

UTILISATION COMBINÉE DE LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE ET DE LA LASERGRAMMETRIE DANS LA SURVEILLANCE D'OUVRAGES EN TERRE

Société d'accueil : *Hélios*
PFE présenté par : *Ingrid Peel*
Directeur (directrice) du PFE : *Mme Corinne Michel*
Correcteurs : *Mr Pierre Grussenmeyer, Mme Tania Landes*



Introduction

La société Hélios a mis au point une technique d'inspection des grandes structures de génie civil basée à la fois sur l'utilisation d'un drone équipé d'un appareil photo et sur le développement d'un logiciel de détection automatique des désordres (fractures, dièdres...) : le logiciel Mosaïque.

Ce mode de représentation photographique présente néanmoins une lacune majeure: il ne permet pas la visualisation en 3D de l'objet d'étude, complément d'information pourtant opportun lors d'une campagne d'évaluation d'aléas liés aux éboulements rocheux.

A cet égard, une technologie en expansion : la lasergrammétrie, génère des modèles 3D. La société TPLM-3D dispose des outils et compétences propres à ce domaine. En outre un logiciel de photogrammétrie développé en interne permet de traiter les photographies prises par le reflex numérique dont le drone est équipé.

En associant les potentiels d'un levé scanner et d'une campagne de prises de vues aériennes réalisée au moyen d'un drone, nous visons à acquérir une compétence nouvelle: être en mesure de créer le photomodèle de tout ouvrage en terre, photomodèle sur lequel figurent les polyèdres découpés par les intersections des directions structurales avec le massif. Le géomécenicien, à qui ce produit est destiné, disposera dès lors de toutes les informations nécessaires à la mise en sécurité d'un site rocheux.

1. Etat de l'art

La singularité des ouvrages en terre par rapport aux ouvrages dits « classiques » de Génie Civil se caractérise par divers facteurs : la quasi-absence de repères, la difficulté d'accès, le relief accidenté...

Trois variantes d'opération de surveillance dominent à l'heure actuelle:

La première a pour maître mot : « observation ». Des éboulements ayant affecté un site donné pendant une période bien définie sont déduites des fréquences d'éboulements par siècle, en fonction du volume de roche impliqué.

L'observation est certes primordiale mais, pour assurer une base fiable aux travaux consécutifs des géologues, une étude cartésienne des risques s'avère nécessaire.

La seconde repose en l'occurrence sur des mesures d'ondes. Leurs propriétés permettent d'obtenir des informations sur le milieu:

- les ondes électromagnétiques présentent une résolution élevée pour des profondeurs faibles
- une augmentation du temps de parcours des ondes sismiques trahit la présence d'une fracture

Reste que ce type de mesure présente trois inconvénients majeurs :

- les fractures ne doivent être ni trop profondes ni trop irrégulières
- la réalisation des profils peut être rendue difficile par la présence d'une végétation boisée
- l'intervention d'une équipe rompue au travail sur corde est souvent indispensable

Citons enfin les travaux réalisés sous convention entre les sociétés TPLM-3D et Gipea (entreprise spécialisée dans les domaines de l'environnement et de l'aménagement du territoire). La première assure une série de traitements aboutissant à la modélisation 3D d'entités rocheuses, la

seconde la restitution manuelle des photographies aériennes ou terrestres de l'objet, l'analyse structurale du massif et la génération de fichiers au format VRML.

Les améliorations que nous comptons apporter à ce dispositif sont une accessibilité à tous les ouvrages, la facilité de mise œuvre du dispositif 'Drone', ainsi que la flexibilité inhérente à un calcul de triangulation par faisceaux.

2. Etapes préliminaires aux traitements informatiques

2.1 Situation de l'ouvrage étudié

La complexité de la falaise de Cize Bolozon (01) en fait un objet d'étude adéquat. S'étirant sur 120 mètres de long et 30 m de haut, le long d'une voie SNCF en réfection, elle présente un éventail représentatif des difficultés que nous pourrions rencontrer lors de l'analyse de tout ouvrage en terre : zones en limite de rupture, végétation rase, filets de protection, distance de recul faible...

2.2 Levés

Matériel topographique: un tachéomètre TCR1105, un scanner HDS3000

Matériel photographique:

		Levé terrestre	Levé aérien
Appareil		EOS 20D	D200
Focale (mm)		20	35
Recouvrement (%)			
	Longitudinal	60	72
	Latéral	10	Entre 0 et 10%
Conditions de prises de vues		*	Proches du cas normal

* : Les photographies de l'intégralité de la falaise ont été prises suivant deux bandes horizontales. Les conditions de prises de vues de la bande inférieure sont proches du cas normal, alors que la saisie de la partie supérieure de la falaise a nécessité l'inclinaison de l'axe de prise de vue.

L'ensemble des opérations suivantes repose sur les données brutes acquises sur le terrain.

3. Modélisation 3D et calcul du projet photogrammétrique terrestre, projet source d'informations essentielle du projet aérien

3.1 Modélisation 3D

Elle résulte de deux traitements successifs :

Le nettoyage du nuage de points, dont l'objet est l'élimination des éléments parasites de l'ouvrage en terre (végétation rase et autres tirants d'ancrage).

Le maillage 3D en deux étapes, généré à partir du nuage de points net.

L'altération, voire la perte d'informations sont les risques majeurs encourus au cours des opérations susmentionnées: des trous factices risquent de se créer. Il est parfois préférable de laisser des traces de végétation.

3.2 Compensation par les observations intermédiaires du bloc de photographies terrestres

Nous détaillerons au §4 le principe des moindres carrés servant de base à tout calcul de ce type. Précisons pour l'heure qu'il requiert l'introduction de points de calage bien répartis, la connaissance des valeurs approchées des inconnues de la compensation, ainsi qu'un ensemble d'observations:

- les points de calage: les points de contrôle matérialisés par les cibles utilisées pour géoréférencer le nuage de points ne suffisent pas face au nombre d'inconnues à calculer. Pour pallier à ce manque, des points de calage supplémentaires déterminés sur le nuage de points sont utilisés de façon temporaire (pointés à ± 4 cm près, ils n'offrent pas la précision requise pour des points de calage). Ils nous permettent en fait de lancer un premier calcul de compensation visant à affiner les valeurs approchées des inconnues.

Dans un second temps les points temporaires sont retirés du fichier de points de calage et calculés en tant que points nouveaux : visibles sur deux clichés ou plus, ils apportent un minimum de 4 observations pour uniquement 3 inconnues supplémentaires.

- **Les inconnues :** nous ajoutons au calcul des six paramètres d'orientation externe de chaque photographie i (X_{0i} , Y_{0i} , Z_{0i} , ω_{0i} , φ_{0i} , κ_{0i}) et des trois coordonnées-objet de chaque point de jonction j (X_j , Y_j , Z_j) la détermination de cinq paramètres additionnels relatifs à l'orientation interne (f , x_0 , y_0 , A_1 , A_2 , où les A_k représentent les distorsions de l'objectif) Le but est de corriger les erreurs systématiques.
- **Les observations,** à savoir les coordonnées-image des points de jonction et des points de calage : chaque point visible sur l clichés permet d'écrire $2 * l$ équations d'observation.

Afin de faciliter la prochaine restitution des photographies aériennes, nous fixons la redondance à 60. Les inconnues sont déterminées avec une erreur moyenne quadratique de l'ordre du centimètre.

4. Adaptation de la triangulation par faisceaux aux aléas de l'acquisition photographique d'un ouvrage en terre réalisée au moyen d'un drone

Les étapes préalables au lancement de ce calcul nécessitent la manipulation simultanée du projet photogrammétrique terrestre validé et des clichés aériens bruts.

4.1 Contraintes inhérentes au projet

La précision escomptée sur la détermination des coordonnées des points nouveaux dans un cas 'idéal' en terme de nombre et de répartition de points de calage est de 3 mm suivant les axes parallèles au plan focal, de 6 mm perpendiculairement à celui-ci. Reste que, dans notre cas, deux problèmes majeurs sont à appréhender : les points de calage sont peu nombreux et mal répartis, et la trajectographie du drone est inconnue.

4.2 Détermination des valeurs approchées des inconnues

- *les coordonnées des centres de prises de vues :* nous repérons les zones homologues sur les clichés aériens et terrestres. Puis nous choisissons un point calculé dans le projet terrestre et situé dans le proche périmètre du centre de la photographie aérienne correspondante. Nous affectons ses coordonnées aux coordonnées approchées recherchées.
- *les paramètres de rotation de l'orientation externe :* nous insérons une des photographies aériennes dans le projet terrestre puis lançons un calcul de compensation. La restitution de ces modèles fournit les valeurs des angles de rotation du cliché aérien. Ces dernières sont alors affectées à l'ensemble des photographies aériennes.
- *les coordonnées-objet des points de jonction :* le logiciel sélectionne l'intersection des rayons la plus favorable et calcule les coordonnées-objet à partir de ces 4 observations.
- *les paramètres d'orientation interne :* les renseignements nécessaires se trouvent dans la documentation de l'appareil photographique utilisé

4.3 Détermination des points de calage

3 points de calage par photographie, bien répartis et visibles sur un minimum de deux clichés, sont nécessaires. Un chemin détourné consiste à créer ces mêmes points dans le projet terrestre, à calculer leurs coordonnées par un calcul en bloc, et enfin à les utiliser comme points de calage dans le projet aérien.

4.4 Application du principe de moindres carrés

La règle de base de la triangulation par faisceaux consiste à assurer une redondance $r = n - q$ maximale (n est le nombre d'observations, q le nombre d'inconnues), pour contrôler les observations et accroître la précision. Le problème de compensation généré par cette redondance est résolu en posant une condition: maximiser la densité de probabilité de voir les erreurs des différentes observations d'une même quantité se produire simultanément dans une série de mesures.

Le calcul se déroule en trois étapes: l'expression des observations en fonction des inconnues, puis la linéarisation de ces équations d'erreurs primitives, enfin l'application du principe des moindres carrés aux équations d'erreurs transformées obtenues.

La taille de la matrice des équations normales dépend du nombre d'inconnues, alors que l'annulation de ses coefficients est fonction de la répartition des observations.

L'analyse de l'inverse de cette matrice nous permet d'une part de justifier le nombre et la répartition des points nécessaires au calcul, d'autre part de calculer les emq des inconnues.

Les coordonnées-image des points de jonction calculés par le logiciel Mosaïque insérées dans les fichiers en-tête sont complétées par celles de points nouveaux visibles sur au moins trois clichés, jusqu'à atteindre un total de 8 points de jonction par photographie.

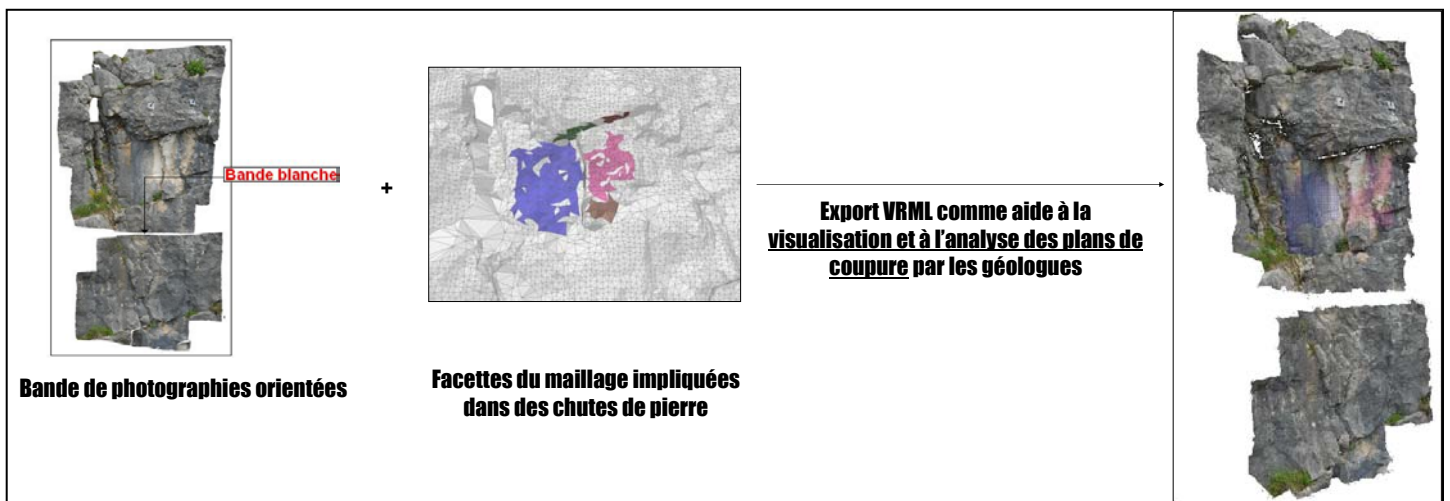
4.5 Outil de contrôle des résultats: le levé au tachéomètre

Nous comparons les coordonnées de points nouveaux obtenues à l'issue d'une triangulation par faisceaux à celles issues d'un levé géodésique classique.

Les écarts suivant les axes parallèles au plan focal sont inférieurs au centimètre. Ils sont plus élevés suivant l'axe perpendiculaire à ce plan: de l'ordre de 10cm.

5. Export VRML

C'est un outil convivial de visualisation des plans de coupure de l'objet étudié destiné aux géologues:



Conclusion

Ce projet a mis en lumière le potentiel de la technologie 'Drone' pour l'auscultation d'ouvrages en terre: l'accessibilité à tous les ouvrages, la facilité de mise en œuvre, la performance et la flexibilité de la triangulation par faisceaux pour la restitution des clichés en sont autant de points forts. Toutefois, l'application du principe des moindres carrés implique la connaissance de valeurs approchées des inconnues, valeurs approchées qui ne peuvent être déterminées que par le biais d'un projet photogrammétrique terrestre validé.

La méthode élaborée au cours de ce Projet de Fin d'Etudes gagnerait d'une part en simplicité si le photogramètre disposait de la trajectographie du drone, d'autre part en précision si le logiciel de photogrammétrie lui permettait d'appliquer des poids aux observations.

Il appartient également aux géologues d'orienter les axes de recherches des topographes, puisque la génération du photomodèle de toute entité rocheuse n'est pas une fin en soi, mais une base fiable au travail consécutif des professionnels de l'aménagement du territoire.