



Relevé de la grotte glacée de Cenote Abyss dans les Dolomites

■ Farouk KADDED – Tommaso SANTAGATA

Situé en Italie du Nord (figure 1), le Cenote Abyss (ou grotte Conturines) est l'une des grottes les plus profondes et volumineuses de la région des Dolomites. La grotte est caractérisée par un énorme dépôt de glace au bout de 150 m, ce qui rend la cavité d'intérêt majeur pour l'étude du paléoclimat et du changement climatique dans cette région des Alpes. L'exploration spéléologique a commencé en 1994 à la suite de la brusque vidange d'un petit lac à 2940 m. Les spéléologues italiens ont remarqué la présence d'une cavité dans la glace au fond de la doline vidée et ont commencé l'exploration pendant la saison estivale. Cependant, après plusieurs expéditions il était impossible de descendre au-delà d'une profondeur de 70 m à cause de la glace et des conditions hydrologiques difficiles. Dans les années qui suivirent, le passage à travers la glace a de nouveau été fermé à cause de l'accumulation de neige en hiver. En 2015 et 2016 des expéditions ont pu se dérouler, grâce à la basse température d'automne (en dessous de zéro pendant la nuit) et entrer dans la grotte avec des conditions sèches pour explorer un énorme puits de 160 m de profondeur sous la langue de glace principale.

MOTS-CLÉS

Scanner laser 3D, GNSS, spéléologie, climat, drone, topographie, gouffre, Piz des Conturines

rencontrons des équipes "spéleo" et "topo", puis nous repérons des lieux. Rapidement prêts à intervenir nous montons à l'entrée du gouffre par une marche de 20 minutes en montagne.

L'équipe "topographie" est composée de Tommaso Santagata et de moi-même. Il nous faut rapidement faire le relevé de 3 points de calage au GS16 servant au géoréférencement des relevés scanner laser 3D et drone. Nous devons aussi réaliser un vol de drone pour réaliser une modélisation de la partie extérieure du gouffre.

Nous commençons par le vol de drone (DJI Phantom 4). Dix minutes de vol suffiront pour couvrir l'entrée du gouffre avec 58 photos.

Pour les mesures GNSS (figure 3), il nous faut faire face à l'absence de réseaux GNSS et GSM à proximité. Donc afin de réaliser les mesures "rapidement" nous décidons d'utiliser le service SmartLink basé sur un calcul PPP (Precise Point Positioning) en temps réel intégré dans l'antenne GNSS. Une fois allumé, le récepteur GS16 capte les signaux GNSS de toutes les constellations (GPS / GLONASS / Galileo / BeiDou), puis reçoit les corrections (orbites et horloges) envoyées par un satellite géostationnaire (AORE ou

Le fond de la grotte est une immense chambre dont le sol est caractérisé par un impressionnant glacier rocheux avec des signes de mouvement récent en raison de la recharge de glace par le haut. Depuis 2010, la grotte a été étudiée jusqu'à une profondeur de 285 m. Après cette expédition, la grotte était encore inaccessible en raison de l'accumulation de neige au cours des quatre années suivantes, jusqu'à ce qu'un passage fut trouvé l'été 2015. La dimension et la morphologie particulière des dépôts de glace de la grotte ainsi que son altitude ont conduit à la création d'un projet de recherche à long terme pour surveiller les mouvements et les changements de volume de la glace ainsi que pour comprendre le microclimat de la grotte et explorer le potentiel pour de futures études paléoclimatiques. Deux expéditions, en 2015 et 2016, ont été organisées principalement pour acquérir des données scientifiques, installer des pièges à pollen, enregistrer l'humidité et la température en différents points de la grotte et finalement réaliser un relevé 3D de toute la grotte.

Levé extérieur du gouffre par GNSS avec le Leica GS16 combiné au service "SmartLink" et le levé par drone

Le vendredi 30 septembre 2016 c'est la montée des hommes et du matériel grâce à l'hélicoptère, puis nous dressons le camp de base pour 4 jours en autonomie complète (figure 2). Nous



Figure 1. Italie : Haut Adige (ou Tyrol du Sud), Dolomites, vallée de Badia.



Figure 2. Le camp de base à proximité du Piz des Conturines, 3064 m.



25E). La solution de positionnement 3D converge au bout de 20 minutes, c'est-à-dire le temps de marcher vers notre premier point à mesurer. Nous obtenons une précision de 5 cm en 3D sur les 3 points en mesurant 5 minutes chacun, sans perdre la liaison avec les satellites (en tenant la canne verticale pendant la marche). Cette série de 3 mesures est réalisée juste avant le coucher du soleil en à peine une heure avec une température de 5°C. Nous devons rapidement revenir au camp de base pour le briefing définissant la stratégie du lendemain.

Relevés extérieur et intérieur du gouffre avec le scanner 3D Leica ScanStation P40

Le suivi de l'évolution des glaces par relevé au scanner laser fut l'un des principaux objectifs des deux expéditions en 2015 et 2016. Le but est de réaliser un relevé 3D complet du gouffre et surtout des zones de glace afin d'obtenir des données détaillées sur le volume et la taille de ces importantes sources paléoclimatiques souterraines des Dolomites. L'objectif de l'expédition 2016 était de relever la partie supérieure de la grotte, de l'entrée jusqu'à environ -140 m afin de se connecter à la mesure réalisée en 2015 (le fond du gouffre) et d'obtenir un modèle 3D complet de la grotte. L'utilisation d'un scanner laser permet l'acquisition rapide de données de haute précision pour étudier des environnements souterrains vastes et complexes, tels que le Cenote Abyss. Le gouffre atteint -285 m. L'instrument utilisé en 2015 était un HDS 7000 (figure 4), un scanner laser à différence de phase équipé d'un compensateur double axe, laser classe 1 avec une portée de 187 m et une résolution de 0.3 mm. Pendant

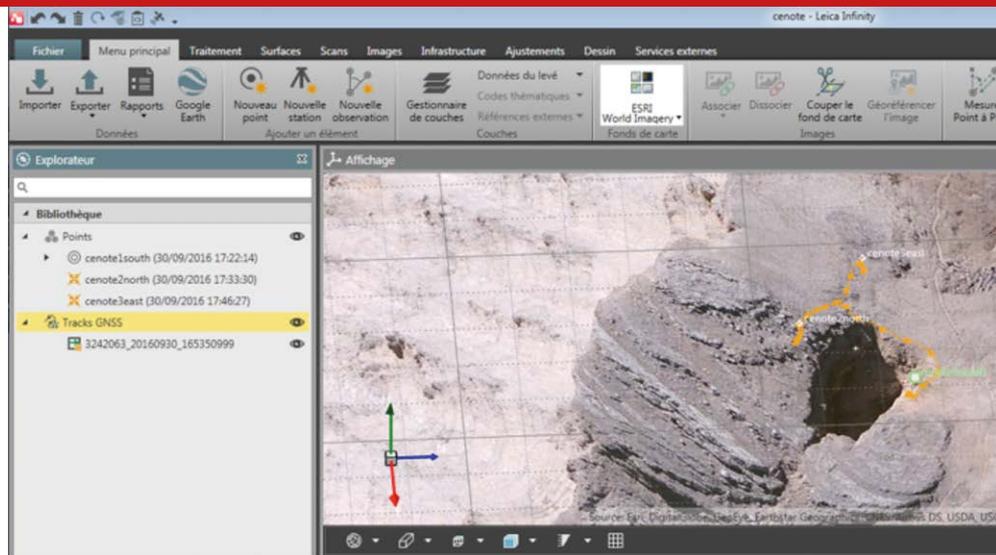


Figure 3. Vue sur le logiciel Leica Infinity : la trace des mesures GNSS autour de l'entrée du gouffre.

les opérations à l'intérieur de la grotte, des cibles circulaires avec une base de support magnétisée tournant sur 360° ont été utilisées. La chambre géante au fond a été mesurée en utilisant 11 scans à une résolution de 12 mm.

En 2016, le relevé s'est poursuivi dans la partie supérieure du puits (au-dessus de la langue et à travers la série de puits courts et de tunnels creusés entre la roche et la glace jusqu'à l'entrée de la doline). En 2016, nous avons utilisé un scanner laser 3D P40 équipé de la technologie WFD (Waveform Digitizing) avec une vitesse de 1 million de points par seconde à une portée de 0,4 à 270 m. Le P40 numérise à 360° l'ensemble de ce qui est visible en 3 minutes (figure 5), sans photo car le gouffre est trop sombre.



Figure 4. Relevé du fond du gouffre en 2015 avec le Leica HDS7000

Tout d'abord, les spéléologues doivent équiper la cavité de cordes fixes afin de permettre la descente dans le gouffre. Le scanner laser 3D P40 est transporté à dos d'homme.

Nous commençons par scanner la partie extérieure du gouffre ainsi que l'entrée pour pouvoir assembler ce relevé avec le nuage de points par drone. Le relevé au scanner laser se fait avec des cibles en extérieur et sans cibles en intérieur. Le relevé de l'entrée ne pose pas de difficulté, par contre dès qu'il faut descendre sur corde fixe et trouver des positions pour le mini-trépied tout se complique. Il faut donc trouver une position stable et mettre en place le trépied, puis placer le scanner laser. C'est très exposé et je fais des positions de scan assez périlleuses. Une fois terminé, il faut ranger le scanner dans le sac à dos et continuer à descendre dans le gouffre. Il faut s'assurer d'un minimum de 30 % de recouvrement entre les scans pour assurer l'assemblage a posteriori. Nous mesurons 20 positions de scanner et il nous aura fallu plus de 8 heures pour

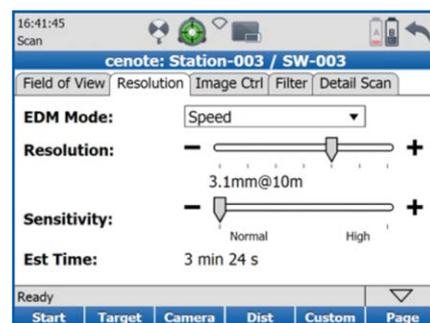


Figure 5. Ecran du laser scanner Leica Scanstation P40 : résolution utilisée de 3.1 mm à 10 m



Figure 6. Dernière position de scan sur la langue de glace verticale, au-dessus de la grande chambre du gouffre.

arriver juste avant la langue glaciaire qui descend verticalement et qui se tient suspendue dans le vide.

Avant de remonter, nous vidons les données sur ma tablette PC Leica CS35 par wifi, car nous laissons le scanner ici et il ne restera plus qu'à mesurer cette langue de glace, ça ne sera pas une partie de plaisir...

Il est 21 h 35 quand on quitte le fond du gouffre avec Francesco et il nous faut encore remonter sur corde fixe toute la moitié du gouffre. Étant novice en spéléologie la remontée est pénible et malgré la fatigue je m'adapte rapidement. C'est une sacrée impression de ne plus avoir la notion du temps dans le gouffre, le temps est suspendu. Nous arrivons au camp de base à 23 h 30.

Durant la journée du 2 octobre il sera impossible d'entrer dans le gouffre, car il a plu et beaucoup d'eau y circule. Ça sera repos et exploitation des données scannées la veille.

Grâce à la neige et au froid, la journée du 3 octobre 2016 permet le gel de l'eau ruisselante, donnant ainsi de bonnes conditions pour la descente dans le gouffre.

Les équipes se mettent en route à 9 h 00, il faut remonter en 20 mn au gouffre et refaire toute la descente qui prendra 1 h pour retrouver le scanner laissé l'avant-veille. C'est reparti pour continuer les relevés au scanner laser avec Tommaso. Vers 14 h 20 nous arrivons à la dernière position de scan (*figure 6*), la plus périlleuse ! Nous sommes suspendus à une corde, en dessous il y a 160 m de

vide, et il nous faut trouver une position où stationner le trépied, c'est-à-dire entre la langue de glace verticale et le rocher... En fixant une broche à glace pour supporter un pied du trépied, j'arrive à trouver une position stable. Il faut installer le scanner et grâce à la portée du scanner P40, nous pouvons mesurer les points du fond du gouffre qui sont à 160 m sous le trépied. La paroi étant concave, nous ne pouvons pas mesurer de points sur 40 m de hauteur de paroi, mais comme nous pouvons mesurer des points au fond, cela donnera assez de points communs avec le nuage de points de 2015. En 2015 le scanner utilisé n'avait pas assez de portée pour atteindre le fond (la chambre au fond mesure 130 m de long et environ 40 m de large). Depuis cette position, cette mesure-ci permettra d'assembler les nuages de points de la mission de 2015 avec ceux de 2016. Il nous faut rester en place pour que le photographe et le journaliste de GEO magazine immortalisent la scène. Nous restons là suspendus 1 h 30 environ, nous sommes gelés car la corde nous coupe la circulation du sang. À 16 h 00 il faut bouger ses membres, faire circuler le sang et remonter la langue de glace et l'ensemble du gouffre (en 1 h 30). À la sortie, parmi de superbes couleurs et le paysage magique des Dolomites, je croise le journaliste qui me dit "you made it" ! Oui nous l'avons fait. Nous avons mesuré en tout 38 nuages de points bien résolus et indépendants qu'il nous faut à présent assembler pour compléter la mission de 2015.

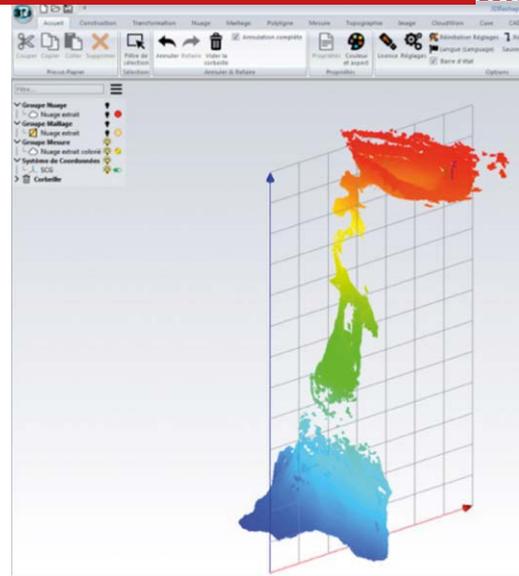


Figure 7. Nuage de points complet dans le logiciel 3D Reshapper

Traitements des nuages de points dans le logiciel Leica Cyclone et 3DR (assemblage, maillage, animation et mesures)

Cyclone a été utilisé pour assembler les nuages de points et fournir un nuage complet, dense et peu bruité. Il faut assembler les 38 positions de scan, le tout sans cible, uniquement basé sur l'assemblage "nuage/nuage"; les algorithmes de Cyclone ont permis d'assembler 80 % des scans automatiquement et le reste a été traité en assemblage "visuel", c'est-à-dire que l'on déplace un scan vers un autre visuellement, et ensuite Cyclone assemble selon un nombre d'itération décidé en amont. Une fois le tout assemblé (*figure 7*), nous avons pu nettoyer le nuage de points afin de le préparer pour le traitement suivant.

3D Reshapper a permis de réaliser un maillage complexe. Ce maillage pourra être comparé facilement avec de prochaines mesures. Il permet aussi de coloriser le nuage selon l'axe Z et de réaliser des vidéos de visite virtuelle. Pour les données drone, nous avons traité les 58 photos en photogrammétrie avec le logiciel PhotoScan (*figure 8*). Nous avons obtenu une qualité de 3 cm par pixel en XY, et 5 cm par pixel en Z.

Conclusions

Les expéditions de 2015 et 2016 sont les premiers pas d'un projet à long terme de surveillance qui pourrait fournir des

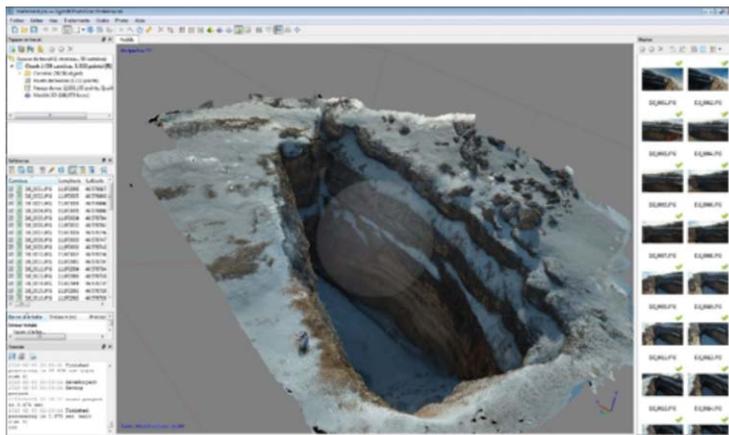


Figure 8. Traitement photogrammétrique des 58 photos dans le logiciel Photoscan



Figure 9. Coupe du gouffre. Montage réalisé par le magazine GEO.

données intéressantes sur les conditions passées des masses de glace de la grotte et de leur évolution en réponse au changement climatique. Dans cette première phase du projet l'objectif principal était de réaliser un relevé 3D haute définition, afin de figer les conditions volumétriques et morphologiques du dépôt de glace à l'intérieur de la grotte, couplés à une surveillance continue du microclimat de la grotte. En outre, les données sur le pollen pourraient ouvrir la perspective de l'étude des couches de glace comme archives paléoclimatiques.

Les activités de recherche dans cette grotte reposent sur la capacité de pouvoir entrer dans la grotte à la fin de l'été ou en automne, et les conditions météorologiques. Néanmoins, une nouvelle expédition est prévue pour 2018 ou 2019 afin de répéter les mesures au scanner laser 3D et comparer les pertes de volume de glace, en corrélation avec les conditions climatiques enregistrées à la surface. ●

Contacts

Farouk KADED - Chef de Produits / Responsable de l'assistance Technique
Leica Geosystems France, Paris
Farouk.kadedd@leica-geosystems.fr

Tommaso SANTAGATA
La Venta "association d'exploration géographique", Trévise, Italie
Co-fondateur de VIGEA - Virtual Geographic Agency
tommaso@vigea.it

Bibliographie

Marchetto GC. (2007) "Les recherches spéléologiques dans le Parc naturel de Fanes-Sennes-Braies et Dolomiti d'Ampezzo (Italie)". Dans : Untertage Alpine 2007, Ramsau bei Berchtesgaden, 9-11 novembre 2007.
Sauro U., Meneghel M., Bini A., Mietto P., Siorpaes C. (1995) *Altopiani Ampezzani*. Geologia geomorfologia speleologia.

ABSTRACT

The abyss of Conturines, also known as Cenote Abyss, represents one of the deepest and largest caves of the Dolomites. This 280 m deep cave is characterized by a huge ice deposit, which makes it of major interest for the study of paleoclimate and modern climate change in this region of the Alps. The cave was discovered in 1994 after the abrupt emptying of a lake at 2940 m. In 2015, a research project began to monitor the long-term movements and volume changes of this ice deposit and to understand the microclimate of the cave. With two expeditions organized in October 2015 and September 2016, a complete study of the cave was carried out using a 3D laser scanner HDS7000 in 2015 and a scanner ScanStation P40 in 2016. Installation of barometric dataloggers, temperature and humidity in different areas of the cave provide a one-year record of the microclimate. In addition, pollen traps have been installed to study the current flow of pollen on and inside the cave, while preliminary analyzes of pollen grains held in the ice are in progress. The Cenote Abyss Ice Caves Research Project aims to shed light on the changing climate of the Dolomites over the past several hundred years, perhaps thousands of years, as well as on environmental changes more recent events that led to the melting of the cave glacier.



Figure 10. L'équipe au camp de base.