

ETUDES GÉOSTRUCTURALES DE PAROIS ROCHEUSES PAR PHOTOGRAMMETRIE ET LASERGRAMMETRIE

APPLICATION OF LASERGRAMMETRY AND PHOTOGRAMMETRY TO GEOSTRUCTURAL STUDIES ON ROCK-WALL

François ROCHE¹, Quentin BARBIER¹, Fabrice GUYOTON¹, Violaine VIGNON¹

¹ GEOLITHE Ingénieurs Conseils, Crolles, France

RÉSUMÉ - La lasergrammétrie et la photogrammétrie permettent de réaliser des analyses structurales en milieu difficiles d'accès et sur des sites partiellement recouverts de végétation ou d'ouvrages de protection. Nous analysons la pertinence des données structurales obtenues par ces méthodes, et les comparons aux levés structuraux manuels. Les résultats montrent que les données obtenues sont fiables et précises, et permettent d'assister le géologue dans son expertise des parois rocheuses.

ABSTRACT – Lasergrammetry and photogrammetry allow structural analysis in hardly reaching places or covered with vegetation or wire meshes. We analyzed the precision of structural data from lasergrammetry and photogrammetry, and compared them with compass acquired data. Data obtained are reliable and precise, and can help geologist in his expertise on rock-wall.

1 - Introduction

La lasergrammétrie terrestre (LIDAR couplé à la photographie haute définition calibrée) et la photogrammétrie terrestre sont des techniques de modélisation 3D permettant au géologue de mieux appréhender les sites d'étude d'accès difficile. Leurs applications sont nombreuses (Slob et Hack, 2004) : analyses volumiques et surveillance, mesures topographiques, creusement de tunnels, surveillance de parois rocheuses, etc. Ces techniques fournissent des informations géométriques et géologiques complémentaires aux mesures de terrain, et en quantité supérieure, notamment pour des sites non accessibles à pied (Dueholm et al. 1993 ; Buckley et al, 2008). En 2009, Dunning et al. ont montré que l'utilisation du laser permettait d'extraire les orientations des discontinuités géologiques, et d'identifier les modes de rupture.

L'objet de cette publication est d'évaluer quelle technique de la photogrammétrie ou de la lasergrammétrie est la plus adaptée à une analyse géologique structurale, suivant les conditions et le type d'objet étudié. Nous avons comparé les données structurales obtenues par chacune de ces techniques, sur différents sites d'étude à la géologie simple et impossibles d'accès: un affleurement rocheux d'alternances marno-calcaires très raide avec une végétation dispersée, et le front de taille d'un tunnel.

2 - Protocole expérimental

2.1 - Sites d'études

2.1.1 - Site 1 : Affleurement rocheux de Crolles (38)

L'affleurement rocheux (voir figure 1) se situe dans la commune de Crolles, en Isère, France. Il s'agit d'un escarpement rocheux raide de pente moyenne 80°. Il est orienté sud-ouest et mesure 10 m de haut par 15 m de large. La lithologie est constituée d'alternances

marno-calcaires dont les joints stratigraphiques forment un plan de discontinuité très marqué, et recoupé par plusieurs familles de fractures affectant le massif dans son ensemble. Un petit surplomb rocheux dans la partie gauche de l'affleurement forme une zone d'ombre.

Du fait de son escarpement, cet affleurement rocheux est impossible d'accès, pour des levés manuels en paroi avec un très fort risque de chutes de pierres. Les mesures structurales à la boussole ont donc été réalisées à gauche de l'affleurement, sur de petites surfaces. En revanche, l'accès au versant opposé est simple. Le site est dégagé et le géoréférencement est aisé.

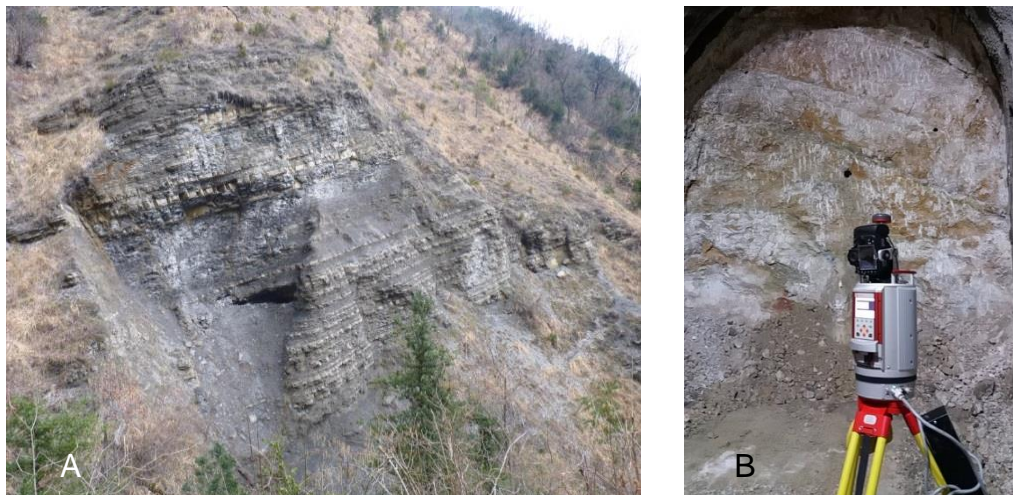


Figure 1 : A : photographie de l'affleurement rocheux de Crolles, site 1 (Isère, France)
B : Photographie du front de taille du tunnel du chat, site 2 (Savoie, France) et de l'appareil de mesure laser LIDAR

2.1.2 - Site 2 : Front de taille en tunnel

Le chantier de creusement de la galerie de secours du tunnel du Chat, localisé en Savoie (voir figure 1, B), est situé dans des formations calcaires massives. Ce site a été retenu pour ses conditions d'intervention particulières imposées par le chantier de creusement : milieu confiné à faible luminosité, et délais d'intervention très courts (< 15 min). L'accès au front de taille est interdit et une distance de sécurité de 3 m doit être respectée. Les mesures géologiques sont donc réalisées à distance par le géologue. Notons qu'au fond du tunnel, on ne perçoit aucun signal GPS pouvant servir au géoréférencement.

2.2 - Protocole d'acquisition des données tridimensionnelles

Nous avons comparé les vecteurs pendages des discontinuités observées sur les deux sites d'étude en utilisant 3 techniques décrites ci-après :

2.2.1 - Lasergrammétrie terrestre :

Nous utilisons un scanner laser à temps de vol (LIDAR) couplé à un appareil photographique haute définition calibré (chaque point du nuage lasergrammétrique est associé à un pixel de la photo afin de faciliter la visualisation des données). Le scanner permet d'acquérir jusqu'à 122 000 points par seconde dans un rayon maximum de 600 m. A 100 m de distance, sa résolution peut varier de 1 point tous les 17.4 cm à 1 point tous les 4 mm (à la verticale et à l'horizontale). Les prises de vues haute définition sont réalisées à partir d'un appareil photo numérique (APN) HD. Les caractéristiques techniques de cet APN sont indiquées dans le tableau 1. Du fait du faible recul entre les stations de mesure et les zones d'étude, nous utilisons une distance focale de 20 mm.

Les nuages de points (NdPt) sont géoréférencés à l'aide de 5 sphères disposées au préalable à proximité de la zone d'étude, et permettant de recalibrer les différentes acquisitions. La position de ces sphères est ensuite levée à l'aide d'un GPS haute précision (de l'ordre de 2 à 3 cm), puis sont rattachées à un système de coordonnées géodésiques.

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des APN pour lasergrammétrie (LIDAR) et photogrammétrie

	APN du LIDAR	APN pour photogrammétrie
Format de capteur	Plein format 24x36	Plein format 24x36
Définition du capteur	36.3 Mpx	42.4 Mpx
Type de capteur	CMOS	Full Frame
Sensibilité min - max	100 - 6400	100 - 6400
Sensibilité max étendue	25600	102 400
Objectif	20 mm f/2.8D	55 mm f/1.8

2.2.2 - Photogrammétrie terrestre :

La méthode utilisée est la multi-corrélation d'images géoréférencées. Pour limiter les aberrations géométriques et chromatiques, les prises de vues sont réalisées au moyen d'un APN à focale fixe Ø 55mm. Le taux de recouvrement entre chaque prise de vue est de 80 à 90 % et le géoréférencement est réalisé par visée de points de mesure avec une station totale de précision millimétrique. Les principales caractéristiques techniques de l'APN sont présentées dans le tableau 1.

2.2.3 - Levés manuels à la boussole :

Le principe d'acquisition des données géostructurales s'appuie sur l'analyse réalisée par le géologue et le repérage des différentes familles de discontinuités. Le géologue mesure ensuite les orientations et pendages des différentes familles, à l'aide d'une boussole. Ces levés permettent d'estimer la fréquence des discontinuités ainsi que l'extension, de relever la rugosité et l'altération des épontes, visualiser les venues d'eau, les éventuels suintements, l'altération des matériaux, les matériaux de remplissage, etc.

Si l'accès sur le site est possible, ces observations et mesures peuvent être réalisées à l'œil nu, en complément d'un géoréférencement par positionnement avec un GPS. Dans le cas contraire, le géologue peut être amené à utiliser des jumelles. Le géoréférencement pourra utiliser des outils de géoréférencement à distance (station totale, théodolite) pour localiser les cibles étudiées.

2.3 - Protocole d'analyse des données géostructurales

La photogrammétrie et la lasergrammétrie permettent de construire des nuages de points. En lasergrammétrie il est possible de supprimer la végétation par la technique des échos (Duong 2006; Harding 2008; Heritage et Large 2009), le nuage de points ainsi obtenu correspond uniquement à la paroi rocheuse. En photogrammétrie, le fait de traiter la végétation diminue la densité de points disponibles en arrière du masque végétal. En d'autres termes, un affleurement rocheux recouvert d'une végétation très dense ne pourra pas être analysé d'un point de vue géostructural.

Les nuages de points sont traités par un logiciel d'analyse géostructurale 3D qui permet de visualiser les plans de discontinuité en leur appliquant un code couleur en fonction de leur projection sur un stéréogramme (voir figure 3). Cette transcription 3D par nuage de points colorisés assiste le géologue dans son analyse structurale et complète le set de données terrain.

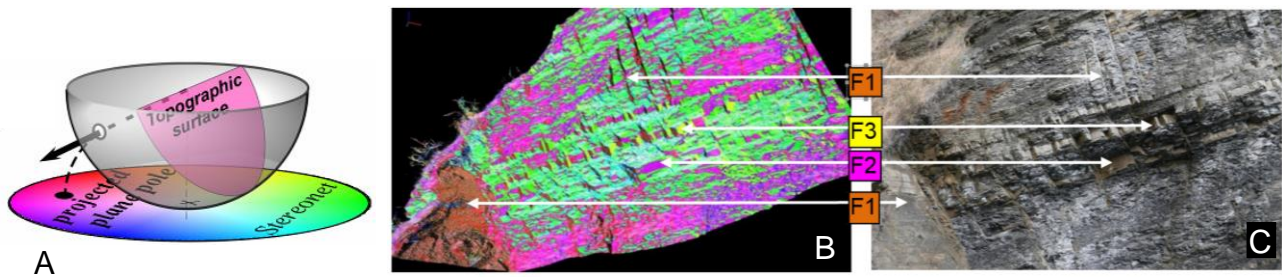


Figure 2 : (A) : Projection du pôle du plan de discontinuité sur un stéréogramme – (B) : Coloration de l’affleurement rocheux du site n°1 par le logiciel d’analyse géo-structurale. Les familles de plans de discontinuités visualisées grâce à la coloration, ont été corrélées avec les plans visibles sur la photographie (C)

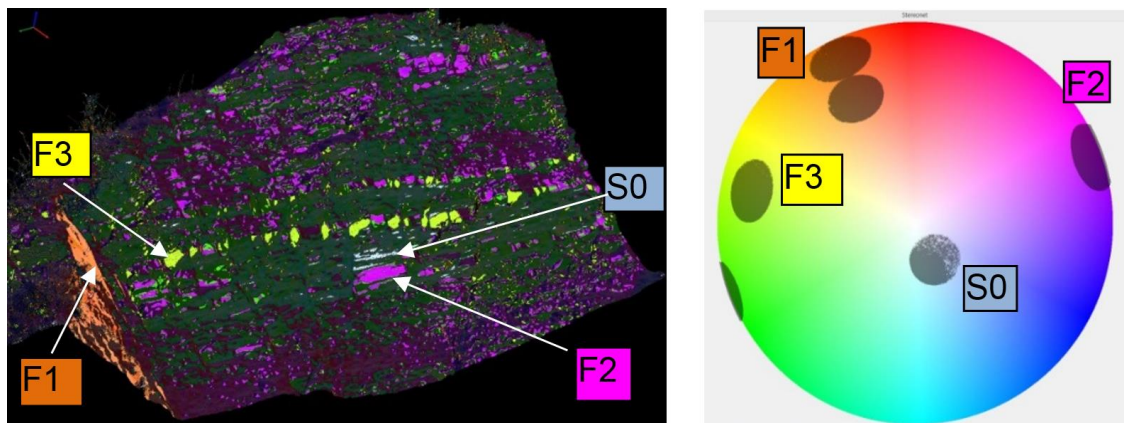


Figure 3 : Sélection de 4 familles de discontinuité identifiées sur le nuage de points colorisés selon les pôles

La figure 2 montre la coloration obtenue avec le logiciel pour le site 1. Cette représentation fait ressortir les 3 familles de fracturation observées sur l’affleurement. Une fois identifiés, les plans peuvent être sélectionnés par deux méthodes différentes : de manière interactive en délimitant manuellement des plans identifiés, ou de manière semi-automatique en fixant les orientations des plans visibles (Figure 3). Cette dernière méthode facilite la visualisation des différentes familles de plans, et permet d’en mesurer les fréquences. Une fois les différentes familles de plans repérées par l’analyse 3D, les orientations et pendages de chaque plan sont exportés sous un logiciel d’analyse géostructurale à partir duquel on déduit les canevas, utilisés pour l’étude de stabilité des massifs rocheux.

Pour pouvoir comparer les nuages de points obtenus par lasergrammétrie et photogrammétrie en s’affranchissant du biais de la géolocalisation, nous avons utilisé des points de mesure laser pour recalibrer le NdPt photogramétrique. Le choix du laser comme référence est lié au principe de cette méthode qui mesure le temps de retour du rayon laser émis sous forme de pulsation. Ce type de mesure n’induit pas de déformation liée à l’appareil et ne nécessite pas de correction post acquisition, contrairement à la photogrammétrie (Kraus, 2007).

3 - Analyse comparative des données structurales par chaque méthode

Sur le site n°1, la projection des données structurales obtenues par chacune des méthodes est présentée dans le tableau 1. La comparaison des canevas montre que la dispersion des données est beaucoup plus importante avec la boussole qu’avec les autres

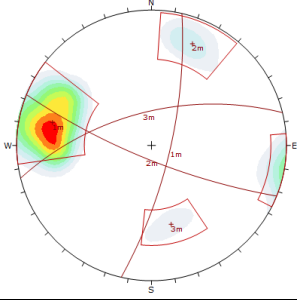
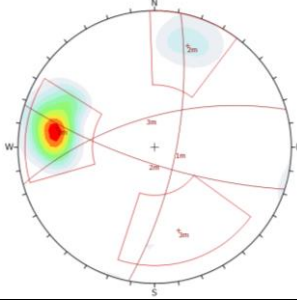
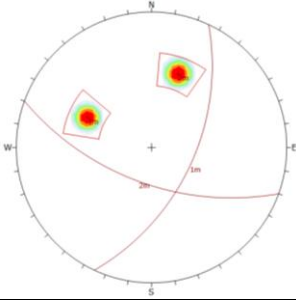
méthodes. On observe aussi une différence d'orientation des plans mesurés à la boussole, d'une quinzaine de degrés. Notons que l'affleurement étudié étant inaccessible à pied, les mesures à la boussole ont été réalisées à l'extérieur de l'affleurement, sur sa partie nord-ouest, à une quinzaine de mètres de l'affleurement lui-même. La comparaison des mesures par photogrammétrie et lasergrammétrie montre des densités et des orientations de plans tout à fait comparables.

Tableau 2 : Comparaison des données structurales obtenues par lasergrammétrie, photogrammétrie terrestres et mesures à la boussole pour le site n°1

	Lasergrammétrie	Photogrammétrie	Levé manuel
Canevas obtenus sur le site n°1 : Affleurement rocheux escarpé de Crolles			
Nbr de stations	2	30 photos	-
Nbr de pts mesurés	2 600 000	2 900 000	45
Densité	17 300 pts/m ²	19 300 pts/m ²	0,1 mesure/m ²
Matériel requis	Scanner laser. GPS Haute précision.	APN FHD, GPS Haute précision ou Théodolite	Boussole avec clinomètre.
Coût d'investissement	Elevé	Modéré	Très faible
Géoréférencement	GPS Haute précision. NB : En tunnel, il s'effectue avec des points de repères positionnés au préalable par le topographe à l'avancement du tunnel. Ces repères sont connus en coordonnées dans un système géodésique.	Tachéomètre lorsque la paroi est inaccessible ou un GPS Haute précision. NB : En tunnel, identique à la lasergrammétrie	-
Temps d'acquisition pour une surface de 150m ²	Données 3D : 10 mn hors calibrage du montage de l'appareil photographique avec le scanner laser. 20 mn avec calibrage du montage. Géo-référencement : 20 min à 2h en fonction des sites. 60 min en moyenne.	Données 3D : 5 mn Géoréférencement : 20 min à 2h en fonction des sites. 60 min en moyenne.	Données 3D : 60 mn Géoréférencement : Instantané
Données complémentaires disponibles	Modélisation 3D texturé Photos HD calibrées Réflectance	Modélisation 3D texturé Photos FHD	-

Sur le site n°2, la projection des données structurales obtenues par chacune des méthodes est présentée dans le tableau 2. Dans ce cas, l'orientation des plans de discontinuité est sensiblement identique en lasergrammétrie et en photogrammétrie. En revanche le levé manuel (2 mesures à distance) diverge des deux autres, avec notamment des différences dans les pendages qui sont de l'ordre de 15 à 20°. Ces différences sont dues pour l'essentiel à des erreurs d'appréciation de l'inclinaison des plans du fait des levés à distance.

Tableau 3 : Comparaison des données structurales obtenues par lasergrammétrie, photogrammétrie terrestres et mesures à la boussole pour le site n°2

	Lasergrammétrie	Photogrammétrie	Levé manuel
Canevas obtenus sur le site n°2 : Front de taille en tunnel			
Nbr de stations	1	30 photos	
Nbr de points mesurés	1 710 000	3 200 000	2
Densité des mesures	70 000 pts/m ²	128 000 pts/m ²	0.08 pts/m ²

4 - Discussion

Les résultats montrent que la lasergrammétrie et la photogrammétrie (réalisée avec un APN très haute définition) permettent de réaliser des études géostructurales de grande précision, du fait de la densité et de la précision des mesures obtenues. Ces techniques permettent d'obtenir des données structurales, sur des objets non accessibles à pied, où, pour réaliser des levés manuels, le géologue procéderait par estimation avec un risque d'erreur qui pourrait fausser les canevas obtenus. Le nombre de point de mesures en photogrammétrie et lasergrammétrie est de plusieurs millions contre quelques dizaines pour les relevés manuels. Outre la possibilité de disposer d'informations 3D sur l'ensemble de la zone d'étude, qui améliore la quantité et la qualité des données disponibles pour le géologue, le nombre important de mesures disponibles pour l'analyse géostructurale peut être pertinent. De plus, ces méthodes permettent a posteriori de rechercher et visualiser une extension de plan, de sélectionner une orientation particulière pour visualiser et estimer la fréquence d'une discontinuité, et d'afficher les caractéristiques géométriques des zones sélectionnées.

4.1 - Géoréférencement :

La précision des orientations mesurées réside principalement dans la qualité du géoréférencement, car la densité de points est bien suffisante pour obtenir des données très précises. Dans ce cas, la lasergrammétrie présente un atout par rapport à la photogrammétrie, puisque le GPS est intégré au système de mesures, et que le principe même de cette méthode permet de réaliser des visées sur des objets à distance, eux même géoréférencés. Au contraire, la photogrammétrie nécessite l'utilisation d'un outil supplémentaire, tel qu'une station totale.

4.2 - Couverture végétale ou objet surfacique (grillage) :

Dans le cas d'objets étudiés présentant un couvert végétal léger, la photogrammétrie présente des écarts significatifs (quelques centimètres) avec la lasergrammétrie, du fait que cette dernière permet de dissocier le couvert végétal de l'objet étudié. Cet atout est aussi applicable à un ouvrage surfacique tel qu'un grillage de protection (voir figure 4), évitant au géologue une intervention sur corde pour obtenir les données structurales.

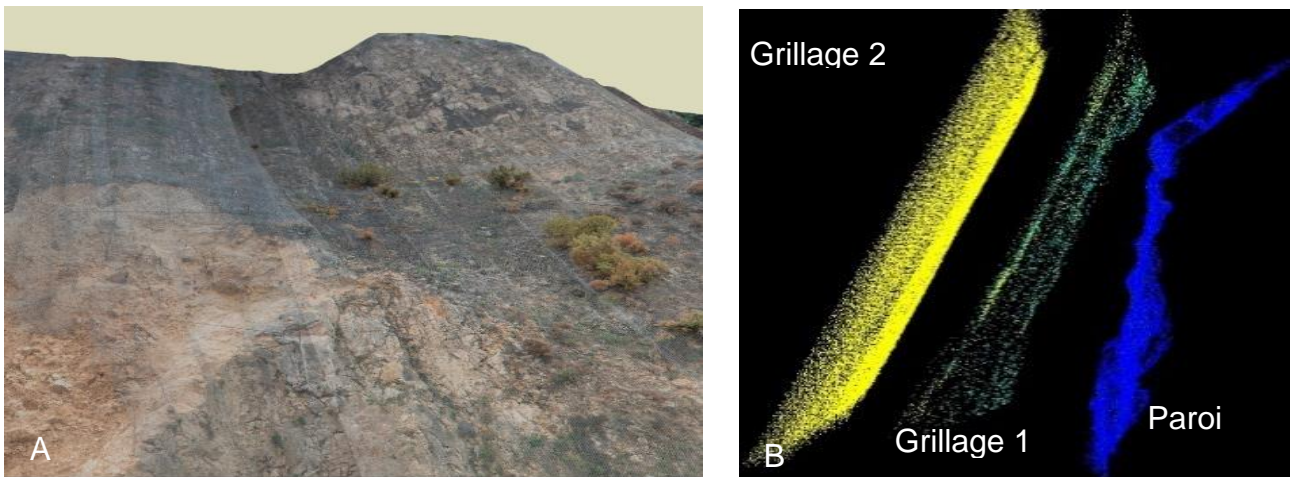


Figure 4 : Exemple de traitement de deux grillages superposés en lasergrammétrie. A_ Nuage de points colorisé de l'affleurement ; B_ nuage de points « en vue écho »

4.3 - Luminosité :

Les conditions de luminosité ne sont pas une limite pour la lasergrammétrie, qui pourrait être réalisée dans l'obscurité totale. En revanche, avec la photogrammétrie, l'utilisation de capteurs spécifiques dit « bas niveau de lumière » est impérative afin de permettre la restitution d'images de qualité. Les écarts maximaux (supérieurs à 5 cm sur le site 1) entre les deux méthodes apparaissent sur les zones de forts contrastes. Dans ce cas, même avec un APN très haute définition et un iso très élevé, la photogrammétrie est moins précise que la lasergrammétrie.

Cette étude montre aussi que la méthode d'acquisition des données est primordiale, afin de minimiser les zones d'ombre et avoir une densité de points homogène sur toutes les orientations de plans, dans la perspective de pouvoir ensuite extraire les statistiques sur les fréquences de discontinuités. L'angle d'incidence du laser ainsi que l'angle de prise de vue photographique influent sur la qualité des données. Plus l'angle est tangentiel moins bonne est la restitution 3D. Une des limites de ces techniques sera donc l'obtention de données qualitatives dans des cas d'études à morphologie complexes, de grandes hauteurs avec faible recul. L'utilisation des drones pour des acquisitions aéroportées peut être une solution.

Notons enfin que les données lasergrammétiques permettent de disposer de données complémentaires telles que la mesure de la réflectance, qui permet de visualiser la présence d'eau ou zones humides au niveau de fractures. Cette mesure est directement intégrée dans le traitement usuel des données de lasergrammétrie

5 - Conclusion et perspectives pour l'analyse structurale

La présente étude a permis d'apprécier l'apport des données tridimensionnelles dans l'analyse géostructurale de massif rocheux de petite taille. Elle montre que la lasergrammétrie et la photogrammétrie sont des techniques tout à fait adaptées aux études géostructurales, et présentent de nombreux intérêts.

Elles améliorent la sécurité, en permettant de diminuer les temps d'exposition aux risques des intervenants. Les données tridimensionnelles obtenues sont très précises, et en très grand nombre, autorisant ainsi des expertises plus pointues. De plus, en diminuant la durée d'intervention, les techniques de modélisation 3D permettent de couvrir avec précision de grandes surfaces. Dans des cas d'étude de stabilité de massif rocheux, les

modèles 3D permettent donc une optimisation (qualitative et quantitative) des confortements.

La qualité des données obtenues dépend de la méthode d'acquisition des données, qui doit être effectuée de manière rigoureuse. Le géoréférencement est essentiel afin de pouvoir replacer les mesures dans un référentiel terrestre. Dans ce cas, la lasergrammétrie présente un avantage sur la photogrammétrie, les outils de géoréférencement étant intégrés à l'appareil.

Une utilisation intéressante des techniques serait l'acquisition embarquée sur drone pour l'étude de versants rocheux de grande hauteur. Ceci permettrait de s'affranchir des contraintes de prises de données terrestres (position des stations d'acquisition imposée par la morphologie, angle d'incidence pouvant être élevé), mais impliquera des contraintes d'acquisition de données 3D par laser dynamique (Jacquin, 2015).

Dans le cas d'affleurements rocheux partiellement masqués ou à forts contrastes, la lasergrammétrie apporte un avantage certain en s'affranchissant de la végétation et des ouvrages surfaciques tels que des grillages. Ceci n'est pas possible en photogrammétrie.

6 - Références bibliographiques

- Buckley Simon J., Howell J.A., Enge H.D., and Kurz T.H., Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations, *Journal of the Geological Society*, v. 165:625-638, doi:10.1144/0016-76492007-100.
- Dueholm K.S, Garde A.A, Pedersen A.K, Preparation of accurate geological and structural maps, cross-sections or block diagrams from colour slides, using multi-model photogrammetry, *Journal of Structural Geology*, Volume 15, Issue 7, 1993, Pages 933-937, ISSN 0191-8141, [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90186-E](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(93)90186-E).
- Dunning S.A., Massey C.I., Rosser N.J., Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning, *Geomorphology*, Volume 103, Issue 1, 1 January 2009, Pages 17-29, ISSN 0169-555X,
- Duong H. (2006) Full waveform analysis: Icesat laser data for land cover classification. In: ISPRS commission VII mid-term symposium "remote sensing: from pixels to processes",
- Harding D (2008) Pulsed laser altimeter ranging techniques and implications for terrain mapping, Chap 5. In: Shan J, Toth CK (eds) *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press, Taylor & Francis, pp 173–194.
- Heritage GL, Large ARG (2009) *Laser scanning for the environmental sciences*. Wiley-Blackwell, London.
- Jacquin A. (2015) - Qualification de la précision de données topographiques issues d'acquisitions par méthode scanner laser dynamique ferroporté au sein de la SNCF.
- Metzger R. (2009) - Coltop3D: A New Software for Structural Analysis with High Resolution 3D Point Clouds and DEM - University of Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Kraus K.: *Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans* - 2nd edition; Walter de Gruyter, Berlin, 2007, ISBN: 978-3-11-019007-6; 459 pages.
- Slob S. and Hack R.: 3-D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique, in: *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe, A European Perspective*, edited by: Hack, R., Azzam, R., and Charlier, R., *Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer, Berlin/Heidelberg, 104, 179–190, 2004.