

SUIVI GEOLOGIQUE DU CREUSEMENT DES GALERIES DU CMHM : DE L'OBSERVATION A LA MODELISATION 3D

GEOLOGICAL SURVEY OF THE EXCAVATION-INDUCED FRACTURE NETWORK AT URL DRIFTS: FROM OBSERVATION TO 3D MODELLING

Apolline ARNOULD¹, Antoine TOUSSAINT¹, Lucie BAUDOUY¹, Céline RIGHINI-WAZ², Anthony DOTTESI³

¹ GEOTER SAS/Fugro GROUP - Pôle géoenvironnement - 3 rue Jean Monnet, 34830 Clapiers, France

² Andra - 55290 Bure, France

³ FUGRO GEOID SAS - 12 rue des Frères Lumières, 34830 Jacou, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un stockage géologique profond sur le site du laboratoire souterrain du Centre de Meuse / Haute-Marne (CMHM) de l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs), GEOTER effectue le suivi géologique des galeries et des forages. Pour le suivi géologique des galeries, il a été développé une méthode innovante de levé géologique Très Haute Résolution (THR) à l'aide d'un scanner laser 3D. La synthèse des observations sur forages et en galeries a permis de contraindre le modèle de fracturation induite par l'excavation des galeries, creusées de parallèlement à la direction de la contrainte principale orientée N155°E et d'obtenir une modélisation tridimensionnelle.

Depuis le début du creusement des galeries et des forages au niveau du Laboratoire, aucune structure d'origine tectonique n'a été observée. L'ensemble des fractures formées est lié aux travaux souterrains et au phénomène de déconfinement qui accompagne le creusement d'une galerie ou d'un forage. Le terme « fracture » utilisé dans ce rapport désigne donc exclusivement des fractures induites par le creusement des galeries ou des forages.

Ce document présente la méthodologie de levé géologique par scanner laser 3D, puis les observations structurales sur forages et l'analyse correspondante afin de les synthétiser en un modèle 3D cohérent pour les galeries orientées N155°E.

ABSTRACT – As part of a feasibility study for a deep repository on the underground research laboratory (URL) of Andra (French national radioactive waste management agency), GEOTER performed a geological survey of both drifts and drilling in order to characterize the excavation-induced damages on the surrounding claystone. Due to security and technical issues, GEOTER developed a new method of geological survey, which combined naturalistic observations of the drift faces and a high-resolution topographical survey by 3D laser scanning. Integration of structural observations of drift faces and core drilling were used to build, with high precision, a 3D structural model for these drifts, which are parallel to the main horizontal stress axis (N155°E).

No structures with tectonic origins have been observed on the URL. All observed structures/fractures are induced by drifts and boreholes excavation. The word “fracture” used in this publication only referred to excavation-induced fractures.

After a presentation of the methodology used for the 3D laser scanning geological survey and the structural analyses on core drillings, this paper discusses the data analysis and the resulting 3D excavation-induced fracture network model built for N155°E-oriented drifts.

1. Introduction

Le Laboratoire de recherche Souterrain de l'Andra est localisé à l'Est du Bassin parisien, entre les vallées de la Marne et de la Meuse, sur la bordure sud-ouest du département de la Meuse. Le niveau principal des galeries du laboratoire est situé à 490 mètres de profondeur (-124 m NGF) dans la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien.

Depuis plus de 15 ans les géologues de GEOTER effectuent le suivi géologique du creusement des puits et des galeries et de travaux associés sur ce site. En particulier, les géologues lèvent en continu la fracturation induite par l'excavation au sein du massif argileux. Afin de s'adapter aux contraintes techniques et sécuritaires, GEOTER et FUGRO-GEOID ont développé une méthode moderne associant un levé géologique naturaliste des fronts de tailles à un levé topographique de haute précision par scanner laser 3D afin d'atteindre des connaissances et une compréhension optimale sur la fracturation induite par le creusement des galeries.

La majorité des galeries ont été creusées selon les directions principales des contraintes régionales (cf. Figure 1). Les études antérieures ont montré que ce champ de contraintes joue un rôle déterminant sur la géométrie et l'extension de la zone fracturée induite par le creusement au sein même du massif argileux (Andra, 2012).

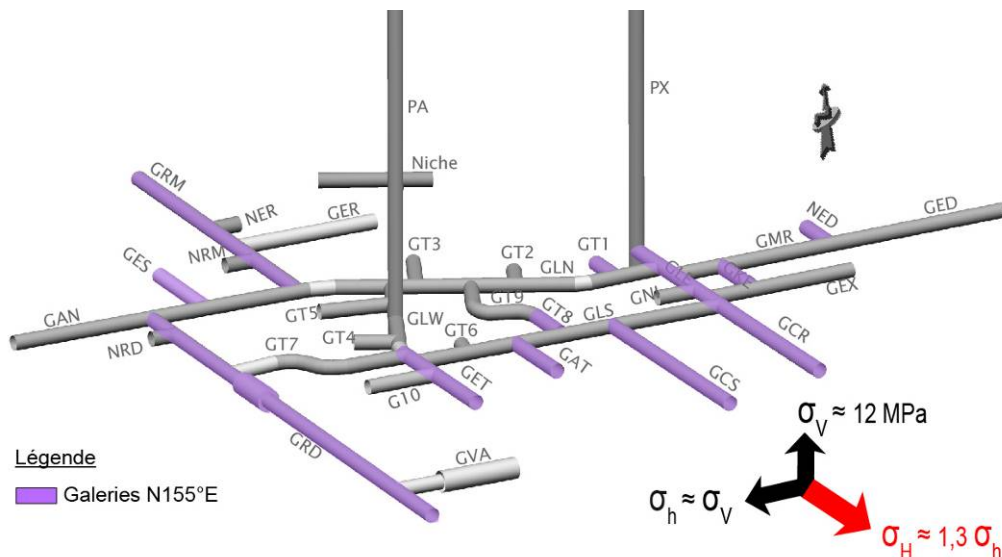


Figure 1. Architecture du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et champ de contraintes

L'exemple présenté correspond aux observations réalisées en galeries orientées N155°E, parallèles à σ_H , contrainte principale horizontale majeure, comprise entre 12,7 et 15,4 MPa.

2. Méthodologie du levé THR des fronts de taille en galerie

Le levé géologique THR est réalisé en deux temps afin d'effectuer un relevé exhaustif, précis et détaillé dans des conditions de sécurité optimales avec :

- un levé topographique et photographique du front sans soutènement,
- un relevé sédimentologique, géotechnique et structural détaillé effectué par le géologue, après mise en sécurité du front.

2.1. Intervention du topographe

L'intervention du topographe dure environ une demi-heure et se traduit par l'acquisition de données laser 3D géoréférencées. Pour répondre aux exigences du projet (sécurité, rapidité d'intervention, densité de points et grande précision), les levés topographiques sont réalisés au moyen d'un scanner laser compact 3D, qui permet de réaliser une numérisation dense de galerie en mesurant jusqu'à 976 000 points/s, avec, dans les conditions d'utilisation propres au projet, une densité de 2 x 2 mm. La précision obtenue sur la mesure brute de position d'un point, au vu de la grande densité d'information, est d'environ 2 mm.

Pour éviter les zones d'ombre et couvrir l'ensemble du levé (front mais aussi voûte et parements), les mesures sont effectuées depuis deux positions du laser 3D, en zone sécurisée, à environ 4 m du front, excentrées à gauche et à droite de la galerie. Les deux nuages de points ainsi obtenus sont assemblés et géoréférencés grâce à l'observation de quatre points communs au minimum, matérialisés par des sphères de calage. Le scanner est également équipé de matériel permettant d'effectuer la couverture photographique du front pour permettre la colorisation instantanée du nuage de points.

Une fois l'intervention terminée, le topographe prépare une minute de terrain pour l'intervention du géologue à partir des prises de vues photographiques (front, parement gauche et parement droit).

2.2. Intervention du géologue

Le géologue intervient après la cimentation de la partie supérieure des parements et la pose de treillis soudé en voûte et à front, afin de lui permettre d'observer finement le levé en toute sécurité. Le levé géologique consiste en un levé sédimentologique, structural et géotechnique de type naturaliste sur la totalité des parements observables, front de taille compris, à partir du radier. La mise en sécurité du front permet au géologue d'effectuer un relevé détaillé à l'œil nu et/ou à la loupe des objets difficilement identifiables à partir des prises de vues réalisées au scanner laser 3D. Le suivi consiste en :

- la recherche et le suivi de la continuité d'horizons repères mis en évidence dans la galerie et la description des variations latérales de ces horizons (niveau à bioturbations vermiculaires, niveau d'argilite plus carbonaté...)
- la description des variations sédimentologiques,
- la recherche des éventuelles zones de discontinuité ou d'hétérogénéité (cimentation, corps chenalisés ou slumps...),

- un levé détaillé des zones mécaniquement perturbées, induites par le déconfinement des terrains lors du creusement des galeries (plans de fracture nouvellement créés par l'excavation).

L'attention du géologue est particulièrement portée sur la détermination de la typologie des fractures, sur la relation géométrique entre elles, sur le repérage et la mesure des tectoglyphes, sur les mesures d'espacements et de fréquence pour chaque famille de fracture.

Ces observations seront reportées sur la minute photographique préalablement préparée par le topographe.

Deux structures majeures s'observent sur le front et les parements : la fracturation en chevrons et les fractures en extension (cf. Figure 2) (Armand *et al.*, 2015).

La fracturation en chevrons (FCh) se compose de deux types de fractures de même direction, globalement perpendiculaires à la galerie, mais de directions de pendages opposés. L'examen des tectoglyphes démontre que ces fractures se forment par rupture en cisaillement normal.

Les fractures du chevron inférieur (FCh inf) occupent la partie basse du front et des parements. Leur géométrie est légèrement concave. Leur plongement, dirigé vers la partie excavée de la galerie, montre une pente assez raide en partie basse et moins inclinée en remontant vers le haut de la fracture.

Les fractures du chevron supérieur (FCh sup) occupent quant à elle la voûte et la partie sommitale du front et des parements. Leur géométrie est légèrement concave et leur pendage est dirigé vers la partie non excavée de la galerie.

L'espacement entre les plans des chevrons est assez variable et dépend de la réponse de la roche à la contrainte. La roche peut alors être affectée par une seule grande fracture ou par une coalescence de fractures moins étendues.

La fracturation en extension (F ext) occupe la partie médiane du front et s'étend sur une hauteur variable comprise entre les fractures inférieures et supérieures du chevron. Elle se compose de fractures de direction globalement perpendiculaire à la galerie. Les plans de fractures sont courbes (concaves) et décrivent un bombement dont l'axe est situé environ à mi-hauteur du front. L'examen des plans de fracture montre des structures en plumoses traduisant une rupture en extension. Ce bombement se débite en "pelures d'oignon" individualisant des plaques subparallèles entre elles d'environ 3 à 20 cm d'épaisseur. La continuité du bombement s'observe en coupe sur les parements où les fractures décrivent des arcs de cercle.

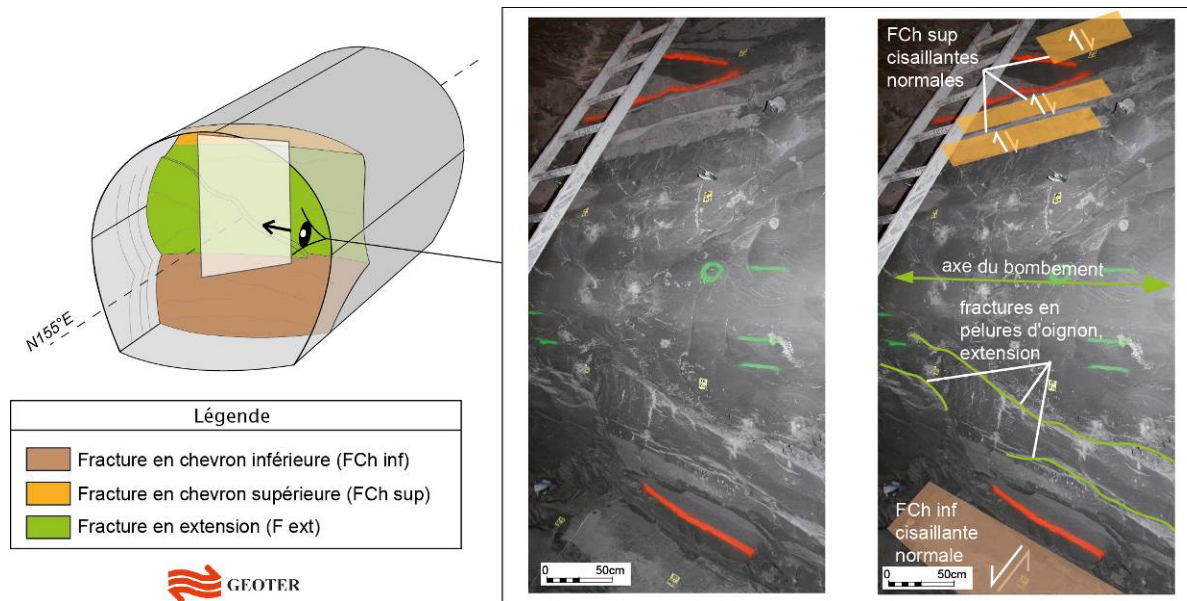


Figure 2. Schéma et photographies de la fracturation induite visible à front dans les galeries N155°E

Des zones broyées ou à pseudo-schistosité peuvent parfois être observées, à la limite entre les plans inférieurs du chevron et les fractures en extension. Cette zone constitue une charnière accumulant la charge des plans de ces deux structures. Les argilites y sont donc intensément fracturées.

2.3. Restitution des observations géologiques sur le modèle de terrain 3D

En surface, le topographe réalise un modèle maillé en trois dimensions du levé, à partir des points topographiques mesurés par le scanner. Pour cela, il transfère les données du scanner laser 3D sur un ordinateur et consolide le nuage de points géoréférencé obtenu sous le logiciel Polyworks®. La précision de recalage du nuage dépend de la précision des opérations topographiques préalables (détermination des coordonnées des sphères de calage). Le topographe supprime les points parasites du nuage et effectue un maillage de ce dernier, qui servira de support aux analyses géologiques. Toutes les surfaces, et par conséquent tous les plans de fractures, sont numérisés et géoréférencés. Une fois le modèle 3D de front créé, le géologue reporte et complète ses observations à partir de sa minute de terrain sur le modèle 3D du levé. Il cartographie et digitalise un maximum de plans de fractures visibles sur ce modèle, en leur attribuant une typologie (FCh inf, FCh sup, F ext...) (cf. Figure 3). Un logiciel développé en interne permet de calculer la direction et le pendage de chacun des plans identifiés, avec une précision inférieure au degré.

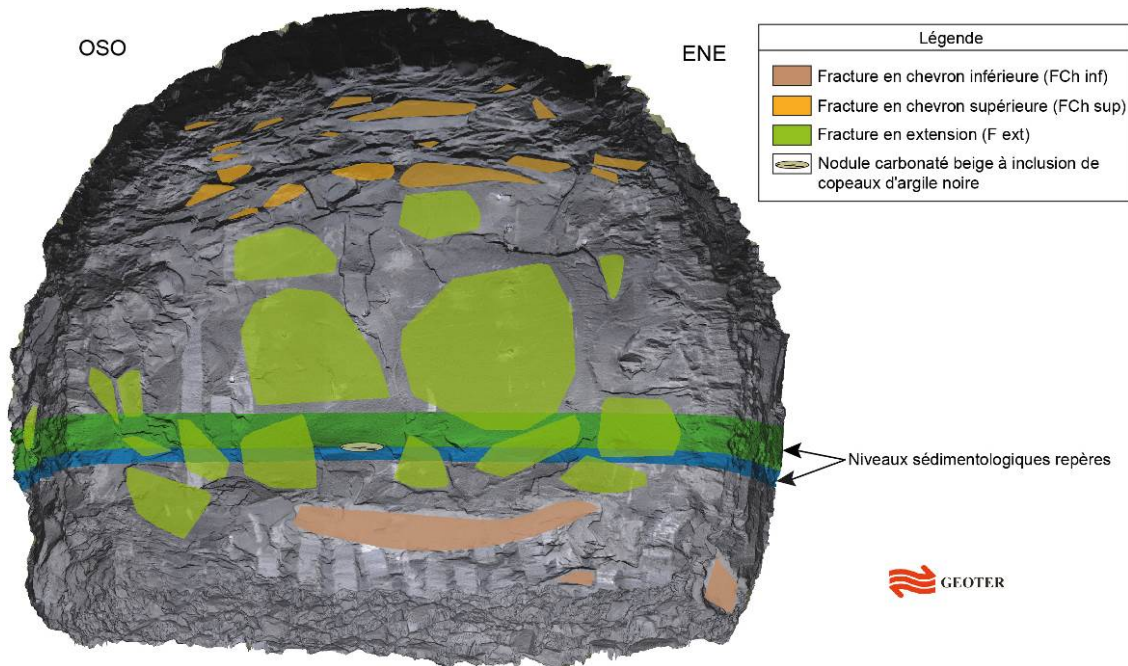


Figure 3. Restitution géologique sur un modèle 3D d'un levé de galerie N155°E

L'analyse structurale consiste alors en l'identification, la caractérisation et la classification des plans de fractures digitalisés par le géologue (direction, pendage, longueur apparente, rosaces directionnelles...). La mesure exhaustive des plans de fractures permet ainsi l'étude statistique fiable de la fracturation en galerie (40 à 100 plans de fractures extraits par levé).

3. Méthodologie du levé des observations structurales des forages en galeries

Environ 650 forages carottés, soit près de 9 km de carottes, ont été réalisés dans les galeries du laboratoire souterrain et analysés par nos équipes de géologues. Après reconstitution des carottes de forage sur une table orientée, une description géologique minutieuse des fractures induites par le creusement des galeries est effectuée.

3.1. Intervention du géologue

L'expérience acquise dans les levés de galeries et divers critères (forme de la fracture, marques laissées par le carottier...) vont permettre de discriminer les fractures induites par le creusement des galeries, des fractures liées au forage, dites "de dépôtage" (Armand *et al.*, 2014). Seules les fractures induites par le creusement des galeries font donc l'objet d'un relevé précis : cotes, direction, pendage, pitch et jeu le cas échéant. Elles sont brièvement décrites et classées selon leur mode de rupture, dans une des quatre catégories suivantes : cisaillement, extension, mixte (cisaillement et extension conjuguée) et indéterminée (cf. Figure 4).

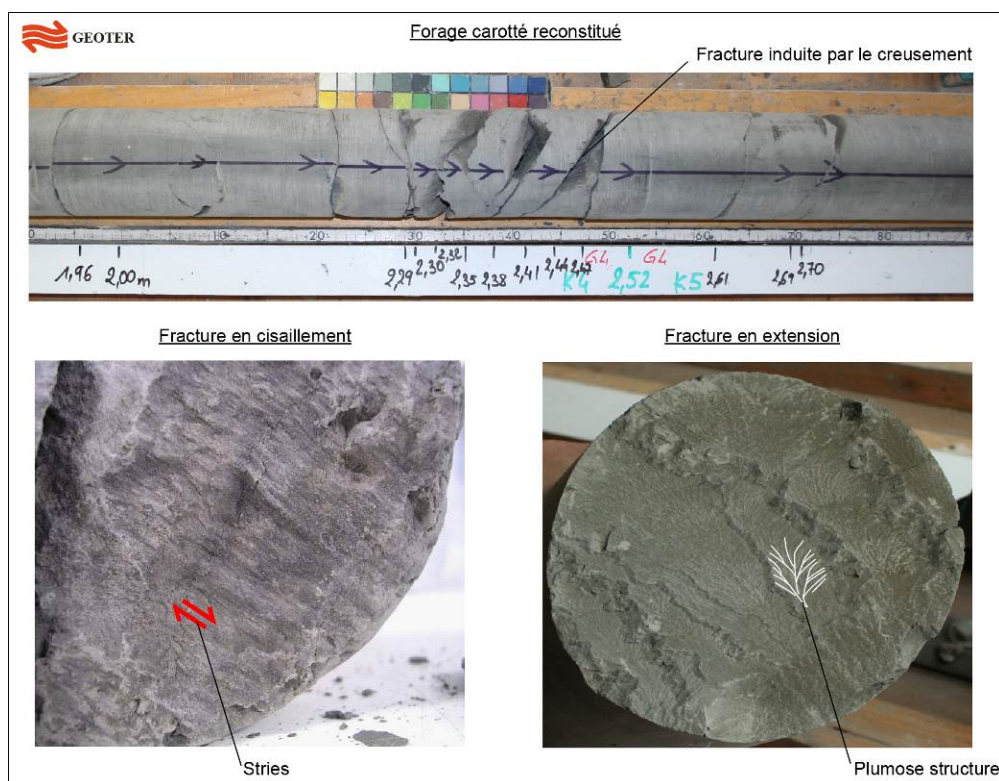


Figure 4. Typologie des principales fractures observées en forage

Une vérification de ces mesures peut être effectuée par diagraphie (caméra optique). Dans ce cas, les mesures sont considérées comme sûres.

La totalité de ces fractures et leurs caractéristiques sont également incorporées à une base de données informatique.

3.2. Restitution des observations sur forages

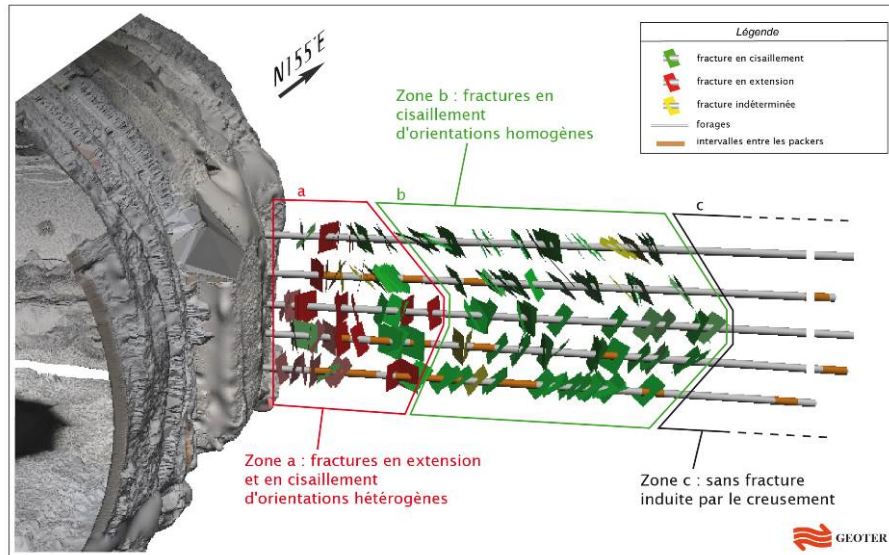
Les données issues d'une même section de forages dans une galerie orientée N155°E ont été modélisées en 3D sur le logiciel Polyworks® avec un code couleur correspondant au mode de rupture de cette dernière. La visualisation tridimensionnelle des plans montre deux zones distinctes (cf. Figure 5).

La première zone correspond au premier tiers de la partie fracturée du massif, en bordure de la galerie. Elle est représentée par des plans de fractures d'orientations hétérogènes, sans organisation visible mais avec des pendages très redressés, proches de la verticale. Ces structures sont en grande majorité des plans en extension mais sont également présents des plans cisailants et indéterminés.

La seconde zone présente des structures orientées de façon beaucoup plus homogène, constituée uniquement de plans cisailants et indéterminés. Elle est comprise entre la zone d'orientations hétérogènes et la dernière fracture constatée sur les forages. L'extrapolation des plans de fracture met en évidence deux structures majeures :

- Un ensemble de plans cisailants situés dans la partie supérieure, de directions subparallèles à la galerie présentant un pendage vers le parement *droit*,
- un ensemble de plans cisailants situés dans la partie inférieure, également de directions subparallèles à la galerie présentant un pendage vers le parement *gauche*.

L'examen des tectoglyphes montre que ces fractures se forment par rupture en cisaillement normal. Le redressement des plans mesurés dans la zone médiane souligne la forme légèrement courbe des deux ensembles de structures. Ces deux ensembles se rejoignent et/ou se recoupent dans la zone médiane de cet ensemble de forages. Ces structures s'apparentent donc vraisemblablement aux fractures en chevrons observées à front de galerie.



4. Développement d'un modèle 3D de la fracturation induite

L'utilisation du scanner laser 3D permet de mettre en relation les éléments géologiques et structuraux relevés à front avec les données recueillies en forages. La synthèse de ces observations permet de développer un modèle cohérent 3D purement qualitatif, de représentation géométrique de la fracturation induite par le creusement des galeries N155°E (cf. Figure 6). Ce modèle est caractérisé par deux ensembles de plans cisillants de direction proche mais de pendage opposé : l'un dans la partie supérieure de la galerie et le second dans la partie inférieure. Ces chevrons forment globalement une ovoïde développée dans le plan horizontal qui englobe une zone de fractures en extension. Cette visualisation 3D permet de mieux comprendre la propagation des fractures dans le massif.

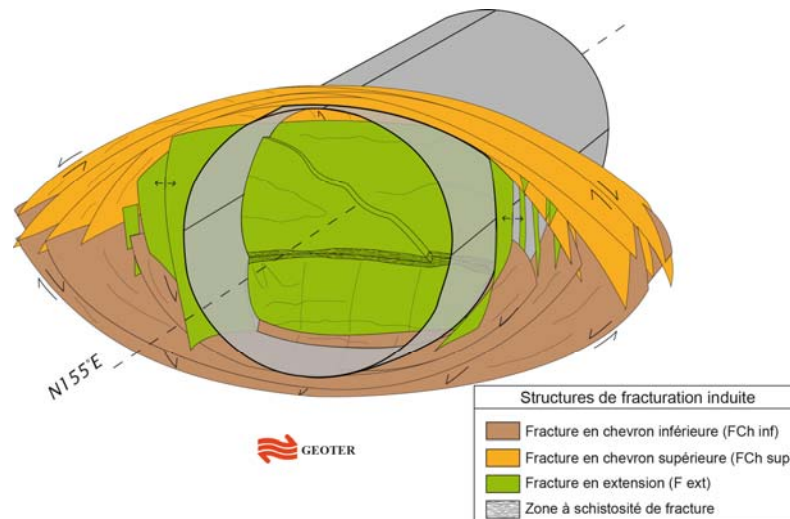


Figure 6. Modèle 3D de la fracturation induite des galeries N155°E

5. Avantages et perspectives de la méthode

L'approche méthodologique développée spécifiquement pour le laboratoire souterrain de l'Andra présente de nombreux avantages par rapport à un levé géologique classique en galerie :

- La quantité d'observations géologiques et leur qualité (précision des mesures des plans de l'ordre du degré) sont multipliés par 3 ou 4 ;
- Ces données alimentent en continu et en quasi temps réel une base de données d'observations géoréférencées consultable à tout moment. Ainsi, la mémoire des interventions successives est conservée et une réinterprétation des observations est toujours possible au fur et à mesure de l'avancement du creusement.
- l'intégration de données provenant de diverses sources d'investigations et leurs confrontations en 3D apporte une compréhension globale de la géologie pour une section définie ou un tronçon de galerie ;
- les données acquises sous forme numérique permettent de réaliser une observation virtuelle du front de taille ou de la galerie depuis le bureau via un viewer gratuit.

Ainsi, l'observation naturaliste du géologue est parfaitement complémentaire du scan THR de la surface de la paroi pour comprendre et anticiper au mieux les différentes composantes du développement de la fracturation du massif en galerie.

6. Références bibliographiques

- Armand G., Plas F., Bosgiraud J.M. (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*, vol. 250, pp. 251-268.
- Armand G., Leveau F., Nussbaum C., de La Vaissière R., Noiret A., Jaeggi D., Landrein P., Righini C. (2014). Geometry and properties of the excavation-Induced fractures at the Meuse/Haute-Marne URL drifts, *Rock mechanics and rock engineering*, vol. 47, Issue 1, pp. 21-41.
- Andra. (2012). Référentiel du site Meuse/Haute-Marne, *Tome 1*, pp. 291-294.