

# TESTS DE MOYENS INNOVANTS D'ACQUISITION DE DONNEES 3D EN CAVITES SOUTERRAINES

## TESTS OF INNOVATIVE 3D DATA ACQUISITION SYSTEMS IN UNDERGROUND CAVITIES

DEGAS Marie<sup>1</sup>, DAVESNE Jean-Marie<sup>1</sup>, LECOMTE Amélie<sup>1</sup>, HELAINE Quentin<sup>2</sup>, BONNEL Jérôme<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Ineris, Verneuil-en-Halatte, France*

<sup>2</sup> *URBANLOOP, Tomblaine, France*

<sup>3</sup> *TTGéomètres-experts, Paris, France*

**RÉSUMÉ** – Afin de tester différents outils innovants d'acquisition de données 3D en souterrain, une expérimentation a été menée au sein de la plateforme scientifique de l'Ineris. Lors de cette expérimentation, des robots-chiens, des drones volants et des scanner 3D embarqués ont été mis à l'épreuve dans l'environnement souterrain de la plateforme expérimentale, afin de comparer leurs capacités opérationnelles d'intervention et d'acquisition de données 3D.

**ABSTRACT** – To test various innovative 3D underground data acquisition tools, an experiment was carried out on the Ineris scientific platform. During this experiment, dog robots, flying drones and on-board 3D scanners were tested in the underground environment of the experimental platform, to compare their operational capabilities for intervention and 3D data acquisition.

### 1. Introduction

L'Ineris (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques), identifié comme référent Cavités du ministère en charge de l'Écologie, a parmi ses missions, la prévention des aléas et des risques liés aux cavités souterraines, notamment ceux de type mouvements de terrain. Afin de répondre aux objectifs de cette mission, l'Ineris dispose d'une plateforme scientifique à vocation expérimentale et pédagogique dédiée aux risques liés aux cavités souterraines. Aménagée au sein d'une ancienne carrière souterraine, à Saint-Maximin (Oise, près de Creil), elle constitue un lieu unique pour la mise en œuvre de tests et d'expérimentations visant à améliorer la connaissance et à éprouver les technologies pour la prévention et la gestion de ces risques.

Dans ce contexte, l'Ineris mène une veille technologique sur les outils d'aide au diagnostic de stabilité en souterrain, prenant en compte le caractère spécifique de cet environnement confiné. En effet, lors de diagnostics géotechniques, les risques vis-à-vis de la stabilité ou de l'atmosphère confinée peuvent limiter les experts dans leur progression et dans leur analyse in-situ. Afin de tester le caractère opérationnel d'outils innovants permettant d'évoluer dans des souterrains pour lesquels la sécurité des intervenants n'est pas suffisante, des tests en condition réelle ont été menés avec des drones-volants et des robots-chiens, au sein de la plateforme. Après une présentation de la plateforme, les principaux retours d'expérience des tests sont présentés ci-après.

### 2. La Plateforme scientifique de l'Ineris

L'Ineris a aménagé au sein d'une carrière souterraine, la première plateforme souterraine d'expérimentation dédiée aux risques liés à la présence de cavités souterraines. Elle permet de mener, en toute sécurité, des expérimentations à l'échelle 1, dans les conditions réelles

des carrières souterraines abandonnées. En effet, les caractéristiques du milieu souterrain sont difficiles à reproduire dans une halle d'essai et de démonstration conventionnelle (environnement confiné et obscur, géométrie complexe, obstacles naturels, forte humidité ambiante, température, ...).

La vocation première de la plateforme est d'appuyer des travaux de recherche, des tests et des essais, dans l'objectif d'accroître et de développer les connaissances des phénomènes d'instabilité des cavités souterraines (pour en prévenir les risques potentiels sur les biens et les personnes). Ces expérimentations concernent l'étude des mécanismes d'instabilités, mais également les méthodes de mise en sécurité et de surveillance instrumentée. Elles peuvent concerner des travaux de recherche académique (lois de comportement des matériaux, effets de l'eau, endommagement des roches...), mais aussi des tests de matériels voués à appuyer la caractérisation des aléas et des risques liés aux cavités souterraines ou à améliorer les conditions d'interventions au sein de ces cavités.

La plateforme bénéficie également d'une exposition pédagogique sur les risques liés aux cavités souterraines. Basée sur des ateliers didactiques et la mise en valeur de l'espace souterrain, elle a pour vocation de sensibiliser un public varié, comme lors de journées techniques pour des agents de l'État, en charge de la prévention des risques, de collectivités, ayant la responsabilité des cavités et des risques qu'elles génèrent sur leur territoire ou de bureaux d'études impliqués dans divers travaux / chantiers impactés par la présence de cavités.

La plateforme s'étend dans une ancienne carrière, dite Parrain, ayant exploité le calcaire sur environ 5 hectares, jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle, par la méthode de chambres et piliers abandonnés (méthode « classique » dans le paysage des anciennes carrières souterraines en France et en Europe, consistant à laisser en place des piliers de roche pour soutenir les galeries laissées vides lors de l'extraction). Les galeries ont des portées de l'ordre de 5 à 8 m de large, pour un taux de défrètement (*rapport de la surface exploitée à la surface totale*) global de l'ordre de 75 %. La hauteur des galeries est de l'ordre de 4 mètres (jusqu'à 7-8 m par endroits). La profondeur varie entre 13 et 20 m. Les galeries et carrures présentent des dimensions variées, permettant de disposer de nombreuses configurations géotechniques/ géométriques et de surfaces libres rocheuses contrastées, saines ou fracturées. Le gisement exploité correspond aux calcaires du Lutétien qui se compose de bancs décimétriques à métriques homogènes possédant une bonne résistance mécanique (de l'ordre de 15 MPa en compression simple sur échantillon). La nappe phréatique est située sous le niveau de la carrière, et il n'y a pas de venues d'eau dans la carrière, à l'exception de quelques infiltrations ponctuelles.

Mise en sécurité, d'un point de vue géotechnique, par des travaux de confortement, la plateforme peut accueillir tout type d'expérimentations désireuses de mettre à profit les configurations d'une carrière abandonnée représentative de celles rencontrées en France ou, plus largement, tout projet requérant un environnement souterrain spécifique.

La plateforme offre les conditions idéales pour tester avec précision des technologies de reconnaissance et de télémessure innovantes, ou tout autre matériel destiné à de tels environnements souterrains, permettant d'éprouver leurs performances et leur adaptabilité au milieu. Un modèle spatial numérique 3D de la carrière, issu d'un levé de haute précision et géolocalisé, est disponible. Il peut servir de base comparative à d'autres levés ou de donnée d'entrée pour des modélisations numériques. Des aménagements spécifiques peuvent y être entrepris pour conduire des expérimentations en grand ou tester, par exemple, des méthodes de confortement.

La plateforme dispose d'une alimentation électrique, d'éclairage et d'une connexion Internet pour le suivi des expérimentations à distance (notamment via la plateforme de webmonitoring e.cenaris de l'Ineris). L'accès au site est fermé et contrôlé pour éviter tout vol ou vandalisme.

### **3. Tests de moyens innovants d'acquisition de données 3D en cavités souterraines**

Afin de comparer différents outils innovants développés et promus par les industriels, une expérimentation a été montée à l'été 2022 avec la participation de l'École des Mines de Nancy (Techlab), du cabinet de géomètres experts TTGéomètres-Experts, des fabricants de matériels Flyability, Emesent et Leica.

Lors de cette expérimentation, des robots-chiens, des drones volants et des scanners 3D embarqués ont été mis à l'épreuve dans l'environnement souterrain de la plateforme expérimentale. Il s'agissait de tester leurs capacités opérationnelles d'intervention et d'acquisition de données 3D en souterrain dans diverses conditions et milieux (accidentés, étroits, humides, obscurs, hauts...), ainsi que leur contrôle à distance (pilotage à vue, télépilotage, navigation semi-autonome, navigation autonome par IA). Ces essais ont également permis de créer une base de comparaison et d'aide au choix pour la numérisation 3D, embarquée sur drones, en milieux souterrains complexes.

#### **3.1 Tests réalisés**

Afin de répondre aux objectifs, des essais de déplacement dans différentes conditions et différents milieux ainsi que des essais de pilotage et de contrôle à distance au sein de réseaux souterrains ont été menés. Pour cela, quatre tests ont été réalisés sur des parcours prédéfinis, de manière identique avec les différents outils, à savoir :

- Parcours 1 (tracé rouge sur la Figure 1) : tester la portée de l'appareil sur une distance linéaire en souterrain (sans obstacle) ; le tracé proposé a une longueur de 150 mètres et une section de 3 m de large pour 3 m de hauteur minimum ;
- Parcours 2 (tracé bleu ciel sur la Figure 1) : démarrer le test à l'extérieur de la carrière (entrée principale) et évaluer la portée de l'appareil à l'intérieur de la carrière (linéaire droit d'environ 30 mètres de longueur puis virage à 45 degrés pour une section de 4 m par 4m) ;
- Parcours 3 (tracé vert sur la Figure 1) : tester le caractère opérationnel de l'appareil en conditions de carrière par chambres et piliers, les piliers constituant un obstacle, section de la galerie d'environ 3 m de hauteur par 4 m de largeur ;
- Parcours 4 (tracé orange sur la Figure 1) : tester le caractère opérationnel de l'appareil en conditions dégradées, avec présence de blocs au sol et passages étroits.
- Parcours de captation comparative (zone et flèche bleu foncé sur la Figure 1) : comparer les nuages de points issus des différents levés 3D.

Les différents parcours sont reportés sur la figure 1.



Figure 1. Localisation des tests réalisés au sein de la plateforme expérimentale et scientifique

Les matériels utilisés ont été les suivants :

- deux drones volants équipés de scanners 3D;
- trois robots-chiens dont un équipé d'un scanner 3D ;
- des scanners 3D terrestres ;
- des scanners 3D mobiles dynamiques ;
- un équipement de photogrammétrie, mobile mais non autonome.

### **3.2 Résultats concernant les aspects opérationnels des vecteurs terrestres et volants**

Les tests réalisés ont permis de caractériser les capacités et les spécificités des différents vecteurs (Figure 4). Concernant les drones volants et les robots-chiens, par leur pilotage, ils présentent la capacité d'intervenir dans des milieux dont les conditions de sécurité ne sont pas suffisantes pour y faire pénétrer des personnes (pour des raisons d'instabilité, ou d'atmosphère viciée par exemple). Les scanners 3D, pouvant être transportés par ces vecteurs, permettent d'acquérir ou de reconstituer des nuages de points des environnements souterrains plus ou moins précis et denses.

Lors des tests, les drones volants ont cheminé en toute sécurité au sein de l'ouvrage souterrain grâce à une bonne stabilisation et des possibilités de maintien à distance des parois (Figure 4). Ils ont rencontré peu de difficultés à se déplacer en milieu souterrain (sol irrégulier comme des zones de remblais ou d'éboulis, ou encore conduit de puits) jusqu'à une distance linéaire de l'ordre de 200 m lorsque la section était suffisante. À l'aide de lidars installés sur les drones volants, des levés 3D des carrières souterraines ont été réalisés rapidement. Le pilotage est associé à une tablette qui permet une prévisualisation du nuage de points en temps réel. Cela permet de suivre le cheminement de l'outil et de le piloter de

manière à couvrir l'entièreté de la zone désirée. Lorsque le drone atteint sa portée maximale vis-à-vis du pilote (resté à l'extérieur de l'ouvrage souterrain), le drone réussit à retourner automatiquement à l'endroit où il a perdu le signal. Certains modèles disposent d'un niveau d'autonomie plus évolué, grâce à l'intelligence artificielle, qui leur permet de poursuivre l'acquisition en dehors de la portée de la télécommande.

Lors des tests, la principale difficulté rencontrée a été vis-à-vis des dimensions du vecteur. En effet, pour un déplacement fluide et optimal, les dimensions du vecteur doivent être de l'ordre d'un quart de la section de l'ouvrage et tout au plus d'un tiers. Par exemple, pour un ouvrage de 3 m de hauteur pour 3 m de largeur, idéalement, le matériel devrait être de dimensions maximales de 0,75 m de largeur et autant en hauteur. Par ailleurs, le poids du drone volant, a un impact direct sur les poussières soulevées par les turbulences des hélices. On en déduira que dans le contexte des cavités souterraines françaises, il vaut mieux privilégier un drone plus compact, avec une batterie en cohérence avec son rayon d'action (portée d'environ 200 m et vitesse d'acquisition de 2m/s). Pour ce type de drone, la durée moyenne des vols avec l'autonomie de la batterie est d'une dizaine de minutes. Le drone volant est un vecteur qui évolue rapidement en souterrain et permet en un vol d'une dizaine de minutes de lever jusqu'à un demi-hectare de surface souterraine (selon la complexité géométrique de la zone).

Pour permettre un meilleur déplacement en milieu souterrain, le drone doit être équipé d'une cage de protection réelle ou « virtuelle » (c'est-à-dire une distance minimale par rapport à un obstacle que le drone ne peut pas franchir), afin de pouvoir se rapprocher des parois sans risque d'être endommagé, en particulier dans les espaces étroits.

Les drones volants actuels disposent de moyens de vidéo performants (Figure 2). Les vidéos obtenues sont de haute qualité grâce à la stabilisation du drone mais restent dépendant de la qualité de l'éclairage embarqué, car les conditions lumineuses sont généralement mauvaises (obscurité et poussières). Même s'il est possible d'ajouter des éclairages, il existe des systèmes installés d'origine sur les drones, qui présentent l'intérêt de s'ajuster automatiquement aux conditions lumineuses et à la distance des objets observés.



Figure 2. Capture d'une vidéo prise par un drone volant

Les drones actuels bénéficient d'une parfaite stabilisation grâce au Lidar, d'un éclairage déporté et d'une cage de protection. Le pilotage est donc facilité et les observations réalisées sont plus précises.

Les drones volants équipés de lidar permettent d'effectuer des levés 3D des cavités en temps réel (Figure 3). Cela permet à la fois de réaliser la cartographie d'un site, mais également de localiser les dégradations grâce à des points d'intérêts (POI). Les levés de résolution centimétrique, peuvent être améliorés lorsque le drone se met en station fixe (i.e. non en déplacement). De plus, la qualité des vidéos obtenues ainsi que le fort taux de recouvrement entre les images, permettent de réaliser des modèles 3D par photogrammétrie.



Figure 3. Exemple d'un nuage de points acquis par un drone volant

Les tests réalisés ont également permis d'évaluer les déplacements des vecteurs terrestres de type robot-chiens (Figure 4). Il s'agit de robots se déplaçant sur quatre appuis, comme un quadripède : chaque pied est déplacé consécutivement de manière régulière et dans un ordre défini. Les capacités de déplacements en milieu souterrain du robot-chien sont complètement différentes de celles des drones-volants. Ce vecteur présente l'atout d'être stable et de pouvoir emporter du matériel plus lourd (poids total de plus de 10 kg) comme des lidar, capteurs, éclairages.... Il peut être équipé d'un bras articulé à l'aide duquel il est capable de déposer ou de récupérer du matériel. Néanmoins, les tests ont montré que des déplacements sur des surfaces irrégulières (éboulis formé de petites pierres par exemple) étaient encore difficiles. Il n'a pas la stabilité suffisante et son poids important le déséquilibre.

Sa portée par rapport à la commande de pilotage s'est montrée suffisante pour réaliser tous les tests définis, au-delà de 200 m. Les tests ont également montré que le robot-chien peut déposer sur son parcours des amplificateurs d'ondes radio afin d'augmenter sa portée. Ils ont également montré que le robot, grâce à ses capteurs, a la capacité de se déporter pour contourner les obstacles.

L'un des avantages de certains modèles de robot-chien réside dans leur possibilité d'être programmés pour réaliser des missions identiques de manière autonome. Cela permet notamment de réaliser des missions de surveillance, à fréquence déterminée. Pour acquérir cette autonomie, il est toutefois nécessaire d'avoir une reconnaissance initiale pilotée permettant d'acquérir les éléments nécessaires à la programmation.



Figure 4. Exemples de drone-volant (à gauche) et de robot-chien (à droite) en souterrain

Le robot-chien peut embarquer des lidars mobiles permettant d'obtenir des levés de résolution centimétrique, et comme le drone, pouvant être améliorés lorsqu'il se met en station fixe (Figure 5). Par contre, son mode de déplacement, terrestre, ne lui permet pas d'accéder à tous les endroits difficiles d'accès (hauteur, recoin...).

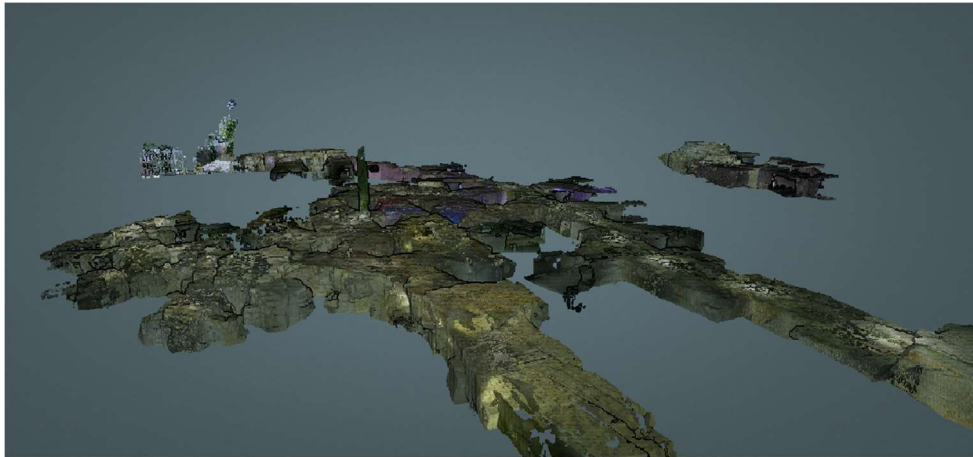


Figure 5. Exemple de nuage 3D de la carrière souterraine réalisé par un lidar embarqué sur un robot-chien

### **3.3 Éléments de comparaison de nuages de points**

Afin de comparer les nuages de points acquis par les différents outils, une captation comparative a été réalisée. Elle a été réalisée dans une zone commune de la carrière où se trouve une montée de voûte (ou fontis). Le nuage de points acquis par le scanner-laser terrestre (sur trépied) a servi de base de comparaison.

La photogrammétrie est une technique qui permet de réaliser des modèles 3D à partir de photographies prises sous différents angles de vue et avec un fort recouvrement entre les photographies. Le résultat est obtenu, a posteriori, par traitement de centaines de photos en utilisant des logiciels spécifiques d'assemblage et de construction 3D. Le résultat est dépendant de la qualité des prises de vue, fortement contrainte par l'éclairage (contrairement au lidar). La densité du nuage de points obtenu par photogrammétrie, lors des tests, est nettement inférieure aux solutions de type lidar testées (facteur 10 à 20). Sa résolution (décimétrique) peut s'avérer limitée pour réaliser des inspections géotechniques, notamment pour détecter des fractures ou de petites chutes de blocs.

La comparaison des nuages de points obtenus avec le scanner laser terrestre et les lidars embarqués sur drones volants a permis de mettre en évidence de faibles différences entre les méthodes, de l'ordre de quelques centimètres, et pour certains modèles, inférieures au centimètre (Figure 6). De manière ponctuelle, quelques décalages ont été constatés (Figure 6), mais globalement, les résultats sont satisfaisants et les lidars embarqués sur drones volants permettent d'obtenir des nuages de points beaucoup plus rapidement et en toute sécurité.

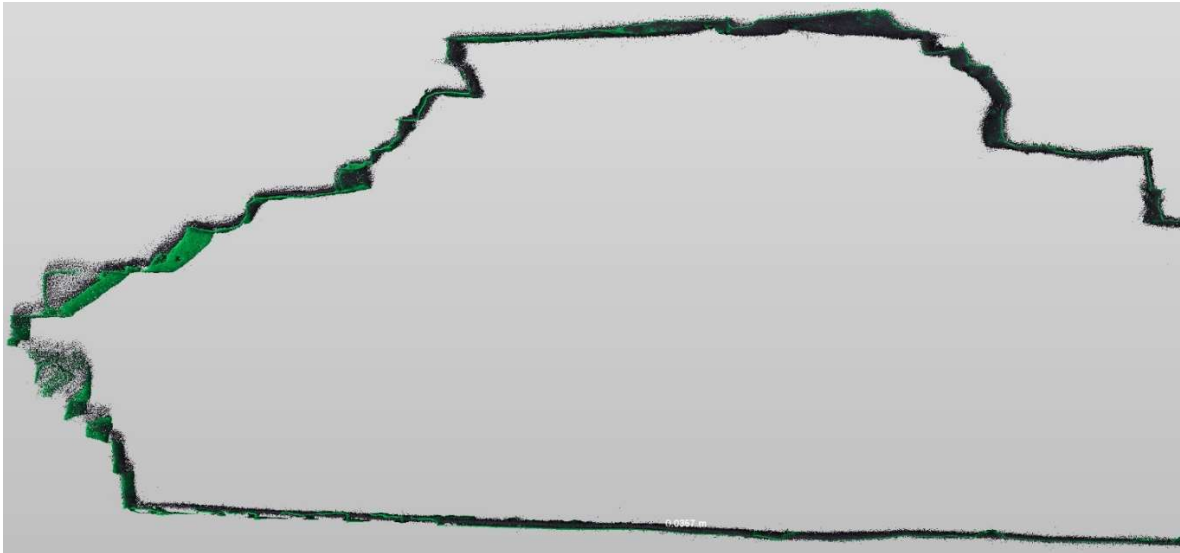


Figure 6 : Superposition d'une section du secteur du fontis obtenue avec le scanner terrestre (en vert), comparée à celui d'un des drones volants (en noir).

#### 4. Conclusions

Les tests réalisés au sein de la plateforme scientifique de Saint-Maximin ont permis d'évaluer et de mettre en perspective différents outils innovants, équipés de moyens de levés 3D, en environnements souterrains notamment vis-à-vis d'inspections géotechniques (pour préciser les aléas et risques liés aux cavités, expertise historique de l'Ineris). Ils ont mis en évidence que le drone volant présente l'avantage d'évoluer rapidement même lorsque les conditions d'accessibilité sont difficiles. Ces outils restent toutefois limités par leur portée lorsqu'ils sont dénués de relais radios ou d'intelligence artificielle. Les robots-chiens ont quant à eux, malgré une mobilité plus difficile, démontré leur capacité à emporter du matériel et à mener des missions programmées de type surveillance. La qualité des nuages de points obtenus par les nouveaux lidars embarqués permettent désormais de répondre aux besoins des inspections géotechniques classiques et des avis sur des situations d'instabilité, même si les scanners laser terrestres gardent un léger avantage avec une précision plus élevée (pluri-millimétrique).