



HAL
open science

Dimensionner et localiser une cavité souterraine en couplant un scanner laser 3D avec le système UGPS3

Thomas Richard, Gaël Gouillon

► To cite this version:

Thomas Richard, Gaël Gouillon. Dimensionner et localiser une cavité souterraine en couplant un scanner laser 3D avec le système UGPS3. 7. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2014) "Observer, modéliser, décider", Jul 2014, Beauvais, France. ineris-01863829

HAL Id: ineris-01863829

<https://ineris.hal.science/ineris-01863829>

Submitted on 29 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DIMENSIONNER ET LOCALISER UNE CAVITE SOUTERRAINE EN COUPLANT UN SCANNER LASER 3D AVEC LE SYSTEME UGPS3

SIZING AND LOCATING AN UNDERGROUND CAVITY BY COUPLING 3D LASER SCANNER AND THE UGPS3 SYSTEM

Thomas RICHARD¹, Gaël GOUILLON¹

1 INERIS, Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ — L'INERIS intervient régulièrement dans des mines et carrières souterraines abandonnées pour effectuer des diagnostics de stabilité. Les géotechniciens sont souvent confrontés à des difficultés pour dimensionner et localiser les vides souterrains. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, l'institut se dote d'outils novateurs dans ce domaine. Le système UGPS3 (Underground Global Positioning System 3rd generation) permet de localiser, en temps réel, en surface et en profondeur, une position souterraine avec une précision infra métrique à métrique. Le scanner laser 3D permet de numériser en trois dimensions une cavité avec une précision millimétrique. Le rendu numérisé apporte de nouvelles observations et données géotechniques (cartographie, volumes, fracturation, etc.) jusqu'alors difficilement réalisables à partir d'observations visuelles. L'association du scanner laser 3D et du système UGPS3 peut être mise en œuvre facilement et rapidement sur une même intervention. Une cavité souterraine accessible peut ainsi être dimensionnée et géolocalisée dans son ensemble.

ABSTRACT — INERIS regularly performs inspections of abandoned mines in order to assess their stability. Geotechnicians face many difficulties to locate and evaluate the size of underground cavities. It is the reason why, for many years, INERIS has been equipped with innovative tools. UGPS3 system (Underground Global Positioning System 3rd generation) enables the geo-localization at real-time of an underground position with an under metric accuracy. 3D laser scanner can scan underground cavities in three dimensions with a millimetric accuracy. Scanning gives new visuals and geotechnical data (mapping, volume, fracturing etc.) until then difficult to obtain by visual observation. The UGPS3 system and the 3D laser scanner can be easily and quickly used together during the same intervention. This way, an accessible cavity can be exactly sized and located geographically in its globality.

1. Introduction

Dans le cadre de diagnostic de stabilité en cavités souterraines, les géotechniciens de l'INERIS sont régulièrement confrontés à des problèmes d'imprécision sur les dimensions et la localisation de vides souterrains par rapport à la surface. Les techniques classiques de cartographie (ex : levé théodolite, planchette topo, etc.) présentent des contraintes liées à leur mise en œuvre, leur coût ou leur imprécision.

Ces difficultés motivent depuis plusieurs années l'utilisation ou le développement d'outils novateurs dans ce domaine.

Le système UGPS3 (Underground Global Positioning System 3rd generation) permet de localiser par rapport à la surface, une position souterraine avec une précision infra-métrique à métrique et de connaître sa profondeur tout aussi précisément. Ce système est développé en partenariat avec la société INFRASURVEY et est mis en œuvre régulièrement depuis 2010.

Un scanner laser 3D est utilisé par l'INERIS depuis un an pour numériser certaines cavités. Le rendu numérisé apporte de nouvelles observations et données géotechniques (cartographie, volumes, fracturation, etc.) jusqu'alors difficilement réalisables à partir d'observations visuelles.

L'emploi de ces deux outils peut être séparé ou couplé en fonction des besoins.

Cet article présente en premier le système UGPS3 avec deux opérations caractéristiques du système réalisées dans le cadre de prestations commerciales. Puis les caractéristiques et perspectives d'applications de l'emploi du scanner laser 3D couplé avec le système UGPS3 sont exposées à partir d'interventions réalisées récemment.

2. Le système UGPS3

2.1. Principe de fonctionnement

Le système UGPS comprend : une balise « émettrice » générant un signal électromagnétique, 1 à 4 balises « réceptrices » de mesure du signal généré, et un ordinateur qui assure le traitement des signaux en temps réel.

L'émetteur est utilisé en souterrain, il est mis en place à la position où l'on souhaite connaître l'aplomb en surface. Le récepteur est implanté en surface, après réception et traitement du signal émis en souterrain, le logiciel de l'UGPS fournit la position de l'émetteur dans le repère (x,y,z) du récepteur (figure 1).

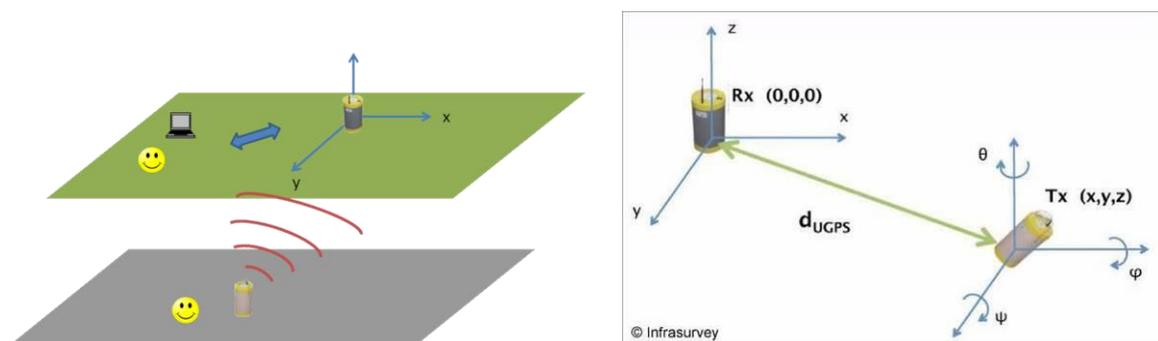


Figure 1 : Illustrations du principe de fonctionnement du système UGPS

A partir de mesures effectuées sur le champ magnétique par le récepteur, les 6 inconnues (la position (x,y,z) et l'orientation (ϕ, ψ, θ)), ainsi que la distance (d_{UGPS}) de l'émetteur sont calculées grâce à l'algorithme de l'UGPS (figure 1). Un seul récepteur est nécessaire à la localisation de l'émetteur. L'emploi de plusieurs

récepteurs en surface permet de couvrir une plus grande zone à investiguer en souterrain et d'obtenir une meilleure précision.

2.2. Fonctionnalités et applications

Le système UGPS présente deux fonctions. La "recherche verticale" permet de localiser ponctuellement l'aplomb en surface d'une position en souterrain et de connaître sa profondeur. Cette fonction est principalement utilisée pour situer des zones dégradées par rapport à des enjeux en surface et pour implanter des forages (travaux de comblement ou surveillance endoscopique par exemple). Le "cheminement souterrain" permet de cartographier en temps réel un parcours souterrain par rapport à la surface. Cette fonction sert à localiser rapidement l'emprise d'une cavité.

Deux applications caractéristiques de l'UGPS sont exposées par la suite. Elles présentent successivement la recherche verticale dans un réseau de crayères de la Marne et le cheminement souterrain dans une ancienne mine polymétallique.

2.2.1. Exemple de recherche d'essors de crayères

Les crayères, anciennes exploitations souterraines de craie de la Marne, forment des cavités pyramidales (figure 2) de 10 à 20 m de hauteur débouchant en surface par un puits d'accès dit "essor". Dans le cas présent, des essors étant obturés, leur localisation en surface n'était pas connue. Ces ouvrages peuvent se dégrader et générer des désordres en surface. Il est donc essentiel de connaître leur position afin d'identifier les enjeux à l'aplomb ou de procéder à des travaux de mise en sécurité. C'est dans ce contexte que la ville de Châlons-en-Champagne a sollicité l'INERIS pour retrouver en surface la position des essors d'un réseau de crayères sous cavant un quartier pavillonnaire. Ce réseau est visitable par un essor connu et accessible, les essors obturés et non localisés en surface sont ainsi visibles en souterrain.

La craie compose l'essentiel des terrains de couverture avec une frange altérée de 1 à 3 m d'épaisseur en surface. Des poches karstiques remplies d'argile peuvent localement être présentes dans la formation crayeuse.

Pour localiser les essors en surface, la fonction « recherche verticale » est utilisée. L'émetteur est fixe et positionné au point identifié en souterrain. Le récepteur est mobile et déplacé après chaque signal réceptionné puis traité jusqu'à retrouver l'aplomb de l'émetteur (figure 3).



Figure 2 : Vue d'une crayère

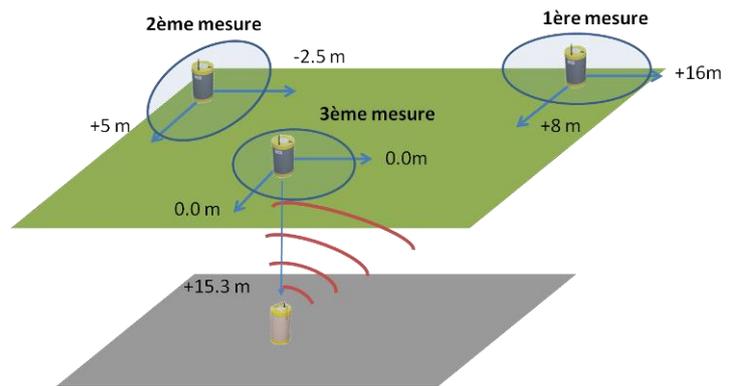


Figure 3 : Illustration d'une recherche verticale

L'émetteur a été positionné à la base des crayères et à la verticale des essors. En surface, le récepteur a été déplacé jusqu'à retrouver l'aplomb de l'émetteur et donc de l'essor. D'après les levés, le sol des crayères se situe entre 15 et 25 m de profondeur. Au total, 16 essors de crayères ont été repositionnés en surface (figure 5). La précision des positions est inférieure à 1 m (9/16) en conditions normales et de 2 à 3 m (7/16) lorsque la position recherchée se situe dans des zones inaccessibles en surface (figure 4) ou des zones soumises à de fortes perturbations magnétiques.



Figure 4 : Position déportée



Figure 5 : Positions essors retrouvés

2.2.2. Cartographie des travaux souterrains d'une mine polymétallique

Dans le cadre d'une étude des aléas mouvements de terrain liés à l'existence d'une ancienne mine souterraine, l'UGPS a été utilisé pour GEODERIS afin de vérifier la cartographie des travaux.

Les travaux miniers ont exploité des poches karstiques et des filons minéralisés dans une formation cambrienne comprenant des dolomies et un ensemble schisto-gréseux. Au-dessus de cette formation et affleurant en surface se trouvent des grès

massifs du Trias. Les travaux miniers forment un réseau complexe de cavités souterraines (figures 6 et 7) et sous-minent à faible profondeur une zone urbanisée (figures 10 et 11). L'unique plan connu de cette mine est dégradé, l'orientation et l'échelle sont incertaines (figure 7). Ainsi, l'évaluation des aléas est difficile et la cartographie des travaux par rapport à la surface présente une incertitude de localisation trop importante.



Figure 6 : Photos de la mine

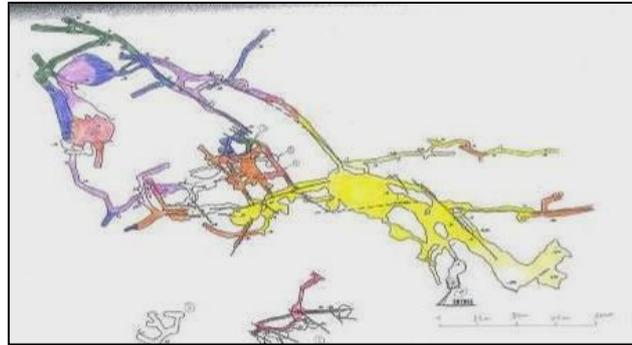


Figure 7 : Plan de la mine (1972)

Pour vérifier et compléter la cartographie de cette mine, la fonction « cheminement souterrain » a été mise en œuvre. L'émetteur est mobile et déplacé successivement à différents points déterminant la géométrie de la mine. Le récepteur est fixe et constitue l'origine du repère dans lequel sont levées les positions de l'émetteur (figures 8 et 9).



Figure 8 : Interface du logiciel UGPS



Figure 9 : Dispositif UGPS en surface

Pour que les levés s'effectuent dans une gamme de distance garantissant la meilleure précision, 8 zones de mesures ont été réalisées (figure 10). Au total, 280 positions souterraines ont été localisées depuis la surface. Afin de rendre compte au mieux de la situation des travaux, les positions des récepteurs ont été déterminées relativement aux supports cartographiques de surface (BD ORTHO de l'IGN pour les coordonnées X et Y, et BD TOPO de l'IGN pour la coordonnée Z). Les positions souterraines sont ainsi géoréférencées en Lambert 93 et leurs cotes sont reliées au système NGF.



Figure 10 : Positions levées avec l'UGPS Figure 11 : Cartographie finale de la mine

La totalité de la mine n'a pu être levée mais les zones localisées avec le système UGPS ont permis de recalibrer le plan de 1972. L'incertitude intrinsèque au levé UGPS est de 1 m, l'incertitude du zonage des travaux sur les secteurs levés avec l'UGPS est estimée entre 1 et 3 m et l'incertitude des zones digitalisées sur le plan de 1972 recalibré est estimée entre 3 et 10 m (incertitude initiale de 50 à 100 m).

La mise en œuvre du système UGPS a permis de définir avec précision l'emprise des travaux souterrains (figure 11). Ces travaux sous-minent une surface d'environ 3000 m² et se situent entre 7 et 50 m de profondeur. Sur le plan de 1972, le dessin des travaux est approximatif mais conforme aux observations en souterrain. Par contre, une importante erreur sur son échelle conduisait à une emprise près de 6 fois supérieure à la réalité.

2.3. Limites du système UGPS3

Le système UGPS nécessite des opérateurs en souterrain et en surface, ainsi qu'une communication entre les deux. Selon les sites, les déplacements en surface constituent la principale difficulté de mise en œuvre du système (passage de propriété, routes, zones inaccessibles, etc.).

Le système UGPS effectue des mesures de champ magnétique. En conséquence, les performances du système sont amoindries à proximité de zones conductrices (ligne haute tension, éléments métalliques volumineux, etc.) ou en présence d'une épaisse couverture argileuse. Par expérience, le rayon d'action du système (distance émetteur/récepteur) pour conserver une précision infra-métrique à métrique est d'au

moins 100 m en milieu naturel et de 30 à 50 m dans un environnement très urbanisé. Localement et exceptionnellement, la mesure peut ne pas être possible.

3. Couplage du scanner laser 3D et du système UGPS3

3.1. Le scanner laser 3D

3.1.1. Caractéristiques techniques

Il existe de nombreux scanners laser 3D (selon l'application et la marque du modèle). Dans le cadre des expertises de l'INERIS, un scanner laser terrestre (SLT) de la marque Trimble (le modèle TX5) est utilisé. Le tableau 1 présente quelques caractéristiques techniques de ce modèle.

Dimensions (cm)	Portée	Temps moyen de numérisation par station	Champ de vision	Boussole	Appareil photo intégré	Précision
24x20x10	120 m	2 à 10 min	360° horiz. 300° vert.	oui	oui	± 2 mm à 10 m

Tableau 1 : Principales caractéristiques techniques du scanner laser 3D utilisé

3.1.2. Principe de fonctionnement et utilisation

Le scanner laser 3D est une solution autonome de numérisation à grande vitesse. L'appareil fonctionne à l'image d'un lasermètre en mesurant la distance avec le point d'impact. En multipliant des millions de fois et dans toutes les directions ces mesures de distance, un volume en trois dimensions peut être modélisé. La figure 12 permet de comparer une vue prise à partir d'un appareil photo et la même vue numérisée par un scanner laser 3D.



Figure 12 : Comparaison entre photographie et scan d'une carrière souterraine

Un scan correspond à une position donnée (dite "station") de l'appareil. Pour numériser un volume important (un réseau de galeries par exemple), il est nécessaire de réaliser plusieurs scans à partir de plusieurs stations. Dans le but de raccorder facilement et rapidement plusieurs scans entre eux, des "cibles" (sphères ou damiers normalisés) sont installées dans l'environnement à numériser. Les cibles

jouent le rôle de points de référence, il faut avoir au moins trois cibles en commun pour recoller deux scans mitoyens (figure 13).

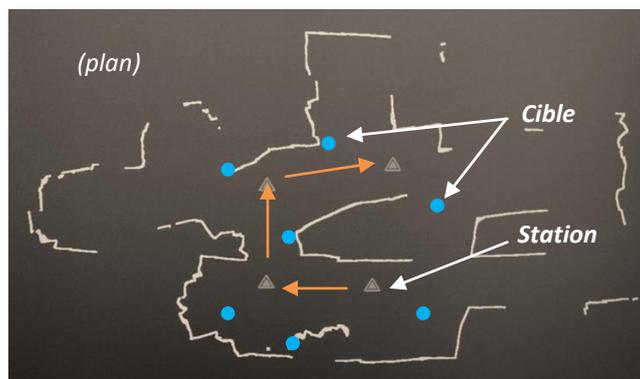


Figure 13 : Installation du scanner laser 3D en souterrain (cheminement vu en plan)

3.1.3. Traitement des données et possibilités offertes par le scanner laser 3D

Le traitement des données du scanner est exécuté à l'aide d'un logiciel de traitement de nuages de points. Selon l'objectif à atteindre, le traitement résultant de la numérisation peut être plus ou moins conséquent.

La mise en œuvre d'un scanner laser 3D dans des cavités souterraines accessibles offre plusieurs applications :

- dimensionner (volume, hauteur, distance) ;
- cartographier (vues en plan ou en coupe) ;
- surveiller l'évolution d'une cavité.

La numérisation constitue aussi un outil d'aide à l'identification de mécanisme de dégradations (écaillage d'un pilier, chute de toit, etc.) et à l'observation de la fracturation.

3.1.4. Exemple de numérisation sur un secteur de la carrière de Saint-Maximin (60)

Les cavités souterraines concernées correspondent à une ancienne exploitation de calcaire en chambres et piliers. La numérisation d'un secteur de cette carrière est présentée en vue de l'extérieur (vue du dessus) sur la figure 14. Cette vue apporte de nouvelles observations, notamment sur la fracturation du massif rocheux (les secteurs en nuance de gris correspondent au volume exploité et les "trous" en vert correspondent aux masses calcaires).



Figure 14 : Vue d'ensemble de la zone numérisée

Ce secteur comprend une importante montée de voûte (figure 12). La numérisation a permis de déterminer le volume exact de cette zone (1722 m³, figure 15).

La comparaison de deux scans réalisés dans une même zone à deux périodes différentes permet de mettre en évidence les différences entre les nuages de points. Afin de tester cette comparaison, une seconde numérisation a été réalisée après avoir déplacé un petit bloc au sol. La comparaison des deux scans a décelé les zones où le bloc a été retiré et replacé (en rouge sur la figure 16). Ce test permet de valider l'utilité du scanner laser 3D en tant qu'outil de surveillance d'une cavité évolutive.

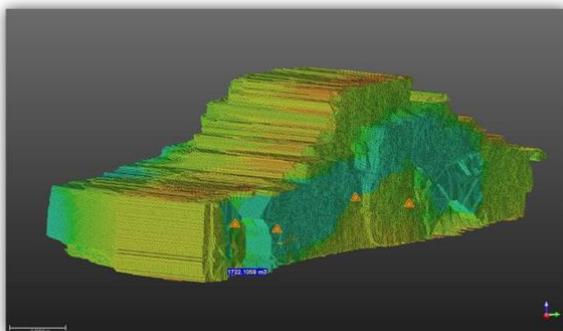


Figure 15 : Calcul de volume



Figure 16 : Détection d'une chute de blocs

3.1.5. Limites du système

Les numérisations doivent être interprétées par un œil expert afin d'exclure d'éventuelles anomalies inhérentes aux mesures (bruits de mesure, végétation, etc.). L'acquisition puis le traitement des millions de points obtenus nécessitent des ressources importantes en termes de moyens informatiques.

3.2. Perspectives du couplage scanner laser 3D avec le système UGPS3

En couplant le système UGPS3 avec une solution de numérisation en trois dimensions, il est possible d'obtenir la morphologie exacte d'une cavité tout en la localisant avec précision par rapport à la surface (figures 17 et 18).

A partir d'un tel état des lieux d'une cavité, toutes les caractéristiques géométriques (ouverture des vides, épaisseur du recouvrement, taux de défrètement) nécessaires à une étude de stabilité peuvent être collectées. Des observations complémentaires (zones en hauteur par exemple) et des mesures de distance peuvent être réalisées sur la numérisation (après la phase d'inspection en souterrain).

Dans le cas de sites jugés sensibles ou évolutifs (remontée d'une cloche de fontis par exemple), la numérisation fournit des volumes et des hauteurs de vide, et la localisation avec l'UGPS fournit l'épaisseur du recouvrement. Ces données sont essentielles pour évaluer un aléa effondrement localisé. La localisation UGPS permet d'identifier les enjeux de surface par rapport aux vides souterrains. Une surveillance peut aussi être mise en place avec l'outil de comparaison du scanner 3D. La première numérisation constitue un état initial, et de nouvelles numérisations périodiques permettraient de déceler la moindre évolution (chute de bloc, fléchissement ou décollement d'un banc, venue d'eau, intrusion, etc.).

Si un traitement doit être étudié et défini, la numérisation serait un outil essentiel au dimensionnement précis d'un ouvrage de confortement. Dans le cas d'un remblayage, les volumes de vides peuvent être calculés, ainsi que l'implantation et le dimensionnement des barrages si nécessaire (cas d'un remblayage partiel).

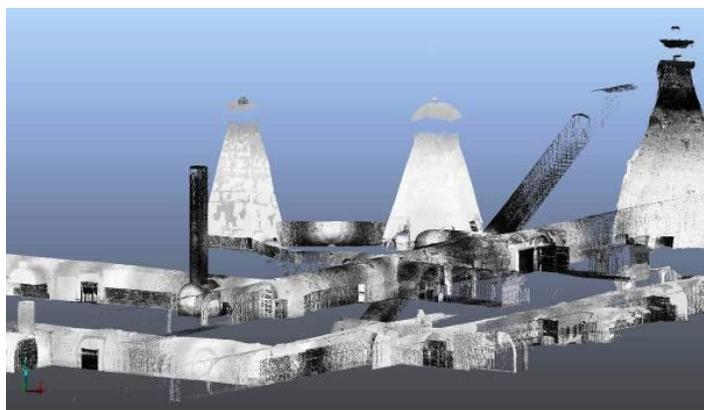


Figure 17 : Exemple d'une numérisation Figure 18 : Couplage scan3D+UGPS

Dans les deux exemples de cas exposés au paragraphe 2, le scanner laser 3D n'était pas encore utilisé par l'INERIS. Dans le premier cas, la numérisation des crayères permettrait d'obtenir le volume précis des vides (dans une optique de remblayage) et d'observer avec plus de précision la nature et l'état de dégradation des essors situés à de grandes hauteurs. Dans le second cas, la numérisation de la mine retranscrirait précisément la complexité géométrique des travaux rencontrés, alors que l'UGPS n'a permis que de localiser des emprises. Dans les secteurs

sensibles (très faible profondeur et grande hauteur de vide), la numérisation constituerait un état initial permettant de mettre en place une surveillance.

4. Conclusion

Depuis quelques années, l'INERIS met en œuvre des outils novateurs en appui de ses expertises géotechniques en souterrains. Le système UGPS3 est un moyen de localisation "fond/jour" rapide et précis. Au moyen de quelques balises, une ou plusieurs positions peuvent facilement être localisées en surface et leurs profondeurs connues. Le scanner laser 3D permet la numérisation en trois dimensions d'une cavité. Ce scan constitue une image de référence qui permet ensuite d'obtenir de nombreuses informations ou observations complémentaires (volume précis, mesures de distance, coupes, plans, fracturation, mécanisme de dégradation, etc.). Le couplage des deux systèmes permet le dimensionnement en trois dimensions d'une cavité tout en la localisant précisément par rapport à la surface et aux enjeux concernés.

Par rapport aux techniques usuelles, la mise en œuvre d'un scanner laser 3D et du système UGPS3 est plus simple et plus rapide qu'un levé au théodolite. Les résultats obtenus sont précis et fournissent plus d'informations ou d'observations géotechniques.

Le couplage de ces deux outils apporte de nombreuses données utiles à la caractérisation des vides souterrains et ainsi à l'analyse des aléas et des risques de mouvements de terrains qu'ils peuvent engendrer.

Remerciements

Michel Demierre et Vincent Schlageter (INFRASURVEY) ; la ville de Châlons-en-Champagne ; GEODERIS (groupement d'intérêt public apportant assistance et expertise en matière d'après-mine) ; la Maison de la pierre du Sud de l'Oise à Saint-Maximin.

Références bibliographiques

<http://www.faro.com/fr-fr/produits> 21/03/2014

<http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/tx5.aspx?dtID=overview&> 21/03/2014