

Reconstruction d'affleurements géologiques par photogrammétrie en utilisant une instrumentation légère et à bas coût

**FERRE Ghyslain, ZANELLA Alain, CODDET Clyde, MOURGUES Régis,
SIMONETTO Elisabeth, France**

Mots clés: photogrammétrie, géosciences, topographie, technologie à bas coût

SUMMARY

Photogrammetry is a widely used imaging technique in Geosciences to reconstruct and analysed in 3D outcrops in nature. Nevertheless, because of the very large range of geometrical aspects and large dimensions of geological outcrops as well as the difficulty access to some study fields, terrestrial photogrammetry can turn to be difficult to use. In order to minimize the equipment to take with us and the number of images, and to insure the accuracy of the 3D measurements and the georeferencing, we developed a particular methodology. Thus, in our experiment, we only use : 1) a camera to take a total of thousands of pictures at a high resolution. We took the pictures with a methodic protocol to control several parameters as the overlap between photos, the direction of the shooting and the distance from the outcrop; and 2) a laser rangefinder with targets, a compass and a clinometer to be able to generate the scaling and georeferencing for the point clouds by measuring the distances and angles between stations and from stations to targets. Then, we use CoMet, a software for compensation of topographic measurements and network pre-analysis, to a posteriori calculate the coordinates of the stations and targets. Finally, we use the software PhotoScan (now Metashape) to retrieve the 3D photogrammetric model. In order to validate our 3D model, we choose to extract some geometrical data as the orientation of the geological structures that normally consist of planes in the 3D point clouds. Thus, we used qFacets plugin and yhe Ransac approach, with the CloudCompare software to generate and interpolate planes from the point clouds. The comparison between the in-situ measurements and the estimated ones from our 3D model shows very consistent values corresponding to the initial expectations.

RÉSUMÉ

La photogrammétrie est largement utilisée dans le domaine des géosciences pour reconstruire en 3D des affleurements rocheux. Néanmoins, cette méthode peut être difficile à mettre en œuvre en raison des grandes dimensions et du très large éventail de la géométrie des affleurements géologiques et de la difficulté d'accès à certains sites d'étude. Afin de pouvoir reconstruire un affleurement très éloigné, difficile d'accès, avec une bonne précision, tout en limitant le matériel à transporter et le nombre d'images à acquérir, nous avons développé une méthodologie particulière pour appliquer la photogrammétrie dans un tel contexte. Pour construire notre modèle photogrammétrique nous utilisons uniquement 1) une caméra pour prendre plusieurs milliers de photographies en haute résolution. Nous prenons ces photographies avec un protocole méthodique pour contrôler plusieurs paramètres comme le recouvrement, la direction de la prise de vue et la distance à l'affleurement; et 2) un distomètre laser avec des cibles, une boussole et un clinomètre pour être capable d'effectuer la mise à l'échelle et le référencement des nuages de points par la mesure de distances et angles entre les stations et depuis les stations vers les cibles. Ensuite, nous utilisons CoMeT, un logiciel de compensation de mesures topographiques et de simulation de réseau pour calculer a posteriori les coordonnées des stations et des cibles. Finalement, nous utilisons le logiciel PhotoScan (Metashape) pour reconstruire le nuage de points 3D par photogrammétrie. Afin de valider notre méthode, nous choisissons d'extraire quelques données géométriques comme l'orientation des structures géologiques qui constituent normalement des plans dans le nuage. Nous utilisons alors le plugin qFacets et l'approche Ransac, du logiciel CloudCompare pour générer et interpoler les plans depuis le nuage de points. La comparaison entre les mesures que nous avons prises directement sur le terrain et les données extraites de notre modèle 3D montre que les valeurs sont très cohérentes, correspondant aux attentes initiales.

Reconstruction d'affleurements géologiques par photogrammétrie en utilisant une instrumentation légère et à bas coût

FERRE Ghyslain, ZANELLA Alain, CODDET Clyde, MOURGUES Régis,
SIMONETTO Elisabeth, France

1. INTRODUCTION

La photogrammétrie permet de représenter des objets en trois dimensions à partir d'images, en s'appuyant sur la vision de ces objets depuis deux points de vue différents. L'avantage de cette méthode est d'utiliser des outils peu onéreux (appareil photo, cibles, règle de mise à l'échelle) et faciles à utiliser lors des acquisitions sur le terrain. De plus, elle permet de produire des modèles 3D de très bonne qualité, comme ceux obtenus par lasergrammétrie (e.g. [Barbier et al. 2016 ; Rose H., 2012]). La photogrammétrie est ainsi utilisée dans de nombreux domaines comme les géosciences avec par exemple la modélisation d'affleurements géologiques naturels parfois inaccessibles, supports de notre étude (figure 1). La difficulté, lors des acquisitions, est d'obtenir une orientation et une mise à l'échelle de l'objet mesuré avec des précisions suffisantes pour l'exploitation des données dans l'analyse géologique, mais sans avoir à utiliser des instruments lourds et coûteux ou des méthodes complexes à mettre en œuvre sur le terrain (utilisation de stations totales et de récepteurs GNSS). De plus, la quantité d'images acquises devient vite un frein en terme de temps de calcul. Les objectifs de cette étude sont ainsi de mettre en place un processus d'acquisition de données 3D géoréférencées par méthode photogrammétrique en utilisant des matériels facilement transportables et à bas coût et une mise en œuvre la plus simple possible et limitant le nombre d'images acquises tout en conservant une précision suffisante pour l'analyse géologique d'affleurements rocheux.

Tenant compte de nos contraintes, nous proposons d'adapter un protocole de levé évoqué dans la partie 2. Avec ce protocole, la résolution des positions des cibles et des stations est présentée dans la partie 3 puis sa mise en œuvre sur notre site est détaillée dans la partie 4.

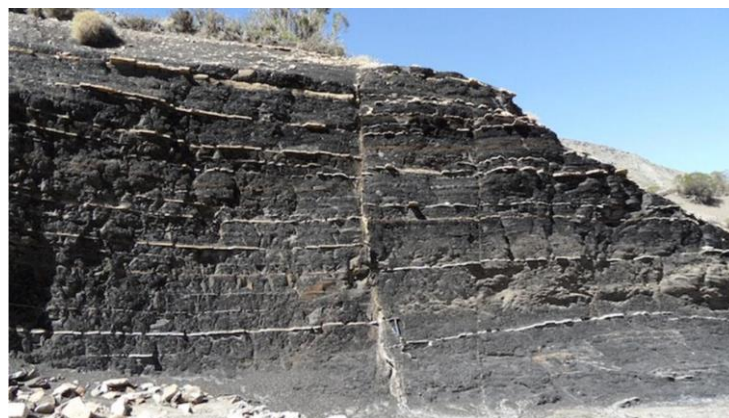


Figure 1: Affleurement rocheux avec plans de fractures (lignes blanches) - Source: A. Zanella

Reconstruction of Geological Outcrops by Photogrammetry from Light and Low-Cost Instrumentation (10789)
Ghyslain Ferré, Alain Zanella, Clyde Coddet, Régis Mourgues and Elisabeth Simonetto (France)

FIG Working Week 2020
Smart surveyors for land and water management
Amsterdam, the Netherlands, 10–14 May 2020

2. Contraintes initiales et recherche de méthodes adaptées

Les structures géologiques sont orientées dans l'espace à l'aide de deux paramètres (figure 2) :

- l'orientation (azimut), direction par rapport au Nord de la droite résultant de l'intersection du plan géologique avec un plan horizontal ;
- le pendage, angle entre la ligne de plus grande pente d'un plan géologique et un plan horizontal.

L'orientation et le pendage sont habituellement mesurés sur site directement sur les plans géologiques, respectivement avec une boussole et un clinomètre ayant une imprécision de l'ordre de 3° .

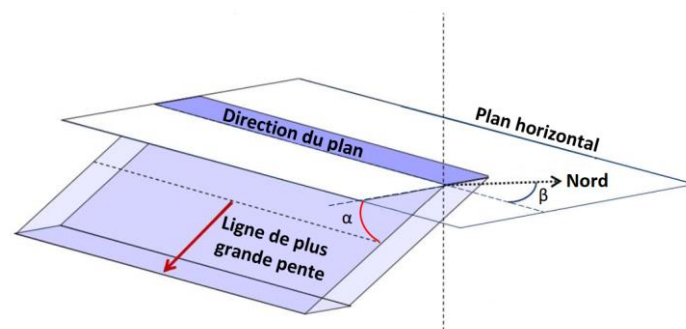


Figure 2: Pendage (α) et orientation (β) d'un plan géologique -
Source : C. Coddet

L'objectif est ici de mesurer ces paramètres en utilisant un nuage de points 3D issus de mesures par photogrammétrie, les affleurements géologiques n'étant pas toujours accessibles. Les précisions finales sur ces deux angles doivent être au moins égales à celles issues de mesures in situ, soit 3° . L'orientation nécessitant de connaître la direction du nord dans cet ordre de précision, il faut que les nuages de points soient géoréférencés ce qui nécessite des outils de mesures spécifiques comme des récepteurs GNSS et des stations totales lors des acquisitions. Un autre objectif étant de réduire au maximum les coûts pour le géoréférencement, l'encombrement (volume et poids) de l'instrumentation ainsi que la complexité des outils de traitement, l'utilisation de récepteurs GNSS centimétriques (mode différentiel) et de stations totales a été écartée.

L'idée initiale a été de proposer une méthode utilisant uniquement un récepteur GNSS de randonnée, un distomètre muni d'un système de mesure d'inclinaison et fixé sur un trépied doté d'un plateau gradué (goniomètre horizontal) ou d'une boussole, l'ensemble revenant à un coût de 1000 € (1100 \$) environ. Une méthode de géoréférencement de cibles à l'aide d'un distomètre pour des mesures photogrammétriques a été présentée par [Egels et Al., 2016]. Il a alors semblé pertinent de partir de cette méthode et de l'adapter aux besoins de cette étude.

Le principe est de positionner des cibles de photogrammétrie dans les zones accessibles des parois étudiées (ou sur des zones proches). Ces cibles sont ensuite mesurées depuis des points fixes (stations), un groupe de 3 cibles devant impérativement être visible depuis 3 stations

formant un triangle, donc non alignées. Les coordonnées de la première station et son orientation doivent être mesurées avec le récepteur GNSS et la boussole. Il n'est pas nécessaire d'effectuer des mesures directes entre les stations.

3. Traitements par moindres carrés

Les mesures d'angles et de distances étant surabondantes, les traitements sont effectués par la méthode des moindres carrés avec une pondération des mesures en fonction de leur précision a priori.

3.1 Mise en équation

Les inconnues à déterminer sont les suivantes :

- les coordonnées 3D des cibles $P(e_p, n_p, u_p)$;
- les coordonnées 3D des stations $S(e_s, n_s, u_s)$, hormis la station de départ qui est connue et fixée, si une boussole est utilisée ;
- les coordonnées 3D des stations $S(e_s, n_s, u_s)$ ainsi que l'azimut du zéro du limbe $G_{0,S}$, hormis pour la station de départ qui est connue et fixée, si un plateau gradué est utilisé.

En notant D_{SP} la distance inclinée mesurée, V_{SP} l'angle zénithal et H_{SP} la lecture horizontale ou A_{SP} l'azimut, les équations d'observation sont les suivantes :

$$D_{SP} = \sqrt{(e_p - e_s)^2 + (n_p - n_s)^2 + (u_p - u_s)^2}$$

$$V_{SP} = \arctan\left(\frac{\sqrt{(e_p - e_s)^2 + (n_p - n_s)^2}}{u_p - u_s}\right)$$

$$H_{SP} = \arctan\left(\frac{e_p - e_s}{n_p - n_s}\right) - G_{0,S} \quad \text{ou} \quad A_{SP} = \arctan\left(\frac{e_p - e_s}{n_p - n_s}\right)$$

Traitement par moindres carrés : équations d'observation

L'angle azimutal est issu de l'angle d'inclinaison Inc_{SP} mesuré avec le distomètre, soit :

$$V_{SP} = 90^\circ \pm Inc_{SP}$$

Angles vertical et d'inclinaison

3.2 Pondération des observations

Les observations ont des précisions relatives très différentes. Elles sont de l'ordre de :

- quelques millimètres sur les mesures de distance ;
- quelques dixièmes de degré pour les mesures d'inclinaison, soit quelques centimètres à 20 m ;
- environ 2,5° en azimut, soit environ 1 m à 20 m.

Les distances ont donc un poids très important par rapport aux angles zénithaux, les azimuts (ou angles horizontaux) ayant encore beaucoup moins de poids par rapport aux autres observations. À ces précisions doivent être ajoutées celles liées au centrage de la station et au pointé : elles n'affectent que la mesure de distance puisqu'elles ont le même ordre de grandeur mais sont négligeables pour les mesures angulaires.

4. Validation de la méthode proposée

Les protocoles d'acquisitions et de traitement ont ainsi été définis de façon théorique. Avant une mise en œuvre éventuelle sur site, des tests ont été pratiqués sur un affleurement rocheux de faibles dimensions (moins de 40 m de long) à Saulges, en France. Les résultats s'avérant concluants, la méthode a ensuite été expérimentée dans un canyon du bassin de Neuquén, en Argentine. Seule cette seconde expérimentation est présentée par la suite.

4.1 Cahier des charges et méthodologie d'acquisition

Le site de tests en Argentine est constitué de canyons étroits (largeurs de quelques mètres) de plusieurs centaines de mètres de long, sinueux et profonds de 3 à 6 mètres.

Les demandes initiales des géologues sur ce site sont les suivantes :

- une précision (écart-type) sur l'azimut et le pendage des plans de fracture inférieure à 3° ;
- une précision relative (écart-type) sur l'espacement des fractures inférieure à 2 cm ;
- une instrumentation légère ;
- un budget limité à 1 000 € pour le matériel de géoréférencement.

Les deux dernières demandes sont validées avec l'utilisation d'un distomètre sur trépied, d'une boussole, d'un récepteur GNSS de randonnée et des cibles imprimées (sur papier ordinaire) peu onéreuses (tableau 1).

Matériel	Qualité
Appareil photo CANON EOS 80D	capteur d'image de 22,3 mm par 14,9 mm 6018 par 4021 pixels définition de 24,2 megapixels
Distomètre LEICA D810 Touch	écart-type sur la mesure de distance : $\pm(2\text{ mm}+100\text{ ppm})$ écart-type sur le centrage/pointé : $\pm 5\text{ mm}$ écart-type sur la mesure d'inclinaison : $\pm 0,1^\circ$
Trépied LEICA TRI 70 avec adaptateur FTA 360	
Boussole	écart-type estimé à $\pm 2,5^\circ$ après correction de la déclinaison magnétique

Tableau 1: Matériels de mesure et qualité

Les prises de vue sont réalisées suivant un protocole mis en place pour modéliser des parois rocheuses à proximité d'ouvrages ferroviaires ([Tronchon M., 2012] et [Bakkouch L., 2013]) avec une adaptation pour réduire les zones d'occlusion et augmenter la précision du modèle sur le haut de la paroi (figures 3 et 4). Avec cette stratégie d'acquisition, où les prises de vues convergentes ne sont réalisées qu'une fois sur trois, la redondance d'observation est assurée mais nous limitons le nombre d'images acquises.

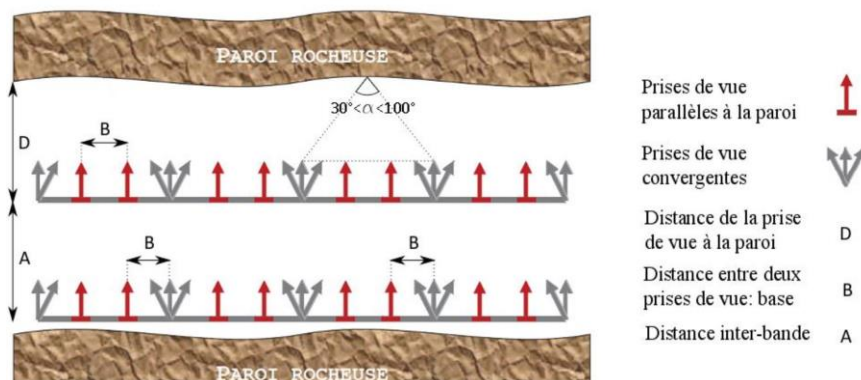


Figure 3: Schéma des prises de vue de la paroi - Source [TrochonM.,2012]

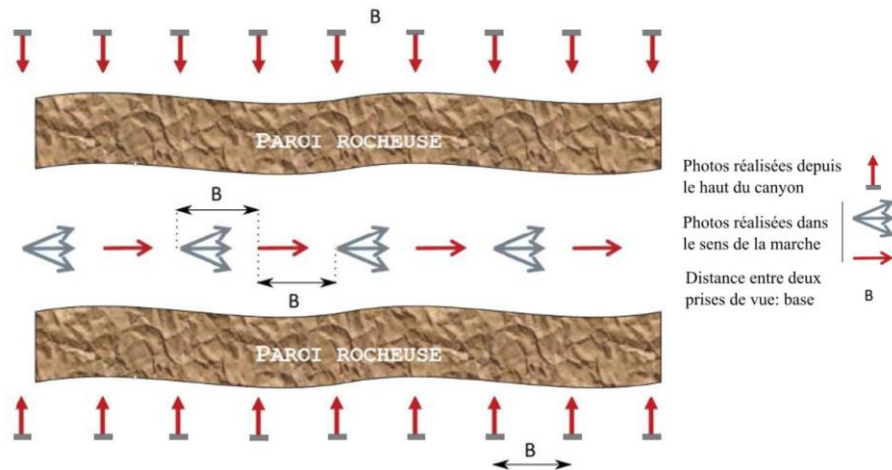


Figure 4: Schéma de prise de vue du fond du canyon et des parois rocheuses -
Source : C. Coddet

Pour le géoréférencement des cibles, les portées pour les mesures de distances sont limitées à 25 m. Toutes les mesures (angles et distances) sont notées sur un carnet à la main : la densification des cibles est donc nécessaire pour avoir des moyens de contrôle et de correction des fautes lors des acquisitions et des reports des données.

Les cibles sont positionnées en bandes séparées de 15 m maximum suivant une géométrie déterminée. Chaque bande comprend 4 cibles (figure 5) :

- les 2 premières à mi-hauteur sur chaque paroi (des 2 côtés du canyon) ;
- la troisième à mi-hauteur sur une des deux parois ;
- la troisième en haut d'une des deux parois, si possible la plus haute des deux.

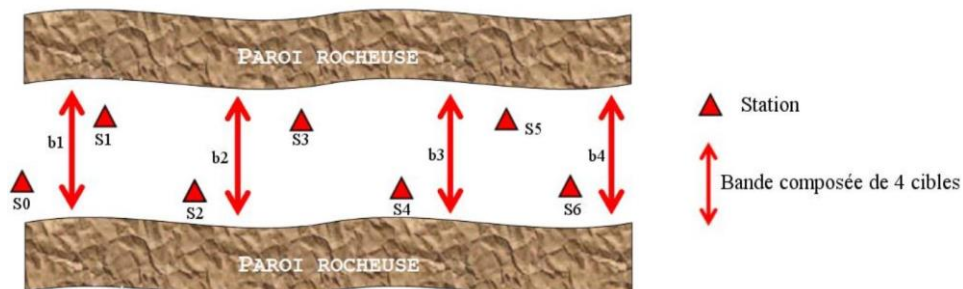


Figure 5: Géométrie des stations et cibles dans le canyon - Source : C. Coddet

Depuis chaque station les trois bandes de cibles les plus proches sont mesurées en excluant les visées trop tangentes. Chaque cible est donc relevée au moins 5 fois.

Cette configuration optimale est évidemment contrainte par le relief et la géologie du site et doit donc être adaptée lors des acquisitions.

4.2 Pré-analyse du réseau

Avant d'effectuer les acquisitions sur site, une pré-analyse du réseau de points pour les acquisitions (stations, cibles) a été effectuée. Ne disposant pas de la géométrie exacte du site étudié, un canyon sinueux de 250 m de long, 15 m de large environ et 3 à 6 m de haut a été considéré. La précision absolue sur la position de la première station mesurée avec le récepteur GNSS de randonnée est de quelques mètres. Cela n'est pas important pour la suite de cette étude contrairement à la précision sur l'orientation (écart-type de 2° sur la mesure de l'azimut à la boussole).

Le logiciel utilisé pour cette pré-analyse du réseau est CoMeT¹. Les précisions a priori sont celles données au tableau 2.

	Intervalles de confiance 1D (sur la coordonnée Alti)	Ellipses de confiance ponctuelles 2D (sur les coordonnées N ;E)	
	Précision (à 2 sigma : 95 %) sur la coordonnées Alti (en m)	Précision (à 2 sigma : 95%) sur le demi grand axe (en m)	Précision (à 2 sigma : 95%) sur le demi petit axe (en m)
Médiane	0,036	0,367	0,094
Moyenne	0,035	0,340	0,088
Maximum	0,056	0,592	0,222

Tableau 2: Pré-analyse du réseau - Intervalles et ellipses de confiance ponctuelles à 95 % (2 sigmas)

La simulation montre, comme attendu, que la taille des ellipses de confiance augmente en s'éloignant de la station initiale dont on a fixé la position. On obtient ainsi une imprécision maximale (à deux sigmas) sur le demi grand-axe de l'ellipse de confiance qui est de 59 cm sur un des points à l'extrémité du réseau (tableau 2). Contraindre la position d'un autre point du réseau avec une précision de quelques mètres n'améliore pas assez sensiblement les résultats. Le tableau 2 montre que la composante altimétrique est déterminée à 3,5 cm en moyenne avec un maximum de 5,6 cm, ce qui est très satisfaisant et suffisant pour répondre aux demandes initiales. En planimétrie, les ellipses de confiance ont un demi grand axe 4 à 5 fois supérieur au demi petit axe (34,0 cm pour 8,8 cm en moyenne) avec une orientation perpendiculaire à la paroi. Cela s'explique par la géométrie des visées et la faible largeur du canyon (figure 6).

1 CoMeT (Compensation de Mesures Topographiques) est un logiciel permettant l'ajustement de mesures par la méthode des moindres carrés et la pré-analyse de réseaux. Il a été développé par Stéphane Durand au sein du laboratoire GeF (Géomatique et Foncier).

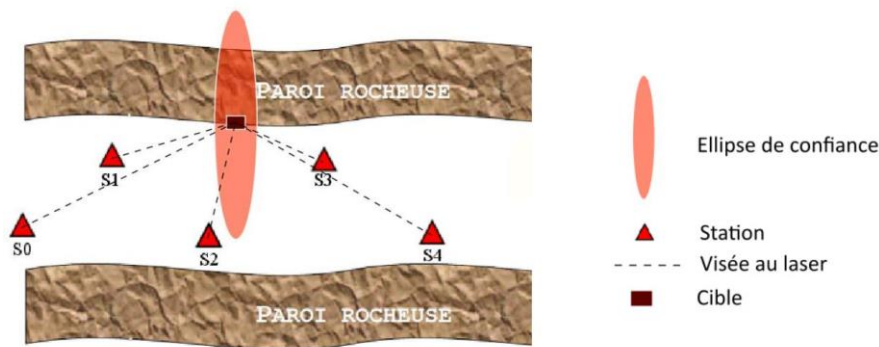


Figure 6: Orientation moyenne des ellipses - Source : C. Coddet

Précision sur l'azimut et le pendage des plans de fracture

L'erreur sur l'orientation du modèle peut être calculé en prenant l'écart maximal de 59 cm qui est sur un point à 200 m de la station de départ, ce qui correspond à un écart angulaire de $0,17^\circ$. Celui-ci est pratiquement négligeable par rapport à l'écart-type estimé sur la mesure initiale avec une boussole qui est de $2,5^\circ$. Cette valeur répond donc à la demande initiale de 3° maximum.

Précision sur l'espacement des plans de fracture

En trois dimensions, l'imprécision sur le point à 200 m du premier est d'environ 72 cm, soit 0,36 % de la distance en relatif. L'espacement entre les plans de fracturation étant de 80 cm environ, l'imprécision relative sera de 3 mm. La demande initiale étant que cette imprécision soit de 2 cm maximum, elle est respectée.

4.3 Conclusion

Une pré-analyse de la méthode choisie pour l'étude semble valider ce choix. Les quatre demandes initiales aux niveaux des matériels et des précisions sont respectées. Cependant, cette simulation n'est opérée que sur les mesures de géoréférencement relatif du modèle. La méthodologie d'acquisition des images ainsi que les méthodes de traitement et d'analyse vont dégrader ces premiers résultats sur les précisions des azimuts et espacements qui seront mesurés sur le modèle 3D final.

5. Étude d'un cas réel et validation de la méthode

Le protocole d'acquisition ayant été pré-validé, il a été utilisé sur le site argentin, un canyon de 300 m de long. Lors de la mission de 4 jours, 3 584 photos ont été prises et le géoréférencement a été réalisé avec des bandes composées de 6 cibles au lieu de 4 pour assurer les acquisitions, avec un écart moyen de 10 m entre ces bandes. Chaque cible a été relevée en moyenne 4 fois. Le réseau est ainsi composé de 229 cibles et 69 stations pour un total de 3 500 mesures. Les cibles ayant été enlevées par erreur avant le dernier jour de la mission, les traitements sont effectués en 2 phases (jours 1, 2 et 3 puis jour 4) puis les nuages

géoréférencés assemblés ensuite. Les traitements ont été effectués avec les logiciels CoMeT pour le géoréférencement et Photoscan (MetaShape) pour la photogrammétrie.

5.1 Traitement des données acquises

Pour le géoréférencement, la première étape est de rentrer les 3 500 données mesurées dans le logiciel. Ensuite, la méthodologie est la même que celle utilisée pour la pré-analyse. Seule une dizaine d'erreurs de retranscription a été corrigée et 11 mesures supprimées (fautes non corrigées).

Les résultats confirment ceux de la pré-analyse (tableau 3).

		Précision (à 1 sigma : 68 %) sur les coordonnées 3D (en m)	Intervalle de confiance 1D (Alti)	Ellipses de confiance 2D sur les coordonnées	
			Précision (à 2 sigmas : 96 %) sur la coordonnée Alti (en m)	Précision (à 2 sigmas : 96%) sur le demi grand axe (en m)	Précision (à 2 sigmas : 96%) sur le demi petit axe (en m)
Mission Argentine : partie 1, 2 et 3	Moyenne	0,185	0,031	0,447	0,071
	Médiane	0,197	0,032	0,473	0,070
	Maximum	0,317	0,056	0,762	0,203
Mission Argentine : partie 4	Moyenne	0,106	0,021	0,257	0,020
	Médiane	0,101	0,022	0,248	0,020
	Maximum	0,197	0,033	0,484	0,043

Tableau 3: Estimateurs de qualité sur les résultats de la mission en Argentine

Précision sur l'azimut et le pendage des plans de fracture

Le cas le plus défavorable est pour un écart de 48,4 cm à 80 m, soit une erreur sur l'orientation de 0,35°. Cela reste faible par rapport à l'écart-type estimé sur la mesure initiale avec une boussole (2,5°) et répond à la demande initiale de 3° maximum.

Précision sur l'espacement des plans de fracture

En trois dimensions, l'imprécision maximale est d'environ 50 cm pour 80 m, soit 0,63 % de la distance en relatif. Pour les plans de fracturation distants de 80cm environ, cela revient à une imprécision relative de 5 mm pour 2 cm maximum demandés.

Les coordonnées des cibles maintenant connues, elles sont intégrées dans le traitement photogramétrique ce qui permet d'obtenir un nuage de points géoréférencé avec a priori une précision peu dégradée par rapport à celle issue des mesures de géoréférencement. Sans

détailler complètement le traitement photogrammétrique avec Photoscan, il suit les étapes d'alignement des photos, de marquage fin des cibles et du calcul du nuage de points dense. Seul l'alignement d'une dizaine de photos a échoué ce qui valide notre schéma d'acquisition (images nettes, avec un recouvrement suffisant et une redondance d'observation suffisante). À l'issue du traitement, les précisions obtenues sur les cibles sont de 3,57 cm sur les parties 1, 2 et 3 du site. Le nuage de points dense a été calculé avec un paramètre de qualité "moyenne" (théoriquement 1 point tous les 16 pixels) et un paramètre de filtrage "agressif". Au final, nous obtenons un nuage de plus de 180 millions de points après environ 20 jours de calcul, sans inclure le temps de pointé précis des cibles sur chaque photo. Cette étape, longue et fastidieuse, n'est cependant pas nécessaire si les cibles sont bien reconnues par le logiciel. Ce sera le cas si les cibles apparaissent nettes et bien contrastées sur les photographies.

5.2 Analyse structurale

Cette analyse correspond à la détermination des valeurs de pendages et d'orientations des plans de fracture puis à la modélisation de l'extension de ces plans. Le processus comporte deux étapes ; l'estimation des paramètres des plans de fracture à partir des nuages de points puis la détermination des valeurs de pendage et d'orientation à partir de ces plans de fracturation. Les outils "qFacets" [Dewez et al, 2016], "Compute normals" et "RANSAC" (RANdom SAMple Consensus) du logiciel CloudCompare ont été utilisés et comparés pour cette analyse structurale.

L'outil qFacets (figure 7) permet de fusionner des polygones ayant des orientations similaires. Deux algorithmes proposés (Kd-tree et Fast Marching) ont été testés pour des résultats très similaires.

L'outil Compute normals permet de calculer la normale de chaque point du plan de fracturation puis de faire la moyenne de ces normales. Il est donc beaucoup plus contraignant car le plan de fracturation doit avoir été bien déterminé puis isolé du nuage de points global.

L'outil RANSAC permet d'estimer et extraire des modèles mathématiques (des plans pour cette études) dans un nuage de points.

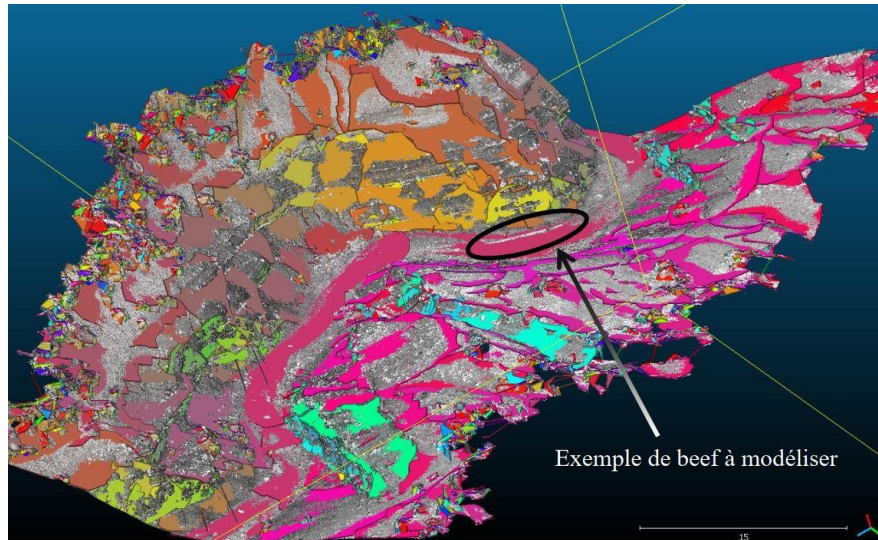


Figure 7: Résultats du traitement global avec l'outil qFacets sur CloudCompare

Ces 3 outils nécessitent d'isoler le plan de fracture étudié avant le traitement pour diminuer le temps de traitement et faciliter l'analyse postérieure. Ainsi, l'analyse a été effectuée sur un plan de fracture bien identifié et isolé dans le nuage de points global. Les directions des normales au plan issues des 3 outils testés sont en coordonnées XYZ dans le système WGS84. Une phase de traitement supplémentaire est donc nécessaire pour obtenir les azimuts et pendages.

Les résultats sont cohérents avec les outils qFacets et RANSAC à $0,2^\circ$ près pour l'orientation et $0,1^\circ$ près pour le pendage (figure 8). Par contre, l'outil Compute normals fournissant des résultats trop éloignés des précédents ($2,4^\circ$ pour l'orientation et $0,8^\circ$ pour le pendage), ceux-ci n'ont pas été conservés pour la suite de l'étude. L'outil RANSAC permettant de définir la géométrie d'un plan éditable (contrairement à qFacets), il est finalement choisi pour définir les plans de fracture puis leur extension. L'outil qFacets sert de contrôle pour la détermination des normales.

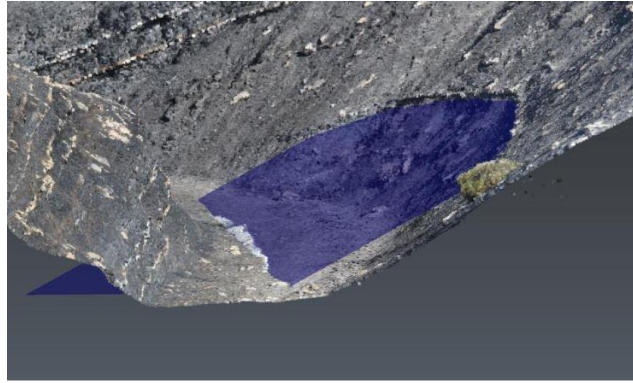


Figure 8: Modélisation de l'extension d'un plan de fracture (RANSAC)

Les étapes de traitement pour l'analyse structurale sont ainsi les suivantes :

- découpage du nuage de points pour isoler le plan de fracture ;
- détermination du plan de fracture (RANSAC) ;
- édition de la géométrie de ce plan pour modéliser son extension (RANSAC) ;
- contrôle des valeurs de la normale (qFacets) ;
- calcul des valeurs d'azimut et de pendage des plans de fracture (programme Python).

Les résultats issus des traitements précédents sur 6 plans de fracture sont comparés avec ceux issus de mesures sur le terrain avec les outils habituels des géologues : une boussole et un clinomètre. Les écarts maximums sont de $2,3^\circ$ sur les mesures d'azimut et $1,6^\circ$ sur les mesures de pendage ce qui est cohérent avec la demande initiale de 3° maximum.

6. Conclusion

Nous avons proposé une chaîne d'acquisitions et de traitements (photogrammétrie et géoréférencement) est l'avons donc validée sur un site argentin relativement contraint (accès et géométrie du canyon). Elle l'a aussi été sur le site français mais celui-ci était de dimensions réduites et d'accès très aisé donc moins significatif.

Des contraintes perdurent sur le terrain en particulier sur la mise en place et la gestion des cibles sur des parois verticales. Il apparaît parfois difficile de positionner ces cibles à plusieurs mètres de haut : la surabondance de cibles peut pallier ce problème en réduisant leur nombre et en en positionnant moins régulièrement en hauteur. Le rapport entre la hauteur des parois et la largeur du canyon est aussi contraignant quand il est important : le manque de recul entraîne des visées tangentes sur les cibles ce qui est à éviter au maximum. Si cela n'est pas possible, la qualité des résultats est largement dégradée.

Des améliorations sont envisageables sur le matériel avec par exemple l'enregistrement des données pour éviter les erreurs de transcription ainsi que l'utilisation d'un récepteur GNSS permettant des positionnements centimétriques.

L'analyse structurale à partir des données photogrammétriques géoréférencées avec la méthode mise en place (boussole, distomètre avec inclinomètre sur trépied avec rotule

graduée, récepteur GNSS de randonnée) nécessite toujours de mesurer des azimuts et pendages de plans de fracture avec une boussole et un clinomètre sur le terrain pour avoir des valeurs de référence. De plus, une analyse de la géologie du site sur le terrain reste indispensable, certaines fractures étant difficilement identifiables sur un nuage de points.

7. Remerciements

Nous remercions chaleureusement les membres des laboratoires de Planétologie et Géodynamique du Mans (LPG) et de Géomatique et Foncier (GeF) qui ont permis de faire progresser et aboutir ce projet. En particulier, Stéphane Durand, concepteur et développeur du logiciel CoMeT, a su faire évoluer celui-ci pour répondre à nos besoins spécifiques. De même, Éric Labergerie et Jérôme Verdun ont su être présents pour aider à la résolution de problématiques liées respectivement à la photogrammétrie et aux méthodes de traitements pour le géoréférencement.

RÉFÉRENCES

[Arles et al., 2011] ARLES A. BUSDRAGHI F. GUYOT J. HECKES J., La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière : premiers essais, rapport, 2011, 25 p.

[Bakkouch L., 2013] BAKKOUCH L., Etude des processus d'acquisition et de traitement de données acquises par aéronef léger pour les travaux d'inspection de la SNCF, mémoire d'ingénieur de l'ESGT au Mans, 2013, 93 p.

[Barbier et al., 2016] BARBIER Q. GUYOTON F. ROCHE F. VIGNON V., Études géostructurales de parois rocheuses par photogrammétrie et lasergrammétrie, Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'ingénieur à Nancy, 2016, 8 p.

[Dewez et al., 2016] T.J.B DEWEZ D. GIRARDEAU-MONTAUT C. ALLANIC J ROHMER, Facets : A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds, congrès, Internatinal Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, 2016, p.799-804.

Durand Stéphane, CoMeT : Compensation de Mesures Topographiques, Logiciel déposé auprès de l'Agence de Protection des Programmes en novembre 2017, IDDN.FR.001.490017.000.R.P.2017.000.31235.

[Egels et Al., 2016] EGELS Y. LAROZE E., La topo au disto, bon marché, tient dans la poche, revue XYZ, 2016, n°149, p.49-52.

[Ployon et Al., 2011] PLOYON E. JAILLET S. BARGE O., Acquisition et traitements de nuages de points 3D, par des techniques légères et à faible coûts, pour

l'élaboration de MNT à haute résolution. Images et modèles 3D en milieux naturels, Collection EDYTEM n 12, 2011, p.155-168.

[Rose H., 2012] ROSE H., Processus de création de nuages de points par corrélation d'images, revue XYZ, 2012, n°131, p.19-23.

[Trochon M., 2012] TROCHON M., Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d'images pour l'étude des ouvrages rocheux, mémoire d'ingénieur de l'INSA de Strasbourg, spécialité Topographie, 2012, 82 p.

[Zanella et al., 2014] ZANELLA A. COBBOLD P.R. VESLUD C., Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock, revue Marine and Petroleum Geology, 2014, n°55, p.262-274.

CONTACTS

M. Ghyslain Ferré
École Supérieure des Géomètres et Topographe, Conservatoire National des Arts et Métiers
Laboratoire Géomatique et Foncier
1 boulevard Pythagore
72000 Le Mans
FRANCE
Tel. +33 (0)2 43 43 31 42
Email: ghyslain.ferre@lecnam.net
Web site: <http://www.esgt.cnam.fr/>