

Auscultation sans réflecteur

■ Vincent BARRAS – Bertrand CANNELLE – Guillaume CHAPOTTE

De nos jours, la surveillance d'ouvrage par tachéométrie nécessite, dans la plupart des cas, la pose de nombreux équipements, cibles, prismes ou autres repères. Est-il possible de s'affranchir de cette matérialisation qui peut être coûteuse, difficile et longue à mettre en place ?

Dans le but d'obtenir des réponses à cette question, des tests ont été réalisés sur plusieurs ouvrages tels que le

Pont sur l'Eau Noire (Valais), l'Abbatiale de Payerne (Vaud) et la falaise d'Hauterive (Fribourg). Sur le premier ouvrage, des mesures tachéométriques ponctuelles et directes sont réalisées tandis que pour les deux autres sites, les déplacements sont détectés suite à des numérisations 3D via scanners laser.

Les précisions obtenues varient principalement en fonction du mode opératoire utilisé et de l'état de la surface. Sur des ouvrages réguliers en béton, des variations de quelques millimètres sont détectables. Par contre sur une surface naturelle comme une falaise, une finesse de 1 à 2 centimètres au maximum est atteignable en raison de la végétation et de la structure de la roche. Pour fiabiliser les mouvements soupçonnés sur des secteurs encombrés par la végétation, la photographie est un appui important et une aide à la décision très intéressante.

Introduction

Actuellement, la majorité des stations totales arrivant sur le marché sont dotées de la technique de mesure de distance sans réflecteur. Pour une surface unie de réflectance moyenne, la précision de la détermination de cette longueur se rapproche de celle de la mesure sur prisme, soit proche de ± 1 [mm] pour des portées allant souvent bien au-delà de 500[m].

Aujourd'hui entrés dans la palette de la géomatique, les scanners lasers terrestres sont de plus en plus utilisés pour les relevés et les modélisations 3D. La précision de ces 2 types d'appareils permet de compléter les moyens disponibles pour la surveillance de structures ou d'éléments naturels en mouvement. Avec ces lasers scanners, les informations fournies ne sont plus ponctuelles, mais surfaciques.

Sur tout type d'ouvrage, la pose de matérialisation permet aisément une détection de mouvement inférieure ou égal au millimètre. Est-il possible d'atteindre une telle précision, ou de s'en approcher sans la pose de repères ?

Pour évaluer ces techniques de détection de mouvements potentiels, le labora-

toire de topométrie de l'institut **insit**¹ de la HEIG-VD², s'est basé sur plusieurs mandats réalisés avec des partenaires. Cet article propose quelques approches des concepts mis en place en détaillant plus particulièrement les projets réalisés.

Surveillance par semis de points

Dans l'objectif de s'affranchir d'une matérialisation sur la structure et d'utiliser une station totale courante, la surveillance d'ouvrage par semis de points lasers vise principalement à déterminer la modification globale de la forme de l'objet inspecté.

■ Processus

Cette méthode de détection s'appuie sur le fait de mesurer à chaque état un même groupe de points lasers sur l'ouvrage. Au traitement, des modèles numériques sont créés par triangulation. L'identification d'éventuelles transformations générales se réalise par comparaison tridimensionnelle.

1. **insit** : Institut de l'ingénierie du territoire de la Heig-vd : <http://insit.heig-vd.ch>
2. **HEIG-VD** : Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud : <http://www.heig-vd.ch/>

■ MOTS-CLÉS

Scanners laser terrestres, mesures ponctuelles, ouvrages d'art, falaises, maillage, inspection, état

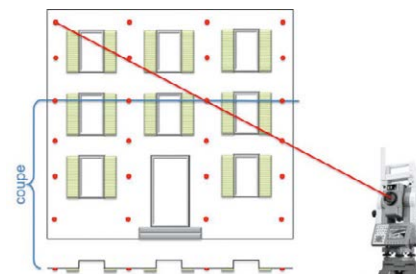


Figure 1. Étape 1 - Relevé au tachéomètre

Mesures lasers sur l'ouvrage

Lors de la campagne de référence, il est nécessaire de lever manuellement un ensemble de points sur la structure. L'important est de mesurer ces points dans des zones « propres » : sur des surfaces régulières en évitant les joints, les arêtes, les fers à béton... La densité de points est à adapter en fonction de l'ouvrage et de la finesse des mouvements recherchés.

Lors des états futurs, une fois la mise en station terminée, l'instrument est orienté via les valeurs polaires, en direction du relevé d'origine. Dans ce cas de figure, seule la distance est susceptible de modifications. Pour automatiser l'opération, les points de référence seront directement intégrés dans un tour d'horizon avec un levé automatique.

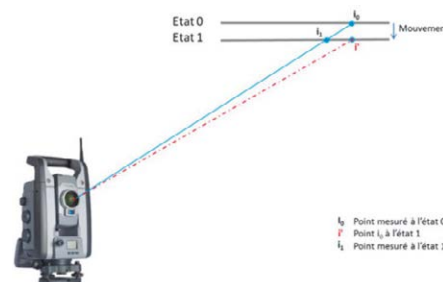


Figure 2. Mouvement et différence de pointé

S'il y a mouvement de l'ouvrage entre deux états, la mesure d'un point ne sera plus réalisée exactement au même endroit.

Pour chaque état, le même nombre de points doit être mesuré.

Création de modèles numériques

Avant de réaliser une comparaison tridimensionnelle surfacique, il est nécessaire de créer un modèle numé-

► rique de chaque état en veillant à plusieurs critères :

- Avoir le même nombre de points dans chaque état
- Avoir la même orientation des triangles

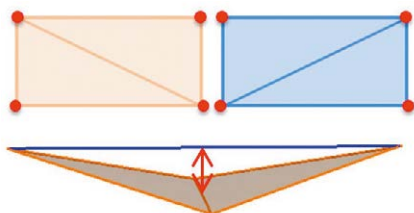


Figure 3. Orientation des triangles et différence

En effet si le nombre de points est différent, la structure, la triangulation du modèle numérique sera différente, et des effets parasites pourront apparaître (Figure 3).

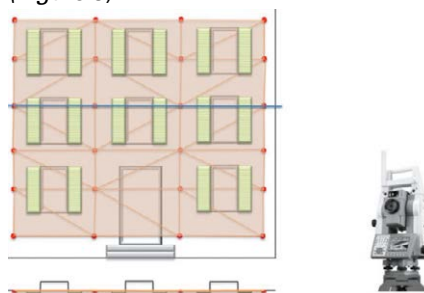


Figure 4. Création du modèle numérique

Inspection / Comparaison

Dans le cadre d'une inspection ponctuelle sur des éléments identifiables (cibles, prismes...) le mouvement recherché, sur la Figure 2, serait entre le point i_0 et i' . Si on analyse uniquement la modification de distance entre les 2 relevés, nous avons le mouvement entre i_0 et i_1 , très dépendant de la position de la station de mesure.

Il est préférable de modéliser, par 2 triangulations schématiques identiques, la structure à surveiller et de les comparer pour obtenir un mouvement continu normal à la surface d'origine. Cette méthode permet de mettre en évidence principalement des modifications perpendiculaires aux facettes de l'ouvrage. Elle n'est pas adaptée pour détecter des glissements tangentiels. Comme le montre la Figure 5 il sera difficile, voire impossible de mettre en évidence un mouvement lors d'une rotation selon un axe perpendiculaire à l'objet ou des translations dans son plan.

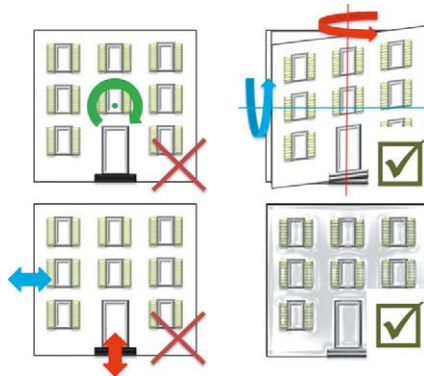


Figure 5. Mouvements identifiables ou non (cas d'une façade)

Cependant il sera tout à fait possible d'observer des rotations horizontales et verticales ou des déformations générales de la surface.

Le gros intérêt de cette méthodologie est de s'appuyer sur une instrumentation (station totale) et un logiciel (pour le calcul de MNT) courants et très répandus dans le monde de la géomatique. Cette technique via mesures ponctuelles est plus précise qu'une acquisition via scanner laser, mais nécessite de connaître la position et l'orientation du tachéomètre.

■ Application du Processus – Pont sur l'Eau Noire (Valais)

En collaboration avec le canton du Valais, le projet décrit la recherche de la mise en évidence des déformations des dalles inférieures du Pont sur l'Eau Noire (en rouge dans la Figure 6). Comme présenté dans le processus, un relevé de points sur l'ensemble des dalles est réalisé depuis une station située au-dessous du pont. Ce relevé permettra par la suite de créer des modèles numériques pour chaque dalle et chaque état.

Pour valider le processus, deux états indépendants de mesures sont réalisés



Figure 6. Pont sur l'Eau Noire (Valais)



Figure 7. Relevé de points et modèle numérique

dans un laps de temps très proche (État 0 = 23.07.2014 et 0bis = 25.07.2014, dans le cadre du travail de diplôme : "Pont sur l'eau noire, mise en place d'un suivi topométrique de l'ouvrage" (Willen, 2014)). Comme validation du processus de traitement, le mouvement des dalles détecté doit être quasi nul.

Toutes les dalles sont comparées entre l'état 0 et 0bis. La Figure 8 ci-dessous montre le résultat pour la dalle n°3. L'inspection montre que la différence entre les modèles numériques est inférieure au millimètre (100 % des écarts 3D dans la plage ± 1 [mm]). Il en est de même pour les 7 dalles du pont.

Cette double prise de mesures dans un intervalle de temps proche a permis de valider la technique. Un nouvel état de mesure a été réalisé en février 2015, par de basses températures, afin d'évaluer l'impact saisonnier sur le pont surveillé. À la différence de la comparaison entre les états 0 et 0bis, l'inspection entre la campagne de référence et l'état 1 (juillet 2014 / février 2015) laisse apparaître un

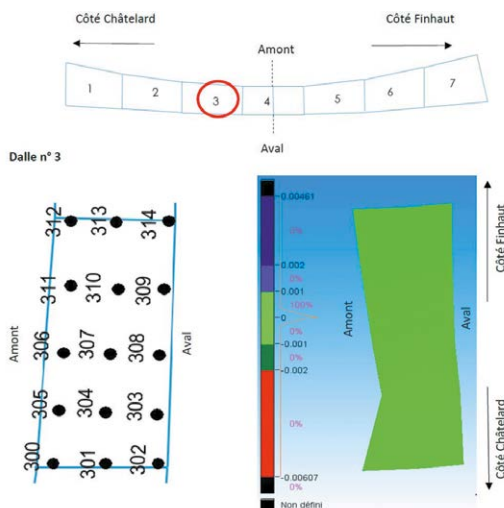


Figure 8. Inspection de la dalle n°3 [m]

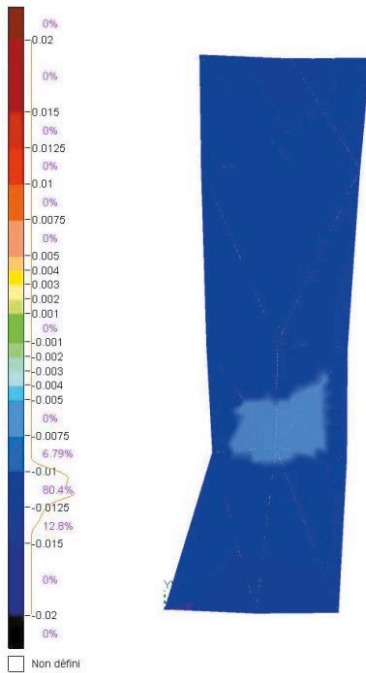


Figure 9. Inspection E0 bis - E1, Dalle n°3 [m]

affaissement de l'ordre du centimètre sur la dalle n°3 (Figure 9).

Ce phénomène d'affaissement est également visible sur d'autres portions de la voûte allant jusqu'à 1.5 cm, Figure 10.

Le mouvement des dalles concorde avec celui du tablier déterminé par nivellement géométrique. Cette modification de géométrie est à imputer au phénomène de dilatation causé par les différences de température entre juillet et février. Sur ce projet avec ce type de matériaux et la planéité des dalles, la détection de mouvements normaux peut atteindre le millimètre. Cependant, les précisions envisageables dépendent de nombreux facteurs :

- La rugosité de la surface
- La position de/des stations
- La trame des points levés.

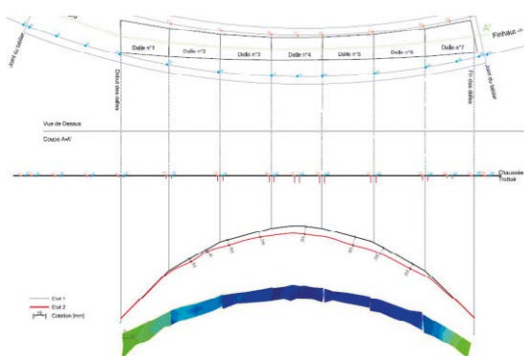


Figure 10. Inspection des 7 dalles (coloration selon la même échelle que la figure 9)

Surveillance par comparaison de nuages de points

■ Processus

Le processus de traitement s'apparente, pour quelques phases, au chapitre précédent. Seuls le mode d'acquisition via scanner laser et le nombre de points obtenus sont profondément différents. Pour cette technique basée sur la lasergrammétrie, le travail sur le terrain s'effectue grâce à des lasers scanners. Le marché propose une large gamme d'instruments, avec des spécificités et des caractéristiques techniques qui vont influencer le résultat :

- La portée.
 - La précision intrinsèque de l'instrument (spécialement les erreurs systématiques résultantes).
 - La longueur d'onde du laser utilisé.
 - Le traitement du signal avec la gestion ou non du multi-écho.
- L'instrument aura une influence directe sur la mise en œuvre et la qualité des résultats potentiels.

Mesures lasergrammétriques

Une acquisition lasergrammétrique va permettre d'acquérir beaucoup plus de détails de la façade que le levé ponctuel présenté précédemment.

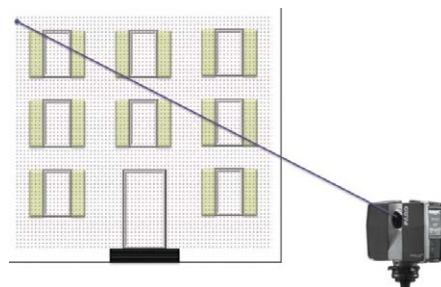


Figure 11. Acquisition lasergrammétrique

Afin de mettre le systématisme de son côté, il est conseillé, à chaque état, de répéter toutes les étapes de travail de façon quasi identique tant pour la partie acquisition que pour la partie traitement :

- Position des stations/cibles : les stations seront positionnées approximativement aux mêmes endroits pour "observer" l'ouvrage depuis les mêmes points de vue à chaque état.
- Paramètres d'acquisition : le pas de scan doit également être le même pour conserver un niveau de détail similaire.

- Paramètres du géoréférencement : le jeu des points entre les assemblages des nuages et le recalage dans le système de référence doit suivre une logique similaire.

Traitement et modélisation

- Une grande part du savoir-faire se cache dans les caractéristiques appliquées au filtrage, au nettoyage et à la modélisation. En fonction de la nature de l'ouvrage, de la présence de végétation, de la forme (régulière, concave, convexe, avec des cassures franches...) et des fonctionnalités présentes dans le logiciel utilisé, le traitement peut prendre des chemins différents. Sans une grande rigueur dans la documentation des valeurs *a priori* fournies aux outils de calculs les résultats peuvent varier notablement en fonction :
 - du découpage des zones de filtrages,
 - de la méthodologie de création des maillages
 - de la taille des mailles de la modélisation
 - des types et de l'intensité des lissages
 - ...

On choisira une taille de maille différente en fonction de l'objet à surveiller et de la surface des éléments à détecter. Plus la taille est grande, plus elle représente la moyenne d'un grand nombre d'impacts laser. Sur une surface plane, cela améliore la précision du plan, sur une surface irrégulière, comme une falaise avec de fortes cassures, cela équivaut à un lissage des aspérités.



Figure 12. Surface / maillage moyen

Dans tous les cas, les paramètres du maillage seront choisis pour créer une modélisation passant par le nuage de points. On peut comparer chaque triangle à une surface moyenne d'un groupe de points.

Lors d'une modélisation sur la base d'un nuage de points les arêtes vives théoriques ne sont pas créées parfaitement. En effet, les angles se trouvent lissés et arrondis, ainsi on observe une perte d'information dans ces secteurs.

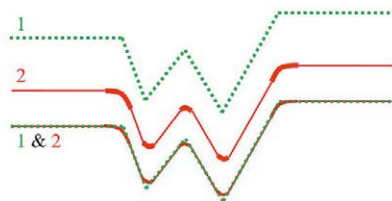


Figure 13. Création d'un maillage (2) à partir d'un nuage de points (1)

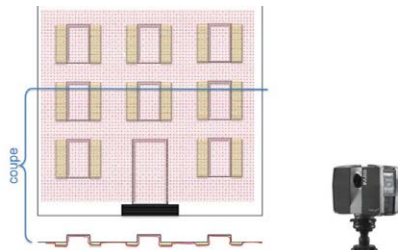


Figure 14. Modélisation de la façade

Inspections / comparaisons

Trois types de comparaisons sont possibles :

1. Maillage / Nuage de points
2. Maillage / Maillage
3. Nuage / Nuage

Dans les deux premiers cas, l'état de référence est représenté par un maillage 3D.

La 1^{re} méthode permet de comparer un nuage de points par rapport à un modèle 3D. Ce type d'inspection est particulièrement adapté dans le cas d'érosion. En effet, le fait de ne pas transformer le nuage de points en maillage évite le lissage de certaines zones. Il est donc possible d'obtenir des informations plus fines dans les creux et les bosses. Cependant cette technique conserve l'entièreté du bruit des mesures, les éventuels matelas de points, et les résidus des imprécisions du géoréférencement.

Cette comparaison maillage / nuage a déjà fait l'objet d'un précédent article "Plusieurs scanners pour surveiller une rampe" (2014). Le lecteur pourra s'y référer pour plus de précisions. Ce travail avait montré que pour une surface bétonnée, une précision de l'ordre de ± 5 mm peut être obtenue.

La 3^e solution n'a pas encore été approfondie. Elle est très dépendante des algorithmes utilisés et peut donner des résultats assez variables en fonction des pas de mesures, des modèles de calculs utilisés et des paramètres fournis.

Le 2^e point présente l'avantage d'éliminer en partie le bruit des mesures

et ainsi de proposer une modélisation moyennée, plus fine que le nuage originel. À l'opposé, comme cela a été expliqué précédemment, les creux, bosses, angles sont plus ou moins lissés, arrondis.

À la différence du processus via mesures ponctuelles, une inspection entre deux maillages permet de détecter d'éventuelles rotations tant horizontales, verticales que perpendiculaires à la façade (Figure 15). Ceci grâce à la modélisation complète de la structure de la façade telle que l'encaissement des fenêtres dans ce cas précis. Les translations sont également identifiables dans le cas d'un ouvrage présentant du relief et des formes.

Par contre, comme cela a été dit, une comparaison de deux maillages ne renseigne pas forcément sur de petites déformations (cas de l'érosion par exemple), qui ont pu être lissées par la modélisation.

Exemple d'application - Abbatiale de Payerne (Vaud)

Ce processus a été mis en application lors d'un projet lié à l'Abbatiale de Payerne, conjointement avec l'entreprise Jaquier-Pointet SA.

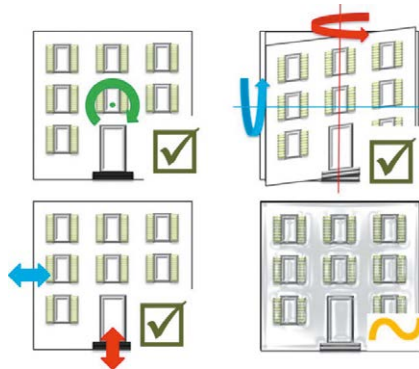


Figure 15. Mouvements identifiables ou non (cas d'une façade)

Ce projet, réalisé dans le cadre d'un chèque de la Commission fédérale Suisse pour la technologie et l'innovation CTI³, avait différents buts :

- Évaluer le potentiel de la lasergrammétrie pour détecter le déplacement de l'une ou l'autre pierre des voûtes avec une précision de ± 2 mm.
- S'affranchir d'un levé tachéométrique manuel sur près de 200 cibles

³ (Barras, Chapotte, & Pittet, Auscultation d'un monument via lasergrammétrie, 2014) - <https://www.kti.admin.ch>

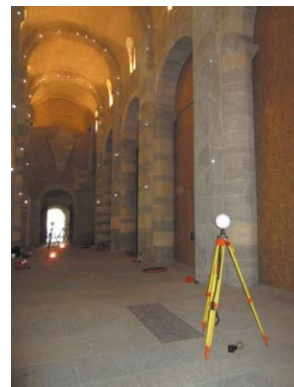


Figure 16. Cibles - Abbatiale de Payerne

Deux états de mesures (février et mai 2014) ont été réalisés avec une Multi Station MS50 de Leica Geosystems. Ces campagnes ont été menées en parallèle des mesures tachéométriques habituelles. Cet instrument a été choisi pour la qualité du géoréférencement via des mesures sur prismes.

Une fois ces positionnements finalisés pour chaque état, les traitements suivants sont appliqués :

- Découpage des nuages selon des secteurs prédéfinis.
- Nettoyage & filtrage du nuage par rapport à des paramètres affinés en fonction des lieux.
- Modélisation par secteurs successifs
- Inspection entre les 2 états.
- Interprétation des résultats.

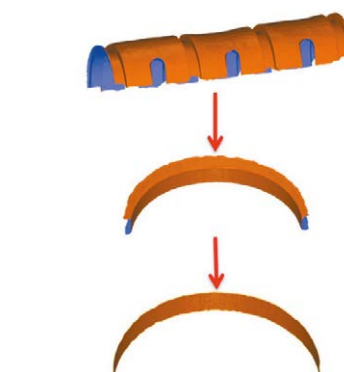


Figure 17. Vision générale vers vision locale

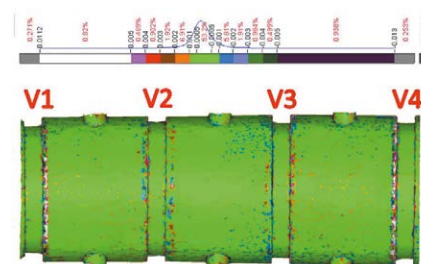


Figure 18. Plafond de l'Abbatiale, voûte 1 à 4 et échelle de couleur - Vue de dessus



Il a été décidé d'inspecter l'Abbatiale en partant d'une vision générale vers une vision locale soit de l'ensemble du plafond vers la face d'une voûte en passant par la voûte en elle-même. Pour l'analyse de l'ensemble de la partie supérieure de la nef, il est possible d'interpréter d'une part la répartition des écarts 3D avec l'allure de la courbe de Gauss et les pourcentages, soit 78.4 % dans la plage ± 1 mm (vert) dont 53.2 % dans la plage ± 0.5 mm.

D'autre part, il est possible de rechercher les zones problématiques directement sur le plafond inspecté. On ne distingue pas de mouvements majeurs sur le plafond situé entre les voûtes, si ce n'est les quelques taches éparses pouvant être assimilées à du bruit. La partie centrale de chaque voûte est également comprise dans une plage de ± 1 mm, par contre on constate des écarts au-delà du millimètre à proximité des arêtes des voûtes.

Il est donc nécessaire d'étudier, au cas par cas, "les problèmes" à proximité de ces voûtes. Trois options sont possibles :

- Maillage déformé en raison d'un nuage de points mal filtré.
- Lissage des arêtes.
- Mouvement réel.

Une fois le nuage correctement épuré le cas 1 n'entre plus en considération. En détaillant le travail pour l'une des voûtes, on constate que la majeure partie des problèmes se concentrent essentiellement sur les arêtes. La modélisation 3D et les effets des lissages des

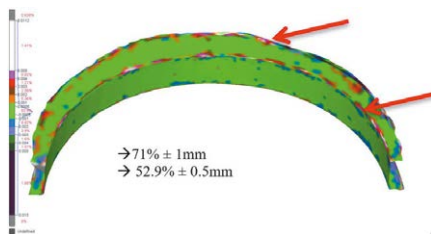


Figure 19. Voûte n°2

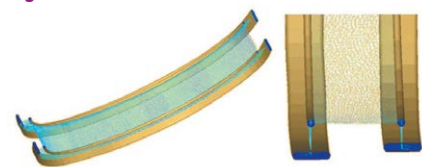


Figure 20. Filtrage des arêtes : modélisation des faces de manière indépendante

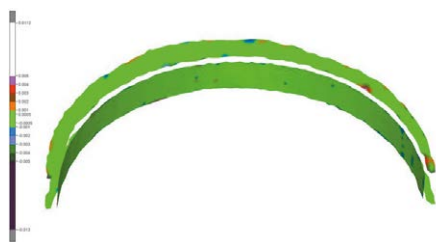


Figure 21. Inspection après suppression des arêtes

arêtes entraînent, très probablement, ces perturbations.

Pour une analyse numérique rigoureuse, il est intéressant d'éliminer les arêtes du processus. Pour rappel, l'objectif est la détection d'un descellement de l'une ou l'autre pierre des voûtes et non un suivi de l'érosion des angles.

L'inspection est donc renouvelée pour les trois faces de la voûte : environ 95 % des écarts 3D sont à présent compris entre ± 1 mm dont 74 % entre ± 0.5 mm. Le résultat de cette inspection permet d'affirmer l'absence de mouvement d'une pierre ou de l'ensemble de la voûte. Dans un environnement régulier et propre, sur des faces bien régulières et en utilisant une instrumentation qui permet un géoréférencement de haute qualité, ce projet a permis de montrer qu'il était possible de s'approcher d'une précision millimétrique pour surveiller des surfaces régulières telles que ces pierres de taille.

Cependant cette technique a montré ses limites au niveau des arêtes et des angles vifs. De plus, quelques tests avec des scanners n'ont pas permis d'être aussi fin. La qualité des géoréférencements semble être la limite principale.

Intégration de la photographie à la surveillance

L'auscultation surfacique impose de fournir une information continue sur le secteur à contrôler. Cependant, l'ensemble de la surface n'est pas toujours représentatif des mouvements recherchés. Sur notre façade prise régulièrement en exemple, les fenêtres, les volets, la porte ou l'arbre ne doivent pas venir interférer dans l'analyse de la stabilité de l'immeuble au fil du temps. Cet exemple simpliste permet d'illus-

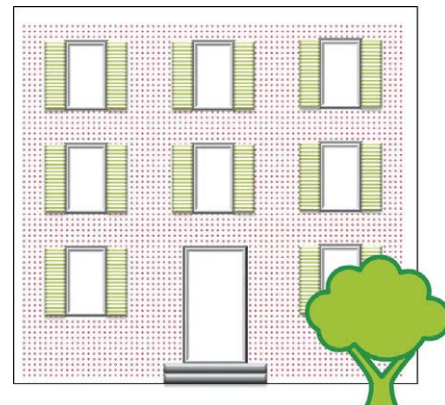


Figure 22. Nuage de points uniquement sur les zones d'intérêt

trer les étapes plus complexes que l'on retrouve tout particulièrement sur des surfaces naturelles comme des falaises ou des zones en glissements.

La possibilité de visualiser la surface avec une texture actuelle (et non sa réflectance) permet également de mieux interpréter les résultats. La photographie devient un outil d'aide à la décision pour valider ou non la présence de mouvements entre deux états de mesures.

Techniques d'acquisition et traitement

Dans le cadre de numérisation de secteur avec végétation, le résultat brut lasergrammétrique doit faire l'objet d'un traitement très fin :

- La possibilité de filtrer les multi-échos est une première phase très intéressante.
- Les algorithmes de recherche du sol doivent être adaptés à des relevés terrestres où la direction de la verticale du lieu, Z, n'est pas privilégiée. De nombreux logiciels possèdent des algorithmes permettant de réaliser cette opération de filtrage de façon plus ou moins optimale en fonction de la géométrie de l'objet observé.
- Les zones cachées lors de l'acquisition et les filtrages de végétation génèrent des interpolations lors de la création du modèle 3D. L'acceptabilité de ces zones sans information doit être évaluée afin de déterminer comment le maillage sera généré avec les "emplissage" et les "trous".

La majorité des lasers scanners du marché permettent d'acquérir, en parallèle des nuages de points, des photos sur la même zone.





Figure 23. Automatisation de la prise de photographies



L'expérience montre que dans la majorité des cas, la qualité et la résolution de ces images ne sont pas suffisantes pour interpréter finement la texture de l'ouvrage. Cela est spécialement vrai dès que l'on se trouve éloigné de la station. De plus, les contraintes photographiques (orientation par rapport au soleil, contraste...) ne sont pas toujours compatibles avec la position du laser scanner.

Le but de ces images est de fournir une vue détaillée des secteurs où la validation d'un mouvement est difficile à fiabiliser. En fonction du type et de la taille des dégradations attendues, la qualité des images sera adaptée pour obtenir une résolution suffisante, sans alourdir trop fortement la taille des fichiers.

Pour réaliser ces panoramiques, une motorisation de l'appareil photo est nécessaire (type RODEON) pour assurer un recouvrement régulier et une couverture complète du secteur.

Le référencement des images dans le même système que la lasergrammétrie est primordial pour permettre une interprétation conjointe des comparaisons lasergrammétiques avec les informations visuelles.

■ Application – Falaise de Hauterive (FR)

La falaise de Hauterive, située à l'arrière d'une centrale électrique, est parsemée de végétation, herbes, mousses, arbres... Elle est irrégulière et présente des secteurs en surplomb. Ce pan de



Figure 24. Falaise d'Hauterive

molasse a déjà subi, à quelques reprises, des décrochements importants.

Depuis l'automne 2014, le laboratoire de topométrie de **insit** teste, en parallèle d'une surveillance d'une vingtaine de cibles observées par tachéométrie, une auscultation surfacique par combinaison de lasergrammétrie et d'images.

Pour le travail lasergrammétrique, un scanner laser VZ1000 de la firme Riegler est utilisé. Sur le terrain, les 4 mêmes positions sont répétées à chaque intervention.

Un complément photogrammétrique avec motorisation (présenté à la Figure 23) est réalisé depuis deux stations. Avec un recouvrement de 15 %, des clichés sont pris avec un objectif de 100 [mm] puis 400 [mm]. Cela représente plus de 350 photos par station.

Processus de traitement

Le traitement des nuages de points se décompose en plusieurs étapes :

- Le géoréférencement.
- Le filtrage et le nettoyage des nuages.
- La modélisation.
- L'inspection et la validation des mouvements.

Hormis le géoréférencement, l'étape la plus importante dans ce flux est le filtrage de la végétation pour que celle-ci influence le moins possible la création du maillage, (Figure 25) en tenant compte des nombreux paramètres du logiciel utilisé. Les 2 campagnes de référence, réalisées sur 2 journées successives, permettent d'affiner puis valider la paramétrisation du flux de traitement.



Figure 25. Filtrage de la végétation

Pour ce projet, le résultat final des filtrages et lissages fournit un modèle avec une maille de 10 cm de côté. Pour éviter des interpolations incohérentes avec le terrain, la taille maximale des triangles est fixée à 50 cm. Au-delà, la modélisation n'est pas réalisée, car soit le secteur est invisible depuis les différents points d'observation, soit cette zone est trop recouverte de végétation. Sur ces "trous" aucune recherche de mouvements ne sera effectuée.



Figure 26. Maillage de l'état 2

L'inspection visible ci-dessous montre la comparaison entre les états E1 et E2.



Figure 27. Inspection E1 – E2 [m]

Les couleurs chaudes renseignent sur des secteurs qui sont tombés (décrochement) entre les deux états de mesures. Les couleurs froides montrent des zones en mouvement. Cette inspection permet d'affirmer que la falaise est stable avec environ 94 % des écarts 3D dans la plage du centimètre.

Cependant malgré le traitement de la végétation, il est possible que certaines zones ne soient pas parfaitement filtrées. Cela a pour conséquence de considérer un secteur en mouvement, respectivement décroché, alors qu'il s'agit d'une déformation des maillages résultant de la présence de végétation. La Figure 28 expose ce problème.

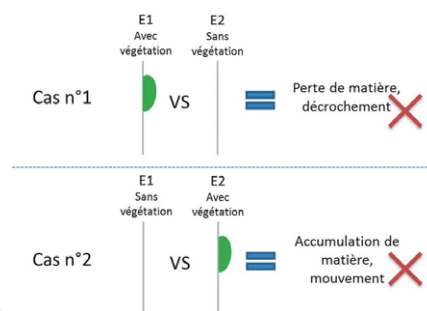


Figure 28. Problèmes résultant de la végétation



Pour contrôler le résultat proposé par cette carte d'inspection, l'apport des images est un complément intéressant. Le drapage des photos du scanner peut être réalisé de deux façons. Soit la plage sans mouvement est texturée pour laisser seulement apparaître les zones problématiques (Figure 29). Il est ainsi possible d'observer la situation de la zone déformée. Soit uniquement les zones problématiques sont texturées (Figure 30).



Figure 29. Inspection E1-E2 - Zones problématiques inspectées

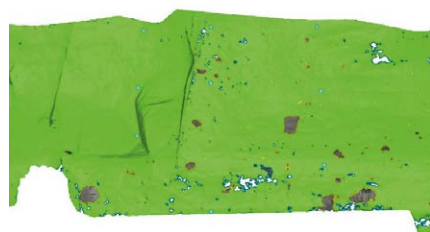


Figure 30. Inspection E1-E2 - Zones problématiques texturées

Les puissances de calcul et la fluidité des navigations limitent la qualité des images drapées sur l'ensemble du modèle. Il est important de garder à l'esprit que ces maquettes virtuelles doivent être généralement diffusées pour être analysées par plusieurs partenaires du maître de l'ouvrage. Très souvent, la résolution des images est dégradée pour garder des tailles de fichiers acceptables.

Par contre, pour valider ou non la présence de végétation, comme le montre la figure 31 ci-dessous, il est



Figure 31. Végétation ou zone en mouvement ?

préférable d'utiliser les clichés à pleine résolution.

Dans l'exemple ci-dessus, sans complément photographique de qualité, il est impossible de définir si cette détection est un mouvement réel de la falaise ou simplement de la végétation mal filtrée. Comme traitement, il s'agit, dans un 1^{er} temps, d'identifier la photographie concernée par le secteur incriminé. Ceci est possible grâce à la création automatique des faisceaux de chaque image (droite passant par le centre de l'appareil photo et le centre de l'image).

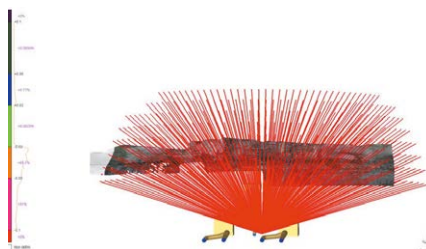


Figure 32. Faisceaux pour chaque cliché depuis une station



Figure 33. Sélection du faisceau et identification de la zone sur la photographie 400[mm]

Le faisceau le plus proche est sélectionné pour identifier la photographie correspondante et, dans le cas présent, exclure un mouvement potentiel en raison de la présence d'une branche. Ce processus ne peut, pour l'instant, pas être automatisé. Il est donc nécessaire de contrôler visuellement chaque zone. Lorsque la présence de végétation est validée, la modélisation est trouée. En effet, dans ces secteurs, il n'est



Figure 34. Inspection finale texturée E1 - E2



Figure 35. Inspection E0 - E1 (cercles jaunes = zones en mouvements)



Figure 36. Inspection E1 - E2 (cercles jaunes = décrochements)

pas possible de fournir des informations fiables. Le résultat final présente des zones sans coloration ni texture, Figure 34.

Il est intéressant de voir que la plupart des zones en mouvements (bleues) entre E0 et E1 sont tombées à l'état 2.

La méthode de surveillance surfacique présentée ci-dessus demande un regard critique des déplacements constatés. À ce jour, il n'existe pas de solutions automatiques fiables pour éliminer les aberrations résultantes de la végétation tout en détectant les mouvements. L'apport d'images à meilleure résolution permet de lever les doutes, même si le processus reste pour l'instant manuel.

Conclusions et perspectives

Au travers de ces quelques exemples pratiques qui viennent s'ajouter au concept général, il est démontré que l'auscultation surfacique d'ouvrage est aujourd'hui une réalité qui peut fournir des informations quasi continues.

La technique par semis de points offre une porte d'entrée très accessible pour réaliser une surveillance simple. Cependant, tous les partenaires doivent être sensibilisés aux limites et aux informations partielles qu'elle peut fournir en retour.





À l'opposé, la solution combinant la lasergrammétrie et l'imagerie donne des résultats complets et l'expérience montre que l'historique photographique est un complément très apprécié des décideurs. Ce processus demande une instrumentation et surtout des moyens de calculs conséquents. Le réalisateur doit toujours garder à l'esprit le flux complet de ses travaux jusqu'à la faisabilité de la diffusion des Gb de données acquises sur le terrain.

Les perspectives d'automatisation sont encore très nombreuses et les solutions qu'offrent les logiciels s'étoffent très régulièrement pour proposer des solutions toujours plus efficaces, structurer et modéliser l'environnement issu de ces rasters 3D. Dans le cadre de l'auscultation, il est primordial de comparer des modélisations basées sur des algorithmes identiques. Le peu d'informations sur les algorithmes implémentés oblige régulièrement le mandataire à retraiter d'anciens états pour assurer une continuité dans ses analyses de mouvements.

Malgré les immenses progrès, il reste encore une part non négligeable de travaux manuels, pas encore automatisés. Les mesures géodésiques apportent depuis longtemps des informations primordiales en donnant des mouvements absolus des ouvrages d'art. Les mesures GNSS apportent des déplacements globaux avec une précision de quelques millimètres, indépendamment des mouvements régionaux. Les mesures tachéométriques et de nivellement fournissent des indications ponctuelles submillimétriques par rapport aux points jugés fixes situés autour de l'objet.

Aujourd'hui, grâce à la lasergrammétrie, l'offre de solutions s'agrandit et permet de surveiller de manière surfacique, des secteurs où la modification de forme, voire l'érosion, sont les problèmes principaux. De plus, la mesure sans réflecteurs offre des solutions pour suivre des régions où la pose de repères est un problème majeur.

Par la combinaison de ces différentes techniques, le géomaticien peut répondre à une palette toujours plus large de problématiques relatives aux contrôles d'ouvrages et fournir des informations capitales pour la sécurité. ●

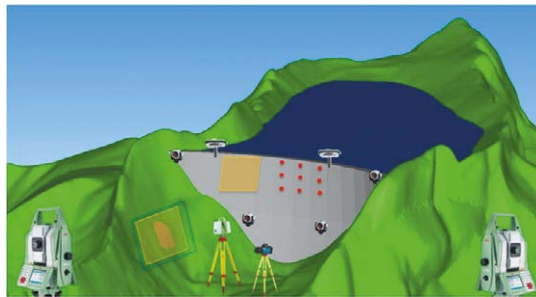


Figure 37. illustration schématique de la combinaison de quelques techniques géodésiques

Remerciements

- Canton du Valais, partenaire sur le projet du Pont sur L'Eau Noire
- Jaquier Pointet SA, partenaire sur le projet CTI Auscultation d'un monument via lasergrammétrie, AusMon 16401.1 INNO 13-16-IW
- Groupe E, partenaire sur le projet AuLI - H

Contacts

Vincent BARRAS, professeur
vincent.barras@heig-vd.ch

Bertrand CANNELLE, professeur
bertrand.cannelle@heig-vd.ch

Guillaume CHAPOTTE, Ingénieur HES en Géomatique - g.chapotte@bbhnsa.ch
HEIG-VD - insit (institut d'ingénierie du territoire)

Bibliographie

- Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M., & Valgoi, P. (2006). *Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning*. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology". Dresden.
- Barras, V., & Chapotte, G. (2015). *Auscultation sans réflecteur : diverses méthodes et techniques*. Veille technologique, geosuisse, sections romandes.
- Barras, V., Chapotte, G., & Pittet, S. (2014). *Auscultation d'un monument via lasergrammétrie*. CTI .
- Barras, V., Delley, N., & Chapotte, G. (2014, Février). *Plusieurs scanners pour surveiller une rampe*. Géomatique Suisse, 63-67.
- Boavida, J., Oliveira, A., & Berberan, A. (2008). *Dam monitoring using combined terrestrial*. 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis. Lisbon.
- Castagnetti, C., & Capra, A. (2016). *Diagnostic Use of Laser Scanning Data to Identify Current and Historical Deformations and Geometries :*

The cas of Modena Cathedral. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Vienna.

Friedli, E., & Wieser, A. (2016). *Identification of stable surface within point clouds for areal deformation monitoring*. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Vienna.

Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2011, 3^e semestre). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre*. Revue XYZ, 37-49.

M.A. Hernández, J. P.-G. (2012). *Methodology for landslide monitoring in a road cut by means of terrestrial laser-scanning technique*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B8,, 21-26.

Willen, M. (2014). *Pont sur l'eau noire, mise en place d'un suivi topométrique de l'ouvrage*. heig-vd.

Wu, J., & Merminod (Dir.), B. (2012). *Cell-Based Deformation Monitoring via 3D Point Clouds*, Thèse EPFL N°5399. Lausanne: EPFL.

ABSTRACT

Currently, the monitoring of works with total stations requires the installation of targets, prisms or other markers. Is it possible to get rid of this costly, difficult and time-consuming materialization? In order to obtain answers to this question, tests were carried out on various objects. The precisions obtained vary mainly according to the operating mode used and the state of the surface. On regular concrete structures, variations of a few millimeters are detectable. However, on a natural surface like a cliff, a fineness of 1 to 2 centimeters maximum is reachable due to the vegetation and the structure of the rock. To enhance the reliability of suspected movements in areas encumbered by vegetation, photography is an important support and a very interesting decision-making aid.