

LEVES GEOLOGIQUES PAR PHOTOGRAMMETRIE : APPLICATION PAR LE GEOTECHNICIEN AU SUIVI D'EXECUTION DE TUNNELS

PHOTOGRAMMETRY FOR GEOLOGICAL SURVEY : APPLICATION BY THE GEOTECHNICIAN TO SITE SUPERVISION OF UNDERGROUND STRUCTURE

Alexis SERIEYS¹, Nour-Eddine EL-KHOTRI¹, Jean-François BRUCHON¹

¹ TERRASOL, Paris et Lyon, France

RÉSUMÉ – Cet article présente un exemple d'application de la photogrammétrie aux relevés de fracturation dans le cadre de travaux souterrains. La méthodologie proposée, basée sur des moyens simples et économiques, rend la technique utilisable directement par le géologue/géotechnicien en charge du suivi d'exécution tout en permettant l'acquisition de modèles 3D suffisamment précis pour l'obtention de mesures structurales exploitables.

ABSTRACT – This paper presents an example of the application of photogrammetry to perform discontinuity analysis in the case of underground structures. The proposed methodology, through simple and economical means, makes the technique directly usable by the geologist/geotechnician in charge of site supervision, while allowing the acquisition of a 3D model that is sufficiently accurate to get relevant structural measurements.

1 Introduction

Le comportement mécanique des roches est largement conditionné par la fracturation du massif : par le comportement mécanique des discontinuités et surtout par leur orientation. Dans le cadre du suivi de travaux souterrains, l'approche du front brut non-confiné est de plus en plus restreinte pour des raisons de sécurité, rendant le plus souvent impossible les mesures directe à la boussole. Dans ce dernier cas, les mesures sont parfois effectuées à partir d'acquisitions 3D de précision par photogrammétrie ou lasergrammétrie qui sont des méthodes déjà assez couramment appliquées en tunnel.

Il existe notamment un certain nombre d'articles techniques concernant l'application de ces méthodologies, par exemple (liste non exhaustive) les travaux de Charbonnier et al. (2013) et ceux de Roche et al(2016) qui illustrent notamment les comparaisons entre ces deux méthodes. En revanche, ce type de relevés reste à ce jour appliqué quasi-exclusivement par des sociétés spécialisées et induisant un certain impact en termes de coût et de délais. Cet impact coût/délais entraine souvent un espacement des relevés.

A travers un exemple concret de sa mise en œuvre sur un projet de travaux souterrains, cet article présente un cas d'application de la photogrammétrie, technique permettant d'obtenir une représentation en 3D d'un objet sur la base de photographies, au relevé de fracturation, comme alternative aux relevés manuels ou comme complément au relevés réalisés par des sociétés spécialisées dans l'acquisition 3D.

L'objectif est de proposer une méthodologie, basée sur des dispositions relativement simples de mise en œuvre, qui rendent la photogrammétrie directement applicable par le géotechnicien ou le géologue en charge du suivi d'exécution du tunnel. Sans supprimer la nécessité d'un recours à des spécialistes pour un relevé de précision, la méthodologie proposée vise, à partir de photographies numériques, à obtenir une modélisation 3D du front de taille suffisamment précise pour permettre la réalisation de mesures structurales exploitables. Elle permet ainsi de densifier les mesures tout en limitant les contraintes habituelles de coût et d'impact en termes de délais sur les travaux.

2 Mise en place de la méthodologie

2.1. Contexte

La méthodologie a pu être mise en place au cours du suivi géotechnique d'exécution du chantier n°4 d'extension des galeries du laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne, réalisé par Terrasol pour le compte de la société Eiffage Génie-Civil Auvergne/Rhône-Alpes, titulaire du marché de travaux auprès de l'ANDRA.

Le chantier consiste en la réalisation d'un ensemble de galeries expérimentales supplémentaires, dont une réalisée à l'échelle 1/1 par rapport aux galeries envisagées pour le projet CIGEO. Le soutènement des premières galeries creusées consiste en la mise en œuvre de béton projeté, d'auréoles de boulons radiaux et de cintres métalliques. Le pas d'avancement de l'excavation en méthode conventionnelle (excavation mécanique) est généralement de 1 m.

Le laboratoire souterrain est situé à environ 490 m de profondeur (environ 120m NGF), au sein de la formation des argilites du Callovo-Oxfordien, couche géologique choisie notamment pour son homogénéité et sa faible fracturation préexistante. Ainsi, la fracturation observée est une fracturation induite par le creusement, dont le schéma varie en fonction de la direction du creusement en raison de l'anisotropie des contraintes in-situ.

Les caractéristiques géométriques de la fracturation induite dans les deux directions de creusement (selon la contrainte mineure et selon la contrainte majeure) sont bien connues (Armand et al 2014), et ont notamment pu être établies grâce au suivi géologique mené sur la durée par la société GEOTER (Arnould A. et al 2016), couplant observations géologiques naturalistes des fronts de tailles, levés topographiques de précisions (Lasergrammétrie) et analyse de diagraphies de forages.

Cette société assure toujours un suivi géologique pour le compte de l'ANDRA et réalise notamment des levés périodiques au scan laser des fronts de taille (environ 1 front de taille sur 5).

Le retour d'expérience sur les différents chantiers de creusement du laboratoire souterrain a montré que la stabilité du front de taille, conforté par un boulonnage systématique, était principalement conditionnée par cette fracturation induite. Ainsi un des objets du suivi d'exécution mené par Terrasol consistait en la surveillance de la stabilité des fronts de tailles au cours du creusement par le biais de levés de front systématiques. La mise en œuvre d'une technique de photogrammétrie n'était pas demandée au marché prévue et a été développée en supplément au cours du chantier.

2.2. Objectifs

C'est donc dans le cadre de ce suivi, et grâce aux conditions favorables du site (surface du front de taille réduite, temps relativement important accordé aux levés de front, topographe à temps plein sur site, etc) qu'a pu être établie et testée la méthodologie d'acquisition photogrammétrique objet de cet article. L'objectif était de mettre en place une méthodologie répondant aux critères suivants :

- Pouvoir être mise en œuvre directement par le géotechnicien en charge du suivi de creusement des tunnels, qui n'est pas nécessairement un spécialiste de ce type de méthode ;
- Posséder un temps d'acquisition le plus réduit possible afin d'avoir un impact neutre sur les cadences de creusement ;
- Permettre d'obtenir des mesures structurales suffisamment précises pour être exploitables dans les analyses géologiques structurales.

En effet sur ce dernier point, du fait de son établissement par des non spécialistes, le modèle 3D obtenu ne saurait prétendre à une précision équivalente à celle demandée à des géomètres ou ingénieurs-topographes. Cependant, la donnée réellement recherchée est la donnée géologique structurale, qui par nature présente toujours une certaine variabilité : les plans structuraux ne sont jamais parfaitement plans, présentent une certaine ondulation et une certaine rugosité et pour finir, leur orientation présente généralement une certaine variabilité spatiale au sein du massif étudié. Ainsi, le but d'une étude structurale est généralement de regrouper les différentes mesures en familles, pour lesquelles seront évaluées des valeurs d'orientation moyennes et de dispersion autour de ces valeurs.

Dans ce cadre, la précision moins importante de chacune des mesures d'orientation peut être compensée par le grand nombre de mesures permises par l'acquisition d'une imagerie 3D, permettant de fiabiliser l'analyse statistique des données.

En outre, notons qu'une mesure effectuée sur le terrain à la boussole peut être schématisée par une interpolation de deux points pour la détermination de la direction et de deux autres points pour la direction du pendage, ce qui génère toujours une perte de précision dans la mesure, dépendant du pendage et de la rugosité/ondulation du plan. L'ordre de grandeur classiquement retenu pour les mesures à la boussole est de l'ordre de +/- 5° en direction comme en pendage, voire plus pour des plans très peu pentés ou très ondulés où il peut atteindre un ordre de grandeur de +/- 10°. Ces ordres de grandeur, issus de l'expérience serviront de base pour la validation de la méthodologie.

Le déroulement de la méthodologie de mesure structurale par photogrammétrie proposée peut être découpée en trois étapes principales : l'acquisition, la reconstruction et le géoréférencement du modèle 3D, et enfin l'exploitation du nuage de points pour les relevés structuraux. Ces étapes sont explicitées dans la suite.

2.3. Acquisition

L'acquisition photogrammétrique consiste en la réalisation d'un grand nombre de clichés du front de taille, pris de points de vue différents. Dans l'étape suivante, le modèle 3D pourra être reconstruit grâce à un algorithme basé sur le repérage des similitudes entre photographies numériques.

Les caractéristiques de l'appareil photo numérique utilisé sont à en prendre en compte pour adapter la distance de prise de vue, notamment la résolution du capteur, la taille du capteur et la focale de l'objectif qui conditionnent le nombre de pixels par unité de surface de la scène photographiée. Plus ce nombre est important, meilleure est la résolution du modèle.

La qualité des photographies est également importante : le bruit de l'image, les zones trop sombres et le floutage des images (par mauvaise mise au point ou à cause des mouvements de l'appareil durant la prise de vue) réduisent la qualité du modèle 3D obtenu. Pour assurer une qualité suffisante des prises de vues dans le cadre du chantier, le bon éclairage du front de taille a été garanti par l'utilisation de projecteurs lumineux, et un trépied a été utilisé pour stabiliser l'appareil durant les prises de vues.

Enfin le choix du protocole d'acquisition doit tenir compte des spécificités de la scène photographiée afin de faciliter la reconstruction 3D par l'algorithme et de capter la scène dans son intégralité. En effet, pour pouvoir être repéré en 3D, chaque point de la scène doit être visible sur au moins deux photographies et en général, plus le nombre de photographies de ce point sera grand, meilleure sera la localisation 3D du point. Il est d'usage de veiller à conserver un recouvrement minimal de l'ordre de 60% entre deux clichés successifs, et de varier les angles de vues en cas de relief important de l'objet étudié. Le nombre des prises de vues et la distance par rapport à l'objet à relever dépendent sont fonction des caractéristiques de l'objectif et capteur de l'appareil photo.

Au final, le temps d'exécution du protocole d'acquisition élaboré a été de l'ordre de 15 à 30 minutes pour une quarantaine de photographies, en comptant une séquence de prises de vues en nacelle. Ceci est compatible avec les exigences du chantier puisque qu'une durée d'une heure était réservée à cet effet.

2.4. Reconstruction et référencement des modèles 3D – Logiciel Agisoft Metashape

La reconstruction du modèle 3D est effectuée sous un logiciel spécialisé. Le logiciel utilisé dans notre cas est Agisoft Métashape. Le traitement est relativement linéaire, accessible et effectué en plusieurs étapes :

- Etape 1 - Alignement du modèle : Lancement d'un algorithme de recherche automatique des points de correspondance entre prises de vues, calcul de la position des prises de vues et construction d'un nuage de point épars constitué des projections des points de similitudes ;
- Etape 2 - Construction d'un nuage de point dense : Lancement d'un algorithme de génération de cartes de profondeur puis détermination de la position 3D des pixels de chaque photographie. La densité du nuage de point est paramétrable. Une fois le nuage de point généré, il peut être traité manuellement, notamment pour supprimer les boulons de fronts et les parties inutiles du nuage de points.
- Etape 3 (facultative) - Génération d'un modèle maillé et texturé : permettant d'obtenir une surface 3D ce qui assure un meilleur visuel.

Les différentes étapes de la chaîne de traitement du logiciel Agisoft Metashape sont illustrées dans la figure ci-après.

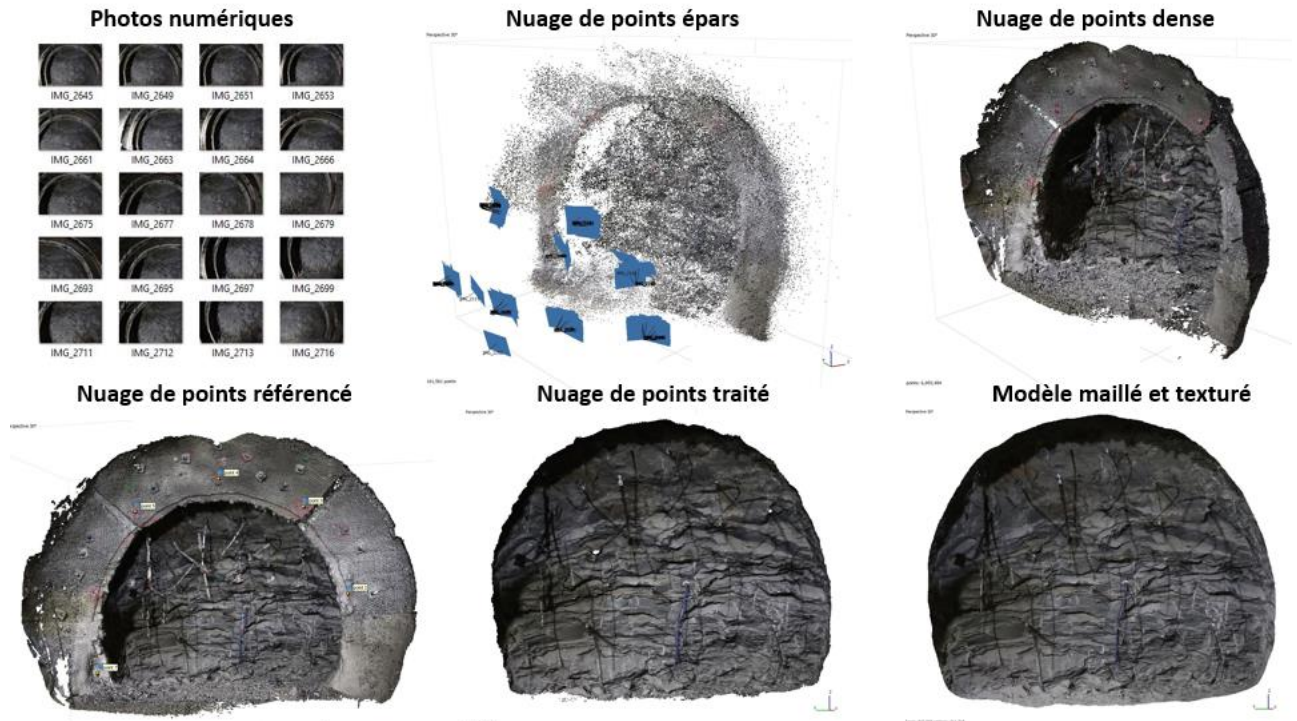


Figure 1. Vue d'ensemble de la chaîne de traitement sous le logiciel Agisoft Metashape

Il est à noter que la reconstruction du modèle 3D peut être effectuée sans nécessiter de repérage topographique, les positions des prises de vues étant calculées par le logiciel. Le modèle 3D ainsi obtenu est mis à une échelle et une orientation arbitraires.

La mise à l'échelle réelle et à l'orientation réelle du modèle peut se faire par la disposition de repères de coordonnées connues (minimum 3) sur la scène photographiée. Ces repères sont ensuite pointés manuellement sous le logiciel.

Dans notre cas, un total de 5 cibles topographiques déplaçables (aimantées et placées sur les cintres de soutènement) relevées par le topographe permettait de recalibrer le modèle 3D dans le référentiel topographique du laboratoire.

La figure ci-après présente un modèle 3D maillé et texturé d'un front de taille sur lequel ont été repérés manuellement les principaux plans structuraux.

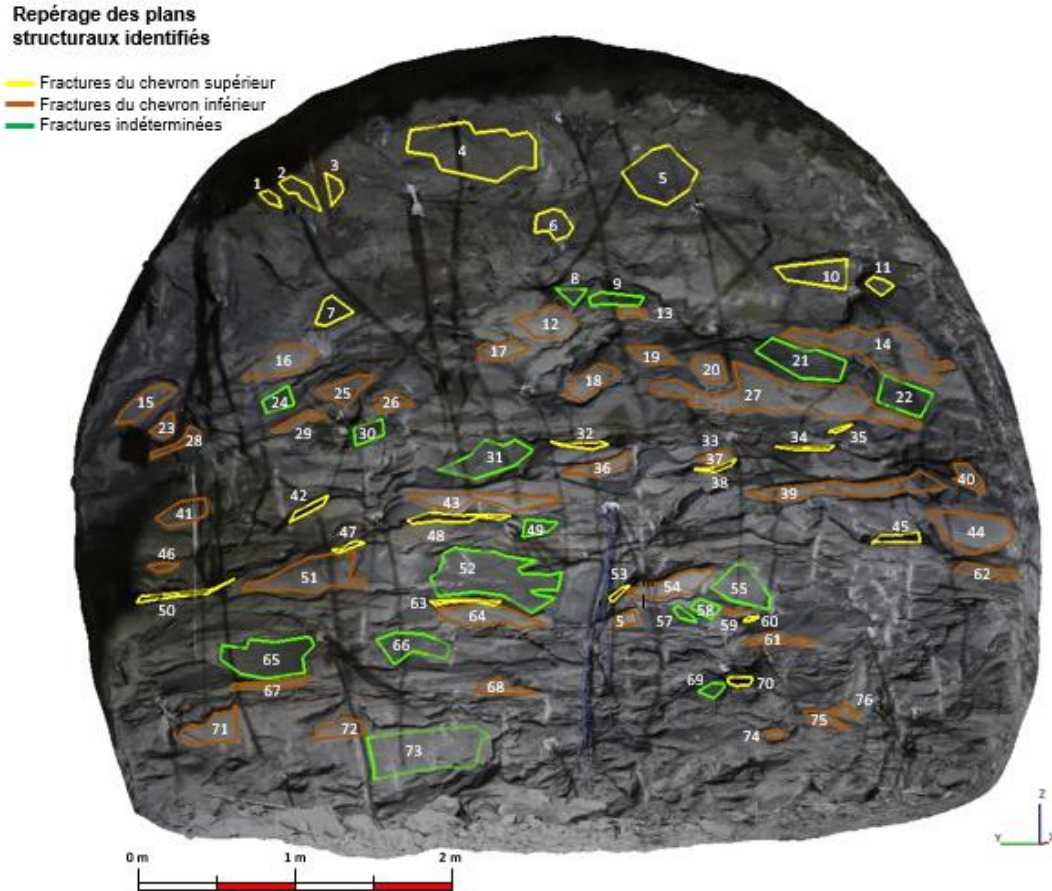


Figure 2. Repérage des plans structuraux à mesurer sous le logiciel Agisoft Metashape

2.4. Mesures structurales sur le nuage de points généré – Logiciel Cloud Compare

L'exploitation du nuage de point généré peut être effectuée sur le logiciel gratuit Cloud Compare, développé par EDF. Ce logiciel propose un grand nombre de fonctionnalités pour le traitement du nuage de points, et comprend notamment plusieurs plug-in adaptés permettant la réalisation de mesures structurales. Le plug-in Compass permet de réaliser la mesure d'orientation (azimut et pendage) en interpolant un ensemble de points sélectionnés manuellement par l'utilisateur, et c'est celui qui a été employé, car étant donné la surface relativement restreinte du front de taille, les algorithmes de recherche automatique de plans s'avéraient trop longs à aboutir. Afin de ne pas altérer la précision de la mesure, un nombre suffisant de points doit être pris en compte pour l'interpolation. L'ensemble des mesures obtenues peut ensuite être exporté sous forme de fichiers éditables (excel, txt) afin d'être exploité par des programmes d'analyse structurale.

Des développements sont en cours pour essayer d'optimiser le temps passé sur cette étape en termes de temps de calcul et de temps effectif.

3 Estimation de la précision

3.1. Comparaisons avec des levés par lasergrammétrie

Grâce aux levés périodiques par scan laser 3D effectués pour le compte de l'ANDRA mais toutefois gracieusement communiqués, une comparaison des mesures plan-à-plan a été rendue possible, la lasergrammétrie étant une technique réputée plus précise et éprouvée sur ce chantier lors des études géologiques initiales (Arnould A. et al 2016). Ainsi, sur plusieurs levés communs, les mesures de 389 plans structuraux ont été comparées en termes de direction du pendage et de pendage.

Les valeurs d'écart obtenus (angle orienté entre l'orientation ou le pendage mesuré sur modèle obtenue par photogrammétrie et l'orientation ou le pendage mesuré sur modèle obtenu par lasergrammétrie) donnent les résultats suivants :

- En termes d'orientation :
 - La répartition des écarts est centrée sur la valeur 0 ;
 - >95% des valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-10^\circ, 10^\circ]$;
 - 84% des valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-5^\circ, 5^\circ]$;
 - Les valeurs hors intervalle $[-10^\circ, 10^\circ]$ sont très majoritairement dues à un artéfact de mesure : nombre de points insuffisant sur le plan mesuré, plan bruité en raison d'un mauvais éclairage.

- En termes de pendage :
 - La répartition des écarts est centrée sur la valeur 0 ;
 - >94% des valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-10^\circ, 10^\circ]$;
 - 78% des valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-5^\circ, 5^\circ]$;
 - Les valeurs hors intervalle $[-10^\circ, 10^\circ]$ sont très majoritairement dues à un artéfact de mesure : nombre de points insuffisant sur le plan mesuré, plan bruité en raison d'un mauvais éclairage.

Les histogrammes de répartition des écarts sont donnés dans la figure ci-après.

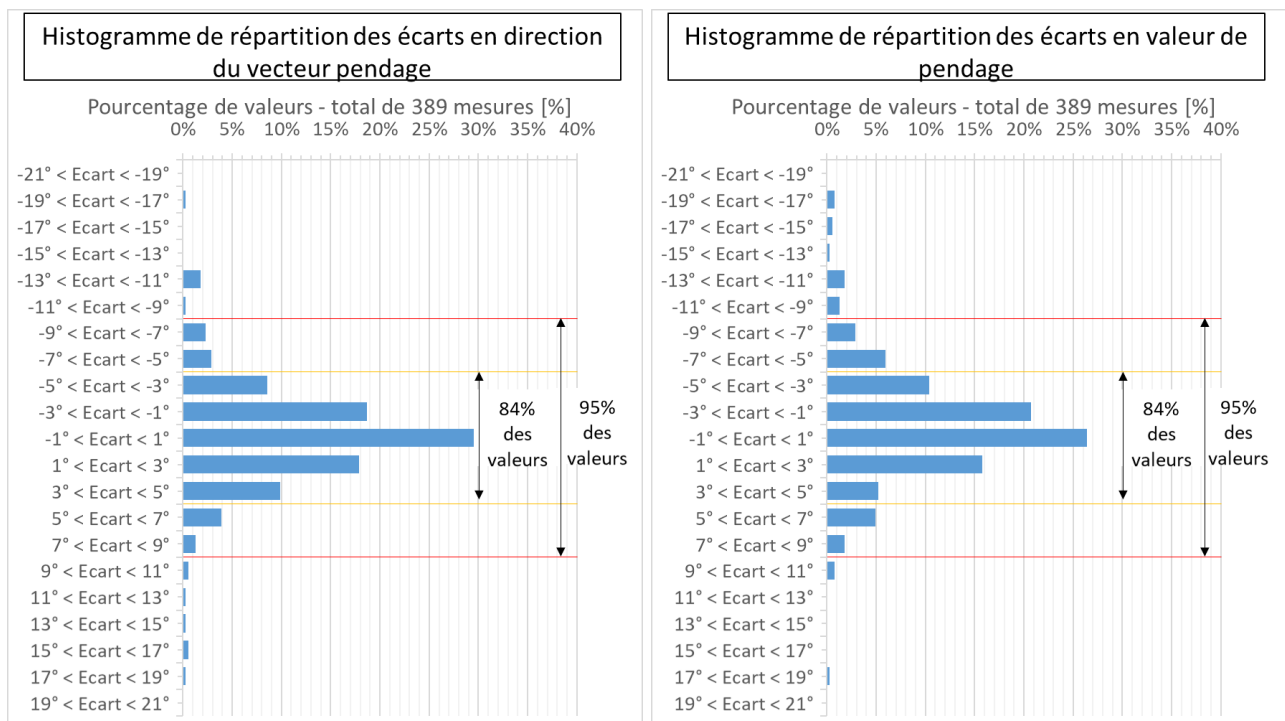


Figure 3. Histogrammes de répartition des écarts angulaires

Ainsi les écarts mesurés apparaissent comparables aux erreurs de mesures à la boussole. Toutefois, il est important de noter que l'intervalle de confiance des mesures sur modèle 3D obtenu par lasergrammétrie n'étant pas connu, des erreurs peuvent se cumuler ou se compenser lors de la comparaison des deux types de mesures. Ainsi, par cette méthode l'intervalle de confiance ne peut qu'être estimé et non défini dans l'absolu.

3.2. Comparaisons avec des mesures au théodolite

Une deuxième méthode d'estimation de l'intervalle de confiance a été mise en œuvre. Le principe était de disposer des cibles topographiques adhésives (17 au total) sur le front de taille au moyen d'une perche. Le levé photogrammétrique a ensuite été réalisé comme d'ordinaire, le modèle étant référencé grâce aux cibles topographiques disposées sur les cintres. La figure ci-après présente schématise la position des cibles considérées.

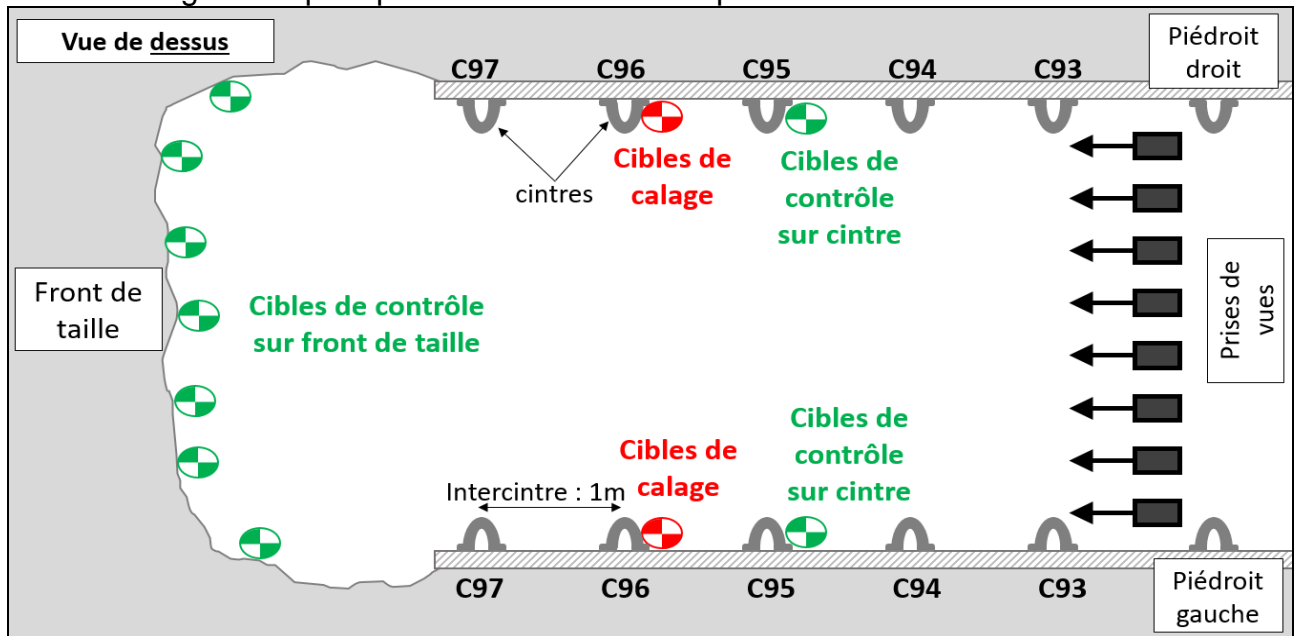


Figure 4. Position des cibles de calage et de contrôle

Après calage, les coordonnées des centres des cibles mesurées sur le modèle 3D ont été comparées aux mesures effectuées au théodolite par le topographe. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le graphique ci-après.

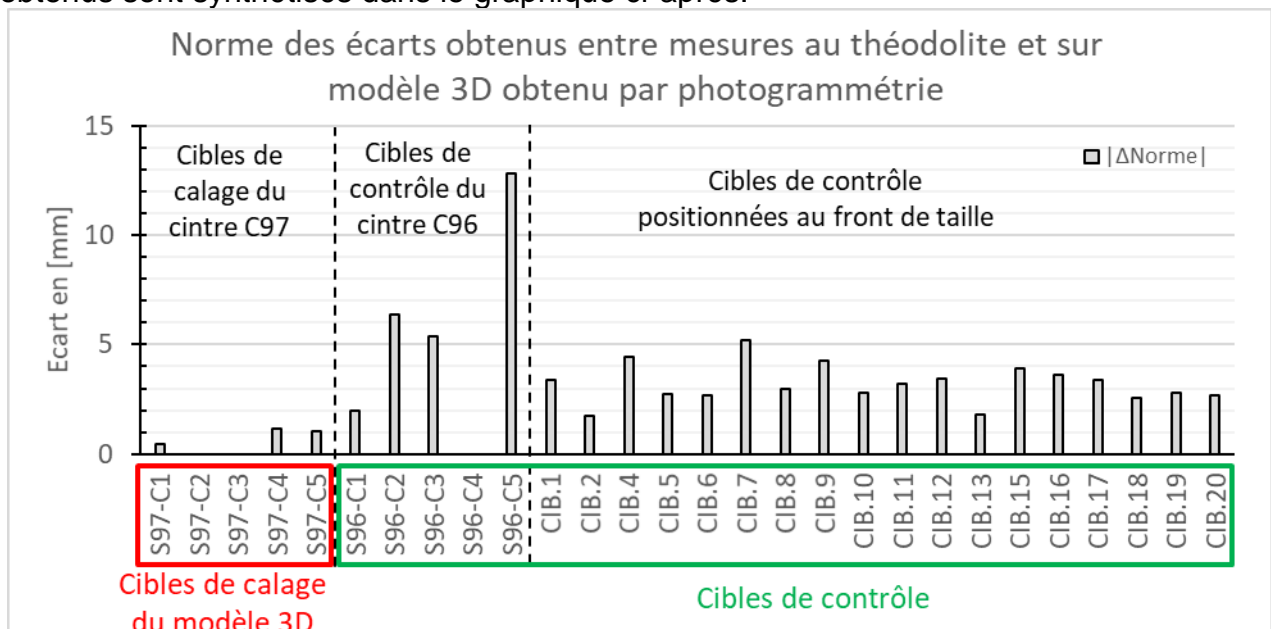


Figure 5. Histogramme des écarts mesurés avec les mesures au théodolite

L'écart présenté est la distance entre le point mesuré au théodolite et le point mesuré sur le modèle 3D.

Les résultats montrent les éléments suivants :

- Les écarts augmentent depuis un point situé au centre des repères topographiques, en lien avec un écart lors de l'homothétie de calage ;
- Plus les cibles de contrôle sont éloignées des cibles de calage, plus l'écart est important ;
- Avec un calage sur les cibles positionnées à 2 m du front de taille, l'écart relatif est de l'ordre de 5 mm en norme.

L'intervalle de confiance de la mesure topographique au théodolite, de l'ordre de +/- 3 à 5 mm en absolu n'est pas pris en compte, dans ces résultats. Toutefois, les écarts relatifs, inférieurs au centimètre, montre que la méthodologie permet d'obtenir un nuage de points 3D suffisamment précis pour obtenir des mesures structurales exploitables.

Les écarts mesurés sur chaque cible sont donnés dans le graphique ci-après (cibles de calage encadrées).

4 Conclusions et perspectives

En conclusion, les résultats obtenus par les méthodes de contrôles employées sont prometteurs : l'intervalle d'incertitude sur la position des points du modèle 3D est de l'ordre du centimètre, et l'intervalle d'incertitude sur les mesures structurales est similaire à celui obtenu pour des mesures à la boussole. Ceci confirme l'exploitabilité des mesures structurales obtenues par cette méthode.

Toutefois, elle a été développée dans un contexte favorable : 1) en termes de cadences d'avancement : avec notamment un temps dédié aux levés de front consigné dans les contraintes du marché de travaux ; 2) avec la disponibilité d'un topographe de chantier pour le relevé des cibles de calage. Son développement devra être poursuivi par une mise en œuvre sur un chantier plus « classique » avec des cadences d'excavation et des contraintes plus élevées.

Malgré tout, le temps d'acquisition reste raisonnable : de 10 minutes (sans nacelle) à 30 minutes, ce qui constitue un impact limité par rapport au temps normalement consacré à un levé de front. De plus, il est possible de se passer de mesures topographiques spécifiques pour le calage des modèles 3D, en profitant de manière opportuniste des relevés topographiques d'implantation ou de recollement effectués au cours du chantier.

L'application d'une telle méthode directement par le géologue/géotechnicien constituerait un réel avantage, permettant d'augmenter la quantité de données collectées au cours du chantier, notamment pour l'analyse de fracturation, et ce à moindre coût.

5 Références bibliographiques

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, Volume 47, Issue 1, pp 21-41.

Arnould A. et al (2016). Suivi géologique du creusement des galeries du CMHM : de l'observation à la modélisation 3D. JNGG Nancy 2016.

Charbonnier P., Chavant P., Foucher P., Muzet V., Prybyla D., Perrin T., Grussenmeyer P., Guillemin S., Accuracy assessment of a canal-tunnel 3d model by comparing photogrammetry and laserscanning recording techniques. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 1, n. 2, p. 171-176, 2013.

Roche F, Barbier Q, Guyoton F, Vignon V(2016), Inspection d'ouvrage d'art et diagnostic de parois rocheuses par lasergrammétrie et photogrammétrie, JNGG 2016