



# Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au ZEB-REVO : Les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France)

Thomas Dewez, Silvain Yart, Florian Masson, Pierre Pannet, Ysoline Thuon,  
Alain Devos

## ► To cite this version:

Thomas Dewez, Silvain Yart, Florian Masson, Pierre Pannet, Ysoline Thuon, et al.. Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au ZEB-REVO : Les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France). Journées Aléas Gravitaires (JAG), Oct 2017, Besançon, France. 2017, <<https://www.journeesaleasgravitaires.fr/>>. <hal-01586641>

HAL Id: hal-01586641

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01586641>

Submitted on 13 Sep 2017

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

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

# Quantification géotechnique 3D de fractures souterraines au Zeb-Revo :

## Les carrières d'Hermonville (Marne, Est de la France)

T.J.B. Dewez, S. Yart, F. Masson

*BRGM – Dir. Risques et Prévention, Orléans France*

P. Pannet, Y. Thuon

*BRGM - Délégation régionale Grand-Est, Reims, France*

A. Devos

*Université de Reims-Champagne-Ardenne, GEGENAA EA3795, Reims, France, alain.devos@univ-reims.fr*

### Résumé

La fracturation est un facteur aggravant l'instabilité des galeries souterraines. Visible et mesurable dans les parois, ses caractéristiques géotechniques sont généralement relevées manuellement et remises en contexte sur des plans de galeries approximatifs. Nous profitons de relevés au scanner laser mobile portable Zeb-Revo réalisés dans trois carrières souterraines des calcaires du Lutétien supérieur à Hermonville, au Nord-Ouest de Reims (Marne, Est de la France) pour caractériser un réseau de fractures sur base d'un nuage de points 3D laser. Les nuages de points 3D, à densité centimétrique, sont acquis de manière continue en déambulant en surface et dans les galeries souterraines. Ceci permet d'extraire un plan exhaustif et précis des galeries, de leurs parois, des désordres les affectant et des épaisseurs de recouvrement. La morphologie des galeries révèle un réseau de fractures partiellement évidées, cônes d'éboulis et cône de soutirage en surface. Le logiciel libre et gratuit Cloud Compare est utilisé pour mesurer l'attitude structurale, l'écartement des épontes et la profondeur évidée des fractures. Replacés dans leur contexte géomorphologique, ces réseaux de fractures sont liés au démantèlement de la couche résistante du caprock par fluage de son socle des sables Yprésiens. C'est le phénomène déjà connu de cambure de versant. Le Zeb-Revo accélère remarquablement la prise de mesures, ce qui permet de documenter d'autres sites sans appréhender l'effort cartographique.

### 1 INTRODUCTION

La cartographie des réseaux souterrains a été communément réalisée au moyen d'un décamètre, d'un distance-mètre et d'une boussole (p.ex. Devos et al., 2012), ce qui est long, fastidieux et imprécis, mais peu coûteux. L'utilisation de scanner laser permet d'augmenter considérablement la restitution des détails des parois (p.ex. Gallay et al., 2016) mais au prix d'un assemblage, très souvent jugé prohibitif, des scènes acquises à chaque station. Le semi de points échantillonne de manière très anisotrope les surfaces, avec des densités nettement supérieures à 1pt/cm à proximité directe de chaque station laser, et des densités beaucoup plus faibles à des distances dépassant la dizaine de mètre. Dans un environnement encombré, chaque obstacle crée des zones masquées que seule une multiplication des stations permet de combler. Bref, la cartographie du milieu souterrain où les lignes de visées sont courtes et constamment interrompues reste un challenge technique.

L'avènement de scanners lasers mobiles portables à la main de type Zeb-Revo modifie cet état de fait (Zlot et Bosse, 2014). Cet instrument de mesure révolutionne le niveau de détail économiquement accessible pour la cartographie de cavités car il permet de contourner les obstacles en quelques pas (p.ex. Dewez et al., 2016). Dewez et al. (2017) discutent l'application de levés au Zeb-Revo lors de l'établissement de cartes d'aléa de remontée de fontis. Le niveau de précision géométrique des nuages de points est suffisamment détaillé pour établir des cartes à l'échelle du 1/1.000 au 1/5.000, l'imprécision étant en tous points inférieure à 1 m. Pour les pouvoirs publics devant gérer les risques d'effondrement, le 1/5.000 permet de traiter l'aléa au niveau de la parcelle cadastrales et même d'y distinguer différents niveaux d'aléa.

Dans le cadre de cette contribution, nous souhaitons montrer comment l'exploitation de nuages de points 3D issus du scanner laser mobile portable à la main Zeb-Revo permet de cartographier les fractures affectant les galeries de carrières souterraines. Comme cause possibles des réseaux de fractures peuvent se développer au toit et dans les murs des galeries via les phénomènes de décompression de versants discutés par Cerepi (2002), Moiriat et al. (2005), Devos et al. (2012) et Bollot et al. (2014). L'acquisition continue de la topographie de surface et du réseau de galeries sous-jacent permet non seulement de visualiser, mais aussi de mettre en relation géométrique directe les dolines et dépressions de soutirage avec les fractures en cavité.

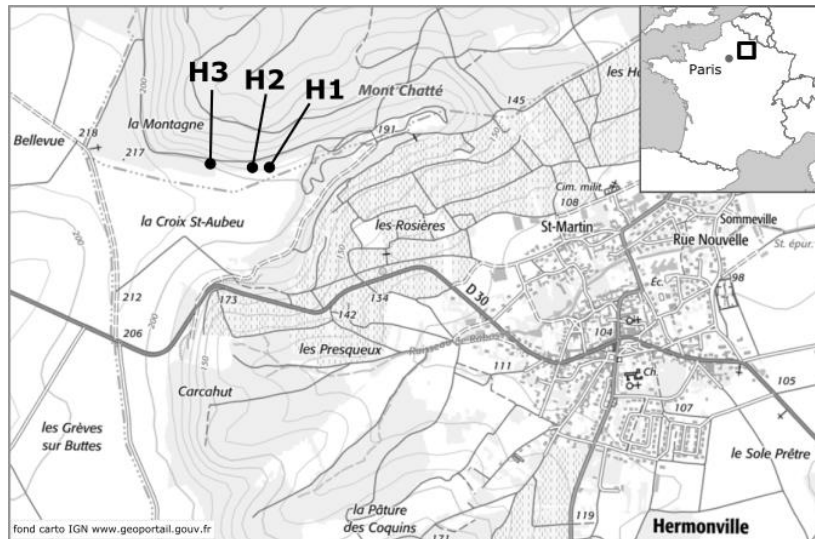


Figure 1. Localisation des trois carrières souterraines numérisées avec le scanner laser mobile Zeb-Revo en février 2017. Les carrières sont positionnées en limite supérieure du versant à l'ouest du Mont Châté, au nord-ouest d'Hermonville (Marne).

## 2 NUMERISATION DE LA TOPOGRAPHIE DE SURFACE ET SUBSURFACE

Le scanner laser mobile portable Zeb-Revo est fondamentalement un distance-mètre laser produisant 42.000 pts/s, d'une portée de maximum 30 m, équipé d'accéléromètres 3 axes. Le logiciel de traitement, boîte noire, intègre les données de distance et d'attitude instantanée du scanner pour reconstruire la géométrie 3D du monde qui l'entoure avec un algorithme de SLAM (Simultaneous Location And Mapping). Il pose l'hypothèse que les points 3D sont fixes et ont été vus plusieurs fois sous des angles différents (voir Zlot et Bosse, 2014) pour résoudre les couples d'attitude/distance instantanés en un modèle cartésien cohérent. Cette technique impose de réaliser des boucles de mesures revenant au point de départ et ne dépassant pas plus de 30 minutes pour limiter la dérive des accéléromètres.

La précision point par point du Zeb-Revo donnée par le constructeur, GeoSLAM, est de 5 mm + 1 mm/m. Ce résultat est cohérent avec nos propres tests. Sur des plans avérés, bien que chaque point dévie de  $\pm 7.6$  mm à 1 sigma, (ou  $\pm 6.8$  mm, quantile à 66%), pour des mesures prises à 1.30 m de distance sur un sol lisse, le optimal plan modélisé par 2.4 millions de points a été restitué avec un gradient résiduel de 0.28 mm/m sur un domaine de 35 m x 12 m.

Le levé de trois carrières de pierre souterraines à Hermonville sur la Côte d'Ile de France dans les calcaires du Lutétien à Hermonville (Marne, région Grand-Est) (Figure 1) a été réalisé le 8 février 2017. Seule la carrière H1 (Figure 1) sera décrite en détail pour des raisons de concision. Le recouvrement des carrières dans les Marnes et caillasses du Lutétien supérieur est représenté par un complexe de bancs décimétriques calcaires et argileux (argiles vertes et blanches). Les carrières s'inscrivent sur le flanc septentrional d'un éperon (le Mont Châté) entre deux « cuves » ou rentrants de la Côte d'Ile de France. Le levé comprend cinq boucles au Zeb-Revo (une pour chaque carrière et deux en surface sur l'emprise de deux des trois carrières). Chaque boucle a duré de 16 min à 27 min pour des distances parcourues comprises entre 735 m à 849 m et des vitesses moyennes de progression comprises entre 1.7 km/h et 2.8 km/h. Les levés ont été orientés approximativement au nord, sans doute à mieux que 5° près, en alignant le laser du Zeb-Revo en direction de l'Est et la plaque arrière sur un axe Nord-Sud, visé à la boussole. Dans le cas qui nous occupe, cette procédure approximative n'a aucune incidence sur nos résultats car nous décrivons la direction des fractures constatées à relier à la pente du versant. Les boucles laser sont cohérentes entre elles et seul un biais d'orientation affecte nos mesures.

Pour les carrières H1 et H2, les nuages de points couvrant le versant boisé et les carrières sous-jacentes comptent respectivement environ 68 millions et 89 millions de points. Le nuage de points acquis sur la carrière H3 (50 millions de points) ne couvre que la partie souterraine. Dans les trois cas, la densité la plus fréquente dépasse 1pt/cm.

## 3 LOCALISATION ET PROPRIETES DES FISSURES

Devos et al. (2012) discutent un modèle conceptuel et quantifié de la direction et de la densité de fracturation en tête de versant sous l'effet de la cambrure du versant à lithologie meuble soutenant le calcaire lutétien. Ici,

nous utilisons les données 3D pour raffiner l'estimation quantitative (Figure 2). Les mesures sont extraites grâce au logiciel libre Cloud Compare (v2.9 beta) ([www.cloudcompare.org](http://www.cloudcompare.org)).

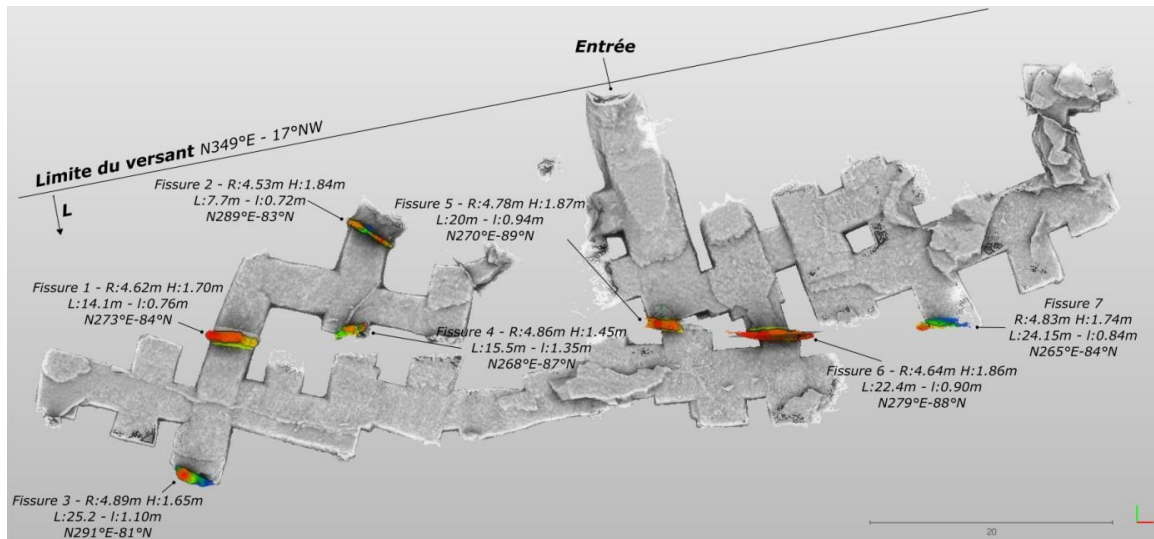


Figure 2. Morphologie de la carrière H1 (voir Figure 1). Sept fissures majeures (en couleur) partiellement évidées affectent le toit et les murs des galeries. Leurs propriétés morphologiques sont reprises. R : épaisseur de recouvrement au sommet de la fissure [4.53 m – 4.89 m]. H : hauteur de vide dans les fissures évidées mesuré à partir du niveau du toit de la galerie [1.45 m – 1.86 m]. l : largeur des fissures entre épontes [0.72 m à 1.10 m]. L'attitude du plan moyen de chaque fissure est reportée. Les azimuts sont approximatifs.

Comme les mesures 3D de surface ne recouvrent pas totalement l'extension de la carrière souterraine, il est nécessaire de poser l'hypothèse que le plateau peut être approximé par un plan de tendance qui recouvre toute l'étendue de la carrière. Ceci est raisonnable au regard de la précision d'ajustement du plan (écart-type : 0.19 m). Le plateau a une pente de 8° en direction du NNW (N343°E). Sous le plateau, la carrière est creusée avec un pendage vers N331°E-04°NW à une profondeur d'environ 6 m (entre 5.5 m et 6.5 m). Les fissures qui traversent le toit sont à moins de 5 m (entre 4.5 m et 4.8 m) sous la surface du plateau (Figure 2).

Pour la distance des fractures au versant (L sur Figure 2), une procédure comparable a été employée : (i) modélisation de la tendance du sol du versant par un plan, (ii) création d'un plan vertical d'azimut identique appliqué à l'entrée de la carrière et (iii) calcul de la distance du plan vertical au nuage de points de la carrière. L'écart entre l'azimut du versant et l'azimut de chaque fissure est en moyenne de 17° (variant de 6° à 32°). Les fissures se situent entre 7.70 m et 25.2 m du versant moyen.

La largeur des fissures est estimée via un plan modélisant la tendance de chaque fissure. L'écartement des épontes considéré est l'amplitude maximale des écarts au plan moyen. Les sept fissures s'ouvrent de 0.70 m à 1.10 m. A l'aplomb des fissures évidées, des cônes d'éboulis se sont accumulés. La pente d'équilibre des éboulis varie de 40° à 45°. Les argiles vertes et blocs hétérométriques calcaires des Marnes et Caillasses du remplissage sont moins compétent que le calcaire Lutétien, néanmoins les pentes d'équilibre peuvent déjà servir à renseigner des valeurs plausible quand il s'agira de produire une carte d'aléa d'effondrement de voûte par fontis.

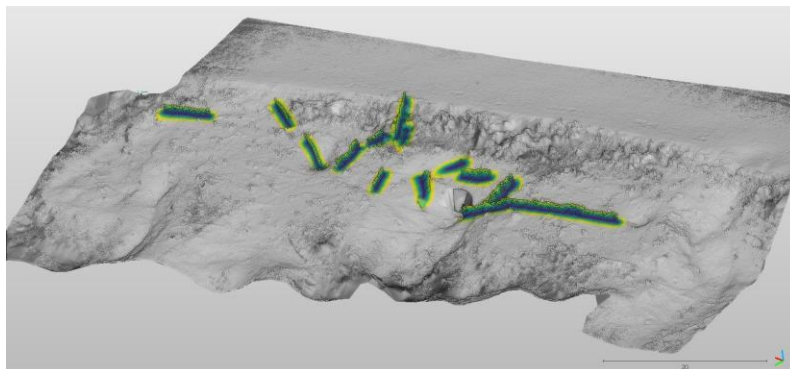


Figure 3. Matérialisation des points de percée des fractures dans le front de côte (carrière H2). Sans surprise, des dolines se trouvent en surface dans le prolongement des fractures indiquant explicitement le rôle de conduit de soutirage des fractures.

Sur le front de côte, où l'épaisseur de recouvrement est moindre, les fissures ont provoqué des cônes de soutirage d'argiles vertes qui se manifestent en surface par des dolines en entonnoir. Les plus petites ont un

diamètre de l'ordre de 5 m pour environ 1 m de profondeur. Les plus grandes sont des dépressions de l'ordre de 10 m à 20 m de largeur pour des profondeurs de l'ordre de 1 m à 2 m. On ne peut pas exclure que ces grandes dépressions proviennent de modifications anthropiques des abords de la carrière (ancien front de taille aérien). Pour les petites dolines, on retrouve le cône de soutirage dans les galeries sous-jacentes, leur origine ne fait guère de doute (p.ex. Figure 3).

#### 4 DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats montrent explicitement l'intensité de la fracturation de détente mécanique (trois fissures recoupées sept fois dans les galeries) caractérisée par une extension latérale marquée (fissures ouvertes) et soutirant les Marnes et caillasses sus-jacentes. Cette fracturation de détente mécanique débite des blocs calcaires de petite taille drapant le sommet du front de côte. Elle concourt à la cambrure soulignée par la pente du rebord du plateau, du toit et du sol de la carrière et par les anomalies de pendage des bancs repères (lumachelles et chailles orientées vers le NNW). Ce fléchissement s'accompagne de nombreux décalages des niveaux repères de part et d'autre des fissures soulignant une structure en « dip and fault » (Hobbs, 2008) où les blocs calcaires s'impriment dans les sables de l'Yprésien supérieur sous-jacents. On observe également le soutirage des Marnes et caillasses associé à des dolines de surface à l'aplomb des fissures et à des cônes d'argiles vertes obstruant les galeries.

La numérisation de carrières souterraines à flancs de versant au moyen d'un scanner laser mobile portable à la main est une solution rapide et suffisamment précise pour reconnaître la forme des galeries et leur implantation dans le sous-sol. En quelques dizaines de minutes, 100 millions de points 3D ont couvert une superficie de l'ordre de 2 ha (1 ha en souterrain et 1 ha en surface) avec une densité meilleure que 1 pt/1 cm. Grâce à cette densité d'information, le nuage de point comprend une description explicite de fractures d'ouverture décimétrique dans le toit et les murs des galeries. Les outils d'interprétation numériques 3D tel que le logiciel libre Cloud Compare sont tout à fait adaptés pour extraire les dimensions des objets géologiques contenus dans les nuages de points. Le site d'étude d'Hermonville avait déjà été reconnu comme un lieu où la fissuration liée à la cambrure de versant est exprimée (Devos et al., 2010, 2012, Bollot et al., 2014). Il apparaît néanmoins que le Zeb-Revo produit des nuages de points 3D adaptés pour quantifier tous les paramètres requis par les géomorphologues voulant documenter les effets du démantèlement sur les roches de couverture compétentes.

#### REFERENCES

- Bollot, N., Devos, A., Pierre, G., Chalumeau, L., et Lejeune, O., 2014, Détente mécanique et dynamique de versant dans l'Eocène de l'est du bassin de Paris, France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20(2), 121-132.
- Cerepi A. (2002) – Quantitative analysis of fracturing heterogeneity: application to underground quarries. *C. R. Geoscience*, 334, 163–170.
- Devos, A., Chalumeau, L., Bollot, N., Sosson, C., Barre, E., Lejeune, O. et Gobancé, G., 2012, Organisation spatiale de la fracturation de détente mécanique de versant en carrières souterraines. Application aux plateaux des calcaires éocènes du Bassin de Paris, *Physio-Géo*, 6, 2012, 243-262.
- Devos A., Fronteau G., Lejeune O., Sosson C., Chopin E., Barbin V. (2010) – Influence of geomorphological constraints and exploitation techniques on stone quarry spatial organisation: Example of Lutetian underground quarries in Rheims, Laon and Soissons areas, *Engineering Geology*, 115, 268–275.
- Dewez, T.J.B., Plat, E., Degas, M., Richard, T., Pannet, P., Thuon, Y., Meire, B., Watelet, J.-M., Cauvin, L., Lucas, J., Dian, G., 2016, Handheld Mobile Laser Scanners Zeb-1 and Zeb-Revo to map an underground quarry and its above-ground surroundings, *Virtual Geosciences Conference (VGC2016)*, 22-23 Sept. 2016, Bergen, Norway.
- Dewez, T.J.B., Thuon, Y., Plat, E., and Pannet, P., submitted 20 January 2017, Towards cavity collapse hazard maps with Zebedee handheld laser scanner point clouds, *The Photogrammetric Record*, manuscript PHOR-2017-01-1120
- Gallay, M., Hochmuth, Z., Kanuk, J., and Hofierka, J., 2016, Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1827–1849.
- Hobbs P.R.N., Jenkins G.O. (2008) – Bath's 'foundered strata' - a re-interpretation. *British Geological Survey Research Report*, OR/08/052. 40 p.
- Moiriat D., Potherat P., Durville J.-L., Bebie J. (2005) – Observations sur la fracturation liée à l'incision d'une vallée – carrière souterraine des brillants (Hauts-de-Seine), *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 258-259, 3–14.
- Parks C.D. (1991) – A review of the mechanisms of cambering and valley bulging. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 7, 373–380.
- Zlot, R. et Bosse, M., 2014, Three-dimensional mobile mapping of caves, *J. of Cave & Karst Stud.*, 76(3), pp. 191–206.