

Le gouffre le plus profond du monde

■ Paul COURBON

La montagne et les gouffres

En 1856, Andrew Waugh, arpenteur général des Indes orientales, annonce qu'après plusieurs années de mesures menées dans le cadre du "grand projet de topographie trigonométrique", le "Pic XV" a été coté officiellement à 8840 mètres d'altitude. Il lui donnera le nom de son prédécesseur au poste d'arpenteur général et le Pic XV (Appelé Chomolungma en tibétain et Sagarmāthā en népalais) deviendra "Mont Everest". Après les nombreuses mesures de triangulation qui suivront, son altitude sera fixée à 8848 m. En 1991, en utilisant 2 stations GPS au Népal, 2 stations GPS au Tibet, complétées de visées trigonométriques et de distances, on obtint : 8846,10 m [1].

En France, la première mesure géodésique du "mont Blanc" aurait été faite en 1685 par le géomètre et astronome genevois Nicolas Fatio et son frère Jean-Christophe. Ils donnent un calcul de l'altitude de la montagne estimée à 2 426 toises, soit 4728 m. A partir de 1863, toujours déterminée par triangulation, l'altitude officielle du plus haut sommet des Alpes a été fixée à 4807 mètres, affinée à 4807,20 mètres en 1892. Mais, subsiste l'indécision due à l'épaisseur importante de la neige qui recouvre le sommet, ce dernier n'étant pas marqué par un rocher sur lequel a été scellée une belle borne en granit ! Dans la période moderne, XYZ s'est fait l'écho des mesures GPS faites tous les deux ans depuis 2001, sous le patronage des géomètres-experts de Haute-Savoie [2]. Si l'altitude mesurée en 2017 est de 4808,72 mètres, les différentes mesures de 2001 à 2015 s'échelonnent dans une fourchette de plus de 3 m. De plus, la forme du sommet obtenue par un semis de points GPS ou scanner laser varie chaque année avec une amplitude de 40 m du déplacement en XY du point culminant depuis 2001 !

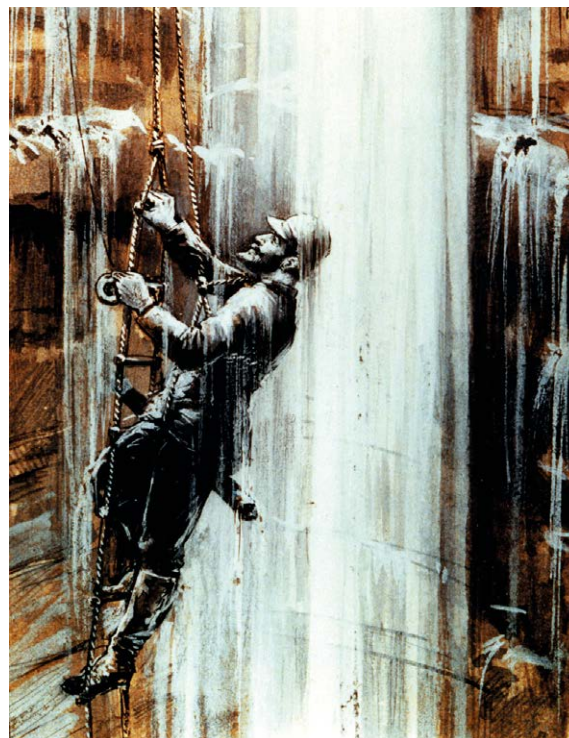
Mais les plus hauts sommets sont visibles de tous et, depuis longtemps, leur altitude a été fixée par des méthodes géodésiques rigoureuses dont on a pu confirmer la précision. Ce n'est pas le cas des grands gouffres dont beaucoup restent encore à découvrir. Un grand gouffre échappe à notre vue et nous devons nous fier à la rigueur des explorateurs qui ont dû faire leurs mesures dans des conditions difficiles et avec des instruments dont la légèreté limite la précision.

Les topographes spéléologues sont rarement des professionnels, de plus, ils ne doivent pas entraver la bonne marche des explorations, qui lors d'une progression éprouvante, se font sans perdre de temps. C'est un peu comme si on demandait aux alpinistes qui gravissent l'Everest de faire des mesures de pentes et de distances au cours de leur ascension. Si on peut mesurer l'altitude d'un sommet sans y aller, mesurer la profondeur d'un gouffre nécessite qu'on en atteigne le fond !

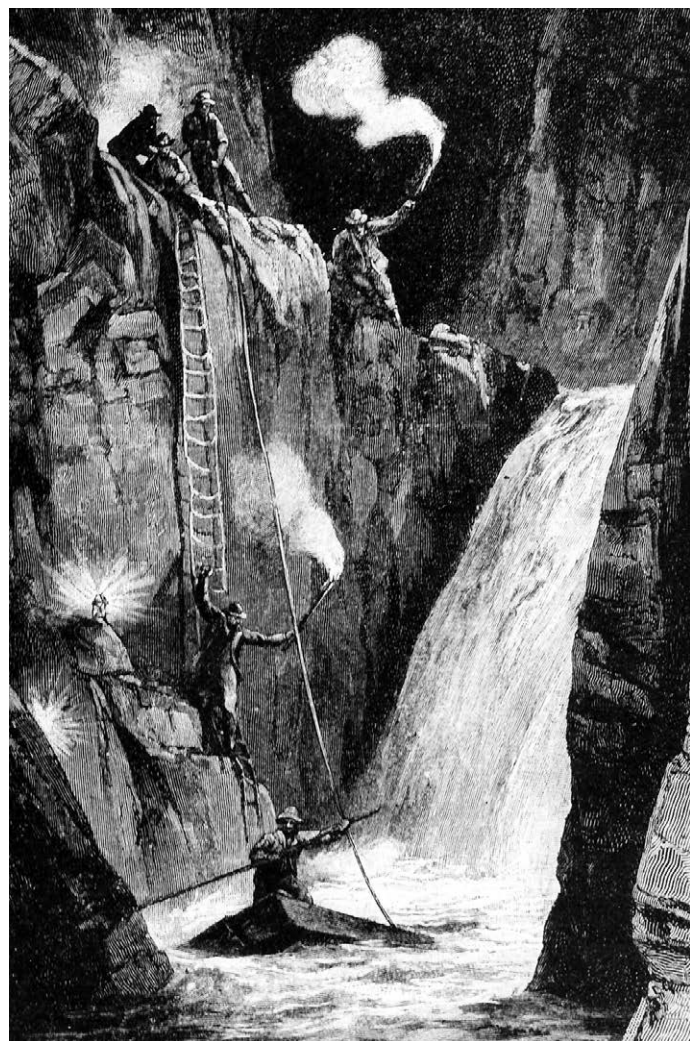
Les lignes qui suivent permettront de comprendre le problème et de fixer une précision aux profondeurs annoncées.

■ MOTS-CLÉS

Topographie, précision, décamètre, topofil, Disto Leica, boussole, clisimètre



Figures 1 et 2. Explorations à l'époque de Martel, vers 1900.





■ Les conditions du lever souterrain

Les deux gravures jointes illustrent les difficultés de la progression souterraine. Dans les grands gouffres parsemés de puits, passages étroits, escalades, rivières impétueuses et parfois des siphons à passer en plongée, pas question de descendre trépieds et théodolites !

■ Retour à un passé récent

Je me suis attaché à la chronologie du gouffre le plus profond du monde étendue sur près de trois siècles. De ce fait, je ne peux ignorer les difficultés de calculs passées, qui aujourd'hui ont été balayées par l'informatique et la création de logiciels accessibles à tous. En 1955, quand j'ai passé le baccalauréat, nous étions moins de 100 000 à le faire en France, avec 65 % de réussite. Aujourd'hui il y a plus de 700 000 candidats avec 85 % de réussite. Il faut aussi considérer que dans les années 1950, la majorité des lycéens prenaient une filière littéraire. Dans mon lycée, il y avait en terminale deux classes de mathématiques élémentaires pour cinq classes de philo. Il faut en tenir compte, en sachant que non-professionnels de la topographie, la plupart des spéléologues ne devaient compter que sur les notions qui leur restaient de l'école quand ils décidaient de mesurer une cavité.

Aussi, il ne faut pas s'étonner si de nombreux spéléologues, même quand ils menaient leurs mesures avec sérieux, pataugeaient lors des calculs, confondant pourcentages et angles verticaux, sinus et tangentes ! En 1953, l'équipe qui avait topographié le gouffre de la Pierre Saint-Martin avait trouvé une profondeur de 729 m qui en faisait le gouffre le plus profond du monde. Je connaissais ces spéléologues qui formaient une équipe sérieuse ayant fait ses preuves ailleurs. Mais l'EDF qui voulait capter la rivière souterraine du gouffre refit exécuter cette topographie par des professionnels qui trouvèrent 689 m. Encore se trompèrent-ils de 5 m dans la mesure de la profondeur du puits de 320 m, exposé aux chutes de pierres, par lequel débute le gouffre. Je l'appris à mes dépens quand je fis l'exploration solitaire du gouffre en



Figure 3. Trop de spéléologues ne matérialisent pas leur station, comme ici au départ d'un puits de 160 m.

1971, en calculant la longueur des échelles à prendre au plus juste !

■ Une quête difficile

A partir de 1970, je me lançais dans la première rédaction d'un atlas des gouffres les plus profonds du monde et j'accumulais l'exploration de grands gouffres pour contrôler leur profondeur [3 à 6]. J'avais déjà été échaudé par toutes les erreurs relevées au cours des explorations des gouffres de la Provence ou des Causses. Erreurs toujours dans le même sens, tous les gouffres étant surcotés avec des erreurs pouvant atteindre + 50 %. Dans les grands gouffres européens explorés je ne relevais pas d'erreurs aussi importantes, mais certaines atteignaient 20 %. Pourtant, vers 1830, lors des explorations du karst triestin, les Autrichiens avaient fait des topographies précises !

Il faut dire que de nombreux spéléologues ne matérialisaient pas leurs stations par un petit point de peinture, celles-ci étant prises au jugé à l'endroit

où se trouvait "l'aide-topographe" que l'on avait visé et qui vous précédait pour les mesures. Les longueurs des puits étant souvent comptées en longueur d'échelles : si on avait utilisé 8 échelles on marquait un puits de 80 m, sans compter les longueurs perdues à l'amarrage, ou traînant au fond du puits.

Aussi, en 1972, à l'instigation de Philippe Renaud rédacteur de la revue *Spelunca*, était rédigé un numéro consacré à la topographie des cavités souterraines à laquelle je participais [7 et 8]. A partir de ce moment, en France, l'École française de spéléologie (EFS), commission de la Fédération française de spéléologie (FFS), organisait des stages de topographie à l'attention des spéléologues, selon des règles bien établies. En avance sur son époque, pendant plus de deux décennies, l'École française de spéléologie eut une grande influence en dehors du territoire national. Il faut ajouter que de 1944 à 2003, le plus profond gouffre du monde se trouva en France. En 1972

même, c'étaient les trois gouffres les plus profonds. Les méthodes enseignées en France eurent donc une grande influence sur la mesure des profondeurs.

Les instruments utilisés

Comme je l'ai écrit précédemment, pas de trépieds et de théodolite dans les levés souterrains. Les difficultés de la progression, le poids du matériel d'exploration et de bivouac à porter, même pour une équipe topographique qu'on allège au maximum, ne permettent qu'un matériel léger.

- **Dans les années 1950**, les rubans plastiques n'étaient pas encore apparus, certains utilisaient des doubles décamètres à ruban en toile. Mais beaucoup préféraient une cordelette avec des petits nœuds tous les mètres. Elle craignait moins l'eau et la boue, qu'un ruban de toile lors de son enroulement ! Le summum des boussoles utilisées était la Chaix employée par les géologues ; elle permettait aussi de prendre les pentes. On notait tout sur un carnet qu'on avait beaucoup de peine à préserver de l'humidité et de la boue, on n'y arrivait pas toujours. Les premiers carnets plastiques sur lesquels on pouvait écrire n'arrivèrent que vers 1975. De retour à la maison, certains faisaient directement leur report sur papier avec une règle graduée et un rapporteur. Une minorité le faisait par calcul à partir des tables de valeurs naturelles, avec les bonnes multiplications manuelles ! Nous rappelons que les premières calculatrices électroniques



Figure 4. Le décamètre ruban de toile dont l'usage était limité par la boue qui bloquait l'enroulement.

n'apparurent qu'en 1972 et encore, vu leur prix, elles furent limitées au départ à un usage professionnel.

- **Une grande avancée fut faite vers 1970** par l'adaptation du compteur métrique à fil perdu Chaix déjà employé par l'IGN pour les opérations de complètement des levés photogrammétriques. Le club spéléologique des Vulcains, à Lyon, avait complété ce compteur par une boussole Chaix intégrée au boîtier et par un demi-cercle gradué associé à une nivelle qui permettait de mesurer la pente matérialisée par le fil tendu entre deux stations.



Figure 5. La CHAIX, "Rolls-Royce" des boussoles ! Elle avait été conçue pour les géologues.

- **Le premier petit distancemètre électronique de Leica apparut en 1993.** Il était d'un prix élevé : de l'ordre de 8.000 F HT en 1996, soit plus de 2 000 euros actuels en tenant compte de l'érosion monétaire. Il ne mesurait que

jusqu'à 30 m au maximum, profondeur que dépassent de nombreux puits. Ce type d'appareil ne fut employé couramment sous terre que lorsque son prix baissa, au début des années 2000. Il fut alors souvent associé au combiné boussole-clinomètre Sunto, dont le viseur avec grossissement permettait une lecture plus précise des angles.

Les distancemètres électroniques s'améliorèrent avec le temps, augmentant la portée des mesures de longueur. Surtout, à partir de 2008, le Suisse Beat Heeb commercialise les premières adaptations du Distomat Leica permettant de mesurer l'azimut magnétique et les angles verticaux, grâce à un module bluetooth. Cet appareil demande cependant un étalonnage précis permettant d'avoir des mesures cohérentes quelle que soit sa position. Il permet actuellement d'enregistrer jusqu'à 4 000 mesures et peut être déchargé sur un logiciel approprié.

Les calculs : suivant l'évolution exponentielle de l'électronique et de l'informatique, plusieurs spéléologues mirent au point des logiciels de calcul et de dessin, permettant d'établir la topographie d'une cavité après déchargement des mesures du Distomat. Les premiers essais datent de la fin des années 1980. Mais en France le premier logiciel qui eut une

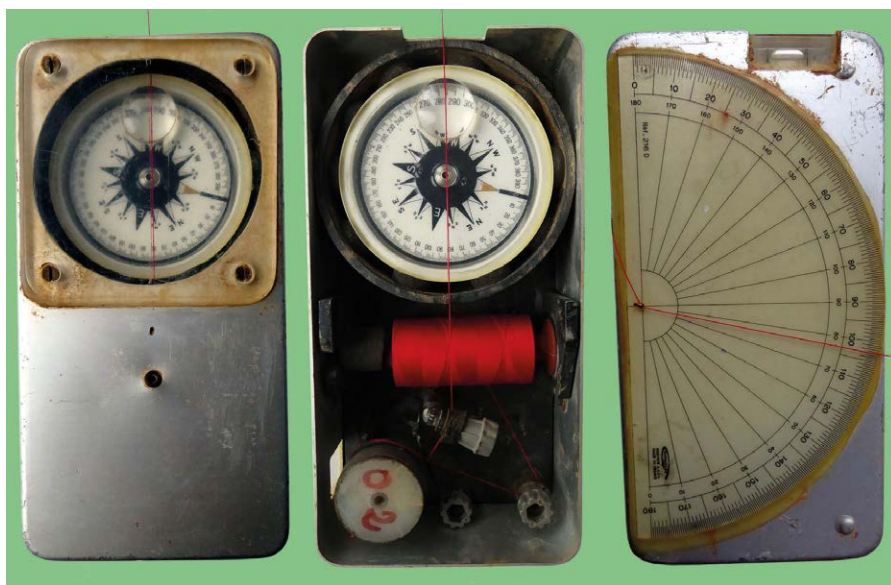


Figure 6. Le Topofil Vulcain vu recto et verso. Sur le côté, un compteur à tambour donnait les longueurs de fil déroulé.



Figure 7. Le nouveau Disto X310 donnant distance, azimuth magnétique et dénivellation. La boussole-clisimètre Suunto associée aux premiers distancemètres.



bonne diffusion, fut le Visual topo d'Eric David, en 1993. Vu le prix des PC portables à l'époque, ce premier logiciel fut utilisé sur calculatrice programmable. Visual topo a évolué et est toujours très utilisé, je l'ai sur mon ordinateur.

D'autres logiciels apparaissent encore aujourd'hui. Au lieu d'exporter les données et de faire ensuite le dessin avec des logiciels tels Illustrator, Autocad, Inkscape ou autres, la demande des topographes est maintenant de pouvoir calculer et dessiner dans le même logiciel. Ceci permet de lier les éléments graphiques aux mesures et d'obtenir directement les modifications de coordonnées en cas d'erreurs ou de bouclage de galeries. Mais il faut dire que ces dessins ou calculs ne peuvent être faits dans de nombreuses cavités, où l'humidité, la boue et des positions inconfortables rendent toutes les manipulations difficiles.

Je dois préciser que les Américains étaient en avance sur nous. En 1979, j'explorais avec les Texans de l'AMCS (*Association for Mexican Caves Studies*) le *Sistema Purification*, au nord du Mexique. C'était alors la plus profonde traversée hydrogéologique (avec une entrée et une sortie) du monde avec 858 m de dénivellation. Depuis plusieurs années les Texans s'attachaient à explorer les nombreuses branches de cette cavité hors normes. Ils m'avaient montré le listing informatique, où les coordon-

nées XYZ des stations étaient calculées en fonction des mesures qu'ils avaient effectuées.

La précision des mesures

Nous en venons au point le plus délicat, qui outre la précision des appareils utilisés, est lié aux conditions inconfortables de travail.

Cette précision est liée à quatre éléments : l'erreur de centrage et les erreurs de la mesure des longueurs, des angles verticaux et horizontaux.

L'erreur de centrage : peu de spéléologues ont la précaution de prendre un marqueur pour matérialiser leurs stations. Mais, même quand cette précaution est prise, il est souvent difficile, en fonction de la nature du point de station de mettre son œil exactement sur le point de peinture. L'œil de l'observateur est souvent décalé de 10 à 20 cm (*Figure 8*).

L'erreur sur les longueurs : si la précision des distancemètres actuels est presque centimétrique (à condition que l'objet visé soit parfaitement défini et plan), cela n'est pas le cas des autres instruments de mesure des longueurs. Que ce soit avec un décamètre ou un topofil, il y a les problèmes de tension et l'erreur de chaînette qui augmente avec la longueur des portées. Dans un puits profond, on est obligé de mettre un poids pour tendre le fil du topofil.

Quel est le poids le plus judicieux ! Sur des puits de 300 m j'ai décelé des écarts de 2 à 3 m, disons 1 %.

L'erreur sur l'angle vertical : les clinomètres Suunto, sont gradués au 1 %. Mais, sans l'appui d'un trépied il est parfois difficile de garder une immobilité complète qui pourrait aboutir à une appréciation de 0.5 %. De plus, bien que cela leur ait été conseillé, une infime minorité de spéléologues fait un étalonnage en extérieur sur deux supports stables avec deux visées réciproques. J'ai souvent constaté des écarts de 2 % dans cet exercice. Aujourd'hui, on a une précision meilleure avec le Distomat vu précédemment.

L'erreur sur l'angle horizontal : l'usage d'une boussole nécessite de maintenir le cercle gradué horizontal. Or dans une cavité accidentée de nombreuses visées ont une forte pente et sortent du champ de vue du petit trait de visée. Il faut donc apprécier la direction visée. L'erreur peut dépasser 2 grades, le Distomat s'avérant plus précis.

■ Estimation de la précision finale

Je reprends un calcul fait en 1972, avec des données que je ne possède plus. Pour traiter cette précision, j'avais repris une topographie que j'avais réalisée en 1970 dans un gouffre qui était alors le troisième du monde par sa profondeur (-980 m). Du fait de sa diffi-



Figure 8. L'erreur de centrage est accentuée par le port du casque qui élargit la tête.

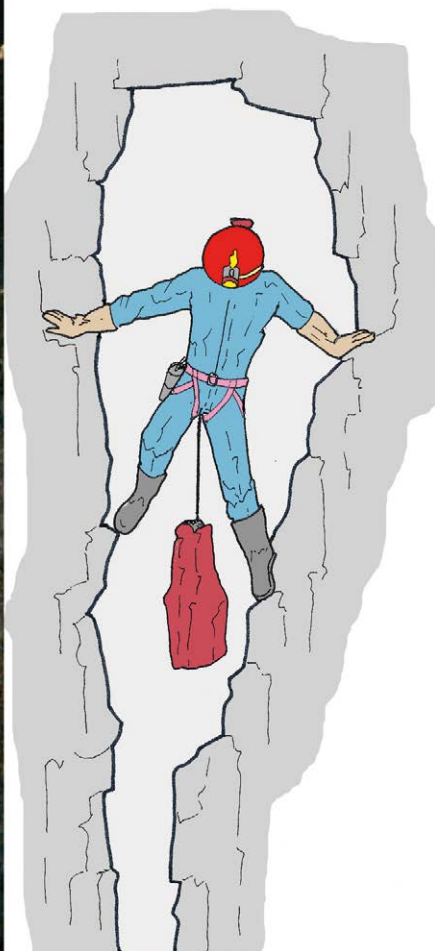


Figure 9. Lors de l'exploration du gouffre le plus profond du monde en 1978, chacun des quatre équipiers avait 35 kg de matériel. Parmi les difficultés, de longs passages en opposition où les mesures sont inconfortables, difficiles à faire et à noter.

culté de parcours, avec de nombreuses parties étroites, nous avons eu 282 portées d'une longueur moyenne de 7 m, le puits le plus profond dépassant à peine 30 m. Je ne m'étais pas lancé dans le calcul rigoureux, prenant en compte chacune de ces 282 portées. J'avais estimé que nous aurions une très bonne approche en prenant en compte 282 portées moyennes.

Pour chaque portée, en estimant :

- l'erreur de centrage à 0.15 m
- l'erreur due à la pente à $7 \text{ m} \times 2 \% = 0.14 \text{ m}$
- l'erreur en longueur à $7 \text{ m} \times 1 \% = 0.07 \text{ m}$ on obtenait une résultante de : $\sqrt{(0.15^2 + 0.14^2 + 0.07^2)} = 0.22 \text{ m}$.

Pour l'ensemble de la cavité l'écart-type s'élevait donc à $0.22 \times \sqrt{282} = 3.7 \text{ m}$, soit une tolérance de $2.7 \times 3.7 = 9.99 \text{ m}$. Compte tenu des difficultés extrêmes de travail et des difficultés de mesures dans certaines stations inconfortables,

c'est cette tolérance que je préfère retenir comme ordre de précision. Elle correspond à 1 % de la profondeur de la cavité.

Bien sûr, lors d'études particulières de cavités, dans des conditions moins difficiles et moins exténuantes, on peut obtenir des précisions bien meilleures. Mais ce chiffre a été conforté lors de la reprise de deux topographies.

Le spéléologue russe Alexander Klimtchouk donne la même précision de 1% concernant le dernier gouffre le plus profond du monde, exploré en Caucase (voir ci-contre).

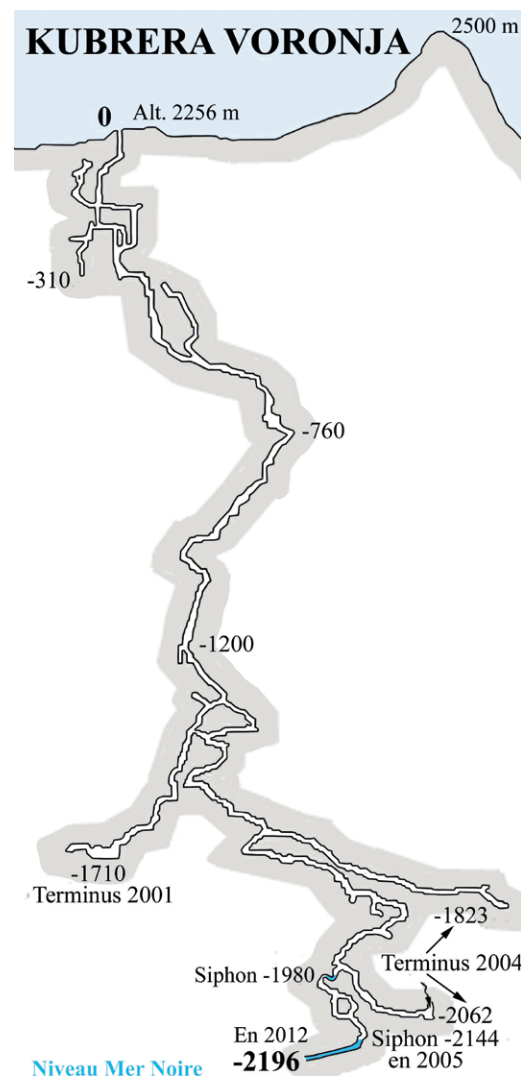
Quand la technique s'en mêle

■ L'U-GPS

Dans XYZ n° 126 [9] avait été abordée l'utilisation du GPS pour déterminer le déplacement d'un explorateur sous terre

(U-GPS). Cet opérateur était relié aux quatre émetteurs en temps réel disposés en surface par une jonction électromagnétique traversant le sol. On pouvait ainsi suivre en permanence l'itinéraire du spéléologue se déplaçant dans la cavité avec une balise émettrice.

À chaque déclenchement d'un signal par le spéléologue, le point où il se trouve va apparaître sur l'écran de l'ordinateur où seront enregistrées ses coordonnées XYZ. Mais ce procédé est limité par la portée des ondes électromagnétiques dans le rocher, très largement inférieure à la profondeur d'un grand gouffre.



Dessin P. Courbon, d'après article Red Bull

Figure 10. Le gouffre le plus profond du monde, jusqu'à quand ? Avant d'atteindre et de plonger le siphon terminal, il a fallu passer un autre siphon intermédiaire.



■ Relevé au scanner 3D

Je renvoie les lecteurs au XYZ n° 157 [10], qui traite du relevé 3D d'une cavité glaciaire de 285 m de profondeur. L'ampleur et la complexité des moyens à mettre en œuvre sont incompatibles avec les difficultés d'une exploration extrême. De plus, il nécessite l'intervention de topographes professionnels rompus à cette technique de pointe. ●

Remerciements

À Eric David, Beat Heeb, Farouk Kadded et Bernard Flacelière qui ont aimablement répondu aux questions que je leur posais.

Contacts

Paul COURBON
paul.courbon@yahoo.fr
www.chroniques-souterraines.fr

Bibliographie

- [1] Benoît CHAMOUX, 1993, *Everest moins 2 mètres, partie scientifique* par MM. BEINAT, MARCHESINI et PORETTI. Ed. Initiative, 127 p.
- [2] Bernard FLACELIERE & alii, 2015, *La mesure du Mont-Blanc*, XYZ n° 145, p. 25 à 36
- [3] Paul COURBON, 1972, *Atlas des grands gouffres du monde*, à compte d'auteur (2 000 exempl.)
- [4] Paul COURBON, 1979, *Atlas des grands gouffres du monde*, éd. Jeanne Laffitte, Marseille.
- [5] Paul COURBON et Claude CHABERT, 1987, *Atlas des grandes cavités mondiales*, à compte d'auteurs (2 000 ex.).
- [6] Paul COURBON, Claude CHABERT, Peter BOSTED, Karen LINDSLEY, 1989, *Great caves of the world*, Ed. Cave books, St-Louis, Mo
- [7] P. COURBON et G. MARBACH, 1972, *Les levers topographiques et leur précision*, Spelunca spécial n° 2 sur la spéléologie scientifique, revue de la Fédération Française de Spéléologie, pp. 34-37
- [8] Paul COURBON, 1972, *La topographie spéléologique*, Spelunca spécial n° 2 sur la spéléologie scientifique, revue de la Fédération Française de Spéléologie pp. 39-46.
- [9] Jean-Baptiste CAVERNE, (2011) : *U-GPS : un prolongement du système GPS sous terre*. XYZ n° 126, p. 27-36.
- [10] Farouk KADDED, Tommaso SANTAGATA, 2018, *Relevé de la grotte glacée de Cenote Abyss*, XYZ n° 157, p. 57-60

■ Chronologie du gouffre le plus profond du monde

On peut définir la naissance de la spéléologie par les premières approches raisonnées du monde souterrain. Nous avons fait partir notre état en 1748, lorsque sur ordre de l'empereur d'Autriche, le mathématicien Thomas Nagel fut descendu dans le puits d'entrée de Macocha Propast (Tchéquie) et y fit quelques observations et des mesures de température. Il est certain que depuis la préhistoire, bien avant Nagel, certains hommes ont pu descendre bien plus bas. Nous pensons particulièrement à la Chine où dans les gigantesques puits appelés Tiankengs, des chasseurs ont pu aller chercher des nids d'hirondelles dans les parois.

1748	Macocha Propast (Tchécoslovaquie)	138 m
1839	Grotta di Padriciano (Italie)	226 m
06.04.1841	Abisso di Trebiciano (Italie)	329 m
1909	Nidlenloch (Suisse)	376 m
10.08.1923	Geldloch (Autriche)	464 m
1934	Antro di Corchia (Italie)	480 m
05.08.1944	Système de la Dent de Crolles (France)	512 m
07.08.1945	Système de la Dent de Crolles (France)	549 m
04.05.1947	Système de la Dent de Crolles	603 m
14.08.1953	Sima de la Piedra de San Martin (Espagne)	689 m
25.09.1954	Gouffre Berger (France)	903 m
29.07.1955	Gouffre Berger (France)	985 m
11.07.1956	Gouffre Berger (France)	1 122 m
13.08.1963	Gouffre Berger (France)	1 135 m
24.08.1966	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 171 m
10.08.1975	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 273 m
23.08.1975	Réseau de la Pierre Saint-Martin (France)	1 321 m
05.07.1979	Réseau Jean-Bernard (France)	1 358 m
02.03.1980	Réseau Jean Bernard (France)	1 402 m
21.02.1981	Réseau Jean Bernard (France)	1 455 m
15.02.1982	Réseau Jean Bernard (France)	1 494 m
11.11.1983	Réseau Jean Bernard (France)	1 535 m
02.12.1989	Réseau Jean Bernard (France)	1 602 m
26.01.1998	Gouffre Mirola – L. Bouclier (France)	1 610 m
Août 1998	Lamprechtsofen – PL2 (Autriche)	1 632 m
Juin 2001	Kublera - ou Voronja - (Géorgie)	1 710 m
06.01.2003	Gouffre Mirola – L. Bouclier (France)	1 733 m
Juillet 2004	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	1 823 m
19.10.2004	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 062 m
Sept. 2006	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 158 m
Août 2012	Kublera – ou Voronja - (Géorgie)	2 196 m