ou à forte pente (photo 8). La plupart des cavités sont creusées sur des fractures de la glace, souvent peu visibles. La majorité des conduits se développent perpendiculairement au sens d'écoulement des glaciers. Les vagues d'érosion (coups de gouge), de dimensions très variables (15 à 300 cm), ont été observées dans la plupart des grottes supraglaciaires, notamment près des entrées (photo 9). Les plus grandes connues sont localisées dans Baraph Guphaa Annapurna 1 (BGA1) entre l'entrée et -65 m, mais elles sont absentes de la salle terminale à -95 m. Ces modelés, comme dans les tunnels présents dans les



Photo 7 : Socle de glace montrant l'ablation différentielle d'une zone exposée au rayonnement solaire par rapport à celle qui est protégée par le bloc. Le socle mesure 2,5 m de hauteur. Le bloc pèse plus de 10 tonnes. Il est incliné vers le sud (Lhotse Sar glacier). Cliché M. Duchêne. Glacier table showing the different solar ablation between exposed and covered sections of the glacier. The socle is 2.5 m high, the block weighs more than 20 tons and is inclined to the South (Lhotse Sar Glacier).

cônes d'avalanches, semblent liés à la circulation de l'air et non à l'eau. L'évolution rapide de ce type de cavités leur attribue un caractère impermanent. Si les grottes qui pénètrent profondément dans les glaciers durent plusieurs années, en revanche celles qui se développent près de la surface ont un caractère éphémère. Ainsi, sur le glacier du Khumbu, une grotte présentant une entrée de 8 m x 5 m en 2008 a pratiquement disparu en 2009.

### C. Les spéléothèmes de glace

Les formations de glace de regel de type spéléothèmes ont été observées aussi bien dans les porches d'entrées que dans les conduits situés plus en profondeur. Les coulées et des stalactites de glace de regel, situées près des entrées, sont liées aux



Photo 8 : Galerie se dédoublant en 2 étages qui peuvent être actifs en même temps (Imja glacier). Cliché M. Duchêne. Passage that doubles into two levels that can be active at the same time (Imja Glacier).



Photo 9 : Grands coups de gouge à l'entrée de BGA 5. Cliché M. Duchêne. Large scallpos at the entrance of BGA 5.

Photo 10 : Différence fusion (glace chargée) / sublimation (glace propre) sur l'Imja glacier.  
Cliché M. Duchêne.  
Difference between melting (covered ice) and sublimation (clean ice) on Imja Glacier.



Photo 11 : Témoins de planchers de glace dans BGA 3 (glacier sud de l'Annapurna). Les épaisseurs varient de 3 à 10 cm.  
Cliché M. Duchêne. Proof of ice covers in BGA 3 (Southern Annapurna Glacier).  
The thickness varies between 3 and 10 cm.



variations de températures journalières ou saisonnières. Parmi celles-ci, de grandes coulées de glace « noire » (photo 10) indiquent la fusion préférentielle des zones glacées recouvertes de dépôts détritiques fins qui absorbent davantage le rayonnement solaire. Généralement, ces coulées noires ont des volumes très supérieurs aux coulées de glace pure.

- Les spéléothèmes situés plus en profondeur ont un caractère plus pérenne, au moins saisonnier : stalactites, piliers et dômes de glace de regel.
- Les planchers gelés ou restes de planchers de lacs intra-glaciaires subsistent sur les parois des galeries (photo 11). Les épaisseurs varient de quelques cm à 15-20 cm, voire 50 cm dans BGA 1.
- Les fleurs de glace, résultant de la sublimation de la glace, sont très semblables à des bouquets d'aragonite. On en a observé dans plusieurs cavités notamment à -50 dans une partie située à l'abri du courant d'air aspiré dans BGA 6.
- On observe aussi des agglomérations de cristaux de glace opaque le long des parois sous les restes de planchers glacés et sur les sols lorsque les cavités sont à nouveau pénétrables après une phase d'enneigement. S'ils se forment sous des planchers glacés, cela impliquerait des épisodes de surfusion locale de l'eau.

#### D. Les dépôts sédimentaires et les contaminations éoliennes

Les sédiments détritiques observés dans les grottes glaciaires sont constitués de sables très fins et de cailloutis de formes irrégulières. Ils sont localisés sur le plancher de galeries à écoulement temporaire, sur des banquettes ou dans des galeries se développant au-dessus de ces niveaux semi-actifs. Des séquences alternées de petits cailloutis et de sables fins sont parfois prises dans la glace (photos 12, 13 et 14). On n'a jamais observé de galets.

En octobre 2009, on a repéré un dépôt limoneux brun-gris dans les dépressions et dans les cavités du Glacier sud de l'Annapurna. On ne l'avait pas observé depuis les premières incursions sur ce glacier en novembre 2007. Le dépôt s'est rapidement atténué en surface mais était encore présent en profondeur en décembre 2009. Il pourrait être d'origine éolienne. Des particules fines arrachées aux moraines par le vent peuvent en effet se déposer dans les lacs qui se forment temporairement au-dessus des cavités, puis transiter en profondeur lors des phases de vidange. Des examens microscopiques d'échantillons de ce limon et de dépôts fins prélevés dans la moraine avoisinante montrent la présence de sables fins et de poussières minérales provenant essentiellement du contexte rocheux environnant. Il n'y a pas de matière organique dans les échantillons prélevés (examen microscopique : Richard Maire, Ades/Cnrs, Université Bordeaux III). Un rapprochement peut être fait avec la présence de poches de sédiments d'aspect similaire situées dans la masse glaciaire. De formes



Photo 14 : Couches de glace plissées bien marquées par les dépôts dus à des dépôts éoliens ou de la pollution atmosphérique (Lhotse Sar glacier). Les dimensions du porche sont de 15 x 8 m. Cliché M. Duchêne. *Folded ice layers easily visible due to either eolian deposits or atmospheric pollution (Lhotse Sar Glacier). The entrance dimension is 15x8 m.*



Photo 13 : Séquence de sédimentation alternée glace – graviers – glace – sable observée dans une grotte temporairement active du Lhotse Sar glacier. Cliché M. Duchêne. *Sedimentary sequence alternating between ice-pebbles - ice - sand, observed in a temporarily active cave of the Lhotse Sar Glacier.*

Photo 12 : Dépôts de cailloutis sur des banquettes dans une grotte du Lhotse Sar glacier. Cliché M. Duchêne. *Deposition of gravel on the bords of a cave in the Lhotse Sar Glacier.*



variables, ces poches mesurent 1 à 3 m de large pour 10 à 50 cm d'épaisseur. Elles prennent parfois la physionomie de petites galeries-méandres colmatées de sédiments et recoupées par de nouvelles galeries dans la glace; comme des « paléo-galeries » colmatées par des sédiments et recoupées par des conduits plus récents du glacier. On les observe entre 2 et 40 m de profondeur.

Les couches de glace, liées à la diagenèse des couches de neige annuelle, sont parfois bien marquées par des alternances rythmées et d'ampleur plus ou moins régulières de glace propre et de glace plus foncée avec de fins lits de graviers et cailloutis centimétriques. Ces couches sombres concentrent des poussières atmosphériques (photo 14). En raison de l'écoulement et des confluences glaciaires, ces couches de glace sont généralement très relevées, pratiquement verticales dans certaines cavités; ailleurs on observe de véritables plis.

Certaines couches de glace presque noire seraient un indicateur de

la pollution atmosphérique causée par les « nuages bruns » (*brown clouds*), véritables cocktails de particules de suie, de cendres, de nitrates, de sulfates, provenant des zones urbaines et industrielles du nord de l'Inde et du sud du Népal [Ramanathan et al., 2007; Pilewskie, 2007]. D'après V. Ramanathan, c'est la

combinaison des gaz à effet de serre et des nuages bruns qui serait à l'origine de la fonte accélérée des glaciers himalayens car le seul impact des gaz à effet de serre ne peut pas l'expliquer totalement. Les particules de suie contenues dans les nuages bruns pourraient contribuer à 50 % de la fonte des glaciers himalayens en diminuant l'albédo de leur surface. Cela conduit à une plus grande absorption du rayonnement solaire et donc à une augmentation de la température superficielle du glacier.



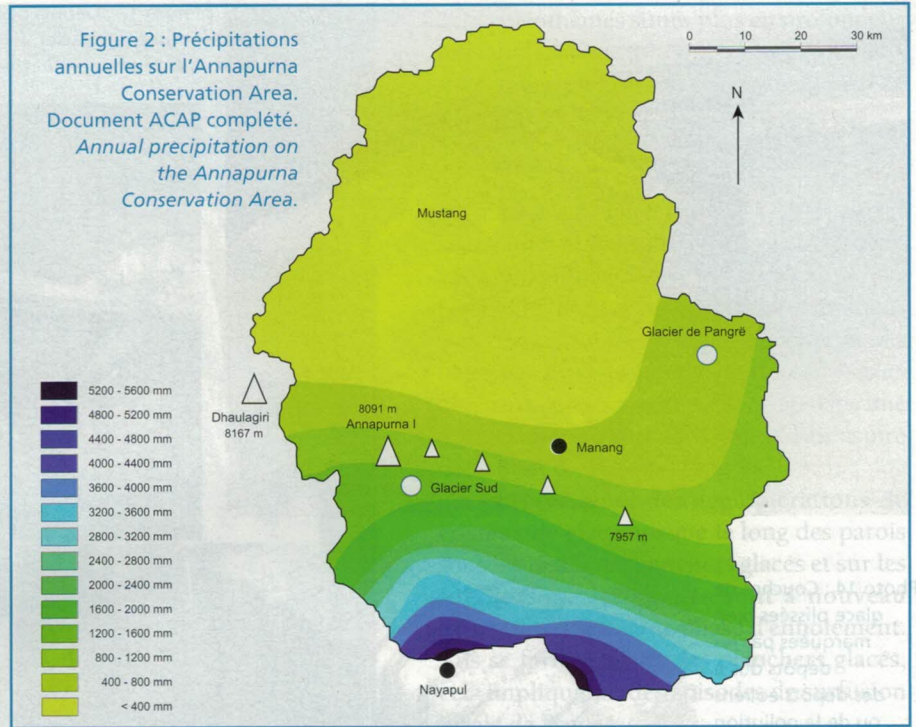
Photo 15 : Dépôt de sable fin (ripple mark) dans une grotte du Lhotse Sar glacier. Cliché M. Duchêne. *Ripple marks in a cave of Lhotse Sar Glacier.*

### III. Les réseaux intraglaciers du Glacier sud de l'Annapurna

#### A. Localisation et cadre physique

Le massif des Annapurnas, situé en zone intertropicale (28,6° N) sur la haute chaîne de l'Himalaya, constitue une barrière infranchissable entre les vallées du sud et du nord. Ses versants sud très abrupts s'élèvent de 7 000 m sur une distance de 75 km seulement.

Le Glacier sud de l'Annapurna est situé sur le versant sud de la chaîne au cœur de l'Annapurna Conservation Area (1). C'est un glacier noir constitué d'une langue glaciaire de 6 km de long pour 400 à 800 m de large entre 3 800 m et 4 300 m d'altitude. Cette langue constitue la zone d'ablation d'un important édifice glaciaire dont la zone d'accumulation est constituée par cinq glaciers de pente issus d'un vaste cirque de montagnes de 7,5 sur 4 km qui culmine à 8 091 m. La langue glaciaire est orientée NW-SE dans sa partie amont et s'infléchit vers l'est dans sa partie aval. Jusqu'à la fin des années 1950, le glacier mesurait plus de 8 km de longueur. En 2009, trois glaciers de pente sont déconnectés de la langue glaciaire, mais ils l'alimentent épisodiquement en glace par l'écroulement des séracs de leurs fronts glaciaires. Seuls les glaciers situés entre le Khangsar Kang (7 480 m) et le Singuchuli (6 500 m) d'une part et entre l'Annapurna I (8 091 m) et le Baraha Shikhar (7 647 m) d'autre part sont encore raccordés par de minces barres de séracs amenées à disparaître dans



quelques années. En octobre 2002, la barre de séracs qui tombait du cirque glaciaire du Baraha Shikhar mesurait 370 m de large (image Google Earth). En décembre 2009, elle mesurait moins de 50 m de large pour 10 m de hauteur seulement.

Le Glacier sud repose sur un substrat de schistes et de quartzites (Cambrien probable) visible dans des verrous délaissés par la glace dans sa partie supérieure. En amont, les cirques glaciaires sont façonnés dans l'Ordovicien qui comporte également des quartzites, mais aussi des calcaires

et des grès qu'on retrouve parmi les blocs qui recouvrent le Glacier sud.

La situation du glacier sur le versant sud de la chaîne l'expose aux précipitations orageuses de printemps et à la mousson estivale, facteurs favorables à son alimentation. Toutefois, le gradient des précipitations annuelles varie considérablement du sud au nord dans le secteur des Annapurnas. A Nayapul, à 1 040 m d'altitude au débouché de la rivière Modi Khola issue du Glacier sud, elles sont de 5 500 mm/an. Mais 30 km au nord, sur le glacier, elles ne sont plus que de 1 500 mm/an sous forme de neige.

Figure 3 : Situation (décembre 2009) des cavités glaciaires explorées sur le glacier sud de l'Annapurna (sans numéro : cavités repérées non explorées). ABC = Annapurna Base Camp (refuge). Fond photographique Google Earth 10/2002.  
December 2009 situation of the glacial caves explored on the Southern Annapurna Glacier (without numbers: found caves that were not explored).  
ABC = Annapurna Base Camp (hut). Figure based on Google Earth 10/2002.



(1) : L'Annapurna Conservation Area (ACA), créée en 1992, est la plus grande zone protégée du Népal (7630 km<sup>2</sup>). L'ACA est limitée au nord par le désert montagneux aride du Mustang qui constitue la frontière avec le Tibet (Chine), à l'ouest par la rivière Kali Gandaki, à l'est par Marsyandi Valley et au sud par des vallées et des collines au nord de Pokhara. Elle englobe la chaîne des Annapurnas. Les objectifs de l'ACA sont la conservation des ressources naturelles au bénéfice des générations actuelles et futures, le développement durable économique et social, le développement d'un tourisme avec un minimum d'incidence environnementale. <http://www.dnpwc.gov.np/conservation-annapurna.asp>



Lorsque l'on franchit la barrière des Annapurnas, elles tombent rapidement au-dessous de 400 mm/an (figure 2).

Les températures diurnes, au niveau du glacier, peuvent être très élevées : plus de 30°C au printemps avec une différence importante entre les zones ensoleillées et celles qui sont à l'ombre. Les températures nocturnes sont toujours négatives, mais ne s'abaissent vraiment que pendant le court hiver tropical, de décembre à février.

### B. Les cavités

Les explorations ont été réalisées de novembre 2007 à novembre 2010 à partir du camp de base sud (ABC) de l'Annapurna (refuge) et d'un campement situé 2 heures en amont sur l'autre rive du glacier. Quatre jours de marche d'approche préalables sont nécessaires pour arriver sur le site. Ce glacier est toutefois le plus facilement accessible et le plus bas en altitude des sites glaciaires visités. Mille mètres de conduits intra-glaciaires ont été explorés dans neuf cavités (figure 3). Toutes les grottes se développent entièrement dans la glace et ont un caractère impermanent. Elles évoluent rapidement par la disparition d'une partie de leurs galeries en raison de la fonte du glacier, mais aussi par des déformations dues aux mouvements du glacier. Ces déformations peuvent être spectaculaires puisque des galeries de 5 m de large explorées en décembre 2009 étaient impénétrables en octobre 2010.

Les principales cavités explorées ou repérées (tableau 1) débutent par un vaste porche dans des dépressions ; un lac supra-glaciaire est toujours proche ou a momentanément recouvert l'entrée de 2007 à 2009 (BGA 1, 7, 10 et 11). Les entrées s'ouvrent toutes dans la paroi aval des dépressions, dans

Nom	Altitude (m)	Type de cavité	L (m)	P (m)	Date
BGA 1	4 040	Tube incliné + partie horizontale	235	95	09/2008
BGA 2	4 102	Porche - entonnoir au fond d'une vaste dépression	-	35	09/2008
BGA 3	4 205	Puits porche + tube incliné	82	60	12/2009
BGA 4	4 200	Perte de lac supra-glaciaire	-	32	05/2008
BGA 5	4 195	Galeries horizontales étagées	268	37	12/2009
BGA 6	4 200	Puits porche + méandre horizontal	180	55	12/2009
BGA 7	4 220	Puits porche + tube incliné + actif	130	54	12/2009
BGA 8	4 185	Tube incliné	12	10	12/2009
BGA 9	4 197	Puits porche + tube incliné	35	26	12/2009
BGA 10	4 120	Puits porche	Non exploré	45 (sondé)	12/2009
BGA 11	4 185	Porche + galerie horizontale + perte	Non exploré		12/2009

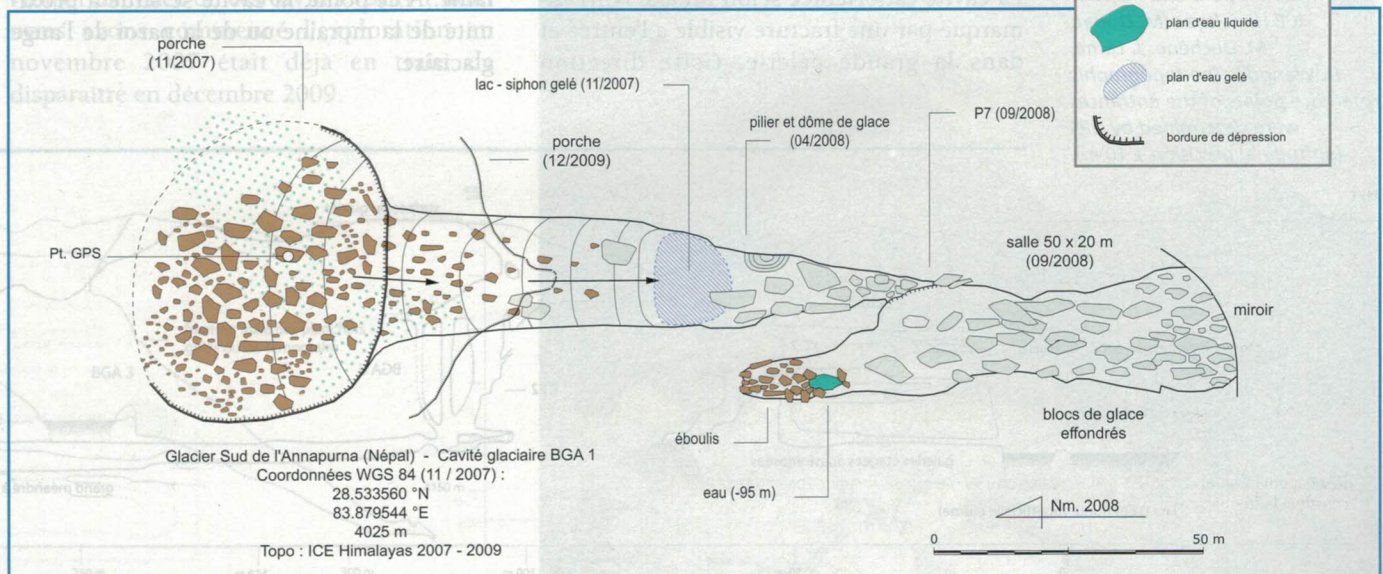
Tableau 1 : Cavités glaciaires explorées sur de Glacier sud de l'Annapurna. Altitude (m) : altitude de la surface du glacier à l'aplomb de l'entrée de la cavité. L (m) : longueur totale des conduits dans la glace. P (m) : profondeur maxi sous la surface du glacier au niveau de l'entrée. Cette définition est plus représentative que la profondeur « spéléo ».

Glacial caves explored on the Southern Annapurna Glacier. Altitude (m): altitude of the glacier surface vertically above the cave entrance. L (m): total length of tubes in the ice. P (m): Maximal depth below the glacier surface at the entrance level. This definition is more representative than the "speleological" depth.

le sens d'écoulement du glacier. On peut distinguer trois types de cavités :

- des tubes inclinés, avec ou sans puits à l'entrée, pouvant être parcourus par un ruisseau temporaire (BGA 1, 3 et 7) ;
- des puits-porches suivis par des galeries ou méandres horizontaux. Les puits peuvent être parallèles dans un même axe. Ils résultent de l'approfondissement d'un méandre horizontal initial bien visible sous la surface du glacier. On peut les assimiler à des moulins (BGA 6 et 10) ;
- des galeries horizontales étagées reliées par des puits ou des rampes (BGA 5).

Figure 4 : Plan de Baraph Guphaa Annapura 1. Map of Baraph Guphaa Annapura 1.



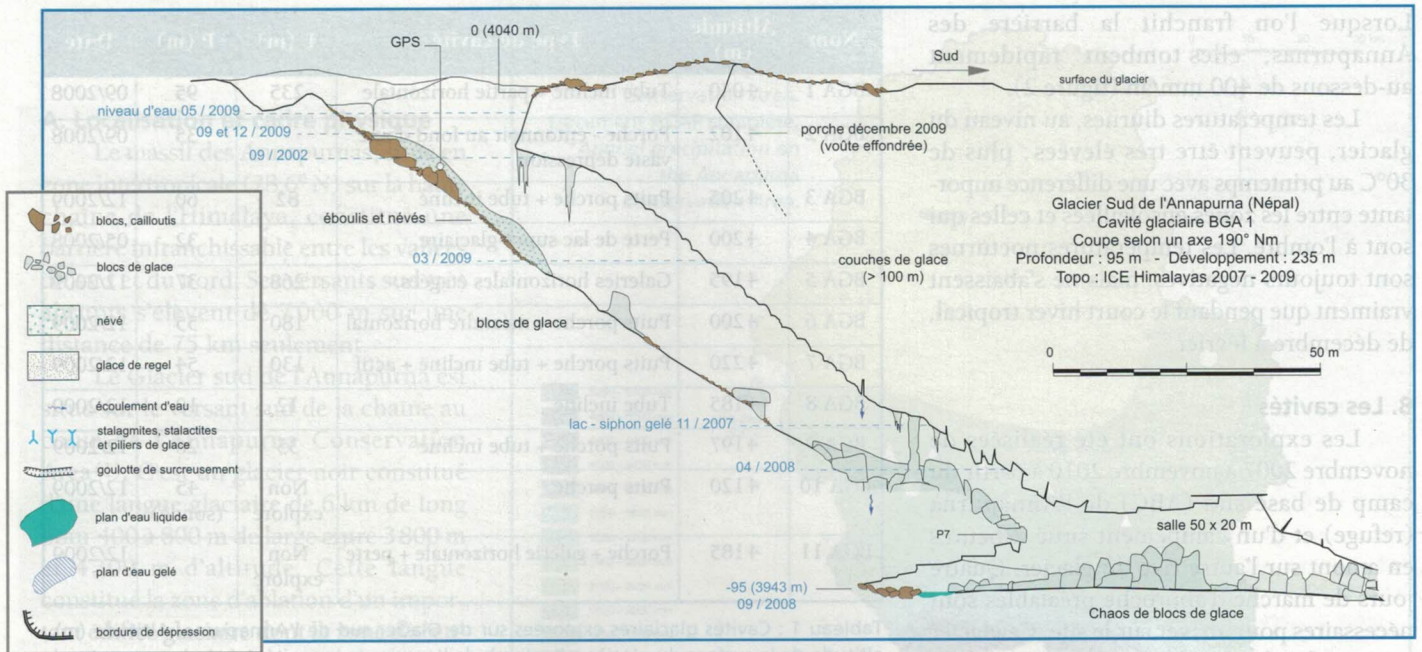


Figure 5 : Coupe de Baroph Guphaa Annapurna 1. Le lettrage bleu date les différents niveaux d'eau observés dans la cavité au cours des explorations. Longitudinal section of Baroph Guphaa Annapurna 1. The blue letters date the different water levels that were observed during the explorations.

Figure 6 : Coupe schématique du système glacio-karstique médian du glacier sud de l'Annapurna (12/2009) d'après explorations et topographies ICE Himalayas décembre 2009 (M. Douat, M. Duchêne, J. Lama, D. Wangdi). Les points de référence topographiques des entrées ont été déterminés au GPS (précision en altitude +/- 10 m). Schematic section through the middle glaciokarstic system of the Southern Annapurna Glacier (12.2009), from explorations and maps of ICE Himalayas (M. Douat, M. Duchêne, J. Lama, D. Wangdi). The topographic reference points of the entrances were determined by GPS (altitudinal precision ± 10 m).

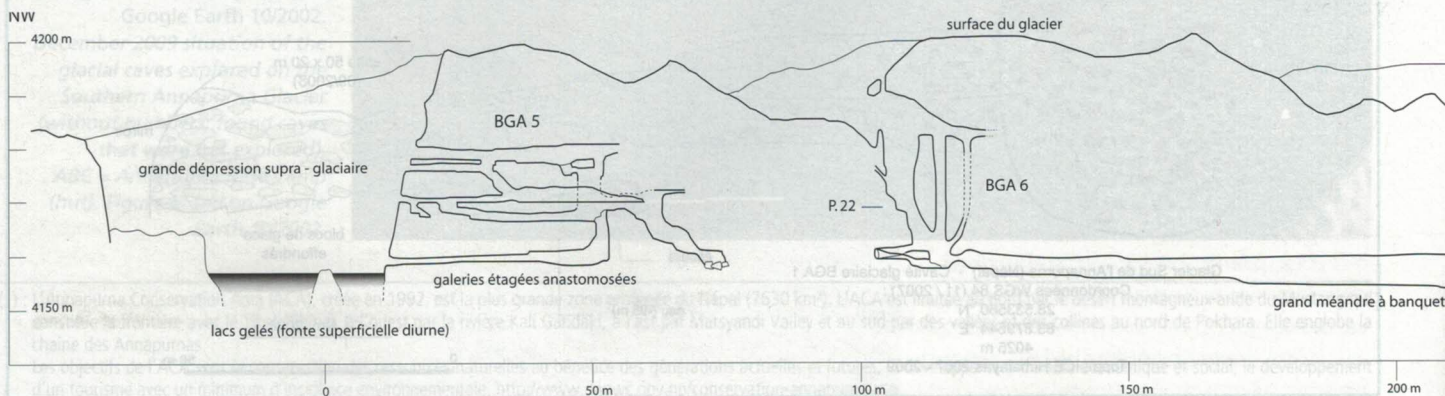
La position des entrées varie dans le temps car non seulement la glace flue vers l'aval, mais en plus les parois des dépressions fondent rapidement faisant peu à peu disparaître tout ou partie de certains conduits (BGA 1, 2, 4 et 5). La position des cavités, relevée au GPS, n'est donc vraie qu'au moment du positionnement. Cela est également valable pour les topographies des cavités que nous avons toutefois effectuées avec précision afin de mieux appréhender leur morphologie et leur physionomie.

1) Baroph Guphaa Annapurna 1 (BGA 1)

Baroph Guphaa Annapurna est le nom en népalî qui signifie la grotte de Glace de l'Annapurna. C'est actuellement la plus vaste cavité glaciaire explorée lors de nos reconnaissances. Elle est située à 4040 m d'altitude dans la partie médiane du Glacier sud de l'Annapurna, ce qui en fait une des plus basses. La cavité est orientée selon un axe Nm190° marqué par une fracture visible à l'entrée et dans la grande galerie. Cette direction

de cisaillement est perpendiculaire à l'axe longitudinal du glacier et la cavité se dirige vers la moraine latérale de la rive droite (figures 4 et 5).

Son vaste porche d'entrée, de 30 m de large et 25 m de haut, marque le début d'une grande galerie longue de 120 m et inclinée à 30-35° (photo 16). Elle conserve les mêmes proportions que le porche sur 80 m puis se rétrécit jusqu'à 8 m x 15 m vers -70 m. Au-delà, commence une zone intermédiaire de dimensions plus modestes encombrée de blocs de glace, de restes de planchers glacés et saisonnièrement de grandes concrétions de glace. Un puits de 7 m conduit ensuite dans une vaste salle à peu près plate de 50 m de long sur 20 m de large. Celle-ci est encombrée de blocs de glace et un petit plan d'eau occupe le point bas à -95 m. L'extrémité sud de la salle est fermée par un miroir de glace semblable à un miroir de faille. A ce point, la cavité se situe à proximité de la moraine ou de la paroi de l'auge glaciaire.



Dans le grand tube incliné, jusqu'à -70 m, les sections transversales sont équilibrées. Les parois et les voûtes sont tapissées de grandes « vagues d'érosion », les plus grandes mesurant 3 m de long et 1 m de large (photos 9 et 16). Si on pouvait établir une analogie morphologique et hydrodynamique avec celles des cavités karstiques, on en déduirait un double sens d'écoulement. Toutefois, leur formation ne serait pas due à l'eau mais aux mouvements d'air dans les galeries, mouvements de convection entre les parties basses et hautes des galeries ou véritables courants d'air [Eraso et Pulina, 1994].

Aucune mesure de température n'a été faite dans cette partie, mais de l'eau tombait des voûtes en novembre 2007, alors que tout était figé en grandes stalactites et piliers de glace en avril 2008.

La partie la plus profonde de la cavité, du passage vers le puits de 7 m à la salle terminale, montre des phénomènes de contrainte caractéristiques en relation avec les mouvements et la pression interne du glacier (photo 17). Toutes les parois, le plafond de la salle et les abords du puits sont constitués de grandes écailles de décompression aux bords tranchants. D'autres tapissent le sol et attestent l'instabilité des lieux et leur caractère temporaire et changeant. Il n'y a pas d'indice de fusion de la glace dans cette partie, en dehors du petit plan d'eau présent au point bas. Il n'a pas été possible de savoir s'il provient d'un écoulement venu de l'amont ou de la remontée de l'aquifère. A aucun endroit, le substratum rocheux n'a été atteint.

Depuis le printemps 2009, un lac occupe l'entrée de la cavité qui est désormais intégralement noyée. En outre, la première partie de la voûte s'est effondrée sur une trentaine de mètres confirmant l'impermanence de ces cavités: BGA 1 dont nous avons commencé l'exploration en novembre 2007 était déjà en train de disparaître en décembre 2009.

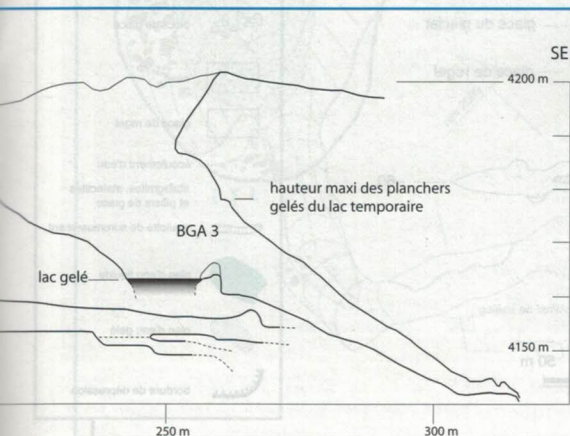


Photo 16 : Le porche d'entrée et la grande galerie de BGA 1. Le minuscule personnage donne l'échelle. Cliché M. Duchêne. *The entrance and the large passage of BGA 1. The small person gives the scale.*

## 2) Le système BGA 3, BGA 5, BGA 6

Ces trois cavités proches, mais non reliées, sont situées 2500 m en amont de BGA 1 vers 4200 m d'altitude (figure 6). Elles développent un total de 500 m de conduits topographiés qui semblent indiquer, en première hypothèse, une relation de ce système de galeries avec les fluctuations d'un aquifère local intraglacière dont la partie visible serait les lacs à l'entrée de BGA 3 et BGA 5.

Photo 17 : La salle terminale de BGA 1 à -95 m avec ses écailles de glace. Cliché M. Duchêne. *Terminal room of BGA1, at -95 m, with ice slabs.*



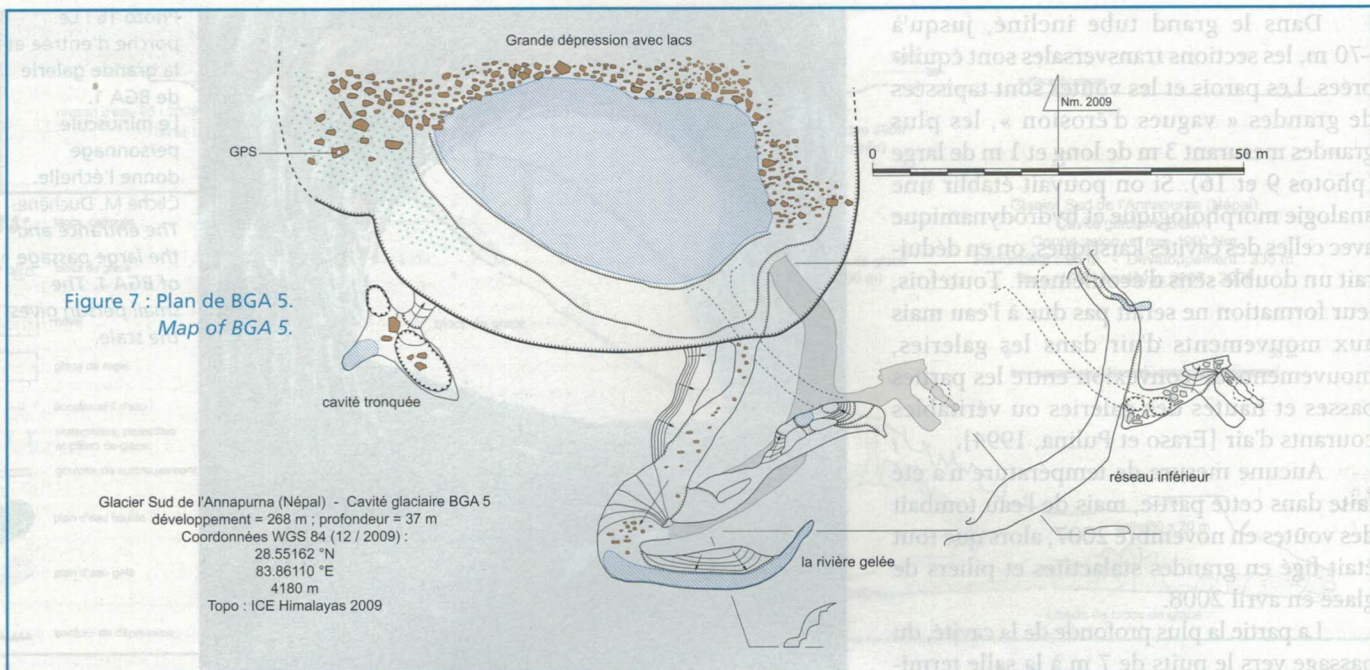


Figure 7 : Plan de BGA 5.  
Map of BGA 5.

Glacier Sud de l'Annapurna (Népal) - Cavité glaciaire BGA 5  
 développement = 268 m ; profondeur = 37 m  
 Coordonnées WGS 84 (12 / 2009) :  
 28.55162 °N  
 83.86110 °E  
 4180 m  
 Topo : ICE Himalayas 2009

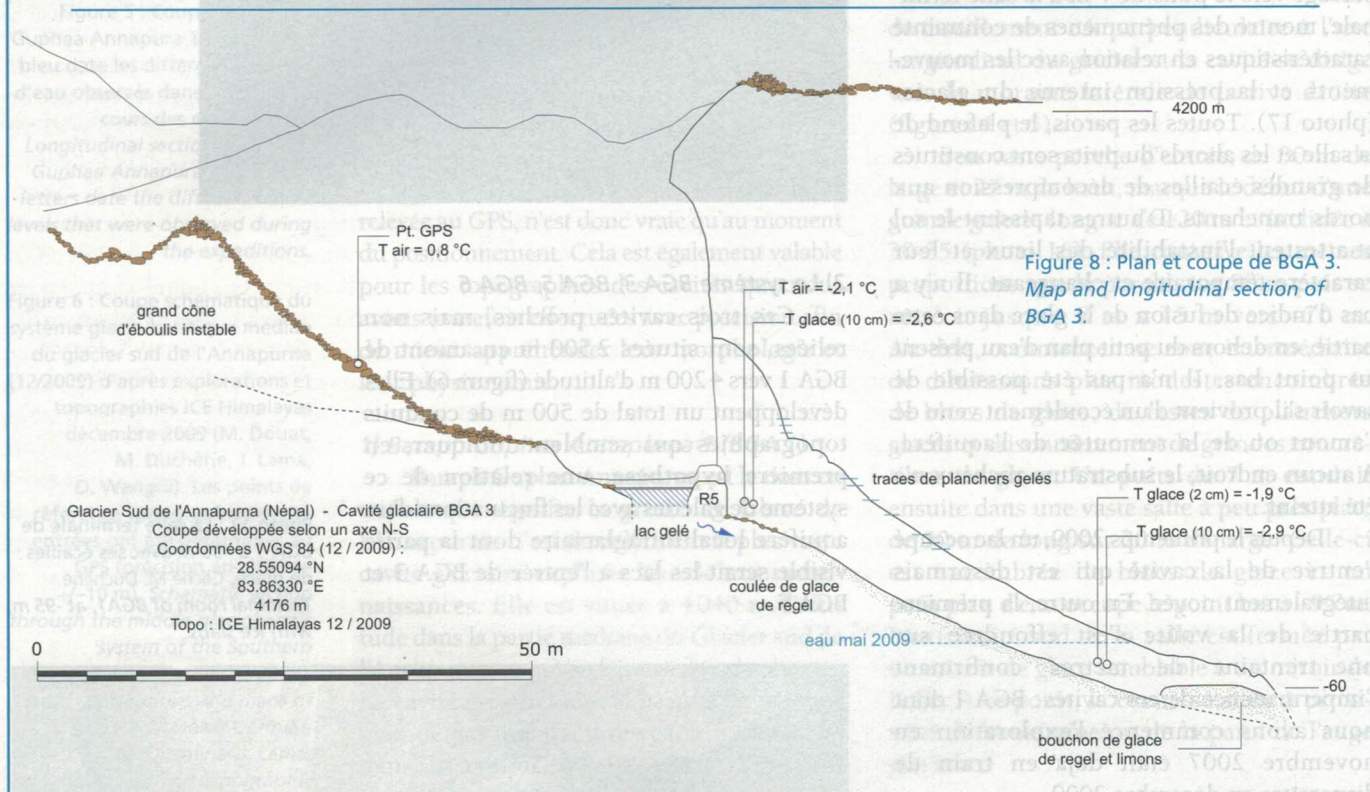
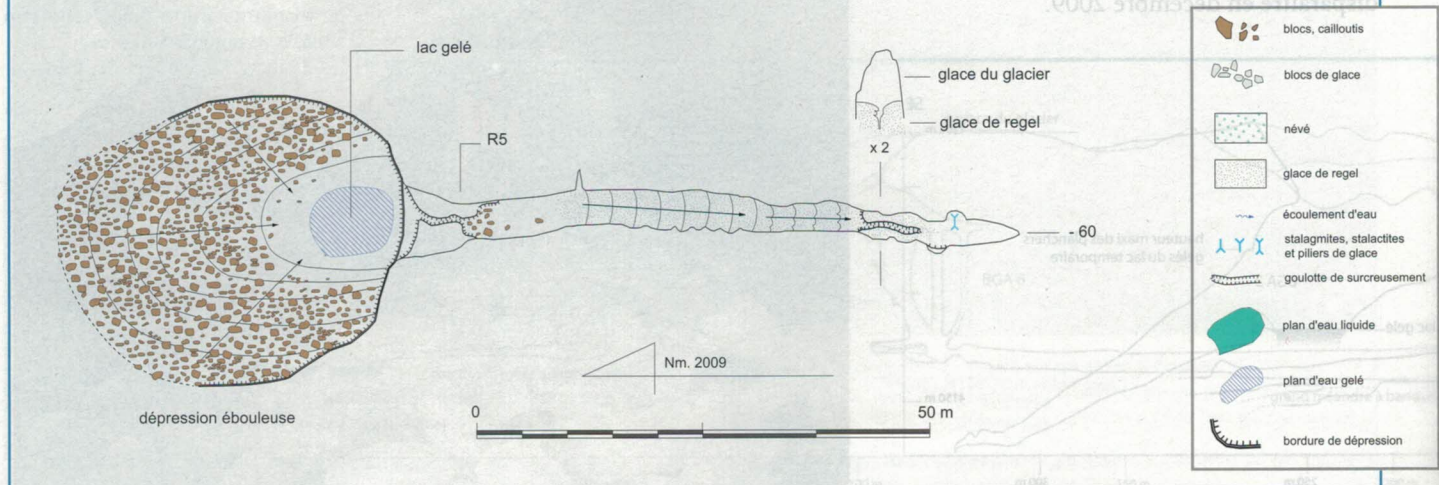


Figure 8 : Plan et coupe de BGA 3.  
Map and longitudinal section of BGA 3.

Glacier Sud de l'Annapurna (Népal) - Cavité glaciaire BGA 3  
 Coupe développée selon un axe N-S  
 Coordonnées WGS 84 (12 / 2009) :  
 28.55094 °N  
 83.86330 °E  
 4176 m  
 Topo : ICE Himalayas 12 / 2009



- blocs, cailloutis
- blocs de glace
- névé
- glace de regel
- écoulement d'eau
- stalagmites, stalactites et piliers de glace
- goulotte de surcreusement
- plan d'eau liquide
- plan d'eau gelé
- bordure de dépression

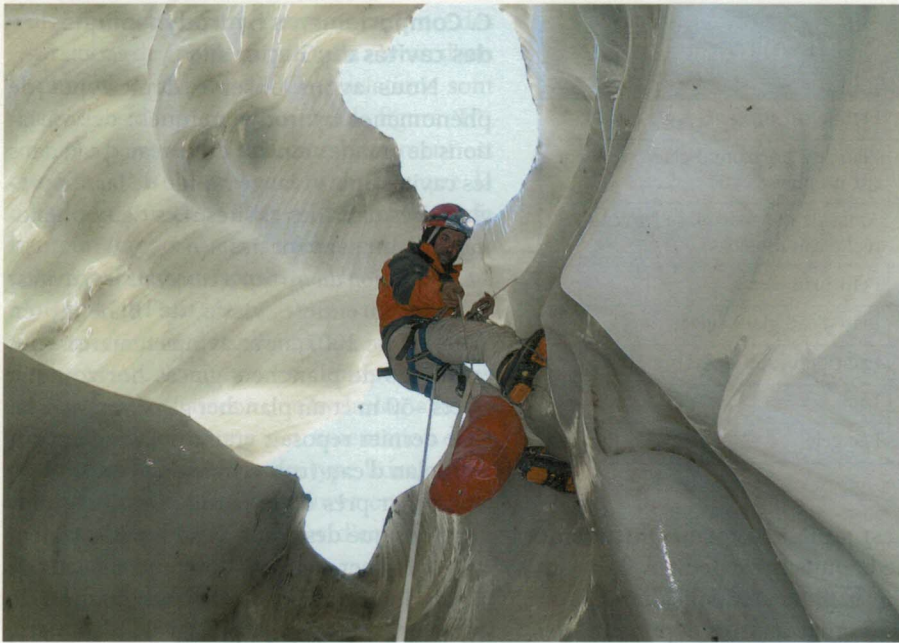


Photo 18 : Descente du puits de 25 m à l'entrée de BGA 6. Cliché M. Douat et M. Duchêne. *Abseiling the 25m shaft at the entrance of BGA 6.*

La grotte BGA 5 (figure 7) est formée par des galeries horizontales étagées et reliées par des petits puits ou des rampes. Les deux étages supérieurs correspondent à des niveaux de fluctua-

tion du lac bien visibles dans la paroi de la dépression où s'ouvrent les 4 entrées.

S'ouvrant un peu en aval, BGA 6 débute par un puits en méandre de 25 m

localisé dans la paroi d'un vaste porche (figure 6 et photo 18). Au-delà, une galerie-méandre horizontale, avec banquettes, a été explorée sur 150 m. Au terminus de l'exploration, le méandre s'agrandit et plonge dans les profondeurs du glacier en même temps qu'un fort courant d'air aspiré. L'altitude de cette galerie-méandre est sensiblement la même que celle des lacs à l'entrée des grottes BGA 3 et BGA 5 (4155 m).

BGA3 est d'un autre type. Après un porche classique, situé dans une dépression occupée par un petit lac gelé, un puits de 5 m conduit dans une galerie inclinée de 60 m de long colmaté par un dépôt de glace et de limons (figure 8). Le long de ce dépôt, une fissure a permis d'entendre un écoulement d'eau proche en liaison probable avec BGA6.

### 3) Les cavités de l'amont du glacier (BGA 7, BGA 8 et BGA 9)

Elles sont de dimensions plus modestes. La grotte BGA 7 (figure 9) est parcourue par un ruisseau qui a surcreusé la galerie inclinée ; celle-ci se termine par un siphon d'eau limpide.

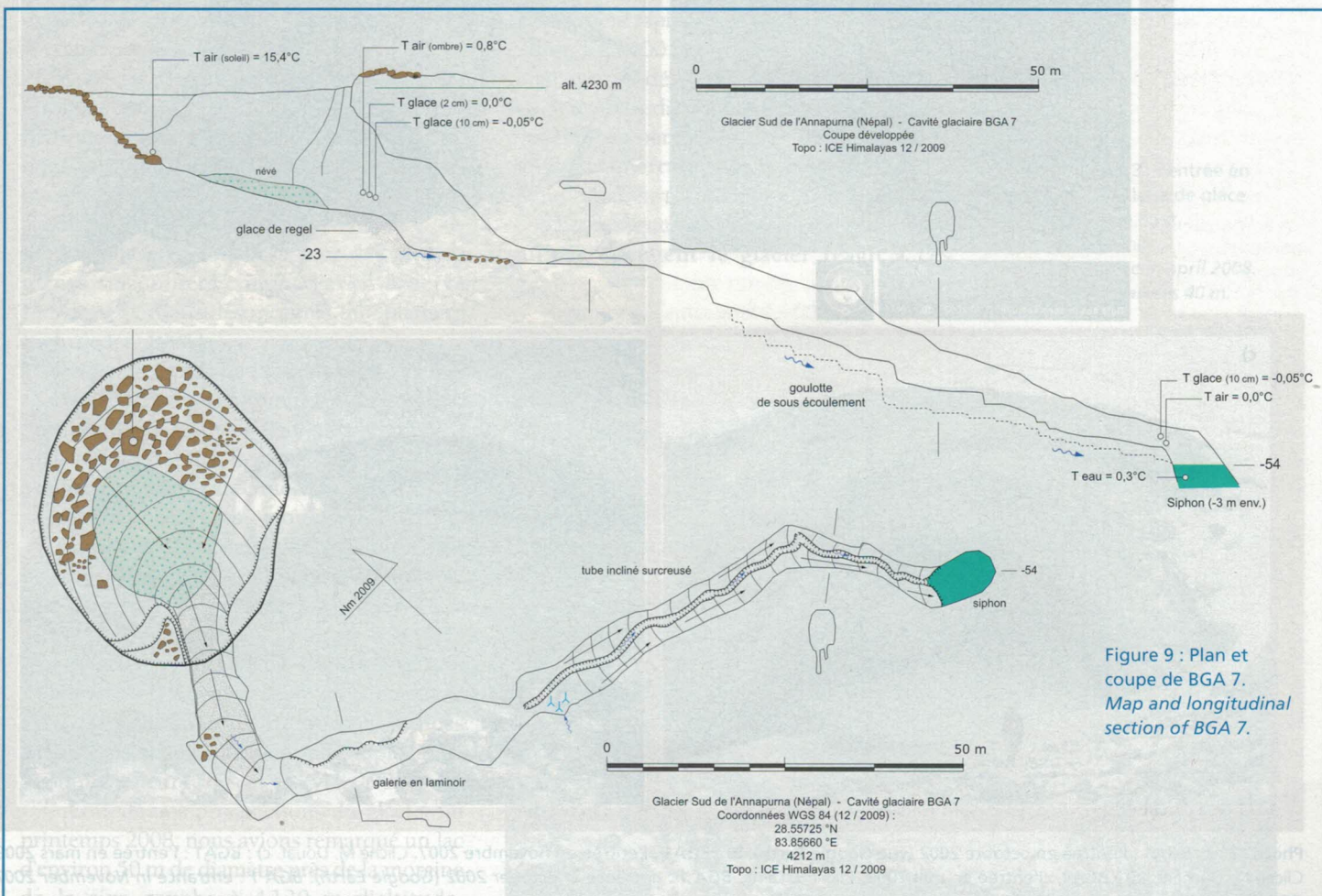


Figure 9 : Plan et coupe de BGA 7. *Map and longitudinal section of BGA 7.*

Date	Niveau d'eau par rapport à la surface du glacier	Observations
Octobre 2002	-10 m	Estimé sur image Google Earth
Novembre 2007	-65 m	Plancher horizontal glacé reposant sur un plan d'eau
Avril 2008	> -73 m	Amas de blocs de glace (niveau réel d'eau plus bas)
Septembre 2008	-95 m	Petit plan d'eau
Mars 2009	-30 m	Plan d'eau glacé (glace fine)
Mai 2009	-10 m	Lac (identique à octobre 2002)
Octobre 2009	-20 m	Lac
Décembre 2009	-20 m	Lac gelé

Tableau 2 : Variations du niveau d'eau dans Baraph Guphaa Annapura 1. Variations of water level in Baraph Guphaa Annapura 1.

Ce siphon est situé à la même altitude de 4175 m que le puits noyé de BGA 9 distant de 400 m. Sur la photo aérienne de 2002, on distingue nettement les trois dépressions où s'ouvrent les entrées, mais à des positions sensiblement différentes. A cette époque, elles étaient occupées par des lacs.

### C. Comportements hydrodynamiques des cavités du Glacier sud

Nous avons observé deux types de phénomènes hydrodynamiques : des variations de grande ampleur du niveau d'eau dans les cavités et la vidange rapide de lacs supra-glaciaires dans des cavités. Les deux phénomènes sont souvent liés.

- La variation du niveau d'eau dans les cavités : dès la première visite de BGA 1, en novembre 2007, nous avons remarqué des témoins de planchers glacés horizontaux vers -50 m et un plancher glacé vers -65 m. Ce dernier reposait vraisemblablement sur un plan d'eau (eau visible dans un trou du plancher près de la paroi). Dès lors, nous savions que des plans d'eau liquide avaient pu se former et geler à différents niveaux de la cavité. En raison de la configuration du glacier, il était déjà peu probable à cette époque que l'eau provienne de la surface. La consultation d'images Google Earth a montré que l'entrée était occupée par un vaste lac en octobre 2002. Des visites



Photo 19 a) : BGA1 : l'entrée en octobre 2002 (vue Google Earth). b) : BGA1 : l'entrée en novembre 2007. Cliché M. Douat. c) : BGA1 : l'entrée en mars 2009. Cliché M. Duchêne. d) : BGA1 : l'entrée en mai 2009. Cliché J. Lama. BGA 1 : entrance in october 2002 (Google Earth). BGA 1 : entrance in November 2007. BGA 1 : entrance in march 2009. BGA 1 : entrance in may 2009.

ultérieures dans cette cavité ont montré des variations de grande ampleur du niveau d'eau (photos 19 a, b, c, d). Ces variations sont reportées dans le tableau 2 et la figure 10.

Nous ignorons si ce comportement est cyclique. Nous savons seulement que la colonne d'eau peut faire au moins 85 m de hauteur. Rapporté aux dimensions de BGA 1, cela représente un volume de 53 000 m<sup>3</sup>. L'origine de l'eau n'est pas liée à une absorption directe dans l'entrée, mais à la remontée d'un aquifère. Afin de mieux comprendre ces remontées d'eau liées à une hydrologie intraglacière originale, une instrumentation de la cavité par des capteurs du type luitrographe serait nécessaire pour mesurer en continu les variations de la hauteur d'eau et de la température.

Un comportement identique a été observé dans BGA 3, une cavité plus modeste, de 60 m de profondeur pour un développement de 82 m située en amont de BGA 1 à 4195 m d'altitude (photo 20). Un grondement d'eau lointain avait été entendu à -60 m en septembre 2008. En mai 2009, une fine couche de glace recouvrait un plan d'eau à -45 m, mais le fond à -60 m était à nouveau accessible en décembre 2009. Dans cette cavité, de nombreux restes de planchers de glace sont visibles sur les parois entre -10 m et le fond. La tendance à la remontée du niveau d'eau dans cette cavité entre septembre 2008 et mai 2009 est cohérente avec celle observée dans BGA 1. Toutefois, l'altitude des niveaux observés ne va pas en faveur de variations d'un aquifère unique, mais plutôt d'aquifères compartimentés, étagés et déformables. Ces variations de niveau ne peuvent pas, pour le moment, être corrélées avec des phénomènes saisonniers comme l'avait observé J. Schroeder dans des moulins du Spitsberg [Schroeder, 1995].

**- La vidange rapide de lacs dans des cavités :**

Le deuxième phénomène hydrologique remarquable est constitué par la vidange, parfois très rapide, des lacs supraglaciers dans des cavités. Grâce à des photos aériennes récentes, nous savons que certaines cavités comme BGA 1 ou BGA 7 se sont retrouvées à un moment donné sous des lacs. Et il est probable que de nombreux lacs peuvent être en relation avec des aquifères du glacier via des cavités. Bien que nous n'ayons jamais observé directement ce type de vidange, de nombreux indices montrent qu'elles peuvent être rapides, ici comme ailleurs [Assier et Evin, 1994].

Lors de nos prospections du glacier au printemps 2008, nous avons remarqué un lac d'environ 50 m de diamètre près de la moraine de la rive gauche à 4 120 m d'altitude.

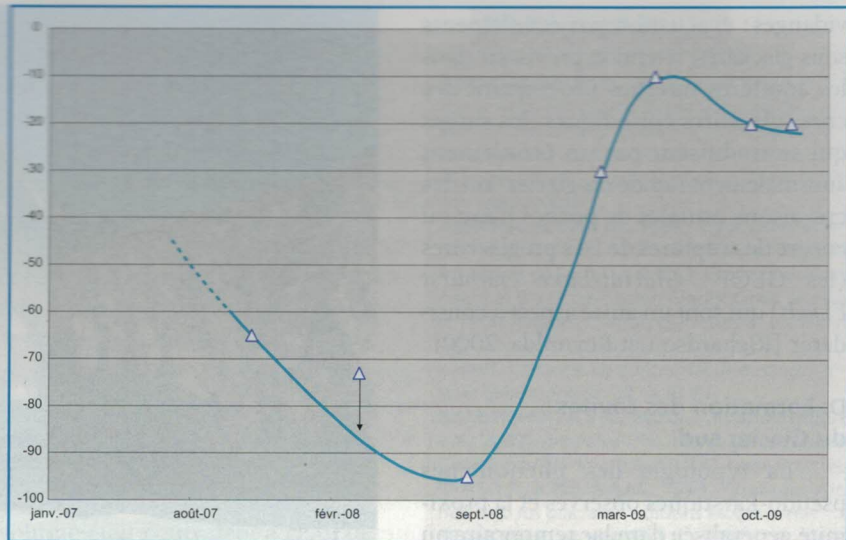


Figure 10 : Variations du niveau d'eau dans BGA 1 sous la surface du glacier. Variations of water level in BGA 1 with respect to the glacier surface.

En octobre 2009, le lac était toujours là, mais en décembre il n'y avait plus qu'une dépression de 20 m de profondeur au fond de laquelle un porche de 3 m de hauteur donnait accès à une vaste galerie-méandre de 25 m de profondeur (BGA 10). Les bords de la dépression étaient semblables à ceux observés pour d'autres cavités, mais constitués de glace vive non recouverte d'éboulis à l'exception de quelques gros blocs en fond de dépression. Coïncés par ces blocs, des empilements de cailloutis et des brins d'herbe suggèrent l'écoulement rapide vers la galerie d'un volume estimé à 15 000 m<sup>3</sup>. Cette observation est à relier avec les dépôts (limons, sables, cailloutis) retrouvés dans plusieurs cavités, sur le plancher ou perchés sur des banquettes. La taille décimétrique de certains éléments indique une forte énergie pour le transport.

En l'absence de mesures en aval, on ne sait pas comment le glacier réagit à ces

Photo 20 : BGA 3 : l'entrée en avril 2008. La falaise de glace mesure 40 m de haut. Cliché M. Duchêne. BGA 3 : entrance in april 2008. The ice cliff measures 40 m.



vidanges: évacuation par écoulements sous-glaciaires, rétention provisoire dans les aquifères internes provoquant des crues glaciaires épisodiques (les surges qui se traduisent par un écoulement anormalement rapide du glacier) ou encore des ruptures de lacs proglaciaires (les GLOF: *Glacial-Lake Outburst Floods*) qui sont un autre aspect à considérer [Richardson et Reynolds, 2000].

#### D. Formation des cavités du Glacier sud

La typologie des phénomènes pseudo-karstiques observés et la proximité généralisée d'un lac temporaire ou de traces de lac autorisent quelques pistes pour expliquer la formation de ces cavités intra-glaciaires:

- des systèmes bédrières-moulins se formant au début du creusement des cavités: c'est peut-être le cas pour la formation de BGA 6, mais cette association n'a jamais été observée ailleurs sur le Glacier sud;
- l'évolution de lacs supra-glaciaires par approfondissement ou capture: l'analogie de BGA 1 avec son lac temporaire à l'entrée et certains lacs permanents bordés d'une amorce de porche sur les glaciers du Khumbu, est frappante (photo 21). Des plongées dans ces lacs pourraient apporter de précieux enseignements;
- l'agrandissement de fissures préexistantes (crevasses) par des remontées d'aquifères intraglaciaires en relation avec des lacs supra-glaciaires. Les battements de niveaux d'eau que nous avons observés dans plusieurs fissures du glacier confortent cette possibilité;
- des creusements en relation avec les variations de niveau d'un lac de dépression qui détermineraient des réseaux étagés de type BGA 5.

#### E. La fonte actuelle du Glacier sud: quels marqueurs dans les cavités explorées ?

L'impact du réchauffement global de la planète est particulièrement important dans l'Himalaya où les températures moyennes augmentent de 0,09 °C/an [Shrestha 2002 et 2004]. Le Glacier sud de l'Annapurna est en forte régression depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG) malgré une exposition favorable aux précipitations neigeuses de printemps et de mousson estivale. Razon [2009] a estimé l'amincissement du

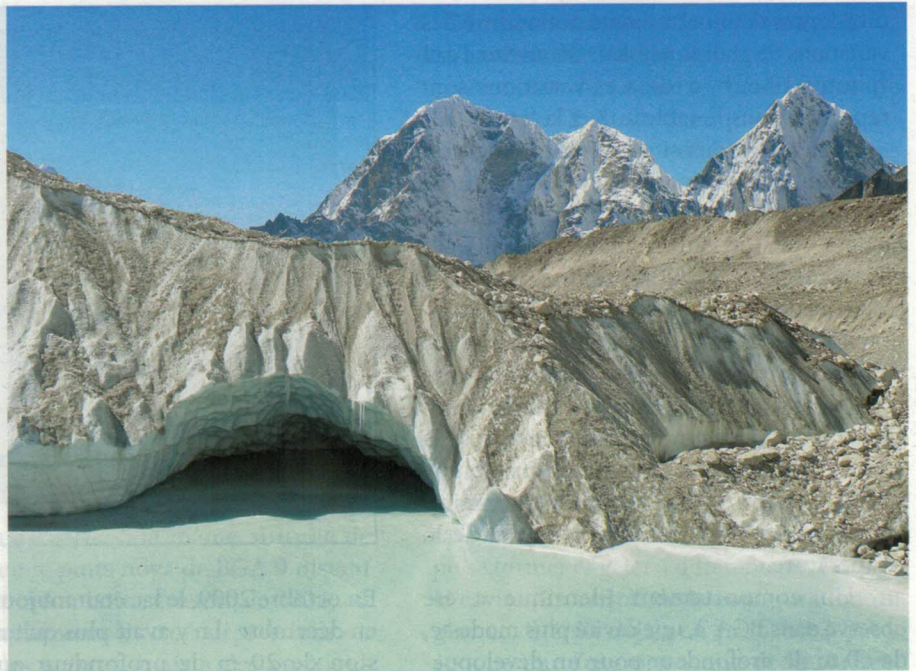


Photo 21 : Ce lac supraglaciaire avec amorce de porche sur le glacier du Khumbu rappelle l'entrée de BGA 1. Cliché M. Duchêne. *This supraglacial lake on Khumbu Glacier with the beginning of an entrance is similar to the entrance of BGA 1*

glacier entre 30 et 180 m de l'aval vers l'amont depuis le maximum du PAG au XVII<sup>ème</sup> siècle. Le recul du glacier serait de 3 000 m depuis cette période dont 2 000 m depuis les années 1950. Les cavités explorées et leur environnement montrent également des indices de fonte rapide du glacier:

- *L'ablation superficielle et le tronquage des cavités*: le Glacier sud est couvert de débris rocheux dont l'épaisseur dépasse fréquemment le mètre. Malgré cette protection, nous avons estimé localement une ablation de la surface du glacier de 2 à 4 m entre 2007 et 2009. Nous nous basons sur la diminution de hauteur des parois sub-verticales des dépressions à partir des photographies des entrées de grottes prises à différentes périodes. En revanche, les repères sur les moraines près de la surface du glacier ne sont pas fiables car ces zones sont elles-mêmes en mouvement comme l'attestent les déformations observées sur le sentier à la base de la moraine à proximité immédiate du glacier. Un autre indice de fonte locale est le recul frontal des parois des dépressions où s'ouvrent les grottes explorées. Ce recul est beaucoup plus important que l'ablation superficielle du glacier. Pour BGA 5, il est de l'ordre de 10 m en 3 ans. La grotte se retrouve ainsi tronquée d'une partie de ses galeries d'entrée.

- *La température de la glace dans les cavités intraglaciaires*: nous avons mesuré la température de la glace dans les parois des zones d'entrée et à l'intérieur des cavités intra-glaciaires. A 2 cm de profondeur dans la glace, elle varie de 0,0°C à -1,9°C. A 10 cm de profondeur, la température s'établit aux alentours de -3,0°C, mais nous avons obtenu également des températures voisines de 0,0 °C à cette profondeur. Nous avons remarqué des suintements d'eau liquide sur les parois, voire des jets d'eau sous pression à plus de 100 m de l'entrée d'une cavité et 40 m sous la surface du glacier, ce qui indiquerait aussi une fusion interne.

- *La température de l'air dans les cavités intraglaciaires*: celle-ci diminue rapidement dès qu'on pénètre dans le porche des cavités. Elle devient négative dans la zone de pénombre pour atteindre un minimum de -2,0 °C plus en profondeur. Ces cavités ne se comportent pas comme des pièges à froid, d'autant que celles à entrées multiples sont parcourues par des courants d'air en provenance de l'extérieur. Or, pendant nos mesures de décembre 2009, la température extérieure est restée exceptionnellement élevée (-7°C seulement au lever du jour et jusqu'à +10°C à l'ombre pendant la journée). Dans BGA 7, perte parcourue par un petit actif, la température de l'air reste positive jusqu'au siphon terminal de -54 m à 130 m de



l'entrée. Au niveau du siphon, la température de l'eau est de +0,3°C. Toutes les températures (glace, eau et air) ont été mesurées en décembre 2009 (1).

- *Les masses d'eau liquide dans le glacier* : la présence d'eau liquide en quantité importante dans la masse du glacier est une autre piste d'étude. Actuellement, la seule indication que nous ayons est le volume occupé par l'eau lors des phases d'ennoiement des cavités explorées. Nos topographies sur le Glacier sud nous permettent d'estimer un volume exploré de 110 000 m<sup>3</sup> (hors dépressions d'entrée des cavités) dont 53 000 m<sup>3</sup> pour BGA 1 seul. Or, ce volume ne représente sans doute qu'une petite partie des vides intraglaciers susceptibles de s'envoyer.

## Conclusion

Comme l'ont déjà suggéré plusieurs auteurs, l'exploration spéléologique des cavités glaciaires du Népal permet d'identifier des types de cavités dont l'organisation et la morphologie sont en partie similaires aux réseaux karstiques. Nos explorations révèlent en outre un comportement hydrodynamique original caractérisé par la présence de grandes masses d'eau fluctuantes au cœur des glaciers dans des aquifères plus ou moins séparés et déformables. Ces masses d'eau et leur circulation pourraient jouer un rôle important dans le déséquilibre thermique des glaciers himalayens, avec un effet de rétroaction positive dans le processus de fusion accéléré observé. Elles peuvent aussi contribuer à des effets de seuil et d'irréversibilité dans ce processus. Ce sont des pistes de recherche à mener rapidement compte tenu des enjeux en aval et de la vitesse d'évolution du processus.

Outre l'apport d'eau supplémentaire en aval du glacier provoqué par les crevaisons de moraines (GLOF), la fusion des glaciers et l'augmentation de

nappes phréatiques sous-glaciaires et intraglacières pourraient aussi contribuer aux phénomènes de crues glaciaires rapides avec la vidange associée de poches intraglacières. Dans un cas comme dans l'autre, les conséquences peuvent être catastrophiques pour les populations situées en aval. Ces phénomènes de vidange de poches d'eau glaciaires sont également bien connus dans les Alpes, notamment celui de 1892 sur le glacier de Tête Rousse à Saint-Gervais (Haute-Savoie) qui avait fait de nombreuses victimes. Cette poche, qui s'est reformée en 2010, a dû être vidée avec des moyens techniques importants. Son volume était équivalent à celui de grottes temporairement ennoyées que nous avons explorées sur le Glacier sud.

La spéléologie glaciaire se présente donc comme une méthode complémentaire pour étudier la morphologie et le fonctionnement hydrologique des glaciers, mais également une évaluation des risques de crues dans les montagnes de l'Himalaya, des Andes et d'ailleurs. Cependant, ce type d'exploration nécessite une grande prudence et une logistique adaptée en raison de l'isolement des équipes, de l'instabilité et de l'imperméabilité des cavités.

*NB : Afin de poursuivre nos investigations, nous avons créé ICE Himalayas (2), structure associative d'exploration et de recherche soutenue par des scientifiques français et européens. D'autre part, ICE a pris des contacts avec les autorités scientifiques et techniques népalaises, mais aussi avec des ONG telles qu'ICIMOD [Mendez, 2009] (3).*

## Participants 2007-2009 :

*Equipe France* : Marie-Claude Douat, Michel Douat, Maurice Duchêne, Alain Massuyeau, Bernard Vigneau.

*Equipe Népal* : Kabindra Lama, Rajesh Lama, Janak Lama, Abiral Tamang, Dabindra Lama, Ratna Lama, Dawa-Wangdi Tamang, Hazman Tamang, Satman Tamang, Sarki Tamang, Deepak Tamang.

## Bibliographie

- ARMSTRONG R. L., 2010** - *The Glaciers of the Hindu Kush-Himalayan Region. A summary of the science regarding glacier melt/retreat in the Himalayan, Hindu Kush, Karakoram, Pamir, and Tien Shan mountain ranges.* Technical Paper ICIMOD, Katmandu Népal.
- ASSIER A. et EVIN M., 1994** - Cryokarst et vidanges glaciaires au glacier de Chauvet (Haute Ubaye, Alpes Françaises du Sud). Actes du 3<sup>ème</sup> symposium international UIS / Commission Glacier Caves and Karsts in Polar Regions, Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne, Chamonix, *Annales littéraires de l'Université de Besançon* n° 561 série géographie n° 34, p. 83-87.
- BAJRACHARYA S.R., MOOL P.K. and SHRESTHA B.R., 2007** - *Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes*, ICIMOD, Katmandu Népal.
- ERASO A. y PULINA M., 1994** - *Cuevas en Hielo y ríos bajo los glaciares.* Editions McGraw-Hill.
- FRANCOU B. et VINCENT C., 2007** - *Les glaciers à l'épreuve du climat*, IRD éditions et Belin, Paris, 274 p.
- GULLEY J. and BENN D.I. 2007** - Structural control of englacial drainage systems in himalayan debris-covered glaciers. *Journal of Glaciology*, vol. 53, n°182, p. 399-412.
- GULLEY J. D., BENN D.I., SCREATION E. and MARTIN J., 2009** - Mechanisms of englacial conduit formation and their implications for subglacial recharge. *Quaternary Science Reviews* 28, p. 1984-1999.
- JOBARD S. et DZIKOWSKI M., 2009** - Les réseaux de drainage glaciaires et les milieux karstiques : analogies morphologiques et modélisation hydrologique. *Karstologia* n° 51, p. 45-50.
- LLIBOUTRY L., 1954** - The origin of penitentes, *Journal of Glaciology* vol. 2, n°15, p. 331-338.
- MAVLUDOV B. R., 2006** - Glacialkarst, why it is important to research. Ljubljana, *Acta Carsologica*, 35/1, p. 55-67.
- MENDEZ J., 2009** - *Glacier caves: Just the tip of the iceberg, but may offer clues on climate change* - Summary of a presentation given by Maurice Duchêne at ICIMOD, Kathmandu Népal, 28 April 2009.
- PILEWSKIE P., 2007** - Aerosols heat up, *Nature*, Vol. 448, p. 541-542.
- RAMANATHAN V., RAMANA M.V., ROBERTS G., KIM D., CORRIGAN C., CHUNGH C. and WINKER D., 2007** - Warming trends in Asia amplified by brown cloudsolar absorption, *Nature*, Vol. 448, p. 575-578.
- RAZON E. 2009** - *L'influence du changement climatique sur le bassin-versant englacé du Sanctuaire de l'Annapurna (Himalaya du Népal)*. Mémoire, Université Paris 1-Panthéon Sorbonne, 89 p.
- RICHARDSON S.D. and REYNOLDS J.M., 2000** - An overview of glacial hazards in the Himalayas, *Quaternary International* 65/66, p. 31-47.
- SCHROEDER J., 1994** - Les moulins du glacier Hans de 1988 à 1992 - Actes du 3<sup>ème</sup> symposium international UIS, Commission Glacier Caves and Karsts in Polar Regions, Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne, Chamonix, *Annales littéraires de l'Université de Besançon*, n° 561, série géographie n° 34, p. 34-40.
- SHRESTHA A.B., 2004** - Climate change in Nepal and its impact on Himalayan Glaciers. Presented at European Climate Forum Symposium: *Key vulnerable regions and climate change.*
- SHRESTHA A.B., C.P. WAKE, J.E. DIBB and P.A. MAYEWSKI, 2000** - Precipitations fluctuations in the Nepal Himalaya and its vicinity and relationship with some large scale climatological parameters. *International Journal of Climatology*, 20, p. 317-327.
- ZURICK D., PACHECO J., SHRESTHA B. and BAJRACHARYA B., 2005** - *Atlas of the Himalaya.* ICIMOD, Katmandu Népal, 96 p.

(1) : Thermomètre digital GTH 175/MTP : précision +/-0,1 °C. Les températures de la glace sont mesurées en plaçant la sonde dans un puits thermométrique creusé au moyen d'une broche à glace. Les températures de l'air sont mesurées à 1 m des parois et celles de l'eau en plongeant la sonde d'au moins 10 cm dans l'eau.

(2) : ICE Himalayas : International Centre for the Exploration of the Himalayas dont les buts sont l'exploration, la recherche et des études scientifiques au travers d'activités comme la spéléologie glaciaire et karstique, les plongées dans les lacs glaciaires, l'exploration des canyons afin de participer à l'évaluation des risques pour les populations, mais aussi à la connaissance des héritages culturels. <http://www.ice-himalayas.org/>

(3) : ICIMOD : International Centre for Integrated Mountain Development est une ONG internationale fondée en 1983. Son objectif principal est de promouvoir le développement d'un écosystème montagnard économiquement et écologiquement sain et d'améliorer le niveau de vie des populations des montagnes des huit pays de l'Hindu Kush-Himalaya (Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Chine, Inde, Myanmar, Népal et Pakistan). <http://www.icimod.org/>