

## **Aménagement d'une carrière souterraine en une plateforme expérimentale et démonstrative**

### **Converting an underground quarry in an experimental and demonstration platform**

A. Cherkaoui, *INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques), Verneuil-en-Halatte, France*

M. Degas, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

JM. Watelet, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

T. Richard, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

G. Gouillon, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

#### **Résumé**

L'INERIS (INstitut de l'Environnement Industriel et des RISques) a aménagé au sein d'une carrière souterraine, la première plate-forme de démonstration et d'expérimentation dédiée aux risques liés à la présence de cavités souterraines. Ce projet vise à diffuser les connaissances de la gestion des risques liés aux cavités naturelles vers tous les interlocuteurs confrontés à la présence de cavités, particulièrement les collectivités locales et territoriales, grâce à un ensemble d'ateliers concrets et expérimentaux. Les différents phénomènes d'instabilités (remontée de voute, fracturation des piliers...), les méthodes de surveillance (caméra téléguidée à distance, sondes microsismiques et microphoniques, filets détecteur de chute de blocs...), les méthodes d'évaluation de ces risques, les mesures d'aménagement et les moyens de limiter les impacts en surface y sont présentés et expliqués. La partie expérimentale de ce laboratoire consiste à déterminer la vitesse de déformation d'un pilier et les instabilités liées en utilisant des capteurs climatiques et géomécaniques en milieu souterrain. Pour ce faire, un pilier de la carrière a été instrumenté (capteurs de température, capteur d'humidité ambiante en galerie, sonde d'humidité de roche, extensomètre à double ancrage, canne de convergence) ainsi qu'un bloc de craie immergé dans de l'eau. Deux autres outils ont été testés et développés : un système de localisation du souterrain par rapport à la surface (fond/jour) et un outil de caractérisation et numérisation du milieu souterrain. L'analyse de ces informations sera exposée dans cet article.

#### **Abstract**

In an underground quarry, INERIS (National Institute of Industrial Environment and Risk) has set up the first experiment and demonstration unit dedicated to the risks relating to the presence of underground cavities. This project aims the development, enhancement and circulation of knowledge regarding risk management relating to underground cavities to all relevant stakeholders who may encounter cavities, more especially local and regional authorities, through a set of demonstrator and experimental workshops. Different instability phenomena (arch rise, fracturing pillars ...), monitoring methods (remote controlled camera, micro-seismic and microphone sensors, rock fall detector net...), evaluation methods of these risks, management measures and means to limit the surface impact are presented and explained. The experimental part of this laboratory involves determining the deformation velocity of a pillar and instabilities linked using climatic and geomechanical sensors operating in an underground environment. To do this, a pillar of the quarry was instrumented (temperature sensors, ambient gallery humidity sensor, rock humidity sensors, extensometer with two anchor points, convergence probe) together with a chalk block immersed in water. Two other tools have been developed and tested: a locating system in relation to the subsurface and the surface and a scanning and characterization tool of the underground environment. The analysis of this information will be exposed in the present article.

# **Aménagement d'une carrière souterraine en une plateforme expérimentale et démonstrative**

## **Converting an underground quarry in an experimental and demonstration platform**

A. Cherkaoui, *INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques), Verneuil-en-Halatte, France*

M. Degas, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

JM. Watelet, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

T. Richard, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

G. Gouillon, *INERIS, Verneuil-en-Halatte, France*

### **1 Introduction**

L'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques) a aménagé au sein d'une carrière souterraine, la première plate-forme de démonstration et d'expérimentation dédiée aux risques liés à la présence de cavités souterraines. Ce projet a pour objectif de diffuser les connaissances de la gestion des risques liés aux cavités naturelles vers tous les interlocuteurs confrontés à la présence de cavités, particulièrement les collectivités locales et territoriales, grâce à un ensemble d'ateliers concrets et expérimentaux.

Une première zone est consacrée à présenter et visualiser les différents phénomènes d'instabilités, les méthodes de surveillance, les méthodes d'évaluation de ces risques et les moyens de limiter les impacts en surface. La deuxième partie concerne le volet « recherche scientifique » qui sera plus largement détaillé dans cet article. Elle se divise en trois axes principaux : le suivi de la stabilité d'un pilier, le développement d'un système de localisation du souterrain par rapport à la surface et le développement d'une méthode de surveillance par l'utilisation d'un appareil scanner laser 3D.

Ce projet est un bel exemple de la complémentarité existante entre l'aspect démonstratif et l'aspect expérimental d'un site naturel grâce à des aménagements appropriés.

### **2 Caractéristiques du site**

Le site est situé sur la commune de Saint-Maximin (60), au cœur d'une carrière souterraine, la carrière « Parain », propriété de la Mairie de Saint-Maximin.

Il s'agit d'une ancienne exploitation de pierre de taille par chambres et piliers abandonnés, s'étendant sur 3 à 4 hectares et dont l'activité extractive a cessé au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Les portées du toit sont globalement de l'ordre de 5 mètres pouvant atteindre à certains endroits 8-10 mètres maximum, pour un taux de défrètement (rapport de la surface exploitée à la surface totale) global de l'ordre de 75 %. La hauteur actuelle de la majeure partie des galeries est de l'ordre de 4 mètres. Toutefois, l'ouverture peut atteindre 7 à 8 mètres dans les secteurs non remblayés au sol par les déchets de taille. L'épaisseur du recouvrement varie entre 13 et 20 m.

Le gisement exploité correspond aux niveaux calcaires de la base du Lutétien qui a fourni une pierre de taille de bonne qualité utilisée notamment pour des constructions, localement et dans l'agglomération parisienne. Il se compose de bancs décimétriques à métriques continus et homogènes possédant une bonne résistance mécanique. La nappe phréatique est située sous le niveau de la carrière, et il n'y a pas de venues d'eau dans la carrière, seulement quelques infiltrations ponctuelles. Au XX<sup>ème</sup> siècle, la carrière a été utilisée comme champignonnière. Cette activité a cessé il y a une vingtaine d'années. De nombreuses salles sont d'ailleurs encore tapissées de sacs de culture.

### **3 Aménagement du site**

La zone réservée à l'INERIS occupe une emprise de plus de 2000 m<sup>2</sup> dans la carrière. La surface dédiée concentre d'une part l'aspect démonstratif, un parcours présentant plusieurs « ateliers » où sont exposées des thématiques relatives à la connaissance et aux mesures de prévention et de protection et d'autre part un volet expérimental.

### **3.1 La plate forme de démonstration**

L'objectif de ce volet est de sensibiliser un large public aux mouvements de terrain liés aux cavités souterraines mais aussi de former les collectivités locales et territoriales qui doivent prendre des décisions pour gérer efficacement ce risque.

Le premier atelier explique, à l'aide d'un poster, les différentes méthodes d'extraction selon le matériau exploité et l'époque d'exploitation considérée. Aujourd'hui, laissées à l'abandon, les carrières souterraines sont susceptibles de se dégrader et de provoquer des mouvements de terrain.

Le deuxième atelier expose les phénomènes et les mécanismes d'instabilités. En effet, le processus de dégradation est engagé dès la création d'un vide. Ce processus induit une redistribution des contraintes naturelles influencée par différents facteurs de prédisposition liés aux conditions d'exploitation du site (dimensionnement insuffisant) et naturelles (température, hygrométrie, temps). Les mouvements de terrain en surface peuvent prendre différentes formes. Les plus courants sont les effondrements localisés (ou fontis), mais des phénomènes de grande ampleur comme des affaissements, des effondrements en masse ou des éboulements associés à des falaises sous-cavées peuvent survenir.

Le troisième atelier montre comment il est possible de maîtriser le risque en améliorant les connaissances, principalement en détectant et en inspectant de nouveaux vides pour en préciser les contours et pour évaluer l'état des ouvrages à l'origine du risque. Différents outils sont présentés : les outils traditionnels comme la boussole, le lasermètre mais aussi les plus innovants comme des balises de repérage Fond-Jour, les radios ou la caméra qu'elle soit fixe (de type caméra de surveillance) ou transportable de type caméra de forage.

Le quatrième atelier décrit les stratégies de mise en sécurité par traitement du vide : la consolidation, le comblement ou la suppression du vide font partie des solutions envisageables. Différentes méthodes de consolidation peuvent être mises en œuvre comme le boulonnage, le soutènement, la projection de béton ou de résine, le cerclage des piliers ou encore l'édification de piliers artificiels. Pour le comblement du vide, il s'agit de mettre en œuvre du matériau de manière à réduire voire à supprimer le volume des vides. Au sein de la carrière Parain, deux anciennes méthodes de remblai sont présentes et sont mises en évidence. Il s'agit d'une part, de remblai de type hagues et bourrages constitués des pierres d'exploitation, et d'autre part, du remblai présent au sol de la carrière constitué de stériles d'exploitation à granulométrie variée.

Enfin, le cinquième atelier permet de visualiser les outils de surveillance et de comprendre leur fonctionnement adapté à chaque configuration de site. La surveillance des cavités souterraines doit composer avec la grande complexité de certaines cavités et la diversité des phénomènes à suivre. Les instruments exposés sont des sondes microsismiques de paroi, de surface et de forage (suivi de la fracturation par écoute sismique), un filet détecteur de chute de blocs fixé au toit de la carrière, une sonde microphonique (suivi acoustique), un fissuromètre, etc. Une centrale d'acquisition permet de recueillir les signaux des capteurs sollicités artificiellement pour la démonstration.

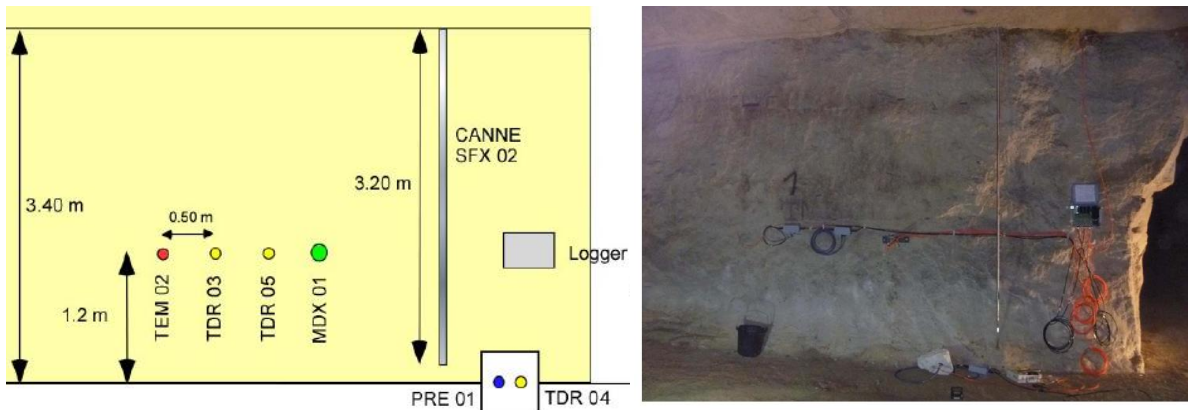
### **3.2 La plate forme expérimentale**

#### **3.2.1 Instrumentation dans la roche pour déterminer la stabilité d'un pilier**

Un pilier a été équipé de divers capteurs de déplacement (Figure 1) :

- une canne de convergence mesurant le raccourcissement longitudinal du pilier ;
- un extensomètre à deux ancrages à 1 m et 0,5 m de profondeur pour suivre son élargissement latéral ;
- des sondes d'humidité de roche TDR (time domain reflectometry) ;
- des capteurs de température ;
- un capteur d'humidité ambiante en galerie.

En outre, un bloc de craie de la carrière a été instrumenté avec une sonde d'humidité de roche TDR et une sonde de pression interstitielle. Ce bloc a été placé dans un bac en plexiglas rempli à moitié d'eau. Les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition qui enregistre en continu les mesures effectuées.



**Figure 1. Schéma d'implantation et photographie de l'installation**

Les données sont en cours d'acquisition depuis juin 2013 et les premiers résultats montrent :

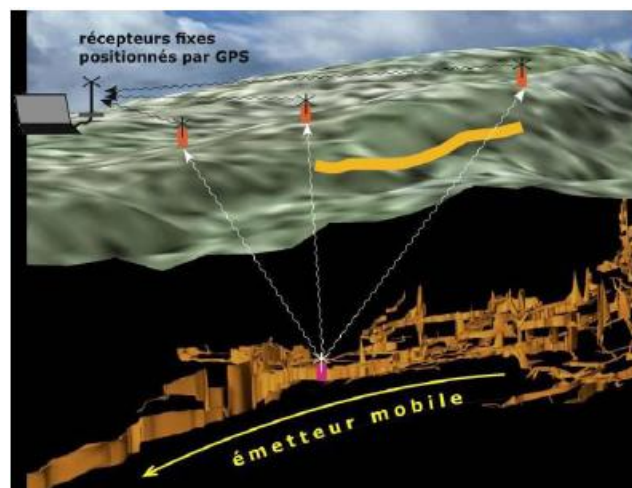
- un raccourcissement longitudinal du pilier de 15 micromètres/an en moyenne, mesuré par la canne de convergence ;
- une extension latérale du pilier plus importante en périphérie qu'au cœur du pilier ;
- que la température impacte de manière significative la mesure de la convergence du pilier : en effet, l'acier (matière composant la canne de convergence) se dilate en fonction des variations de température ce qui modifie les mesures enregistrées de déformation du pilier (surtout dans ces gammes de déplacement, de l'ordre d'une dizaine de micromètre). Une correction des mesures est donc nécessaire ;
- le calcaire de cette carrière serait peu sensible à l'eau : les mesures fournies par les TDR ne dépassent pas un taux d'humidité volumique de la roche de 6% pour le pilier.

Les données futures d'acquisition de ces capteurs nous permettront de conclure sur le comportement de cette carrière, l'impact de l'eau sur les propriétés de la roche et l'interprétation des données de la canne de convergence.

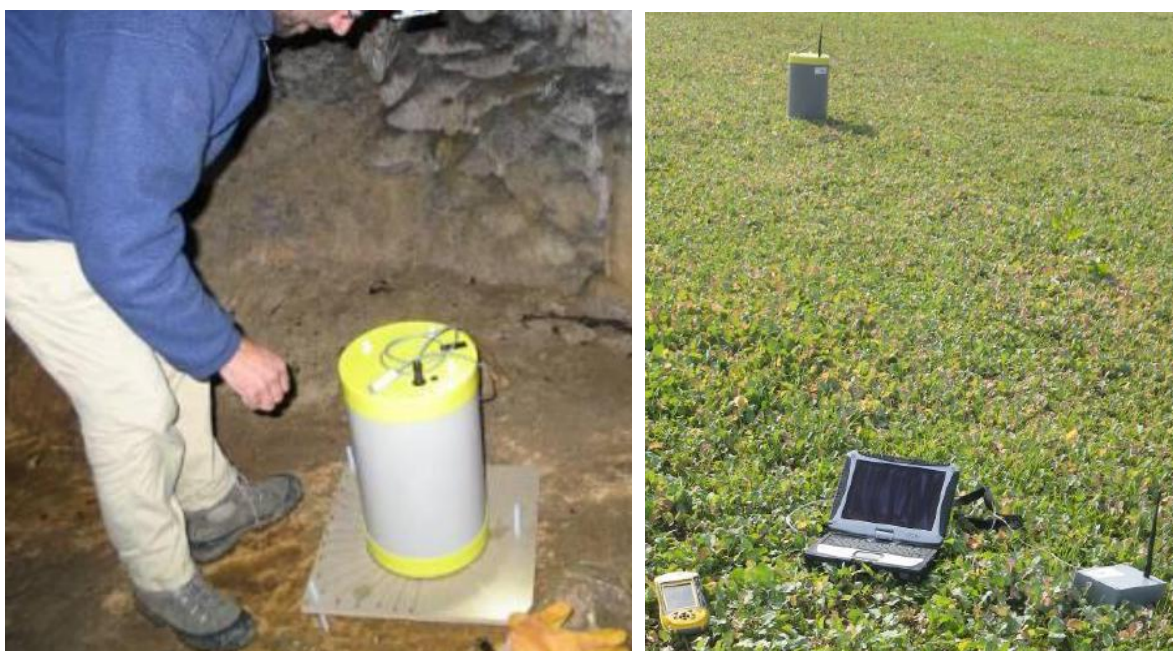
### 3.2.2 Développement d'un système de localisation entre le souterrain et la surface

Dans le but d'améliorer les techniques de localisation des cavités souterraines par rapport à la surface, le système de localisation UGPS 2 a été développé en collaboration avec les équipes suisses de l'ISSKA.

Le système « UGPS 2 » comprend une balise « émettrice » d'un signal électromagnétique et 1 à 4 balises « réceptrices ». Le nombre de balises utilisées en surface dépend du site, du résultat recherché et de la configuration mise en œuvre. Un ordinateur, communiquant par ondes radio avec les balises réceptrices, assure le traitement des signaux et fournit la localisation de la balise émettrice par rapport à la ou les balises réceptrices (Figure 2 et Figure 3).



**Figure 2. Principe de fonctionnement de l'UGPS 2**



**Figure 3. Balise fond (émettrice) et jour (réceptrice)**

Ce système a été testé dans la carrière Parrain pour trois configurations :

- la recherche verticale permettant le positionnement des cavités souterraines par rapport à la surface,
- le levé d'un cheminement en souterrain par rapport à un point (une balise émettrice et une balise réceptrice),
- le levé d'un cheminement en souterrain avec 3 ou 4 points connus en surface (une balise émettrice et 3 ou 4 balises réceptrices).

La recherche verticale a été mise en œuvre dans la carrière Parrain pour rechercher en surface l'aplomb d'une zone en souterrain présentant une remontée de cloche de fontis. L'opération s'est déroulée rapidement (10 minutes) et a permis d'identifier le point recherché avec précision.

Le levé d'un cheminement en souterrain par rapport à un point a été testé dans le même secteur souterrain que pour la recherche verticale. La précision des mesures relativement au point de référence est bonne (de l'ordre du mètre), par contre, la corrélation de ces mesures avec le plan de la carrière reste approximative et dépendante de l'orientation manuelle du récepteur. Concrètement, cette configuration aurait été idéale si l'on avait souhaité faire un levé rapide d'un secteur non cartographié de la carrière, en partant d'un point de référence connu sur plan.

Le levé d'un cheminement en souterrain par rapport à 3 points connus en surface a été testé. L'objectif de cette configuration est de lever un cheminement souterrain précis dans un système de coordonnées permettant une superposition par rapport à la surface. Cet essai a mis en évidence la complexité et les limites de cette configuration. Lors de l'opération, le logiciel de l'UGPS 2 a fourni trois types de positions : des positions « triangulées », précises et dans un système de coordonnées voulu (parfaitement superposable par rapport à la surface), mais aussi des positions « non triangulées » (lorsque l'émetteur passe hors de portée d'un des récepteurs) qui ne sont donc plus dans le système de coordonnées voulu mais dépendante de l'orientation de la balise réceptrice ayant traité le signal, et enfin aucune position lorsque l'émetteur était hors de portée des 3 balises réceptrices. Ainsi, la zone restreinte d'investigation permettant la triangulation des mesures et l'absence de communication entre les opérateurs, en souterrain et en surface, a donné lieu à un levé épisodique, inégal et quasiment non exploitable. Pour valoriser cette configuration, il est impératif que les balises réceptrices aient une plus grande portée pour que la zone d'investigation avec triangulation couvre la ou les cavités que l'on souhaite cartographier. Il est également nécessaire de coupler à l'UGPS 2 un moyen de communication permettant d'arrêter ou de recadrer le cheminement souterrain en fonction du déroulement de l'acquisition en surface.

Cette mise en œuvre en souterrain a permis de définir des protocoles expérimentaux à respecter dans l'objectif d'optimiser la cartographie. Cette technique pourra être utilisée dans les cas de calage rapide de plans de travaux souterrains par rapport à la surface, pour le positionnement en surface d'un réseau de cavités souterraines non cartographié, pour l'implantation de sondages ou encore pour l'identification d'enjeux à l'aplomb de zones à risques.

### **3.2.3 Développement d'un outil de caractérisation du milieu souterrain**

#### *3.2.3.1 Principe*

Le scanner laser 3D fonctionne à l'image d'un lasermètre en mesurant la distance avec le point d'impact. En multipliant des millions de fois sur 360° ces mesures de distance, un volume en trois dimensions peut être modélisé. Le nuage de points obtenu peut être couplé à un appareil photographique intégré afin d'avoir un rendu en couleur.

Le scanner laser utilisé lors des tests peut mesurer jusqu'à 976 000 points par seconde avec une portée effective de 120 mètres. Il a un champ de vision de 360° à l'horizontale et de 300° à la verticale. Un « scan » correspond à une position donnée de l'appareil. Afin de numériser un volume parfois important, il peut être nécessaire de réaliser un nombre important de mesures. 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 est ainsi nécessaire d'avoir au moins trois cibles en commun pour recoller deux scans.

Pour chaque position de l'appareil, le scanner ne peut numériser que l'environnement « visible ». Autrement dit, il ne numérisera pas un objet si celui-ci est masqué par un autre. Par ailleurs, un cône de « non visibilité » est intrinsèquement lié à l'appareil utilisé et correspond généralement à l'emprise du trépied. L'acquisition des points est très rapide et dure en moyenne 5 minutes par scan.

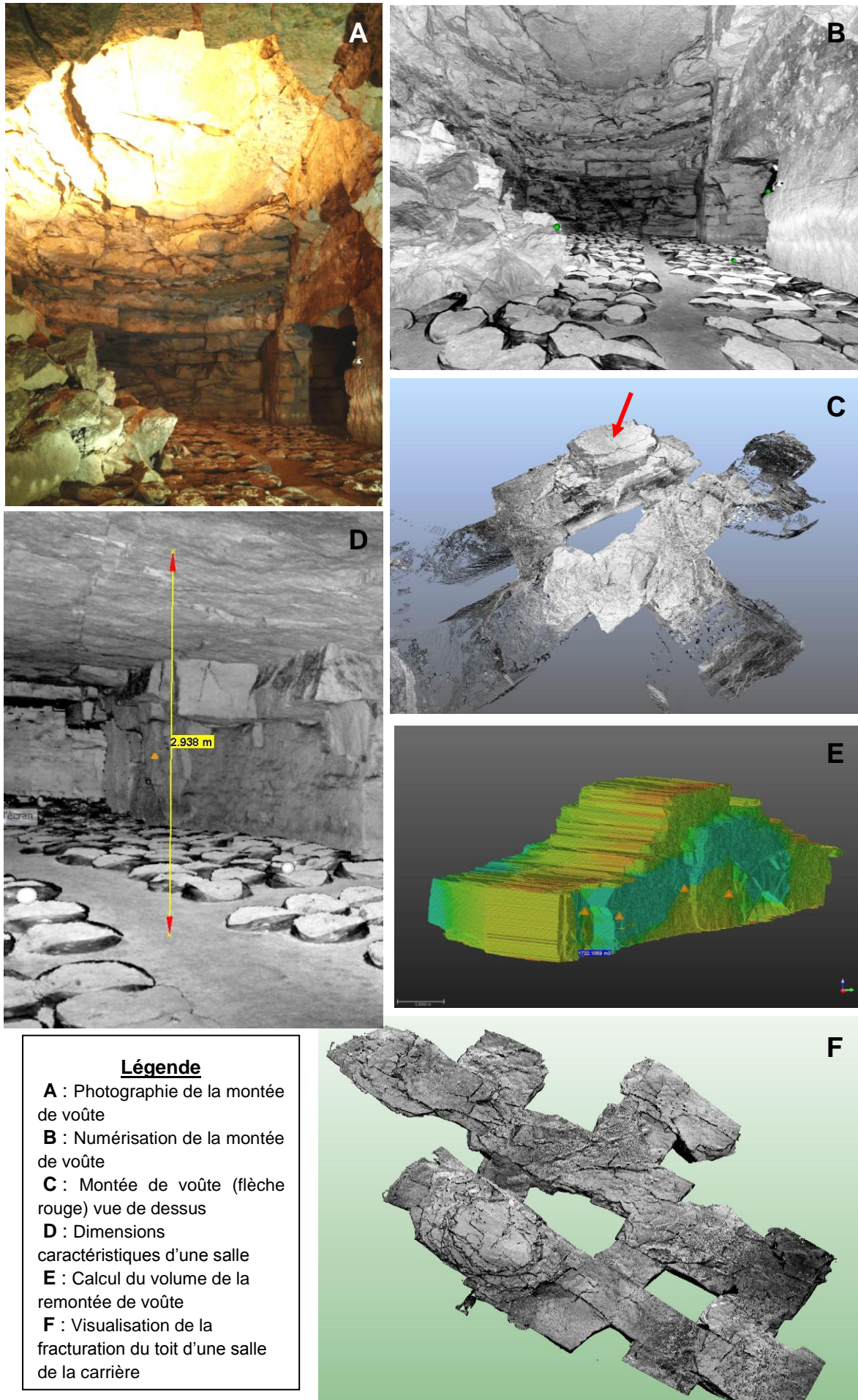
Le traitement des données du scanner est ensuite réalisé à l'aide d'un logiciel de traitement de nuages de points. Il est alors possible de calculer les dimensions caractéristiques du site, le volume du vide, de réaliser un plan précis du secteur, de visualiser la fracturation de la roche et de surveiller un secteur sensible en identifiant les évolutions entre deux périodes de numérisation (comparaison possible de deux scans entre eux, réalisés sur deux périodes différentes avec mise en évidence automatique des différences de position).

#### *3.2.3.2 Application à la carrière Parrain*

L'objectif principal de la numérisation 3D de la carrière Parrain était d'évaluer l'ensemble des fonctionnalités de l'outil et de le confronter à un environnement souterrain (humidité et poussières). Pour répondre à cet objectif, un secteur en particulier a été identifié. Il s'agit d'une montée de voûte importante, d'une dizaine de mètres de hauteur sur une vingtaine de mètres de diamètre (Figure 4A). Au total, quatre stations ont été utiles afin de numériser la montée de voûte et son environnement proche (Figure 4B et Figure 4C). Vingt minutes ont été nécessaires pour l'installation et la réalisation des mesures. Les scans ont été réalisés en noir et blanc (sans l'utilisation de l'appareil photo intégré) en adoptant une précision de 6 mm à 10 m de distance. Aucune observation ou dysfonctionnement du scanner laser n'a été relevé pendant la manipulation.

Au-delà de l'obtention d'une image de référence précise, le scanner a permis de :

- obtenir les dimensions caractéristiques des travaux souterrains (Figure 4D) ;
- calculer un volume précis (le calcul se fait par la méthode des tranches). Le volume de vide au droit de la montée de voûte numérisée est de 1720 m<sup>3</sup> (Figure 4E).
- réaliser un plan précis du secteur numérisé (exportable sous Autocad) ;
- visualiser rapidement et efficacement la fracturation de la roche (Figure 4F) ;
- surveiller un secteur sensible et identifier les évolutions entre les deux périodes de numérisation. Cet outil permet la comparaison de deux scans entre eux, réalisés sur deux périodes différentes. Le résultat obtenu met en évidence les différences sur l'axe z (altitude). Il est donc possible de localiser les éventuelles chutes de blocs avec une précision centimétrique.



**Figure 4. Photographie et ensemble de figures représentatives réalisées au scanner laser 3D**

L'utilisation du scanner laser 3D sur ce site souterrain a permis de mettre en évidence l'adaptabilité et les limites de cet outil pour caractériser les cavités souterraines. L'acquisition rapide des données de site par cet appareil réduit grandement le temps de terrain tout en augmentant la précision des informations acquises. Les zones inaccessibles, en hauteur et escarpées, où la prise de mesures s'avère périlleuse, peuvent être caractérisées facilement. Evidemment, cet outil ne remplace pas l'analyse géotechnique réalisée permettant de conclure sur l'état de stabilité du site mais il constitue une base fiable pour caractériser précisément l'ensemble du site. A cela s'ajoute l'aspect visuel : l'obtention du site numérisé en 3D permet au décideur de comprendre l'analyse de stabilité et d'envisager les mesures à prendre.

#### **4 Conclusion**

La carrière Parrain est un espace souterrain qui est actuellement utilisé pour développer une plateforme démonstrative et un laboratoire expérimental. Les cinq ateliers qui y sont présentés permettent de sensibiliser un large public aux mouvements de terrain liés aux cavités souterraines mais aussi de former les collectivités locales et territoriales qui doivent prendre des décisions pour gérer efficacement ce risque. Les ateliers présentent les différentes méthodes d'exploitation, les mécanismes d'instabilité, la maîtrise du risque, les stratégies de mise en sécurité et les méthodes de surveillance du risque.

La partie expérimentale, quant à elle, a permis de mettre en place une instrumentation sur un pilier sachant que les données d'acquisition futures des capteurs permettront de statuer sur le comportement de cette carrière, l'impact de l'eau sur les propriétés de la roche et l'interprétation des données de la canne de convergence. Des techniques novatrices ont été testées et développées dans cet environnement souterrain tels que l'UGPS 2 et le scanner laser 3D. Cette carrière permet de valider des techniques de mesures pour pouvoir les appliquer sur le terrain. D'autres expérimentations sont prévues dans l'avenir. Leur objectif est d'améliorer les méthodes de prévention des risques de mouvements de terrain liés aux cavités souterraines.