

# **Numérisation des levés géologiques et modélisation géométrique 3D haute résolution dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse / Haute-Marne de l'Andra à Bure.**

## ***Digital geological surveys and high resolution 3D modelling in the Andra's Bure underground research laboratory (Meuse/Haute Marne).***

Bertrand CHAZALY, *FUGRO FRANCE, Castries, France*

Céline RIGHINI-WAZ, *ANDRA, Bure, France*

Jessica LE PUTH, *ANDRA, Bure, France*

Sylvain MINICI, *FUGRO FRANCE, Bure, France*

Anthony DOTTESI, *FUGRO FRANCE, Bure, France*

### **Résumé**

Les expérimentations à caractère scientifique et technologique conduites par l'Andra dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse / Haute-Marne à Bure, ont pour objet (1) de caractériser le comportement in situ des argilites du Callovo-Oxfordien constitutives de la formation hôte du laboratoire, (2) de tester les techniques de construction des ouvrages, (3) d'étudier les interactions entre les argilites et les matériaux du stockage et (4) d'évaluer des dispositifs de monitoring.

Lors du creusement des galeries, une fracturation induite se développe autour des ouvrages (galeries, alvéoles, forages). Dans ce cadre, la mise en œuvre du suivi géologique des levés de front de creusement et des forages a été confiée aux géologues et topographes de Fugro France. Il est réalisé par scanner laser 3D et photogrammétrie, aboutissant à l'enregistrement et l'analyse de modèles 3D haute résolution des fronts.

Les aménagements et les essais technologiques et expérimentaux nécessitent aussi le relevé topographique régulier des installations. Les numérisations 3D des galeries et alvéoles souterraines du Laboratoire sont réalisées avant, pendant et après instrumentation.

Cette approche numérique haute résolution offre un archivage 3D régulier des installations. Elle s'inscrit dans une démarche de développement des méthodes d'enregistrement et d'amélioration de la qualité des informations acquises.

### **Abstract**

As part of a feasibility study for a deep repository on the underground research laboratory (URL) of Andra (French National Agency for Radioactive Waste Management), a geological survey of both drifts and drilling is performed in order to characterize the excavation-induced damages on the surrounding claystone.

Fugro France has developed a geological survey method, which combine high-resolution topographical survey by 3D laser scanning, photogrammetry, and naturalistic observations of the drift faces.

Technological and experimental developments also require regular surveys of the underground facilities. The 3D laser scanning of galleries and micro-tunnels is performed before, during and after equipment installation.

This high resolution and digital approach provides and enriches a detailed 3D archive, in the context of the continuous improvement of information quality.

# Numérisations et modélisations 3D haute résolution dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse / Haute-Marne de l'Andra à Bure.

## *High density 3D surveys and modelling in the Andra's Bure underground research laboratory (Meuse/Haute Marne).*

Bertrand CHAZALY, *FUGRO FRANCE, Castries, France*

Céline RIGHINI-WAZ, *ANDRA, Bure, France*

Jessica LE PUTH, *ANDRA, Bure, France*

Sylvain MINICI, *FUGRO FRANCE, Bure, France*

Anthony DOTTESI, *FUGRO FRANCE, Bure, France*

### 1 Introduction

La loi n°91-1381 du 30/12/1991 dite « loi Bataille » crée l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra) en tant qu'établissement public, et la charge de mener des études de faisabilité sur le stockage géologique de ces déchets. L'Andra étudie alors 4 sites d'intérêt, retenus sur la base de critères géologiques, pour l'implantation du laboratoire souterrain dédié à ces recherches. Le site de Meuse/Haute-Marne est retenu fin 1998 par le gouvernement et l'Andra construit sur la commune de Bure un Laboratoire de recherche souterrain, dans lequel ont été mises en œuvre des expérimentations à caractères scientifique et technologique.

Après 15 ans de recherches, la loi n°2006-739 du 28/06/2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, prolonge la démarche de la « loi Bataille » de 1991 en retenant la solution du stockage profond. Dans ce cadre, les études et recherches menées au sein du Laboratoire souterrain ont pour objectif de concevoir un centre industriel de stockage en couche géologique profonde (projet Cigéo) et de réunir tous les éléments nécessaires à la demande d'autorisation de création du stockage.

Les expérimentations à caractère scientifique et technologique conduites dans le Laboratoire souterrain ont pour objet :

- De caractériser du point de vue géologique, géomécanique, thermique, hydrogéologique et géochimique, le comportement in situ des argilites du Callovo-Oxfordien, constitutives de la formation hôte du Laboratoire ;
- De vérifier la constructibilité et les possibilités de réversibilité d'un éventuel stockage dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

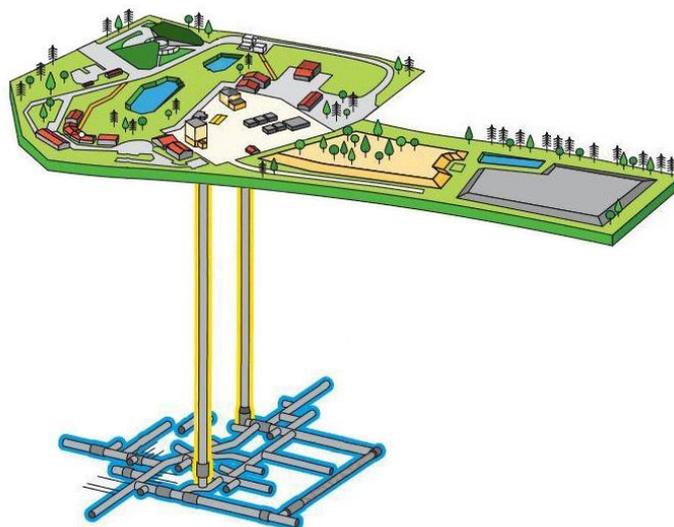


Figure 1: Vue schématique du centre de Meuse / Haute-Marne et son laboratoire souterrain

## **1.1 Le centre de Meuse/ Haute Marne à Bure**

En surface, le centre regroupe sur 17 ha des installations comprenant notamment des bureaux, un ensemble de bâtiments à vocation scientifique et technique dont les superstructures de deux puits de liaison, des aires où sont implantés des forages d'observation et de mesure, et une zone de stockage des matériaux issus des travaux de creusement.

Les installations souterraines, situées à environ 500 m de profondeur et accessibles par deux puits, sont aujourd'hui constituées d'un réseau de galeries localisées dans la couche du Callovo-Oxfordien avec un niveau principal situé à 490 m de profondeur et un niveau secondaire à 445 m de profondeur. Cet ensemble comporte des galeries affectées aux investigations scientifiques, et des galeries à caractère technique. Il représente environ 1900 m de linéaire.

## **1.2 Les expérimentations menées par l'Andra au Laboratoire**

Les objectifs des investigations conduites dans les installations souterraines sont les suivants :

- Eprouver les propriétés de confinement des argilites du Callovo-Oxfordien et notamment leurs propriétés de transfert vis-à-vis des gaz et des radionucléides ;
- Etudier les réactions de la roche aux perturbations engendrées par un éventuel stockage, notamment son creusement et son échauffement, à travers des expérimentations sur ses caractéristiques mécaniques, thermiques, géochimiques et hydrauliques ;
- Evaluer le comportement des matériaux en interaction avec la formation géologique ;
- Tester des méthodes et/ou des technologies de creusement et de construction des ouvrages (galeries, alvéoles, scellements) ;
- Expérimenter des dispositifs (capteurs, transmission sans fil...) qui pourraient être utilisés pour observer et suivre l'évolution du stockage pendant son exploitation.

Ces investigations comportent :

- Des observations géologiques et des mesures réalisées au fur et à mesure de l'avancement du creusement des ouvrages souterrains ;
- Des prélèvements d'échantillons géologiques ;
- Des expérimentations en forages et dans les galeries ;
- Des essais pour vérifier l'adéquation des procédés de creusement et de soutènement de galeries avec un concept de stockage réversible.

L'Andra effectue aussi des relevés des galeries, qui ont pour objectifs d'effectuer le récolement des infrastructures, des calculs de volume, de déformation, de déplacement, de trajectoire, d'épaisseurs de soutènement, etc. Ces éléments sont d'une très grande importance pour démontrer la robustesse des concepts de stockage de Cigéo.

## **1.3 Le choix de la numérisation 3D**

Pour répondre aux contraintes opérationnelles (sécurité, rapidité d'intervention, densité et grande précision des informations enregistrées), Fugro France propose et développe depuis 2005 au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne des méthodes de numérisation 3D haute densité.

L'emploi de scanners laser 3D ou la réalisation de prises de vues photogrammétriques offrent en effet la possibilité d'enregistrer les géométries et les informations en quelques minutes, à une précision et une densité millimétrique, et à distance des parois si nécessaire.

# **2 Les techniques de numérisation 3D mises en œuvre dans le laboratoire**

## **2.1 La lasergrammétrie**

La lasergrammétrie est une technique d'acquisition rapide et automatique de données tridimensionnelles, utilisant la lumière laser pour mesurer directement, sans contact avec l'objet et selon

une trame régulière, les coordonnées 3D de points sur des surfaces depuis une position fixe au sol (Landes et Grussenmeyer, 2011).

Les capteurs mis en œuvre, les scanners laser 3D, sont posés sur trépied et depuis un point de vue fixe, balaient leur environnement de mesures de distance en suivant un pas angulaire vertical et horizontal. L'image panoramique 3D qui est enregistrée est ensuite convertie en une liste de plusieurs millions de coordonnées tridimensionnelles, appelée « nuage de points » 3D.

Pour numériser complètement un environnement en 3D, il faut alors multiplier les points de vue. Chaque nuage est recalé aux nuages voisins ou dans un système de coordonnées défini, par la numérisation de repères topographiques communs.

Les premiers scanners 3D apparus au début des années 1990 étaient cependant assez lourds à manipuler, et ce n'est que dans le courant des années 2000 que la technique a été concrètement mise en œuvre sur des chantiers de construction.

La première opération d'envergure en tunnel est la numérisation 3D complète des 7 km du Tunnel Maurice Lemaire pour le groupement Eiffage-Bouygues (Chazaly, 2006).

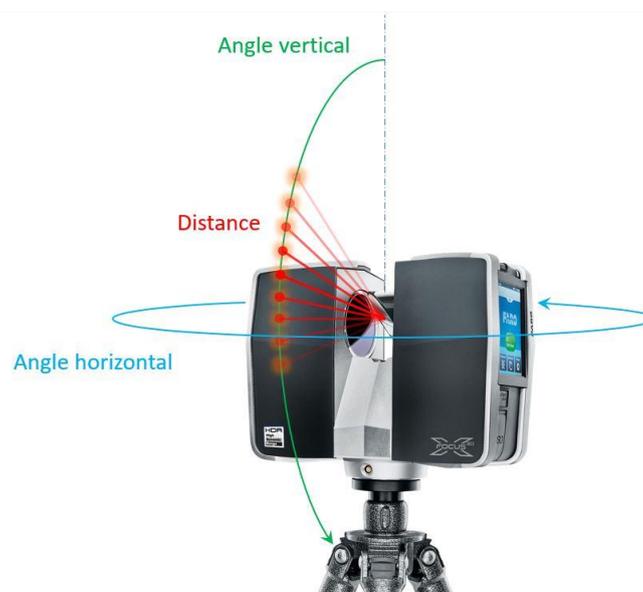


Figure 2: Les mesures enregistrées au scanner laser 3D

Au Laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne, les premiers levés géologiques sont réalisés régulièrement au scanner laser 3D dès 2009 (Arnould et al., 2016).

La lasergrammétrie est aujourd'hui une activité courante qui utilise des capteurs petits (20x15x10 cm<sup>3</sup>), légers (5 kg), rapides (1 million de points par seconde) et autonomes (batterie et logiciel de pilotage embarqués). Les développements ne se concentrent plus sur le matériel, mais plutôt sur l'automatisation des traitements (calage des mesures en temps réel, cartographie et modélisation automatique).

## 2.2 La photogrammétrie

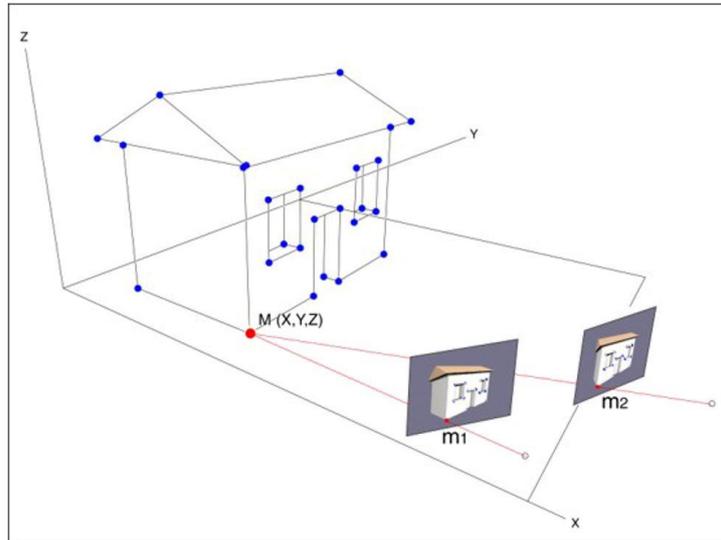
La photogrammétrie est la technique qui permet de reconstituer la surface et les dimensions d'un objet à partir des photographies de cet objet.

C'est une technique assez ancienne, inspirée des travaux d'Aimé Laussedat de 1849, et dont l'invention par Albrecht Meydenbauer en 1858 a immédiatement suivie celle de la photographie (1839).

Plutôt réservée à la production de cartes à partir de photographies aériennes, elle a longtemps été le domaine réservé de quelques spécialistes, nécessitant la mise en œuvre de matériels lourds et très onéreux : chambres de prise de vues métriques grand format, stéréo-restituteurs analogiques puis analytiques (Grussenmeyer, 2016).

Au début des années 1990, la démocratisation des moyens informatiques et le développement des appareils photographiques numériques vont permettre l'épanouissement de la photogrammétrie numérique. La chaîne de traitement demeure encore assez complexe, mais elle peut être entièrement réalisée sur ordinateur. La relative simplicité de la production de données denses par lasergrammétrie la relaie cependant au second plan des techniques de numérisation 3D.

L'automatisation des traitements au début des années 2000 achève son évolution vers une solution simple, précise et bon marché. La photogrammétrie est aujourd'hui le moyen de production de modèles 3D denses le plus répandu.



**Figure 3: La photogrammétrie permet la numérisation 3D d'un objet à partir de photographies numériques**

Depuis Meydenbauer, son principe reste le même : après la couverture photographique stéréoscopique de l'objet, la position et l'orientation relative des images est déterminée. Le pointé dans chaque image de points homologues permet la construction de lignes 3D convergentes, dont l'intersection est le point 3D correspondant.

Les logiciels de photogrammétrie réalisent cette chaîne de traitement de manière automatique, depuis le calcul d'orientation relative jusqu'à la reconnaissance des points homologues et le calcul des points 3D. Exploitant tous les pixels de photographies numériques haute résolution, ils peuvent produire des nuages de points 3D d'une grande densité.

### 3 Les suivis géologiques 3D en galeries

#### 3.1 Contexte

##### 3.1.1 Contexte géologique

L'ensemble de la série sédimentaire faisant l'objet des investigations est d'âge Jurassique ; c'est une série à dominante calcaire comprenant des niveaux argilo-marneux de très faible perméabilité (Kimméridgien et Callovo-Oxfordien), monoclinale, avec un pendage de 1 à 1,5 degré vers le Nord-Ouest.

L'objectif principal des investigations Andra est la reconnaissance de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien, rencontrée à partir de 417 m de profondeur au droit du puits d'accès du laboratoire souterrain. C'est dans la partie la plus argileuse de cette formation (UA : Unité Argileuse), vers 490 m de profondeur, que sont creusées les galeries correspondant au niveau principal du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse / Haute-Marne. La galerie d'expérimentations, à 445 m de profondeur, se situe quant à elle dans l'Unité Silto-Carbonatée (USC) de la formation.

Le Callovo-Oxfordien est une formation finement détritique, à dominante argileuse (45% de minéraux argileux en moyenne). Au niveau du site, l'épaisseur de la formation hôte est d'environ 140 m. Cette formation présente de faibles variations verticales et latérales. La lithologie est légèrement plus silteuse vers le Nord et plus argilo-carbonatée près du fossé de Gondrecourt-le-Château.

Lors des creusements de galeries ou de forages, des bioturbations, quelques niveaux carbonatés, et quelques coquilles, et exceptionnellement du bois fossilisé peuvent être observés.

### 3.1.2 Contexte opérationnel

Les galeries sont creusées avec différentes machines telles le Brise Roche Hydraulique (BRH), la Machine à Attaque Ponctuelle (MAP) et le Tunnelier à Attaque Ponctuelle (TAP). Elles ont des sections d'excavation variant de 17 à 64 m<sup>2</sup>, soit des diamètres de 4.6 à 9 m. Pour assurer le suivi géologique, les interventions doivent être réalisées avant la sécurisation du front (absence de grillage et de béton projeté), rapidement après l'excavation de la galerie.



Figure 4: Creusement de galerie au BRH

Pour des raisons de sécurité, une distance de sécurité équivalente au diamètre de la galerie, doit être maintenue par rapport au front nu non sécurisé. Les géologues et topographes ne peuvent donc pas approcher le front lors de la réalisation du levé. Également pour des raisons de sécurité, le temps entre l'excavation/marinage et la sécurisation du front de taille doit être minimisé au maximum.

## 3.2 Objectifs

Le suivi du creusement des galeries comprend un suivi géologique qui a pour objectifs :

- La caractérisation lithologique et la variabilité horizontale des argilites afin de pouvoir extrapoler à l'ensemble de la zone du Laboratoire souterrain les caractéristiques physiques et géochimiques obtenues de façon ponctuelle sur un seul ouvrage (un forage, un front de creusement...). L'extrapolation de ces données, réalisée pour les rapports de synthèse, fournit des informations à des échelles métrique à hectométrique ;
- L'identification de bancs ou de faisceaux de bancs repères afin de mieux positionner les galeries et les essais qui devront être réalisés. Il s'agit plus particulièrement de niveaux plus carbonatés, de niveaux contenant des abondances de minéraux particuliers (pyrite par exemple) ou des repères biostratigraphiques ;
- La recherche et le repérage d'éventuelles discontinuités d'origine tectonique (failles, diaclases, fentes) pouvant affecter la partie supérieure de la couche hôte. Bien que tous les ouvrages du Laboratoire souterrain (forages, puits, alvéoles, et galeries) ayant recoupé le Callovo-Oxfordien n'aient pas recoupés de structures microtectoniques, on ne peut exclure a priori leur présence ;
- Le levé de discontinuités d'origine mécanique affectant les argilites durant le creusement. Il faut préciser la typologie des structures observées (extension, compression, cisaillement mixte) dans les argilites ainsi que leur localisation précise, en mettant si possible en parallèle les liens avec l'orientation de la galerie par rapport aux contraintes *in situ*. Un levé détaillé de ces structures doit permettre de comprendre la genèse des phénomènes observés. Au-delà de la nature des fractures, il s'agit de décrire pour chaque type de fissuration observée l'extension de

la zone, la densité, et la taille de fissures, leurs ouvertures, ainsi que leurs distributions statistiques et de les comparer aux précédents ouvrages.

### 3.3 Le levé géologique 3D

Les levés géologiques sont réalisés à 1, 2, 3 m puis tous les 5 m lors d'un creusement de nouvelles galeries ou dans le cas de la reprise de creusement d'une ancienne galerie. La fréquence plus élevée des levés géologiques en début de galerie s'explique par le fait que le nombre de fractures est plus élevés aux intersections de galeries car les fracturations de la galerie de départ et la nouvelle galerie creusées se cumulent.

#### 3.3.1 Numérisation lasergrammétrique et levé géologique

Après arrêt du creusement et marinage complet par l'entreprise de creusement, l'équipe Fugro France réalise le levé du front, de la voûte et des parements si possible.

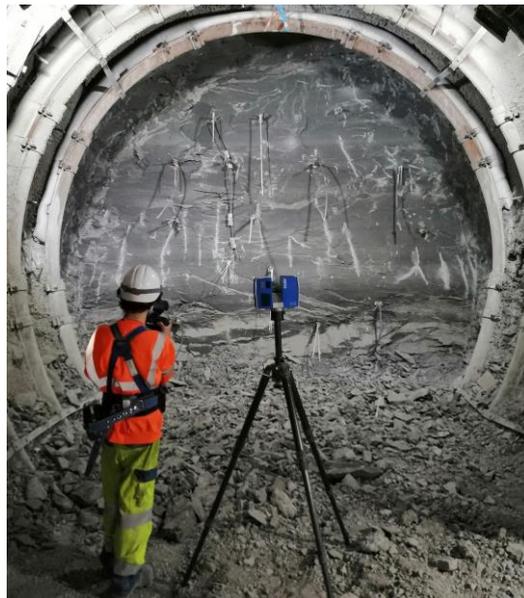


Figure 5: Levé géologique au scanner laser 3D

Le scanner laser 3D est placé par le topographe à quelques mètres du front de façon à respecter une distance de sécurité équivalant au diamètre de l'ouvrage. En quelques minutes, il balaie les surfaces étudiées, enregistrant un nuage de points 3D à une densité pouvant aller jusqu'à 1 point par mm<sup>2</sup>, à une précision relative de  $\pm 2$  mm ( $1\sigma$ ). Afin de réduire les zones d'ombre provoquées par des objets situés entre le capteur et la surface d'étude, l'appareil est ensuite déplacé puis l'opération de numérisation reproduite, multipliant ainsi les points de vue.

A chaque position, l'appareil enregistre aussi des photographies qui, associées aux mesures laser, permettent de produire des nuages de points colorés.

Parallèlement, un géologue réalise les levés sédimentologique, structural et géotechnique du front et des parois. Il reporte sur une minute de terrain numérique (tablette) tous les éléments rencontrés sur le terrain et observés à distance, identifiant et classant les structures observées :

- Description des alternances fines de lithologie ;
- Identification des niveaux (lits ou bancs ou surfaces de discontinuité) susceptibles de servir de repères de corrélations ;
- Recherche des éventuelles zones de discontinuité ou d'hétérogénéité (cimentation, corps chenalés ou slumps...) ;
- Inventaire et caractérisation des éléments structuraux représentant des discontinuités (faille/microfaille, fente ouverte ou colmatée, fissure, plan de glissement banc sur banc), mais également des joints et des pics stylolithiques ;

- Localisation et relevé schématique de la morphologie des hors profils principaux (et de leur profondeur).

Il lui est cependant interdit de s'approcher du front pour faire ses observations. Sa lecture est donc limitée par la distance qu'il doit respecter.

### 3.3.2 Numérisation photogrammétrique

Afin de palier à l'inaccessibilité du front par les géologues pour identifier les tectoglyphes, l'équipe de Fugro France a développé une méthode d'acquisition de prise de vue par photogrammétrie. La phase d'acquisition consiste à compléter le relevé scanner laser par la photographie du front à très haute résolution, à l'aide d'un appareil photo numérique 50 millions de pixels.

Le choix d'une optique calibrée adaptée permet un relevé en maintenant l'équipe à distance du front : à 3 m, la résolution du pixel est de 0.25 mm à la surface du front. A 5 m, elle est de 0.4 mm. Le traitement des données stéréoscopiques aboutit à la production d'un front numérique du même type que celui obtenu par scanner 3D, mais permettant une lecture beaucoup plus fine.

### 3.4 La restitution du modèle 3D géologique

De retour à la surface, le topographe traite les données laser 3D et le cas échéant la photogrammétrie.

Après géoréférencement des mesures, les données laser 3D sont consolidées dans un seul nuage de points 3D de haute densité. Une phase de nettoyage des données permet de retirer des données numériques les objets inutiles (câbles, fers à béton). Le nuage est alors transformé en surface numérique tridimensionnelle : un modèle maillé coloré est interpolé.

Ce modèle de résolution millimétrique est transmis au géologue. A l'aide des outils numériques mis à sa disposition par le topographe, il reporte dans le modèle ses observations, identifiant et numérisant par exemple les plans de fracturation. Les informations ainsi numérisées font l'objet de nombreuses mesures semi-automatiques : direction, pendage, longueur apparente, rosaces directionnelles, etc.

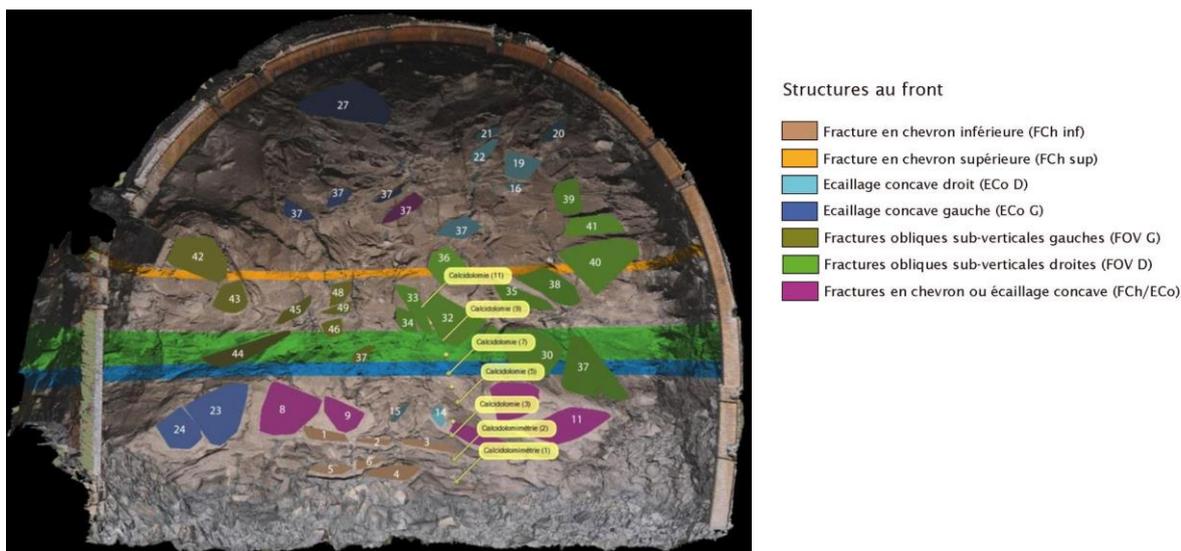


Figure 6: Exemple de restitution du géologue sur le modèle 3D du front produit par le topographe

Pour augmenter la résolution et la qualité des modèles, les prises de vues photogrammétriques sont traitées et corrélées aux mesures au scanner laser 3D. Le résultat est une restitution 3D de très haute résolution, permettant la lecture et la mesure des tectoglyphes dans le modèle numérique.

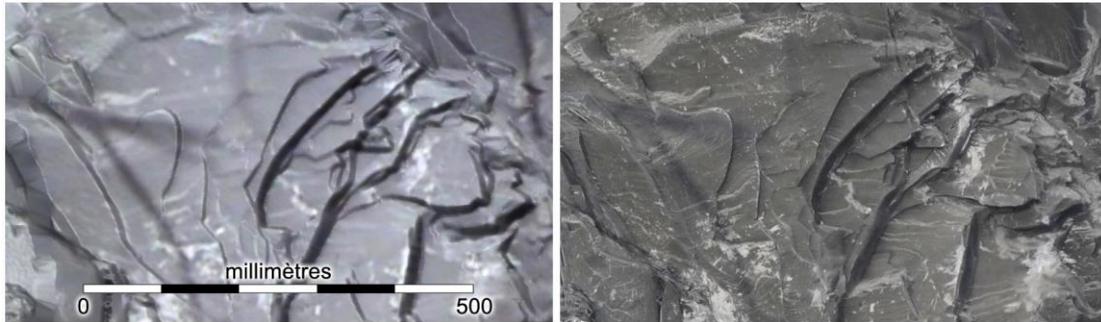


Figure 7: Modèle numérique de front traité par scanner 3D (à gauche) puis par photogrammètrie (à droite)

### 3.5 Exploitation : la fracturation induite par le creusement

Lors du creusement des galeries, une fracturation induite se développe autour des ouvrages (il n'y a pas de fracturation d'origine tectonique dans la zone d'implantation du Laboratoire). Ces structures, apparaissant au cours du creusement en raison du déconfinement, ont été observées essentiellement sur les fronts de tailles, les parements, et au niveau des premiers mètres des carottes des forages.

A l'issue de chaque intervention, l'équipe Fugro France livre une planche de restitution du levé, compilant toutes les informations géologiques recueillies. Toutes les données numériques pouvant alimenter la base de données de l'Andra sont aussi fournies (relevé, modèle maillé 3D texturé), permettant ainsi une modélisation 3D globale de chaque galerie, la réalisation de figures 3D, la corrélation et le suivi géologique continu entre les différents levés.

Ces modèles sont depuis plus de 15 ans en constantes évolutions et présentent aujourd'hui des coupes géologiques complètes.

Les relevés exhaustifs des fractures par les géologues de Fugro France ont permis d'identifier deux modèles de fracturation induite par le creusement des ouvrages au niveau 490 m suivant l'orientation de ces derniers (Armand et al., 2015).

Les galeries orientées N065°E, perpendiculaires à la contrainte principale horizontale majeure, développent principalement trois structures : l'écaillage concave (cisaillement), la fracturation en chevron (cisaillement normal) et la fracturation oblique sub-verticale (traction), d'ampleur secondaire par rapport aux deux premières. L'extension de cette fracturation induite, autour des galeries orientées N065°E, est forte sur le plan vertical et faible sur le plan horizontal.

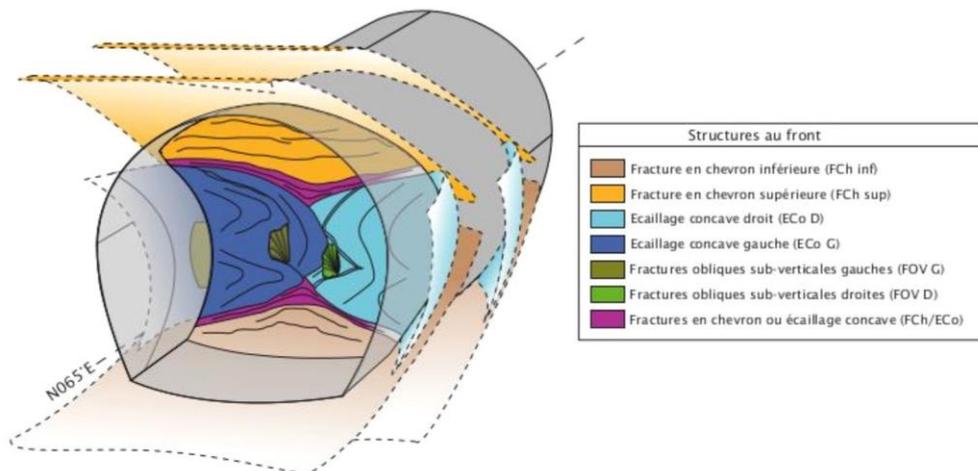


Figure 8: Fracturation induite de type N065°E observée dans les galeries orientées perpendiculairement à la contrainte principale horizontale majeure

Les galeries orientées N155°E, parallèles à la contrainte principale horizontale majeure, développent principalement deux structures : la fracturation en chevron (cisaillement normal) et les fracturations en extension (traction). L'extension de cette fracturation induite est forte sur le plan horizontal et faible sur le plan vertical.

## 4 La numérisation 3D des alvéoles

Un alvéole est un micro-tunnel borgne d'un diamètre au maximum de 920 mm et d'une longueur comprise entre 9 et 112 m, creusé à l'aide d'un micro-tunnelier.

Au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, les alvéoles sont de 2 types : les alvéoles dits « trou nu » où la roche est apparente et les alvéoles chemisés, où un tubage acier est mis en place.

Le principe de creusement des alvéoles a évolué depuis les premiers essais en 2009. Depuis 2016, la réalisation d'un alvéole se déroule en 3 phases :

- Creusement de l'alvéole au micro-tunnelier et retrait de la machine en fin d'excavation. Cette première étape, permet d'obtenir la mesure dans l'alvéole « trou nu » ;
- Mise en place d'un chemisage acier ;
- Injection de l'espace compris entre la roche et le tubage acier par un matériau de remplissage.

### 4.1 Les besoins

Une première numérisation 3D est effectuée à la suite immédiate du creusement de l'alvéole, puis une seconde numérisation est réalisée après chemisage. L'intervalle de temps entre ces 2 étapes peut varier de 2 à 7 jours.

Ces relevés doivent permettre de mesurer :

- Le diamètre des alvéoles sur toute leur longueur, à la fois dans l'alvéole « trou nu » et l'alvéole chemisé. Ces mesures permettent de mettre en évidence l'amplitude des hors profils éventuels (écart à la section théorique) ;
- Le volume total excavé, le volume du chemisage et par différence, le volume de l'espace annulaire. Ce résultat permet d'avoir une idée de la qualité du remplissage de l'espace annulaire par le matériau d'injection ;
- La variation de la trajectoire sur toute la longueur à la fois dans l'alvéole « trou nu » et l'alvéole chemisé, par rapport à la trajectoire théorique. Ce résultat permet d'avoir une indication de la qualité du creusement, la maîtrise de la rectitude des alvéoles étant un enjeu dans la conception du stockage ;

### 4.2 Numérisation 3D téléguidée

La réalisation des relevés 3D ne peut être effectuée par intervention humaine à l'intérieur de l'alvéole.

Fugro France a donc développé un dispositif radiocommandé qui permet d'amener le scanner 3D jusqu'au fond de l'alvéole. Ce système, monté sur roue et motorisé, est d'un encombrement faible et progresse dans l'alvéole, commandé depuis la galerie. Il embarque à sa tête le scanner 3D, qui numérise régulièrement les parois du tube sur 360°. Le tout est géoréférencé depuis la galerie.



Figure 9: Le système téléguidé de numérisation laser 3D d'alvéole, développé par Fugro France

Ce système original permet :

- La numérisation des alvéoles à une résolution et une précision de 2 mm ;
- Une communication sans fil longue distance depuis un poste de pilotage ;
- Une communication par fibre optique en cas de coupure du réseau sans fil ;
- Un retour vidéo temps réel ;
- La gestion d'éclairage embarqué pour une inspection visuelle des parois.

### 4.3 Restitutions

Les premiers livrables sont du même type que ceux fournis en galerie : archive 3D pleine résolution, nuage échantillonné à 2 mm, modèle maillé haute résolution des parois nues et des parois tubées.

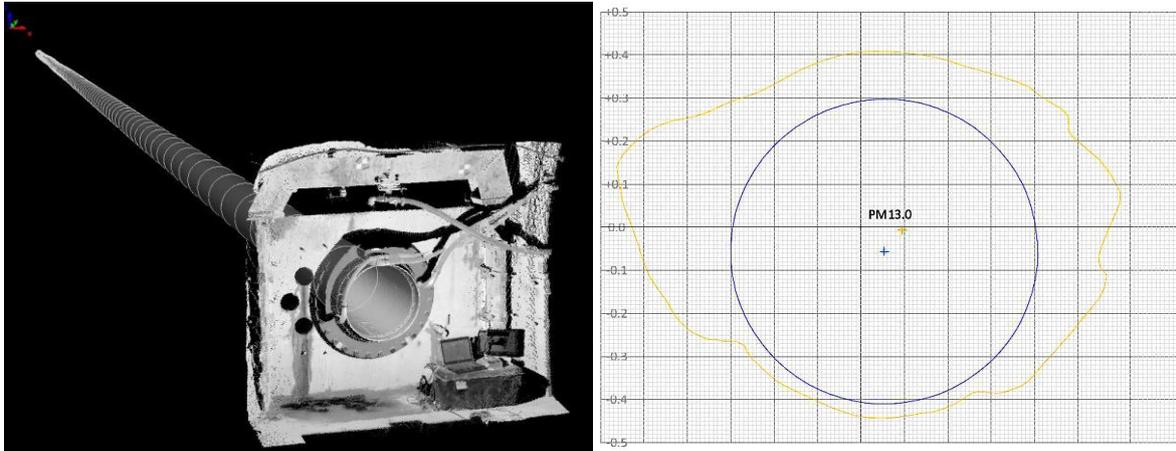


Figure 10: modèle 3D d'une alvéole tubée (à gauche). Section avant et après tubage (à droite)

De cette archive 3D, les informations requises sont extraites automatiquement :

- Volumes ;
- Trajectoire de l'alvéole avant et après chemisage ;
- Comparaison des trajectoires à l'axe théorique ;
- Sections perpendiculaires tous les 50 cm, avant et après chemisage ;
- Positionnement des diamètres théoriques sur la trajectoire et comparaison aux diamètres réels  
⇒ détection et mesure automatique des hors-profils.

## 5 Expérimentations

Dans un souci d'amélioration des conditions d'acquisition et de la qualité des informations enregistrées, des expérimentations concernant les levés géologiques et la topographie ont été menées dans le Laboratoire souterrain.

### 5.1 Levé géologique 3D hyperspectral

Une réflexion a été conduite par l'Andra sur le potentiel de l'imagerie hyperspectrale comme aide au levé géologique et géotechnique en galeries souterraines. Il s'agissait d'élaborer une méthodologie d'acquisition couplant lasergrammétrie et levé hyperspectral, à tester sur un front de galerie, pour évaluer la possibilité de créer un modèle 3D de front virtuel en fusionnant les données topographiques, hyperspectrales et géologiques.

L'objectif de cette modélisation est de s'approcher d'un modèle 3D totalement virtuel, pour le suivi géologique et géomécanique du creusement des galeries.

L'imagerie hyperspectrale est une méthode d'acquisition passive nécessitant une source de lumière qui éclaire la scène à acquérir. Le capteur hyperspectral capte donc la lumière réfléchie par les objets de la scène à étudier, c'est-à-dire la luminance.

Le spectre hyperspectral continu correspond à la courbe de réflectance. Sur ce spectre, la composition chimique d'un élément est caractérisée par un ou plusieurs pics d'absorption dont les positions en longueur d'onde sont caractéristiques d'une espèce minérale. Ainsi, par traitement et analyse des

spectres, on a accès à la nature, la composition et la quantité des espèces minérales ou chimiques présentes.

A Bure, le levé hyperspectral d'un front a été couplé à sa numérisation 3D dense. Le résultat est un modèle 3D haute définition, texturé par des images composites hyperspectrales, qu'une calibration préalable associe aux profils spectraux caractéristiques des roches présentes.

Ce test a permis, après traitement et interprétation géologique, de mettre en évidence les éléments majeurs du levé géologique et géotechnique, à savoir :

- Les variations lithologiques (figure 14, à gauche);
- L'identification et la distinction, à distance, entre différents types de fractures induites par le creusement des galeries (figure 14, à droite);
- La réalisation d'un modèle 3D géoréférencé sur lequel mesures et observations peuvent être reportées.

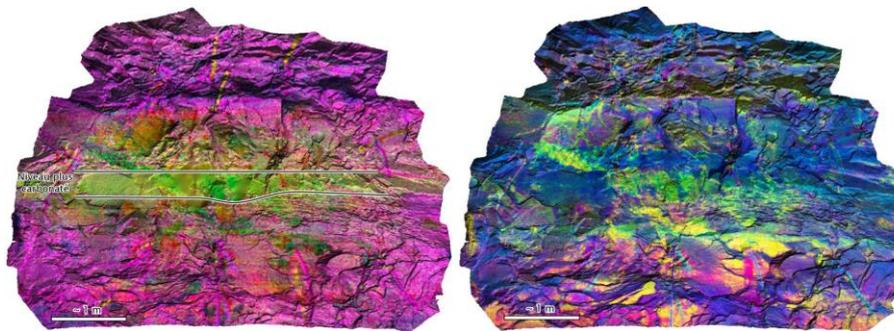


Figure 11: Projections de 2 compositions hyperspectrales sur le modèle 3D d'un front de galerie à Bure

## 5.2 Mesure de convergence au scanner laser 3D

La réalisation d'ouvrages souterrains nécessite le suivi minutieux du comportement des excavations et soutènements. Les sections de mesures de convergence (SMC), ont pour but de mesurer le rapprochement ou l'éloignement relatif de deux éléments tels que les parois de galeries, les piédroits de tunnels, soutènements, blindages etc.

Au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, au minimum six plots de convergence par section sont implantés jusqu'à 50 cm dans le terrain naturel. Ces plots forment alors six bases de mesure. Jusqu'à présent, les sections sont mesurées à l'aide de fils Invar maintenus à une tension constante par un dynamomètre, et entre deux plots situés sur des parois opposées. Avec des conditions de mesures idéales et effectuées avec rigueur, la précision atteinte est de l'ordre du 1/10ème de millimètre.

Mais cette méthode présente des inconvénients :

- Sa mise en œuvre s'avère lourde, mobilisant 2 opérateurs et une nacelle ;
- Le décrochement soudain du fil Invar placé en voûte peut être une cause d'accident ;
- L'opération immobilise la galerie et constitue une gêne pour les autres équipes y opérant.

Fugro France a consacré un mémoire d'ingénieur au développement d'une méthode de mesure de convergence sans contact, par scanner laser 3D (Mallouh, 2016). La méthode s'appuie sur la mise au point de réflecteurs calibrés, leur ancrage en paroi, et leur numérisation dense par un scanner laser 3D.

Dans le Laboratoire souterrain, la modélisation des erreurs instrumentales et l'exploitation de la grande densité de mesure couvrant les réflecteurs ont permis un affinage statistique de la mesure de distance 3D entre chaque réflecteur.

La méthode permet la mesure de section de mesure de convergence en moins d'une minute. Son traitement est réalisé en 30 minutes et fournit les distances relatives entre plot à une précision de 0.3 à 0.5 mm.

## 6 La numérisation 3D des galeries

### 6.1 Le besoin de récolement

Pour satisfaire à la fois des besoins techniques (établissement de plans, de coupes) et des besoins de représentations graphiques pour illustrer des présentations et des documents, l'Andra demande le repérage topographique tridimensionnel de ses installations après creusement et équipement des galeries.

#### 6.1.1 Numérisation 3D des galeries existantes

Une galerie est un tunnel dont la longueur est variable, allant de quelques mètres à une centaine de mètres. Il existe 11 types de section de galeries dans le laboratoire souterrain, et cinq types de soutènement mis en place dans les galeries :

- Avec des cintres coulissants ;
- Avec des cales compressibles ;
- Avec un soutènement rigide ;
- Avec béton projeté épais ;
- Avec des voussoirs.

Le relevé 3D concerne les éléments constitutifs et tous les équipements présents :

- Cintres, boulons, sas, parois métalliques, zones de béton projeté, zones de roche à nue ;
- Gains électriques et de ventilation, ensemble des réseaux de fluides et les vannes associées, coffrets électriques et prises associées, équipements de sécurité, caniveaux, chemins de câbles, etc.
- Têtes de forages et d'alvéoles, armoires, capteurs, centrales d'acquisition, etc.

Pour ce relevé puis la production de restitutions 3D et de coupes, la précision et la densité attendues sont de 10 mm.

Dans ce cas, une position de numérisation tous les 5 m est réalisée, avec une densification au cas par cas, selon la densité des équipements présents, pour enregistrer les parties masquées. A chaque position, 20 millions de points seront enregistrés. Cela permet la production d'un nuage de points 3D couvrant la surface des galeries et des équipements à une densité moyenne de 6 mm.

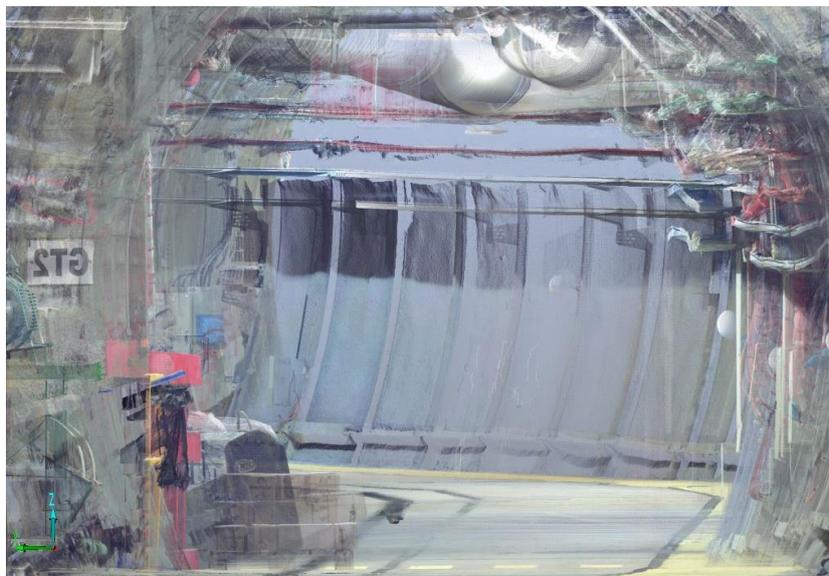


Figure 12: Extrait d'un nuage de points 3D coloré, enregistré dans le laboratoire souterrain

Les positions de scanner 3D calées et consolidées sont rassemblées à leur résolution native dans un dossier structuré. Ce dossier est fourni à l'Andra : il constitue une première archive 3D, vierge d'interprétation, qu'il sera possible de reprendre à l'avenir pour compléter les données ou extraire à nouveau toute donnée 3D supplémentaire.

### 6.1.2 Le récolement 3D des galeries

Cette phase consiste à créer et à placer des modèles 3D légers des équipements des galeries, en s'appuyant sur leurs nuages de points. C'est une phase qui peut être assez longue selon la densité des équipements. Chaque élément constitutif est reconstruit en 3D à l'aide de primitives 3D (boîtes, cylindres, portions de tores, formes extrudées). Petit à petit, une bibliothèque d'objets est ainsi constituée. Chaque modèle est replacé dans le référentiel du site en s'appuyant sur son nuage. La précision de modélisation et de recalage est de 5 à 10 mm.

Parallèlement, les zones de béton projeté et de roche nue sont isolées du nuage de points, filtrées puis reconstruites à l'aide de modèles maillés triangulés.



Figure 13: Modèle 3D d'une galerie du laboratoire souterrain de l'Andra

Après compilation des objets 3D, organisés par calque, les modèles obtenus seront livrés au format Autocad DWG et Microstation DGN.

## 6.2 Les besoins pour le suivi expérimental des galeries

Le creusement d'une nouvelle galerie est associé à une ou plusieurs expérimentations qui ont pour but de suivre le comportement de l'ouvrage. Pour cela, l'Andra instrumente des portions de galerie au cours du creusement, soit par forage, soit par la pose de capteurs dans le revêtement. Ainsi l'Andra a besoin d'avoir :

- Un repérage topographique(x,y,z) des capteurs mis en place avant la pose du revêtement
- Une estimation des volumes des couches de revêtement qui sont mises en place
- Un suivi de la déformation de la galerie, après achèvement des travaux

### 6.2.1 Numérisation 3D des nouvelles galeries

Dans le cas du suivi aval des galeries lors du creusement, le relevé 3D concerne :

- Les principaux éléments constitutifs de la galerie, à savoir les cintres, zones de béton projeté, zones de roche à nue ;
- Les capteurs et câbles ;
- Les têtes de forages

Pour ce relevé, la précision et la densité attendues sont de 2 mm. Les positions de numérisation sont alors resserrées au droit de la zone à couvrir, à généralement une position tous les 2 m.

### 6.2.2 Livrables : Modèles 3D haute résolution

Ce sont des modèles beaucoup plus denses et plus lourds que les modèles infographiques, constitués de surfaces triangulaires 3D qui permettent de restituer finement des surfaces irrégulières comme les parois de roche nue ou les zones de béton projetés.

Leur interpolation est réalisée à une résolution proche de celle de la numérisation scanner laser, de l'ordre 2 à 5 mm. Les modèles sont ensuite finalisés, afin d'éliminer les erreurs topologiques toujours présentes à l'issue d'une interpolation (ex : trous, inversion de normale, etc.).

Ces modèles sont exploités pour l'extraction de cotes, le calcul de volumes ou la mesure de déformations et d'épaisseur de revêtement.

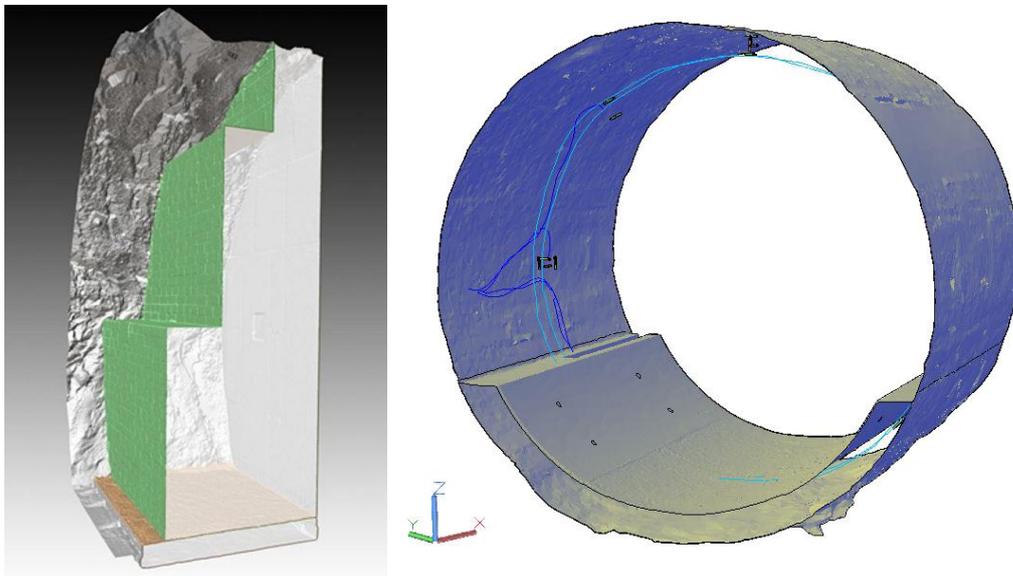


Figure 14: Modèles 3D haute résolution. A gauche la vue écorchée d'une galerie après montage d'un mur de bentonite ; à droite une portion de galerie avant et pendant instrumentation et pose du revêtement.

## 7 Conclusions

En géologie, la fiabilité des modèles de fracturation induite par les creusements est primordiale pour l'Andra car il accompagne le choix des méthodes de creusement, le choix des diamètres et de profils de galeries, l'orientation optimale de ces galeries et des alvéoles.

Les levés 3D haute résolution apportent une grande rigueur dans les descriptions géologiques et une très bonne connaissance des faciès. Une parfaite homogénéité des observations géologiques est assurée, ainsi que la continuité du suivi géologique entre les différents ouvrages.

Ceci permet la mise en perspective de toutes les observations réalisées pour la définition du modèle géologique 3D multi échelle :

- En utilisant des méthodes de travail parfaitement éprouvées et rodées,
- En assurant la continuité des observations 3D et l'utilisation d'une terminologie unique pour la description des objets géologiques (lexiques sédimentologique et structural ; typologie de la fracturation induite) en accord avec celle mise au point et utilisée actuellement dans le creusement des galeries.

Cette approche mise en œuvre lors du percement des galeries est prolongée, pour l'enregistrement des installations et de leur évolution. L'idée est bien de produire et de nourrir une archive tri-dimensionnelle précise et exhaustive du Laboratoire souterrain.

Enregistrée depuis plus de 15 ans dans un contexte opérationnel complexe, cette archive 3D requière la mise en œuvre de techniques de numérisation et de procédures de traitement qui évoluent avec les progrès de l'informatique et la généralisation du numérique. Les données sont chaque année plus denses, plus précises et plus riches : elles répondent ainsi régulièrement aux exigences des experts chargés de concevoir, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français.

## 8 Références

- Armand, G., Bosgiraud J-M., Plas F. 2015. L'apport du Laboratoire souterrain de l'Andra pour le choix et la mise au point des techniques de creusement des ouvrages souterrains du projet de stockage de déchets radioactifs Cigéo. *Tunnels et Espace Souterrain*, n°250, Juillet/Aout 2015, pp. 251-268.
- Arnould A., Baudouy L., Dottesi A., Righini-Waz C., Toussaint A. 2016. Suivi Géologique du creusement des galeries du CMHM : de l'observation à la modélisation 3D. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Nancy, juillet 2016.
- Chazaly B. 2006. La lasergrammétrie appliquée à l'auscultation des ouvrages d'art. *XYZ*, n°107, Juin 2006, pp 18-21.
- Grussenmeyer P. 2016. Photogrammétrie, bilan et perspectives de 150 ans d'histoires. *Colloque Photogrammétrie Numérique et perception 3D : les nouvelles conquêtes*. Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection. Paris.
- Landes, T., & Grussenmeyer, P. 2011. Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2). *XYZ*, n°128, pp 37-49.
- Mallouh, J. 2016. Etude et développement de méthodes de mesure de convergence en galeries souterraines. *Mémoire de diplôme d'Ingénieur Géomètre Topographe*. Septembre 2016, Insa Strasbourg.