



Station GPS sur le Mont Aubert et entrée dans la grotte de Vers-chez-le-Brandt avec un émetteur U-GPS (Suisse - canton de Neuchâtel).

U-GPS : un prolongement du système GPS sous terre

■ Jean-Baptiste CAVERNE

Le GPS est devenu un outil pratique et usuel pour de nombreuses applications, aussi bien en topographie que dans d'autres domaines. Cependant, nécessitant une communication avec des satellites, il n'est pas utilisable en sous-sol. Ainsi dans les mines, les grottes, les tunnels et autres cavités, il faut se passer de ses services. Ce navrant constat pour les professionnels du monde souterrain a amené l'Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA) à décider de mettre sur pied un moyen de positionnement direct de points en souterrain. Ensuite, grâce à des partenaires experts en microtechnique, l'U-GPS a pu voir le jour, rendant possible le suivi en temps réel, depuis la surface sur ordinateur, d'un émetteur se déplaçant dans une grotte. Afin de gagner en efficacité et en précision, ce tout nouvel outil a fait l'objet de tests, qui ont permis de mieux comprendre quels sont les facteurs source d'erreur. Ces expériences doivent encore se poursuivre. En plus, avec la pratique, des protocoles d'utilisation se mettent en place. Mais, l'ampleur des possibilités offertes fait de ce système novateur, une technologie très prometteuse.

Cet article présente une application du levé topographique en milieu souterrain, et étudie en particulier une nouvelle méthode attractive. Tout d'abord, il convient de situer le sujet dans son contexte qui est celui de la localisation sous terre. Les conditions de travail dans ce milieu sont particulièrement difficiles et ce à cause de différents phénomènes. Déjà l'obscurité des galeries rend l'utilisation de lumière artificielle indispensable, ensuite on peut être également gêné par l'humidité ou encore par l'exiguïté de certains boyaux. De plus, le développement des mines ou des cavités naturelles prend souvent un caractère labyrinthique, le risque de se perdre vient s'ajouter à toutes ces contraintes. Ces caractéristiques font que malheureusement, parmi tous les milieux naturels, le milieu souterrain est un des plus ignorés. Or il est de plus en plus sollicité par la spéléologie sportive et scientifique ainsi que par le

tourisme individuel ou de masse. Il est convoité par les milieux agro-alimentaires (champignonnières, brasseries) et industriels (carrières, stockage de déchets toxiques), sans oublier les risques d'effondrements liés à la présence de cavités souterraines. Donc le besoin de cartographeur sous terre s'est rapidement fait sentir et des outils utilisés en surface ont été adaptés à cet environnement, cependant ce travail est resté très contraignant. Avec l'arrivée du GPS, il est devenu possible d'obtenir les coordonnées globales d'un récepteur presque n'importe où à la surface de la Terre, grâce à un réseau de satellites aux trajectoires soigneusement contrôlées. Mais en milieu confiné, il est impossible de recevoir le signal, donc, pour le relevé de galeries souterraines, il faut encore recourir aux méthodes classiques (Figure 1). Dans le but d'apporter une réponse technique à ce manque, l'Institut



■ MOTS-CLÉS

Spéléologie, topométrie souterraine, électromagnétisme, prototype, cartographie, GNSS (Global Navigation Satellite System)



Figure 1. Tachéométrie en grotte.



Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA), a décidé de promouvoir une technologie qui rende possible la détermination et le suivi en temps réel de la position d'un objet situé dans des galeries souterraines naturelles ou artificielles.

C'est ainsi qu'entre 2007 et 2009, un premier prototype a été mis au point dans le cadre d'un projet impliquant plusieurs partenaires. Au cours de ces diverses activités, l'Institut a recours à des moyens de relever et de modéliser les cavités. En tant que professionnel du milieu souterrain et organisme porté vers la recherche scientifique, c'est donc tout naturellement qu'il est venu l'idée à certains spéléologues, habitués à devoir parfois adapter eux-mêmes le matériel aux conditions particulières de leur utilisation, de développer un système similaire au GPS, utilisable sous terre.

Pour la partie technique du projet, une collaboration avec une société issue d'une technologie innovante a été nécessaire. La société Motilis a mis au point une technique pour l'étude de la faculté de motilité du tube digestif sans risquer d'affecter l'organisme exploré. Deux des ingénieurs à l'origine de cette société, ont décidé d'exporter le principe de base utilisé jusque-là dans le domaine médical, pour mettre au point un système capable de recevoir des informations de position à travers la roche. Etant experts en micro-technique, ils ont mis au point les balises composant le système, ainsi que le logiciel de traitement.

Pour financer le développement, un bureau de géomètre (GeoConseils SA) a décidé d'investir dans ce projet. Enfin, l'Institut de l'Environnement Industriel et des Risques français (INERIS) a montré un intérêt certain pour le projet car il voit en ce nouvel appareil, un outil aux nombreuses applications très utile, comme par exemple la localisation de vides souterrains, qui constituent un véritable danger dans certaines communes. Le financement du projet a été complété par un fonds pour le développement de technologies dans le domaine de l'environnement de la Confédération suisse.

Fruit de cette collaboration, l'**Under-Ground Positioning System** a pu voir le jour.

Présentation du système

L'objectif est d'obtenir des informations tridimensionnelles directement et en temps réel, pour se rapprocher ainsi du GPS.

Un appareil permettant d'obtenir la profondeur, la position en plan, le sens de déplacement et l'orientation de l'émetteur, a donc été élaboré.

■ Fonctionnement

Concrètement, la mesure de distances et d'angles se fait en utilisant le principe d'induction électromagnétique, caractérisée par la production d'une force électromotrice sous l'effet d'une variation de flux magnétique dans un circuit.

Le système de base se compose d'un émetteur et d'un récepteur, constitués chacun de bobines ou solénoïdes, enroulement d'un fil conducteur autour d'un noyau ferromagnétique. Ces bobines sont installées avec beaucoup de précaution dans des balises en PVC, matériau non conducteur donc non susceptible de porter atteinte à la diffusion du signal.

L'émetteur est équipé d'une batterie qui fournit un courant aux bobines. Le caractère alternatif du courant circulant

dans les bobines de l'émetteur induit un champ magnétique alternatif dont les lignes de champ sont concentriques aux bobines. Chaque onde magnétique est un signal oscillant (le sens du vecteur champ change alternativement) dont la fréquence dépend directement de la fréquence du courant électrique alternatif qui l'a créé.

Ainsi, en connaissant la fréquence du courant alternatif fourni par le biais de la batterie à l'émetteur, nous connaissons la fréquence de l'onde magnétique se propageant autour de celui-ci. Nous cherchons alors cette fréquence d'onde particulière avec les bobines des balises réceptrices. Les informations induites par la réception du signal suivant chaque bobine permettent d'obtenir la position et l'orientation de l'émetteur.

Vis-à-vis de la fréquence, on sait que plus la longueur d'onde est grande, plus cette onde peut pénétrer et traverser un milieu solide : les basses fréquences sont donc les plus appropriées. Un choix entre 1000 et 2000 Hz a été fait pour s'affranchir au mieux de l'absorption des roches, il s'agit du résultat d'un compromis sur la taille de la balise (25/45 cm) et le temps d'émission (1,1 sec).

Le récepteur convertit les signaux de l'émetteur et transmet les informations par liaison radio à un ordinateur central par le biais d'un collecteur (Figure 2). Sur l'ordinateur, un logiciel

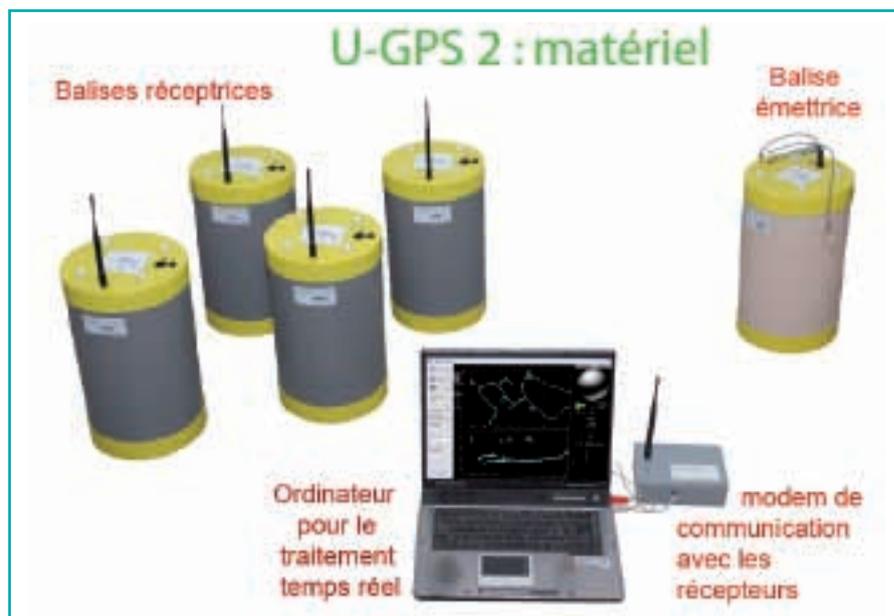


Figure 2. Présentation des composants du système.

dédié permet l'acquisition et la visualisation des données suivantes : coordonnées cartésiennes locales, orientation de l'émetteur, distance à l'émetteur et divers indicateurs de fiabilité des mesures.

Il faut préciser ici qu'une seule balise réceptrice suffit pour obtenir des informations de positionnement, mais le fait d'en utiliser plusieurs augmente la fiabilité et/ou le champ d'application du système.

■ Limites apparentes

Dès les premiers essais, il a été constaté que le signal est soumis à certaines interférences. Tout d'abord il est soumis à celles passives comme l'absorption ou la déformation de l'onde magnétique émise. Ainsi les couches de sol traversées peuvent absorber une partie de l'onde. On détecte ce phénomène en calculant un déphasage, écart entre le signal théorique et celui reçu à la distance considérée. De même les lignes de champ peuvent être déviées et ainsi déformées par certaines couches (courants de Foucault). Une comparaison sur un principe similaire au calcul cité précédemment, permet d'évaluer cette déformation.

Le système prend aussi en compte les interférences actives auxquelles il peut être assujéti, interférences provoquées par le "bruit de fond" magnétique ambiant, provenant de tout type d'appareil électrique ou des ondes présentes dans notre environnement. Pour évaluer ce bruit, l'appli-catif indique la portée du signal en distance jusqu'à laquelle le rapport signal sur bruit est suffisant pour être interprété. Cependant, il est préférable de travailler à une distance des récepteurs, n'excédant pas la moitié de l'indication de portée mentionnée à l'écran pour chacune des balises.

Sur le terrain, dans des conditions optimales, on peut atteindre une indication allant jusqu'à 350 m, garantissant donc une précision métrique jusqu'à 175 m de distance émetteur/récepteur.

En fonction des valeurs données par ces différents indicateurs, on peut avoir une idée sur la qualité des mesures, même si un lien direct entre précision et indices d'interférence n'a pas encore pu être élaboré.

Si la portée est trop faible ou l'absorption et la déformation trop fortes, la possibilité d'effectuer le levé U-GPS peut être largement compromise. Cependant, il existe des solutions potentielles pour remédier à cette limite importante du système, qui sont actuellement mises au point, comme par exemple une durée d'émission plus longue.

■ Principe de levé des positions souterraines

D'abord, pour obtenir des coordonnées relatives fidèles, l'orientation des bobines est importante. Elles ont été mises en place dans chaque balise suivant des axes précis. L'utilisation du système requiert donc de pouvoir orienter le récepteur vers le Nord, usuellement avec une boussole, pour se trouver dans un système de coordonnées pseudo-géographique (déclinaison magnétique non prise en compte pour l'instant car inférieure à la précision nécessaire à la mise en station). En pratique, on oriente également l'émetteur vers le Nord, de manière à optimiser l'émission du signal, en effet si les axes des bobines d'émission et de réception sont parallèles le signal reçu sera plus fort et donc moins affecté par le bruit magnétique. Par rapport au principe de levé, en utilisant une seule balise réceptrice, on obtient une redondance d'informations car le dispositif reçoit neuf informations (trois par axe de trièdre de bobines) et six inconnues sont recherchées, la position XYZ et l'orientation selon les trois axes du repère cartésien de la balise émettrice. En poursuivant cette logique, avec quatre balises, on obtient trente-six informations, ce qui permet d'évaluer statistiquement les erreurs aléatoires, induites par le système, dont certaines pourraient être qualifiées de systématiques, en envisageant d'éventuelles corrections quand elles seront mieux modélisées. De plus à partir de quatre balises, on peut calculer les coordonnées à l'aide des mesures de distance, trois pour le calcul de multilatération plus une pour contrôle. Comme la mesure de distance semble être plus précise, car moins sensible à l'environnement, alors l'utilisation de quatre balises

devrait être privilégiée. Cependant, il arrive que la configuration des récepteurs en surface rende le calcul d'intersection des sphères de distance mesurée peu précise, dans le cas de tangence par exemple, pour identifier ces cas, l'utilisation d'un indicateur type GDOP (*Geometric Dilution Of Precision*), à corrélérer avec les indicateurs existants, est envisagée.

■ Rattachement du sous-sol à la surface

La position de la balise qui se déplace dans le milieu souterrain est fournie relativement à celles des balises réceptrices fixes, situées approximativement à l'aplomb en surface. Donc pour rattacher les points obtenus dans la cavité à un système de coordonnées, il est nécessaire de disposer de points connus, sur lesquels installer les balises fixes de référence.

Il convient d'abord de noter que c'est en complément du GPS que l'U-GPS a été développé, c'est donc le rattachement avec récepteurs GPS qui devrait être utilisé prioritairement (*Figure 3*). De plus, cela permettra prochainement le suivi en temps réel des récepteurs en surface, plutôt qu'une détermination fixe, rendant ainsi le système plus dynamique.

D'ailleurs, un appareillage GPS spécifique est en train d'être développé à la

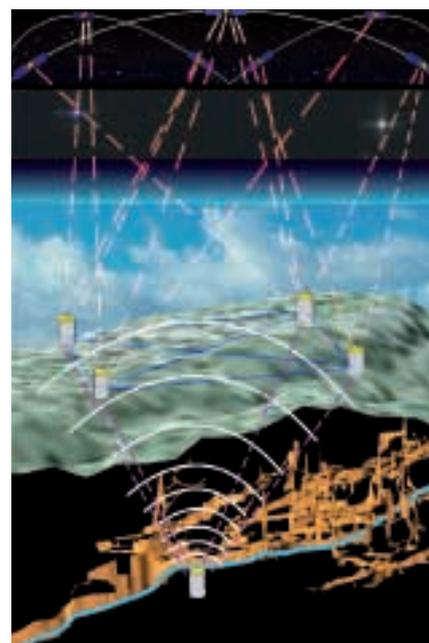


Figure 3. Du GPS à l'U-GPS.

HEIG-VD d'Yverdon (Canton de Vaud, Suisse), section Géomatique, qui pourra s'adapter particulièrement bien aux besoins en positionnement absolu des balises de référence de l'U-GPS.

En attendant le développement de cet appareillage, on peut dire que la méthode DGPS Réseau peut suffire pour la détermination de ces coordonnées en surface. En effet, elle atteint une précision de 10 à 20 cm, ce qui est meilleur que la précision initialement métrique de l'U-GPS, sans pour autant être prohibitif pour l'utilisateur, en termes de délais, de technicité et de prix. Par contre, l'utilisation de GPS de navigation grand public s'est montrée insuffisante pour le rattachement des récepteurs.

En outre, si on ne dispose pas de la technologie GPS, on peut toujours définir un système local, en déterminant une balise origine et en mesurant les coordonnées relatives des autres récepteurs avec des appareils classiques.

En règle générale, la précision des coordonnées des points de base du levé doit être au moins inférieure à l'écart-type obtenu entre les mesures d'un même point par le système, typiquement à quelques décimètres, dans les cas favorables.

Pour faire suite à cette description, la partie suivante expose certains des axes d'étude sur lesquels mon travail de recherche a essentiellement porté.

Caractérisation du système

■ Calibration

En pratique, la calibration des caractéristiques magnétiques des balises s'effectue par couple émetteur/récepteur et consiste à mesurer plusieurs fois une ligne de base connue, en changeant l'orientation d'une des deux balises. La comparaison des mesures obtenues avec des valeurs théoriques

fournit des résultats à appliquer directement aux mesures de terrain.

La pratique de l'appareil a montré qu'il serait important par la suite d'échelonner les mesures de calibration à différentes distances pour vraiment contrôler la dilution de la précision avec l'augmentation de la distance émetteur/récepteur. Typiquement, en disposant d'un site aménagé de manière à servir de banc d'étalonnage pour le système, il sera envisageable de pouvoir contrôler l'ensemble des paramètres intrinsèques des balises.

Sur le terrain, les sites les plus adaptés sont des anciennes mines, des tunnels abandonnés ou autres faciles d'accès avec de longues galeries rectilignes pour envisager des longues portées mais l'environnement ferromagnétique doit être soigneusement testé et la géologie doit être propice c'est-à-dire comportant des couches peu conductrices et magnétiquement peu absorbantes.

Le site retenu doit notamment permettre d'obtenir les mêmes résultats en inversant le couple émetteur-récepteur.

■ Configuration émetteur / récepteur

Quant aux caractéristiques propres du système, j'ai d'abord voulu savoir si l'emplacement particulier du récepteur par rapport à l'émetteur, avait un impact sur la qualité des résultats. Il s'agit de vérifier l'homogénéité du système en orientation.

A partir de la disposition suivante *Figure 4* : 1 émetteur au fond et 1 récepteur en surface, environ à l'aplomb l'un de l'autre, quatre séries de 20 mesures ont été lancées, l'une avec le récepteur décalé de l'aplomb de 20 m vers l'Est, puis vers le Sud, l'Ouest et le Nord, par jalonnement.

Or, à part une valeur différente en X vers le Sud, qui peut s'expliquer par une ligne haute tension présente de ce

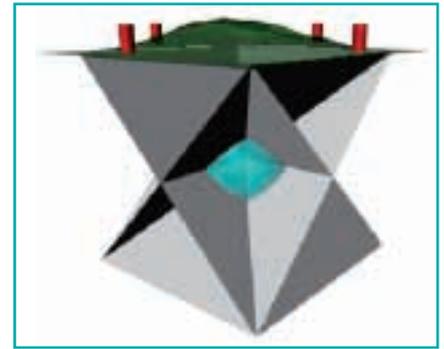


Figure 4. Quatre positions successives du récepteur en rouge.

côté, on peut dire qu'aucun problème d'homogénéité d'orientation n'a été mis en évidence par ce test comme le montre les données du *tableau 1*.

On constate que la dispersion est de l'ordre du décimètre sur les différentes coordonnées obtenues ainsi que sur les directions et les distances quelle que soit la position du récepteur.

J'ai pu en conclure que le système n'a pas de direction privilégiée quant à l'implantation des balises, de ce point de vue il est homogène.

Precision et exactitude du système

Plusieurs grottes et mines ont fait l'objet de mensurations topographiques, et sont donc dotées de points de référence connus en coordonnées nationales.

Il est donc intéressant de relever ces points avec le système U-GPS pour évaluer sa précision.

On peut aussi faire varier les conditions de mesure comme l'implantation des récepteurs ou leur nombre, de manière à estimer l'influence de divers paramètres.

Dans une première expérience, avec deux balises réceptrices installées à l'entrée d'une mine, quatre autres points, connus dans le système de référence suisse et implantés par tachéométrie, tous situés de 35 à 100 m de l'entrée, ont été mesurés successivement avec l'appareil.

Tableau 1. Résultats sur la dispersion des quatre séries de mesures en mètres (système local).

		X	Y	Z	sur la direction	sur la distance
Ecart-types	Nord	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10
	Est	0,13	0,05	0,13	0,13	0,13
	Sud	0,55	0,1	0,08	0,10	0,09
	Ouest	0,1	0,05	0,09	0,10	0,10



Tableau 2. Analyse de la dispersion sur une dizaine de mesures par point, résultats en mètres obtenus suivant chaque axe X,Y et Z et en 3D (rayon XYZ) avec indicateurs de portée du signal et distance calculée. (Précision optimale si Distance < Portée/2, lien empirique) :

Dispersion :		X	Y	Z	Rayon XYZ	Portée	Distance	Commentaire
Point 1	Ec-types :	0,08	0,16	0,12	0,22	144 m	39,67 m	<portée
Point 2	Ec-types :	0,06	0,28	0,18	0,34	130 m	42,05 m	<portée
Point 3	Ec-types :	0,39	0,87	1,01	1,38	125 m	62,74 m	portée limite
Point 4	Ec-types :	1,66	6,38	5,46	8,56	120 m	96,05 m	hors portée

On constate une dispersion des points dans un rayon métrique sauf pour le point le plus éloigné, en portée limite du système, sur lequel on ne peut pas vraiment conclure. On remarque malgré tout l'augmentation de la dispersion avec l'éloignement des balises.

Tableau 3. Analyse de l'exactitude des coordonnées moyennes obtenues, résultats en mètres obtenus suivant chaque axe X,Y et Z, en 3D (rayon XYZ), en 2D (Rayon XY) ainsi que sur les distances calculées par rapport à chaque récepteur.

Exactitude :		X	Y	Z	Rayon XYZ	Rayon XY	Distance R1	Distance R1
Point 1	Décalage :	0,41	-0,36	-1,73	1,82	0,55	-0,11	0,24
Point 2	Décalage :	0,13	-0,09	-1,81	1,81	0,15	-0,17	0,12
Point 3	Décalage :	0,22	-0,12	-1,88	1,89	0,25	0,23	0,22
Point 4	Décalage :	-1,07	-1,54	-8,56	8,76	1,88	0,13	0,51

Par ailleurs, chaque point moyenné est décalé de plus d'un mètre de la position vraie, et ce à cause d'une surestimation de la profondeur bien mise en évidence (colonne Z du *tableau 3*). On voit également que les écarts d'exactitude sur les distances sont en général bien inférieurs à ceux sur les coordonnées cartésiennes (colonnes Distance R1 et Distance R2 du *tableau 3*).

On peut conclure que dans ce contexte, la précision du système est métrique en plan jusqu'à 60 m, sauf pour l'altimétrie dont les mesures restent entachées d'une erreur qui semble liée à la déformation du signal puisque l'indicateur dédié indiquait des valeurs assez

élevées (entre 30 et 40 % de déformation). Plus la distance augmente et plus le signal déformé est erroné, cela explique cette limite de précision fixée à la moitié de la portée du signal.

Dans une seconde expérience, avec quatre balises réceptrices installées en aplomb et à l'entrée d'une grotte, plusieurs points connus à l'intérieur de celle-ci ont été relevés à l'aller et au retour.

Par rapport aux résultats précédents, il a été possible de comparer le résultat issu de la multilatération et celui issu d'une moyenne simple des coordonnées obtenues par chaque balise, comparaison illustrée par la *figure 5*.

On constate une forte imprécision des résultats de la moyenne simple, les écarts par rapport aux positions vraies pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres. Cette imprécision provient vraisemblablement d'un problème d'orientation des balises de réception. En effet, une rotation en post-traitement semble pouvoir corriger certains décalages. Par comparaison, la multilatération fournit globalement, des points deux fois plus proches des points vrais, ce qui s'explique par le fait que son calcul ne prend en compte que les mesures de distance, elle est donc moins sensible à des imprécisions d'orientation. Ainsi grâce au calcul d'intersection des sphères de distance (multilatéra-

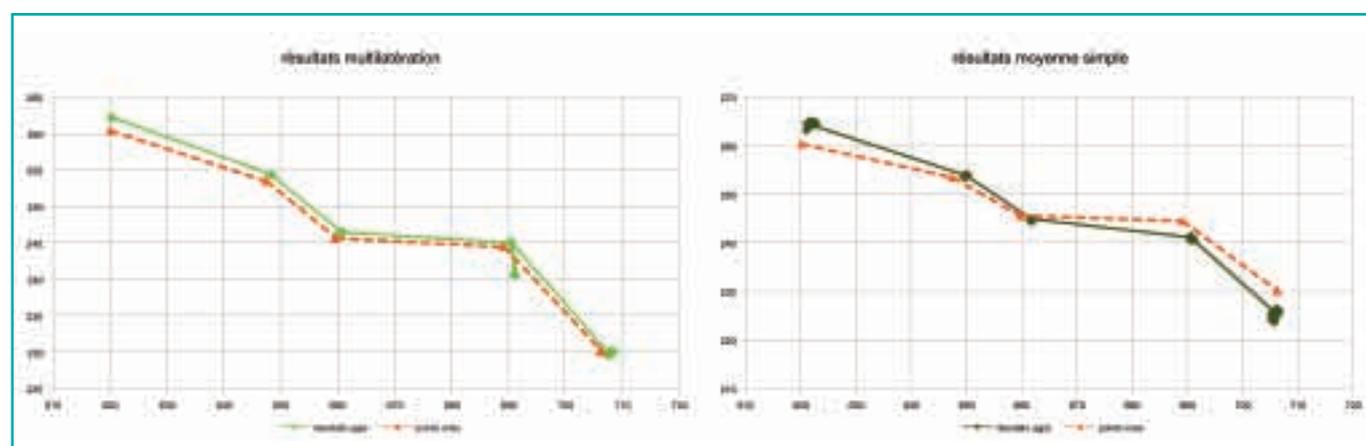


Figure 5. Le graphique de gauche correspond aux résultats issus du calcul de multilatération et celui de droite d'une moyenne simple des coordonnées, en planimétrie. Le cheminement en rouge correspond aux points connus et celui en vert aux mesures. Les coordonnées sont en mètres et font référence aux trois derniers chiffres du système de coordonnées national suisse, les récepteurs étant installés sur des points cadastraux rattachés.

tion), on obtient une précision de l'ordre du mètre, même dans un contexte assez défavorable pour des mesures directes, et la dispersion des points reste de quelques décimètres. Cependant, les tests ont donc montré des résultats assez décevants par rapport à ce qui est attendu du système, puisqu'on observe sur chaque balise une dispersion inférieure à 1 m, mais un écart d'exactitude de un à plusieurs mètres. Face à ce problème, j'ai cherché à savoir d'où pourrait provenir ces décalages problématiques et pour cela j'ai voulu caractériser l'interopérabilité des balises réceptrices et l'importance de leur orientation.

■ Interopérabilité et orientation des récepteurs

Tout d'abord, l'utilisation générale de l'appareillage a montré que l'orientation des récepteurs est primordiale et il faudra vraiment aboutir, par la suite, à un procédé d'orientation des balises de réception assez fiable, pratique et précis.

Ensuite, un test important a été dédié à l'interopérabilité de ces balises réceptrices, dont les résultats sont décrits dans la *Figure 6*. On distingue clairement chaque série de points, et on peut constater que chaque balise donne un résultat différent.

Les points reçus par balise sont inclus dans un rayon de quelques décimètres, ainsi leurs écarts-types sont de 3 dm pour la balise 8, 5 dm pour la balise 6 et 9 dm pour la balise 5.

Mais des écarts de plusieurs mètres s'observent d'une balise à l'autre, caractérisé par un écart-type de 2,4 m entre points moyens, ce qui traduit clairement un problème de calibration des balises.

En conclusion, les balises ne sont donc pas encore véritablement fongibles. Mais le fait que les résultats ne convergent pas vers le même point d'une balise à l'autre, et que ce décalage de position soit du même ordre que l'erreur d'exactitude observée sur chaque balise précédemment, montre que cet écart pourrait vraisemblablement venir d'une dégradation de la calibration des balises, ou encore que la mise en station des récepteurs doit être bien plus soignée.

Enfin, les résultats n'ont pas mis en évidence un problème sur une balise en particulier, mais il semble qu'une meilleure calibration pourrait aboutir à de meilleures mesures, c'est a priori la seule explication de ces décalages problématiques. Le potentiel d'amélioration de la précision de mesure sur système est donc encore conséquent.

Sur la base des essais effectués, nous avons tenté de définir des procédures de mesure.

Préconisations pour l'utilisation du système dans différents contextes

Il ne s'agit pas de présenter ici une liste exhaustive de toutes les procédures possibles, mais plutôt de montrer comment aborder certains chantiers, en gardant à l'esprit que chaque processus n'est pas encore complètement figé.

■ Canevas linéaire souterrain

Présentation

Il s'agit de relever une galerie toute en longueur sur plusieurs kilomètres. La difficulté réside dans le fait que pour l'instant le système n'est pas dynamique en surface. Or le long d'une longue galerie, déplacer les quatre récepteurs de surface sera nécessaire. Vis-à-vis de ce cas de figure, ma proposition a été de procéder en déplaçant les récepteurs par couple, selon un cheminement éclairci par la *Figure 7*.

Précautions de mise en œuvre

L'émetteur émet de façon répétée sur des points à matérialiser, à intervalle régulier, sous terre.

A chaque avancement de l'émetteur en dehors de la zone couverte par les quatre récepteurs, deux des récepteurs sont déplacés d'une position arrière à une position avant, pour couvrir la zone suivante, voir *Figure 7*. La synchronisation des différentes équipes en sous-sol et en surface est indispensable et implique l'établissement de liaisons radio.

Qualité attendue

Grâce à l'utilisation de quatre récepteurs, on a une bonne redondance des mesures, celles-ci sont donc contrôlées et appuyées par le calcul de multilatération.

On obtient donc une chaîne de points connus en souterrain de précision métrique, voir plus précise encore, en fonction du soin apporté à la mise en station des récepteurs.

La rapidité de mise en œuvre et la précision du système seront naturellement grandement améliorées avec la possibilité de travailler avec des récepteurs autopositionnés (GPS).

En outre, dans le cas de figure où l'on souhaite simplement suivre la trace

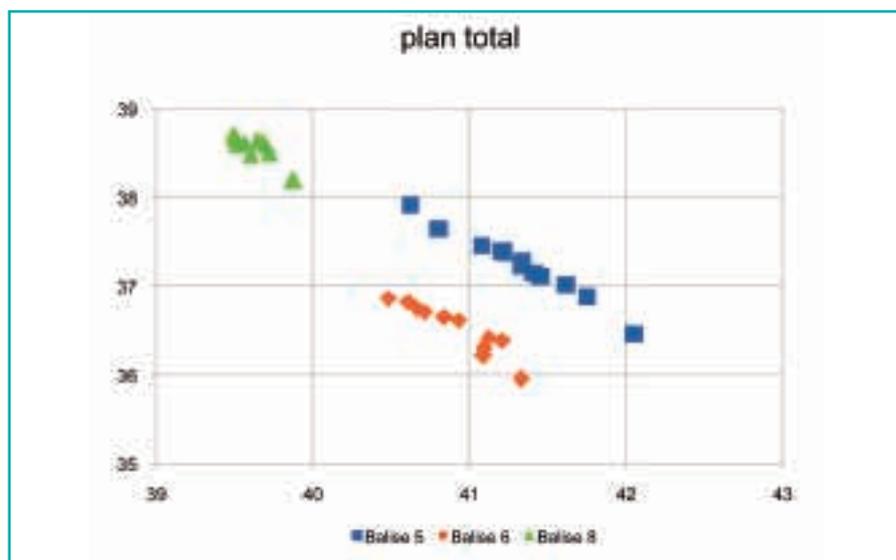


Figure 6. Ce graphique montre les points reçus par trois balises réceptrices différentes installées au même point successivement. Nous sommes dans un système local, les récepteurs sont à l'origine et l'émetteur est stationné durant toutes les mesures sur un point à une quarantaine de mètres.

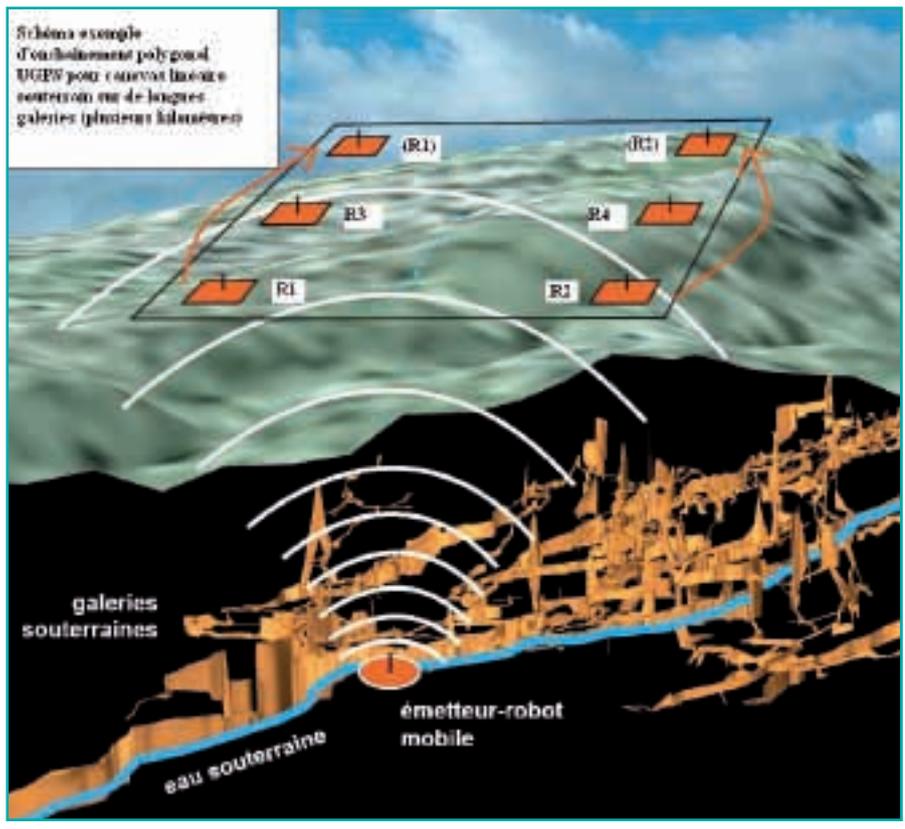
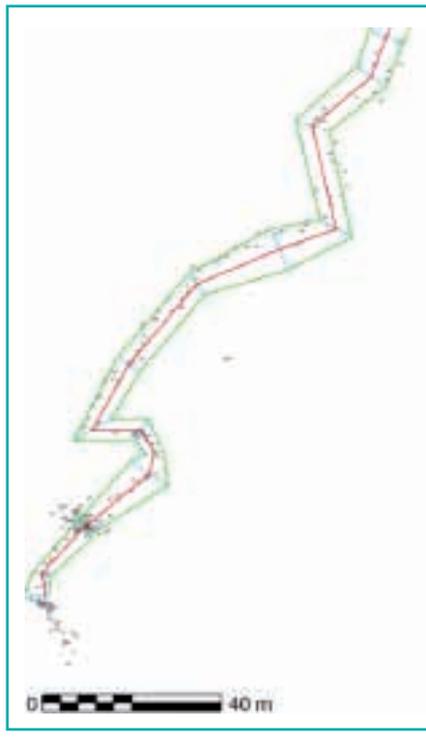


Figure 7. Cheminement parallèle surface et sous-sol.

d'une personne ou un robot, se déplaçant dans des galeries connues ou inconnues, on peut dériver cette méthode en un simple suivi de trajectoire direct et pratique, que l'on peut aborder en première approche sur différents chantiers, exemple : Figure 8.



■ **Vide souterrain urbain**

Présentation

Du fait des interférences précitées, l'appareil a des potentialités limitées en milieu urbanisé car son signal magnétique y est soumis à d'importantes déformations. De plus, sa portée dans un tel contexte est assez courte, en général pas plus de 50 m, à cause du bruit magnétique prépondérant. Cependant le fait de relever les vides souterrains présents sous certaines villes comme celui présenté Figure 9 et qui représentent un danger non négligeable, constitue une application intéressante pour le système. La

Figure 8. Exemple de trajectoire U-GPS (points reçus en gris) comparée à une polygone spéléo en rouge, avec les largeurs moyennes de la cavité mesurées en vert. A noter, le point central correspond à la balise réceptrice présente en surface. (Résultats d'une campagne de mesures effectuées en mars 2010, en Crète dans la cavité d'Ano Peristeras, à la demande de la municipalité de Karidi, dont le but premier était la recherche d'eau potable, une des nombreuses applications du projet).

localisation de conduites en constitue une autre.

Lors de tests urbains, il a été mis en évidence que la réception est plus sensible aux perturbations que l'émission. Or en ville c'est sous terre que l'on est le moins perturbé par des éléments ferromagnétiques. Donc, pour des relevés urbains, le plus efficace est d'intervenir le système, c'est-à-dire de laisser l'émetteur en surface et de descendre un ou plusieurs récepteur(s) sous terre. Une inversion complète du système (un récepteur et quatre émetteurs) est d'ailleurs envisagée.

Précautions de mise en œuvre

Le système U-GPS tel qu'il se présente actuellement considère dans son traitement que les récepteurs sont fixes et l'émetteur mobile. Le logiciel ne permet pas un affichage inverse, mais un développement dans ce sens sera probablement à réaliser. Pour l'instant, un des seuls moyens de traiter les informations données en utilisant un système inversé est déjà de se concentrer sur la seule information pertinente qui est alors affichée à l'écran, à savoir la ligne de base entre récepteur et émetteur sortie de tout contexte de positionnement. En effet, sur le terrain, même si on déplace le récepteur, l'émetteur restant fixe, à l'écran c'est l'émetteur qui bouge. A l'exportation du fichier, il faut être attentif à inverser les Δx , Δy , Δz de la ligne de base émetteur fixe/récepteur, et à les retrancher aux coordonnées de l'émetteur.

En outre, un système inversé requiert d'autant plus une communication surface/sous-sol, car la coordination y est encore plus déterminante, puisque l'émission est contrainte par l'installation des récepteurs sous terre.

Qualité attendue

En effectuant quelques essais en ville sans inverser le système, il a été mis en évidence que c'est essentiellement la mesure d'altitude qui pâtit des mauvaises conditions de mesures, lorsque les lignes de champ sont passablement déformées, la coordonnée Z est souvent complètement erronée.

Mais en installant le récepteur sous terre, une nette amélioration a été



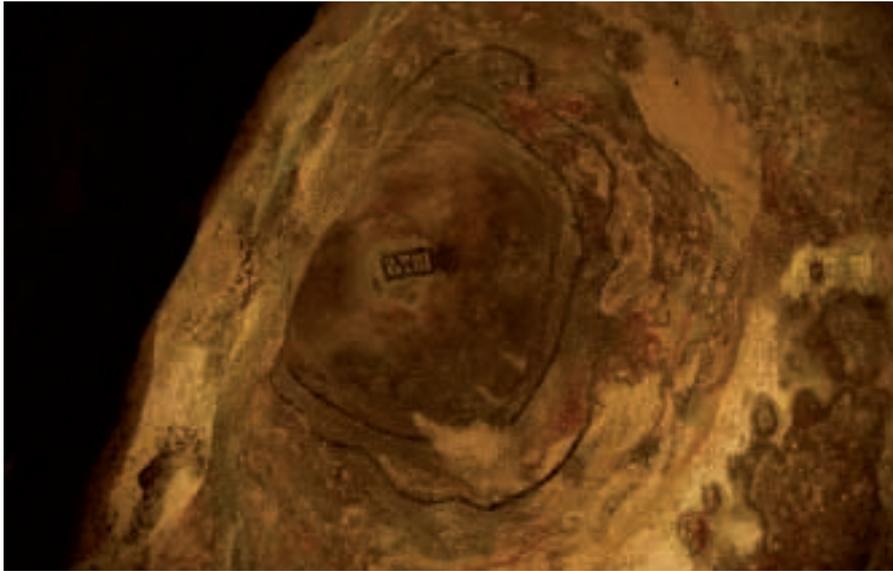


Figure 9. Cloche de fontis dans les catacombes de Paris, avec à terme risque d'effondrement.

remarquée, la portée atteinte est supérieure et les résultats sont comparables à des mesures en meilleur contexte, c'est-à-dire de précision métrique, pour l'instant. De plus, pour des objets situés à faible profondeur (moins de 10 mètres), la précision atteinte est même décimétrique.

■ Point d'aplomb

Présentation

Il s'agit ici de rechercher en surface l'aplomb d'un point se trouvant dans le sous-sol, notamment pour le positionnement de futurs forages d'eau potable (Figure 10). Cette technique repose sur la comparaison du parallélisme des lignes de champ magnétiques à l'émission et à la réception. En effet, si le récepteur est situé à l'aplomb de l'émetteur, alors en modifiant son orientation de 180° , la position obtenue reste identique. Si la position varie en signe, c'est qu'il faut déplacer le récepteur de la valeur absolue moyenne de la ligne de base mesurée pour trouver la position d'aplomb recherchée.

Précautions de mise en œuvre

La première étape consiste à déterminer un point en surface approximativement à la verticale de l'émetteur situé sous terre. Puis, dans un second temps, à partir de ce point approché, on va affiner cette position en réitérant la détermination de la ligne de base plusieurs fois, jusqu'à obtention du point d'aplomb définitif ($?x$ et $?y$ nuls).

Par ailleurs, la comparaison de mesures d'orientation entre la surface et le sous-sol suppose une bonne communication entre les deux.

Qualité attendue

Le résultat peut être précis jusqu'à un décimètre, à plus de 100 m de profondeur, puisque dans une configuration d'aplomb la réception du signal est optimale, mais l'accomplissement de cette méthode suppose sang-froid et patience chez les opérateurs.

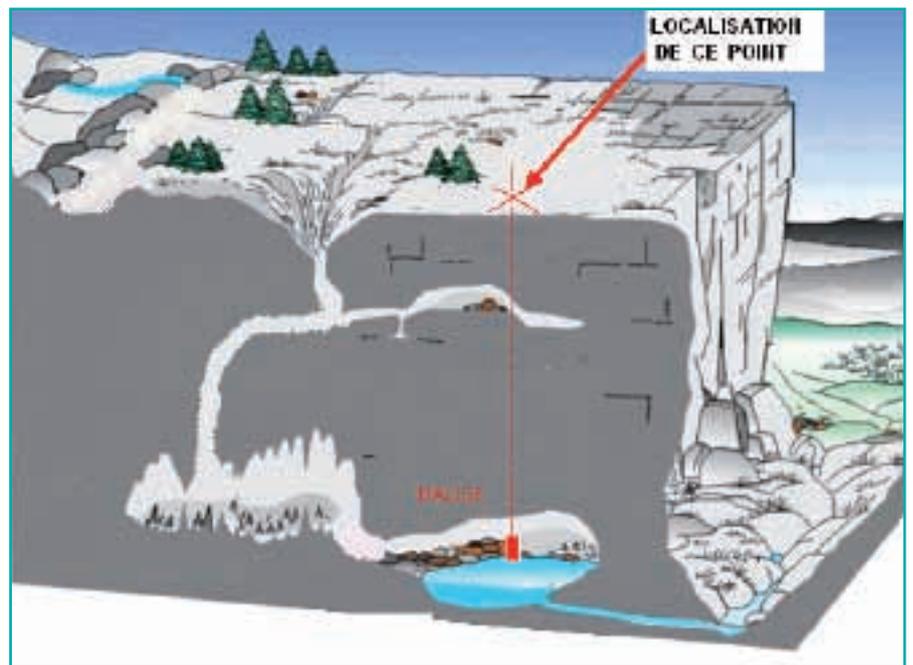


Figure 10. Mesure point zéro par M. Valade auteur d'un système permettant aussi et seulement cette application.

Cependant, à l'avenir, des moyens d'automatiser cette mesure pour la rendre rapide seront élaborés.

Ces protocoles ébauchés, issus de la pratique de l'appareillage dans sa forme actuelle, peuvent être mis en œuvre dès à présent, en revanche ce système est amené à s'appliquer potentiellement à d'autres usages encore latents.

Perspectives d'avenir et marchés visés

Pour parfaire les méthodes décrites précédemment et même les diversifier, certaines améliorations techniques devront être intégrées, comme des capteurs supplémentaires. Le but est aussi de pouvoir accélérer et faciliter la mise en station des récepteurs qui pour l'instant reste laborieuse. Il est notamment envisagé d'incorporer dans le logiciel un moyen, par couplage avec certains capteurs, de corriger automatiquement l'orientation des balises, s'affranchissant ainsi des rotations aléatoires à la boussole. Par conséquent, la fiabilité et la précision pourront être sensiblement améliorées, d'autant qu'en intégrant aussi des capteurs comme des accéléromètres

à l'émetteur, l'orientation sera contrôlée en temps réel.

En outre, un instrument capable de travailler sur des portées deux fois plus grandes, ainsi qu'un émetteur miniaturisé sont en train d'être développés.

Au cours du développement du projet existant, ce système de positionnement souterrain a montré qu'en plus des applications pratiques envisagées au départ pour la spéléologie, il serait potentiellement capable de s'adapter à d'autres marchés et de se combiner à d'autres technologies. C'est cet aspect prospectif que j'aborderai maintenant, en montrant la diversité des possibilités.

En premier lieu, à propos du milieu souterrain en général et des mines en particulier, il ressort d'une analyse des autres méthodes de positionnement utilisées, que la précision comme le principe général d'établissement du canevas restent largement bridés par la méthode de la polygonation. De plus, ces méthodes sont d'autant plus contraignantes que le milieu de travail est difficile.

En permettant de s'affranchir de la polygonation tout en garantissant une précision équivalente voire meilleure, la technique de l'U-GPS pourrait rapidement devenir un outil très apprécié par les topographes miniers. Ainsi, l'enjeu réel est de pouvoir à terme remplacer les levés classiques. Mais, l'U-GPS ne pourra s'imposer que si sa mise en œuvre est facilitée et surtout s'il offre une prestation que la topographie actuelle n'offre pas.

Comme exemple de diversification, on peut déjà citer le couplage facilité avec scan 2D ou 3D, permettant un levé en 3D des galeries en continu, ce qui représente un développement très intéressant dans ce domaine.

Par ailleurs, avec cette technologie nouvelle, pourrait voir le jour un véritable système de navigation minier pour localiser des mineurs ou diriger des engins (Figure 11). Ainsi certaines mines importantes d'Afrique du Sud ont commencé à installer un moyen de se repérer en temps réel en souterrain avec un système de radio-identification. Par analogie avec cette initiative,

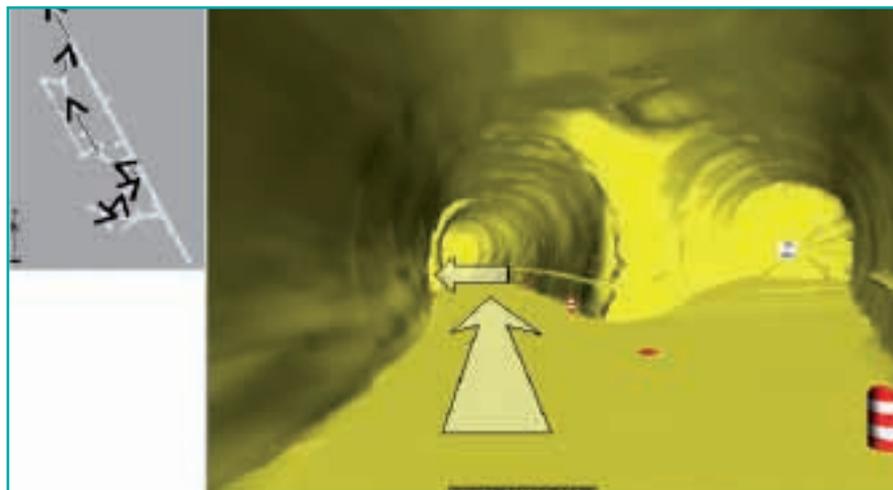


Figure 11. Exemple d'une interface utilisateur d'un système de navigation dans un réseau de galeries basé sur la mesure U-GPS.

il paraît concevable en installant un réseau de récepteurs U-GPS dans une mine, de pouvoir suivre un robot, muni d'un émetteur, n'importe où et de le guider jusqu'à sa destination. Le problème du géoréférencement des ressources et des stocks serait résolu en temps réel.

En outre, on peut aussi trouver des applications possibles du côté de la recherche d'eau souterraine, domaine en plein développement avec les situations de sécheresse, critiques dans de plus en plus de pays. Cependant les techniques existantes réalisent plutôt la prospection que la détection ponctuelle. Donc, l'U-GPS serait une méthode complémentaire qui, en région karstique et pour autant que l'eau souterraine soit accessible à un opérateur spéléologue, permettrait de localiser précisément le point de forage pour atteindre l'aquifère avec certitude.

Un autre domaine de développement potentiel est celui des réseaux enterrés. Vis-à-vis du relevé de conduites en les parcourant sous terre, un U-GPS miniaturisé aurait l'intérêt de ne pas avoir à matérialiser le cheminement en surface (non négligeable en zone encombrée), et de s'adapter à différents types de canalisation (exceptées les conduites métalliques). De plus, il présenterait l'avantage d'avoir une portée de signal largement supérieure aux systèmes existants, tout en permettant un suivi en temps réel en 3D de la balise, et de fonctionner sans

fil (c'est le cas pour certaines techniques mais elles sont d'autant plus limitées en profondeur).

Malgré tout, cette application demanderait de profondes adaptations du système actuel, mais qui semblent tout à fait envisageables.

Enfin, le dernier domaine que j'aborderai ici, concerne le guidage de forages qui reste encore souvent problématique malgré le développement de nombreux appareils de calcul de trajectoire. En effet, dans la mesure où l'on pourrait intégrer une balise U-GPS à un engin de forage, celui-ci serait suivi en temps réel et en absolu, et non plus seulement par rapport à une position précédente comme le font les outils actuels.

Par ailleurs, pour ce domaine comme le précédent, un couplage intéressant est envisageable avec la méthode gyroscopique (Figure 12). Cela implique que l'U-GPS puisse permettre le calcul en continu de la dérive du gyroscope, qui serait ainsi calibré sans paliers, et dans les zones de fort bruit électromagnétique, le



Figure 12. Principe d'un système gyroscopique avec accéléromètres utilisé par l'entreprise de forages dirigés Fordibel.

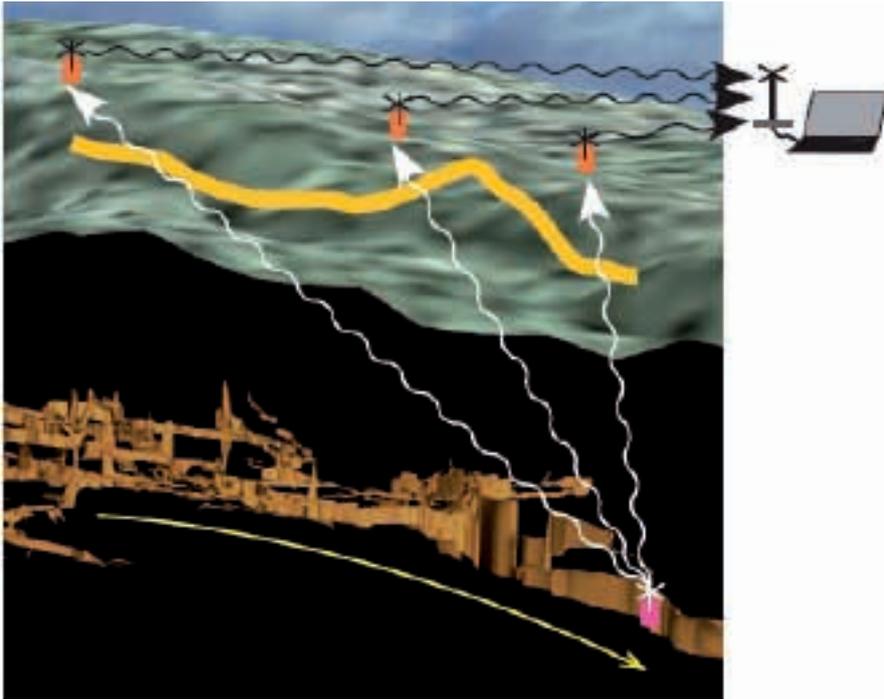


Illustration du principe de suivi en temps réel et en 3D d'une balise en déplacement sous terre, les positions XYZ s'affichant instantanément à l'écran.

► gyroscope pourrait prendre le relais. Cette complémentarité pourrait aboutir à un outil commun qui répondrait à la majorité des situations possibles.

Bien entendu, il s'agit là d'une phase prospective, ces divers développements dépendant des besoins des praticiens de ces domaines spécifiques.

Pour conclure, il paraît évident que pour prétendre à une diversification des applications, il est important de parfaire l'appareillage U-GPS et aussi de prévoir divers couplages dans la limite des sensibilités induites par le magnétisme du système.

Conclusion

Le prototype de système U-GPS testé dans le cadre de mon travail de fin d'études ESGT a permis de démontrer l'applicabilité de cette méthode dans différents contextes. S'agissant d'un prototype, il est évident que de multiples améliorations doivent être envisagées pour que la méthode devienne concurrentielle et largement applicable. La rapidité et la facilité de mise en œuvre, la convivialité des logiciels de pilotage, la précision des mesures et les performances de l'ap-

pareillage doivent donc être améliorées. Le présent travail a pu contribuer à définir quelques pistes pour ces développements, en mettant en particulier en évidence des problèmes de calibration et en esbossant un banc d'essais pour corriger les erreurs.

Les partenaires du projet ont d'ailleurs créé une société (InfraSurvey Sarl) pour que le développement se poursuive et en vue d'entrer sur les marchés esquissés dans cet article. Plusieurs des développements esquissés dans le cadre du travail présenté ici ont déjà été entrepris et les premières versions améliorées sont sur le point de sortir.

Personnellement, ce travail fut très enrichissant, et j'espère que la singularité de ce champ d'activité du géomètre-topographe, attirera d'autres collègues pour prolonger la recherche vers les solutions techniques les plus appropriées. ●

Contact

Jean-Baptiste CAVERNE

Ingénieur Géomètre Topographe
jean-baptiste.caverne@laposte.net

► Pour tout renseignement :
www.infrasurvey.ch

ABSTRACT

Keywords: speleology, subterranean topography, electromagnetism, prototype, innovation, cartography, GNSS

GPS has become a very common and useful tool in many human activities. However, it's not possible to use this instrument in closed areas such as caves, mining galleries,..., where it usually does not work. In order to get rid of this difficulty, the Swiss Institute of Speleology and Karstology (SISKA) has decided to develop a way of determining the position and the depth of a subsurface point, from the surface. So, the UnderGround Positioning System (U-GPS) is born, and now, we can follow in real time a moving transmitter in a cave, from a PC at landsurface. To know the efficiency of this new system and improve its reliability, many tests and applications have been and still have to be carried out.

Therefore, before the real launching of the product, experimental and working procedures are being developed. However, there are many directions for further developments and U-GPS will likely become one of the most attractive option for many underground surveys.