

UN NOUVEAU SYSTÈME DE POSITIONNEMENT SOUTERRAIN: L'UGPS

Paul Courbon

Une grande satisfaction pour un topographe : la réussite d'un forage. Ici, par -465 m au gouffre Qattine Azar (Liban). Ph. T. Comaty

Outil extraordinaire, inimaginable il y a 50 ans, le GPS s'est imposé partout où il y a un problème de positionnement. Réservé au départ aux professionnels, il s'est démocratisé et généralisé aux non professionnels et à tous les gens qui se déplacent. Bien que fonctionnant grâce aux satellites, le GPS n'inclue pas ce terme dans son sigle qui signifie *Global Positioning System*, en bon Français *Système de Positionnement Global*, le *Global* pouvant être interprété comme *Mondial*. Mais, dans l'esprit de tous les gens GPS est maintenant inséparable des satellites, bien que S ne soit pas l'initiale de satellite !

Nos amis Suisses sont en train d'étudier un nouveau système de positionnement souterrain très innovant qu'ils ont nommé UGPS (*Underground Global Positioning System*), en bon Français toujours, *Système Global de Positionnement Souterrain*. Bien que cette appellation UGPS puisse se justifier, elle va créer une grande ambiguïté pour le spéléo de base, qui va l'associer aux satellites, alors que ce système n'en a pas besoin pour fonctionner. Est-ce involontaire ou commercial ? Pour éviter toute ambiguïté, j'emploierai dans les lignes qui suivent : UGPS et GPS satellitaire.

PRESENTATION DU SYSTEME UGPS

La grande originalité de ce système est qu'il va pouvoir fonctionner en *Temps Réel*, technique que les professionnels appellent RTK (*Real Time Kinematic*), même quand ce sont de bons Français qui publient dans une revue française ! La traduction française en est *Temps Réel Cinématique*. Pour le profane, que signifie *Temps Réel* ? Cela signifie simplement que sur l'ordinateur de surface associé au système, on va pouvoir suivre en permanence l'itinéraire du spéléologue qui se déplace dans la cavité avec une balise émettrice. Chaque fois que ce spéléologue va déclencher un signal, le point où il se trouve va apparaître sur l'écran de l'ordinateur où seront enregistrées ses coordonnées XYZ. Cela signifie qu'en surface, on pourra dresser le plan de la cavité, en même temps que le spéléologue porteur d'une balise la parcourt. Où s'arrêtera-t-on ? C'est prodigieux, mais cela n'enlèvera-t-il pas au spéléologue la jouissance de faire les mesures puis de reporter son lever en surface, prolongeant ainsi les plaisirs de l'exploration ? *O tempora o mores* comme aurait dit Cicéron, il y a vingt siècles ! Mais, qu'on ne se fasse aucune illusion, comme nous allons le voir, le systè-

me UGPS a comme objectif une utilisation professionnelle et il nécessitera une mise de fonds et la mise en œuvre de moyens qui dépasseront largement l'achat d'une boussole Sunto et d'un distancemètre électronique.

LES TECHNIQUES QUI ONT PRECEDE

Le positionnement souterrain utilisant des procédés électromagnétiques pour remplacer un lever topographique et son report en surface ne date pas d'hier. D'après Henri Paloc, déjà vers 1975, ce procédé avait été employé pour faire le forage de captage des Sources du Lez près de Montpellier. Dans les années 1990, plusieurs déterminations avaient été faites et en 1999, j'avais expérimenté au Liban le nouveau procédé Arcas mis au point par Joan Erra de Toulon. Nous avons alors traversé 300 m de calcaire pour déterminer la position d'un siphon (-465) sur lequel était placée une bobine émettant un champ électro magnétique. En surface, une bobine de réception permettait de déterminer la direction des différentes lignes de champ, dont l'intersection donnait la verticale de la balise souterraine et ses coordonnées XY. La profondeur pouvait être aussi calculée, mais avec moins de précision.

Avec UGPS, on utilise toujours un procédé électromagnétique, mais en élargissant le champ de détermination en XY loin de la verticale.

Bien qu'un premier prototype ait été mis au point entre 2007 et 2009 les chercheurs en sont encore qu'au stade de l'amélioration et du développement du système. Il faut préciser que l'origine du projet est dû à l'Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA). D'autres partenaires se sont joints à ce projet et la société Infra-survey basée à la Chaux-de-Fonds a été créée pour exploiter commercialement le procédé.

Ci-après, je fais une synthèse d'un article publiée par Jean-Baptiste Caverne dans une revue topographique destinée aux professionnels. Je m'efforce d'en faire une synthèse accessible au plus grand nombre de lecteurs de Spelunca et me limite à la seule application aux cavités naturelles que nous explorons.

PRINCIPE DE BASE

Plus une longueur d'onde est grande, mieux elle peut traverser un milieu solide tel que la roche. Cette propriété est utilisée depuis que des détermina-

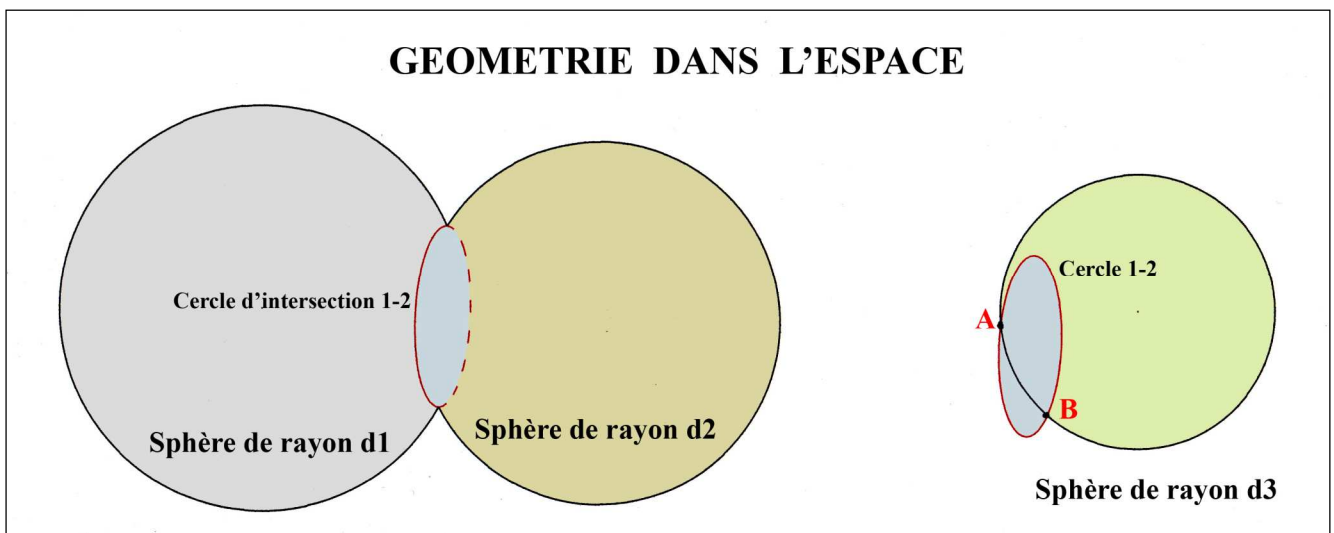
tions électromagnétiques sont faites sous terre. Dans l'UGPS, un choix a été fait entre 1000 et 2000 Hz, un compromis entre la taille des solénoïdes utilisés dans les balises et la pénétration des ondes dans la roche. Cette fréquence est obtenue par un oscillateur placé entre la batterie et les solénoïdes qui constituent l'âme de l'émetteur et du récepteur. Il est évident qu'avec des fréquences de 1575 et 1227 MHz, c'est-à-dire un million de fois plus élevées, les messages émis par les satellites ne peuvent pénétrer sous terre.

Les expériences ont démarré à partir d'un émetteur porté par un spéléologue se déplaçant sous terre et d'un récepteur placé en surface, bien déterminé en XYZ, bien calé en verticale et orienté suivant le nord magnétique. L'émetteur envoie des signaux d'une durée de 1,1 seconde, dans toutes les directions, à la commande du spéléologue le transportant. Grâce à une technologie complexe, l'interprétation du signal reçu permet de déduire ΔX , ΔY , ΔZ . Les coordonnées du récepteur étant connues, on en déduit immédiatement celles de l'émetteur à l'ins-

tant où il a émis ses signaux.

Pour améliorer la précision, on a recommencé l'opération avec deux récepteurs en surface, ce qui permettait un contrôle. En comparant les résultats à ceux d'une topographie précise faite au théodolite, on a constaté que si jusqu'à 60m on avait des écarts en X et Y compris entre 10 et 40 cm. Les précisions en Z étaient beaucoup moins satisfaisantes, dues au défaut de directivité des bobines connu des spécialistes du magnétisme. Pour répondre aux exigences d'un usage professionnel, on s'est orienté vers une méthode ayant une analogie avec la quadrilatération que nous allons voir plus loin. Nous sommes donc loin des systèmes qui ont précédé l'UGPS, lesquels n'utilisaient que la direction des lignes de champ magnétique d'une bobine.

Je rappelle que dans les distancemètres électroniques, utilisés dans une topographie classique, la mesure de distance est calculée à partir du déphasage entre l'onde émise et l'onde réfléchi. Dans le GPS satellitaire, elle est déduite du déphasage entre l'onde émise par le satellite et celle reçue par le récepteur.



Principe de la multilatération. Avec 3 distances d_1 , d_2 , d_3 , on obtient deux solutions A et B, faciles à trancher.

Rien de cela dans l'UGPS, où il n'y a pas à proprement parler de véritable mesure de distance à partir d'un déphasage. L'onde magnétique issue de l'émetteur est interprétée par les quatre récepteurs. A partir de l'analyse des caractéristiques de cette réception et de son intensité, on obtient des informations permettant de calculer les coordonnées XYZ de la balise émettrice.

LA MULTILATERATION

La multilatération est un terme employé lorsqu'on utilise plusieurs distances pour déterminer un point inconnu. C'est la méthode qui est employée dans le GPS satellitaire, où grâce aux signaux émis par les satellites, on mesure à un instant précis t la distance entre les satellites et le récepteur GPS. A cet instant t , les coordonnées des satellites étant connues au millimètre près, les distances mesurées permettent de déterminer les coordonnées du récepteur.

Géométriquement, les distances d_1 , d_2 , d_3 ,... permettent de tracer des sphères de rayon équivalent autour des satellites correspondants. L'intersection de deux sphères donne un cercle et celle de la troisième sphère avec ce cercle donne deux points. Cette

indétermination est facile à lever en fonction de l'emplacement de ces deux points. Une quatrième sphère est plus pratique pour lever l'indétermination et elle permet en outre un contrôle et un affinement des coordonnées.

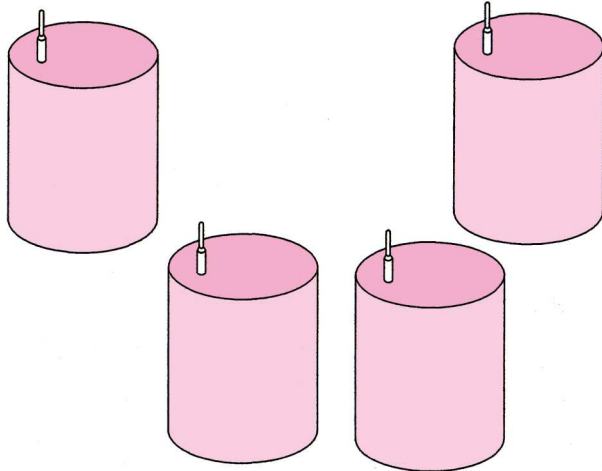
En GPS satellitaire, le quatrième satellite permet surtout de déterminer le décalage entre l'horloge des satellites et celle du récepteur, nécessaire à une bonne détermination des distances. Les satellites supplémentaires permettent d'améliorer la précision de la mesure.

LE DEVELOPPEMENT DE L'UGPS

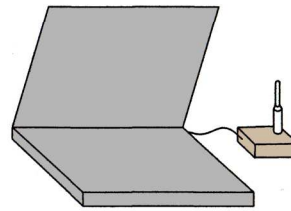
Maintenant que nous avons vu le principe de la multilatération, comment l'appliquer sous terre ? Au lieu de quatre satellites, nous aurons quatre balises réceptrices placées en surface et dont les coordonnées XYZ auront été déterminées avec le maximum de précision. Là s'arrête la comparaison avec le GPS satellitaire. Ici, nous n'aurons pas quatre distances issues du déphasage comme avec les satellites. Mais le fait d'avoir quatre balises réceptrices, permet surtout de bien cadrer la zone de relevé et d'obtenir une grande redondance des mesures, dont la combi-

MATERIEL UTILISE PAR L'UGPS

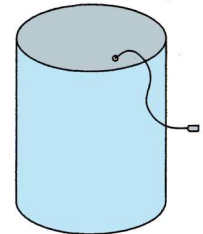
4 Balises réceptrices connues en XYZ avec liaison vers le modem



1 ordinateur connecté à un modem



1 balise émettrice itinérante avec déclenchement manuel



naison améliorera la précision.

En surface, les coordonnées des balises réceptrices peuvent être déterminées classiquement avec un théodolite électronique. Cependant, nous verrons plus loin qu'il est plus pratique de le faire avec un GPS différentiel, c'est-à-dire du matériel de professionnel. Mais, à partir de cette utilisation, il est inapproprié de dire que l'UGPS est la prolongation du GPS sous terre !

En surface, nous avons aussi un ordinateur portable ayant une liaison par modem avec les quatre balises réceptrices. Sous terre, le spéléologue dirige la balise émettrice au mieux vers le nord, comme les balises de surface. Dès qu'il déclenche les signaux de la balise souterraine, les 4 balises de surface vont fournir à l'ordinateur toutes les mesures enregistrées. A partir des coordonnées des balises de surface, un logiciel adéquat va analyser ces mesures et calculer immédiatement les coordonnées XYZ de la balise souterraine qui va apparaître sur l'écran. A chaque émission de signaux, un nouveau point apparaîtra sur l'écran ! On pourra tracer la trajectoire du spéléologue en temps réel, à quelques secondes près ! Deuxième similitude avec le GPS satellitaire temps réel.

Description du matériel

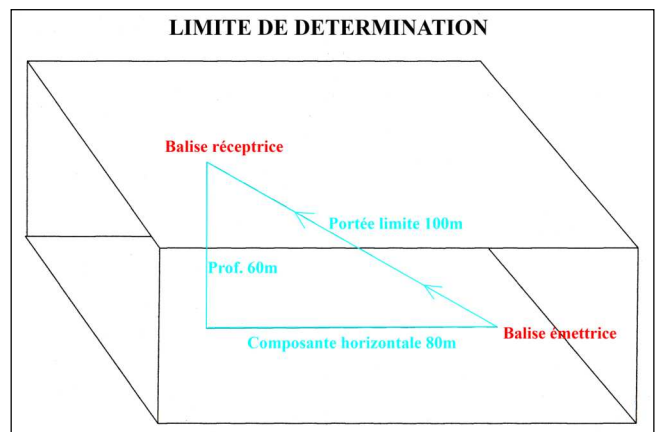
Les quatre balises réceptrices et la balise émettrice ont la même taille, dictée par celle des solénoïdes enfermés dans un cylindre en PVC. Ce cylindre a un diamètre de 25 cm et une longueur de 45 cm. Le bobinage des balises est installé selon 3 axes particuliers, et la combinaison de l'émetteur et d'un récepteur donne $3^2=9$ informations, soit 36 informations pour les quatre balises réceptrices. Les quatre bobines réceptrices sont surmontées chacune d'une antenne pour liaison avec le modem associé à l'ordinateur portable, dont le logiciel va analyser les 36 informations et faire les calculs. La balise émettrice n'a pas d'antenne, mais un fil avec un interrupteur permettant de déclencher les signaux. Dans les images visibles sur internet, les bobines réceptrices sont placées sur un socle permettant d'assurer correctement leur orientation horizontale et surtout verticale.

Les limites actuelles

La grande limite actuelle réside dans la portée de l'émetteur, c'est-à-dire la distance maximale permettant d'analyser l'onde reçue avec une précision acceptable. Nous avons vu précédemment les précisions issues des essais publiés par J.B. Caverne. Le site d'Infrasurvey annonce 1m de précision à 100m et une portée de 200m. Mais si on a 1m de précision à 100m, cela veut dire qu'on aura une précision nettement insuffisante à 200m, car l'intensité du signal diminue proportionnellement au cube de la distance.

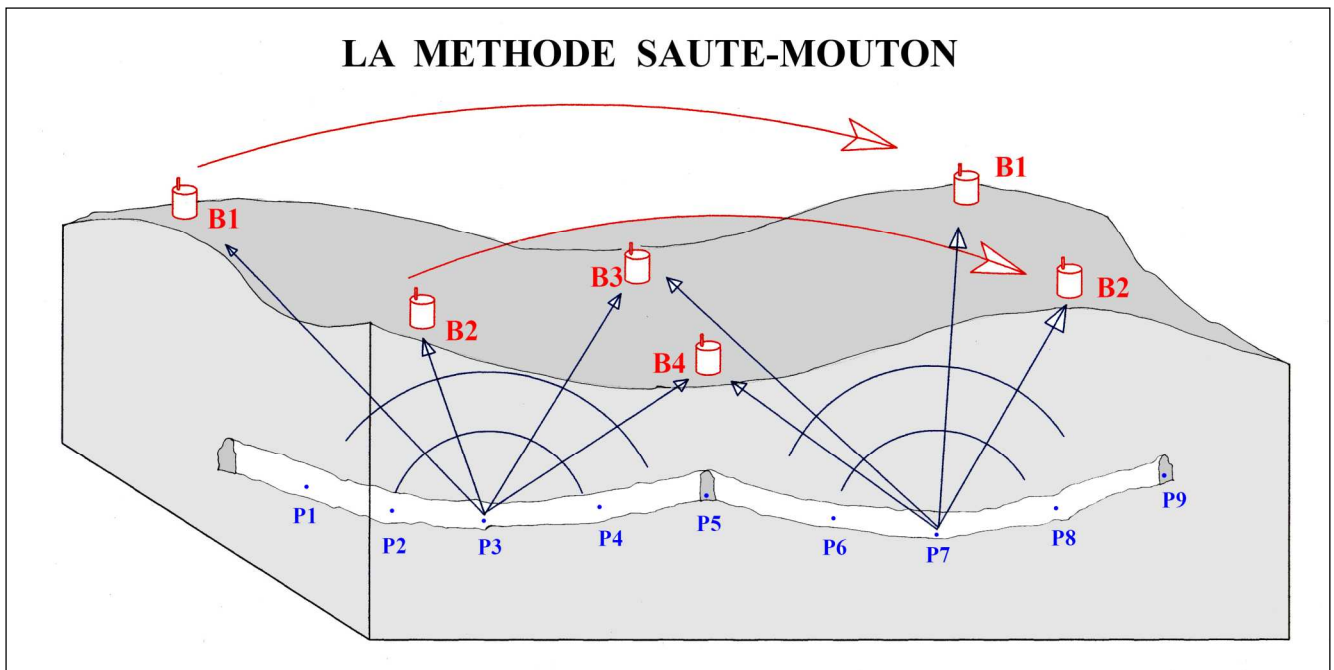
Cela change tout. Si, dans un souci de meilleure précision, on limite la portée à 60m, il est évident qu'une balise située à 40m de profondeur, ne peut être déplacée horizontalement que sur 40m. Si on admet une précision métrique, avec une portée de 100m, ce déplacement horizontal passe à 80m à une profondeur de 40m. On voit que plus la balise émettrice est profonde, plus le déplacement latéral est restreint. Des recherches sont faites pour augmenter cette portée en augmentant le temps d'émission de la balise.

Pour pouvoir continuer le lever au-delà de cette limite, il faudra jouer à saute-mouton avec les balises réceptrices. C'est-à-dire que dès qu'on atteint



Avec cette portée limite, plus la galerie à relever sera profonde, plus la composante horizontale sera faible.

LA METHODE SAUTE-MOUTON



Du fait de la portée limite, le lever de la galerie doit se faire plusieurs en tronçons. Ici, un premier lever a été fait du point 1 au point 5. Il faut ensuite faire passer les balises 1 et 2 au-delà des balises 3 et 4 pour lever un nouveau tronçon avec les points 5 à 9, 5 étant pris deux fois à titre de contrôle. Et ainsi de suite.

la limite de détermination correcte des XYZ, il faudra enlever les balises 1 et 2 et les placer au-delà des balises 3 et 4 qui restent en place. Et ainsi de suite. Cela veut donc dire qu'à chaque déplacement des balises de surface, il faudra déterminer leurs nouvelles coordonnées, ce qui pour le relevé d'une cavité longue est une contrainte importante. Il a donc été envisagé de pouvoir accoupler un GPS satellitaire à chaque balise réceptrice, ce qui fournira automatiquement sa position à l'ordinateur. Mais, si voulons une précision inférieure au mètre, il est évident qu'il faudra utiliser des GPS différentiels professionnels d'un prix non accessible aux amateurs !

Autre aspect à envisager : le déplacement des balises de surface au fur et à mesure du lever est un élément pénalisant qui nécessite une équipe souterraine et une équipe conséquente en surface. Durant les arrêts dus au déplacement et au repositionnement des balises de surface, il faut avertir l'équipe de fond, pour qu'elle arrête sa progression. Cela exige une liaison phonique pouvant alourdir la manipulation.

Pas de problème pour relever le Rupt du Puits qui étend ses galeries à moins de 30 m de profondeur sous les reliefs très sages de la Meuse. Mais pour les gouffres de montagne, quand un abrupt ou une falaise peut couper l'itinéraire ? A propos de gouffres de montagne, ce n'est pas encore avec la portée actuelle du système qu'on pourra relever un -1000 !

En guise de conclusion

Techniquement, l'UGPS est un concept très intéressant qui va connaître certainement des développements et des améliorations sensibles, surtout s'il est destiné à un usage professionnel. Une mini-

aturisation de l'émetteur est étudiée pour pouvoir le déplacer dans une conduite souterraine inaccessible à l'homme. Mais dans l'état actuel de son développement, spéléos n'avez pas, ce n'est pas demain que vous l'utiliserez !

Remerciements: Je remercie J.B. Caverne qui a répondu aimablement aux questions que je lui ai posées.

BIBLIOGRAPHIE

- R. VANDEVINNER, 1989, Localisation électromagnétique au réseau de Fresne (Bel), Bull. Soc. Spél. Namur, pp 16-20.
- S. SHOPE, 1991, A theoretical model of radio location, NSS Bull., vol. 53 n° 2, pp. 83-88
- A DELPY, 1992, Emission-réception électromagnétique appliquée à la localisation depuis la surface des galeries accessibles du karst, Actes du XIX^e congrès Nat. de Spél., Montpellier, Spelunca Mémoires n° 19, pp. 101-105.
- B. LISMONDE, 1992, Repérage magnétique au réseau Christian Galtier, Scialet n° 21, pp. 81-83.
- D. GIBSON, How accurate is radio location? Cave and Science vol. n° 2, pp. 77-80.
- A. COMATY, P. COURBON, B. JABOUR-GEDEON et J. ZAATAR, 2001, Radio localisation dans le gouffre de Qattine Azar, Proceedings of the Middle-East Speleology symposium, Beyrouth, pp.122-129.
- P. COURBON, 2002, Mode de positionnement topographique et électromagnétique d'un siphon, Karstologia n° 40, pp. 19-26
- P. COURBON, 2003, Histoire d'eau, positionnement d'un siphon en surface, XYZ n° 95, Association Française de Topographie, Paris, pp.37-42.
- Jean-Baptiste CAVERNE, 2011, U-GPS : un prolongement du système GPS sous terre, XYZ N° 126, Association Française de Topographie, Paris, pp. 27-36

On peut aussi consulter le site : www.infrasurvey.ch