

Etat de l’art des techniques récentes en auscultation topographique

State of the art of recent monitoring topographic techniques

Damien Tamagnan,

Responsable Département Topographique Soldata Iberia
Travesia Industrial, 149-3a C 08907 Hospitalet de Llobregat, Barcelona, Spain
damien.tamagnan@soldata.fr

Martin Beth,

Directeur Technique Groupe Soldata
Résidence Maunier, 3120 Route d’Avignon, 13 090 Aix en Provence, France
martin.beth@soldata.fr

MOTS CLÉS

Instrumentation, monitoring, surveillance, théodolites motorisés, scanner, radar, cyclops, centaure, barrage, glissement de terrain.

RÉSUMÉ

L’auscultation topographique est très utilisée sur les barrages, depuis de nombreuses années. L’article décrit les évolutions des 15 dernières années, qui profitent des nouveaux instruments apparus sur le marché. Les stations totales motorisées sont devenues assez courantes, tandis que les stations totales motorisées sans cibles restent plus rares. Le mode opératoire permet d’obtenir des précisions de l’ordre de 1 mm, à des distances jusqu’à 100m, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. On compare ensuite trois techniques automatiques avec station totale robotisée, pour aider à un choix éventuel en fonction des besoins. Les scanners et les radars ne sont utilisés que depuis quelques années pour des opérations de monitoring. Un test sur barrage est décrit ici. On compare les résultats issus de deux appareils scanners différents, et les résultats issus de mesures topographiques traditionnelles. La précision des mesures scanner obtenue est de l’ordre de 5 à 7mm, avec une représentation complète de l’ouvrage (nuage de dizaine de milliers de points). Enfin en conclusion un tableau comparatif complet permet de synthétiser de façon simplifiée les caractéristiques de chacune des six techniques topographiques disponibles.

ABSTRACT

Surveying is used a lot for monitoring of dams, and has been for many years. The paper describes the evolutions of the last 15 years, evolutions that benefit from the newest instruments available on the market. Motorised total stations have become quite common, whereas reflectorless motorised total stations remain more rarely seen. Under proper operation it is possible to obtain, 24/7, precisions in the order of 1 mm at 100 m distance. Three techniques using motorised total stations are then compared, in order to help selection depending on the needs. Scanner and radars have only been used these last years for monitoring purposes. A full scale test on a dam is described, including the comparison of 2 scanners and comparison with the results of standard topographic measurements. The obtained scanner precision is in the order of 5 to 7 mm, with a complete representation of the dam (thousands and thousands of measured points). Finally as a conclusion a comparative chart aims at summarising in a simplified way the characteristics of 6 available topographic methods.

INTRODUCTION

Les barrages ont de tous temps été surveillés avec de nombreux types d’appareils et de capteurs, en complément des inspections visuelles. Les techniques topographiques font notamment partie de la panoplie à la disposition des ingénieurs.

L’auscultation topographique manuelle est très utilisée depuis de nombreuses années pour le suivi tridimensionnel des barrages.

L'objet de cet article est de présenter l'état d'avancement de plusieurs autres techniques récentes :

- Stations totales robotisées ;
- Stations totales robotisées sans cibles ;
- Lasers scanners ;
- Radars terrestres ;

2. LES STATIONS TOTALES ROBOTISÉES

2.1 Introduction

Note : Les stations totales robotisées sont aussi appelées RTS pour Robotic Total Stations; ou CYCLOPS pour CYCLic Optical Surveyor; ou AMTS pour Automatic Motorised Total Stations.

Il s'agit d'automatiser des mesures topographiques manuelles de précision. Développée depuis les années 1990, cette technique est mure et prouvée.

Le système CYCLOPS est composé :

- D'une station totale robotisée équipée d'un module de recherche automatique du centre du prisme ;
- D'un ordinateur ou d'un datalogger capables de piloter à l'aide d'un logiciel spécifique les diverses stations totales du marché ;
- D'un système de communication (3G ou Wifi) permettant l'envoi de données en temps réel mais permettant aussi de prendre la main à distance sur le tachéomètre ;
- D'un réseau de prismes, des prismes d'auscultation dont nous allons suivre le mouvement au cours du temps et des prismes de référence situés dans une zone stable pour permettre le calcul à chaque cycle de la position du tachéomètre et son orientation.

2.2 Principe de fonctionnement

Une fois le système CYCLOPS installé, un opérateur se charge de l'apprentissage manuel des différentes cibles que le tachéomètre devra lire durant ses futurs cycles. Ensuite il lance le cycle de mesure qui va permettre d'établir la mesure zéro de l'ensemble du réseau pendant une période déterminée. A la fin de chaque cycle de mesure les données brutes sont envoyées au centre de calcul pour être traitées par une chaîne moindres carrés, stockées dans une base de données et publiées dans une solution SIG consultable via Internet. Durant la chaîne de traitement ces données brutes de distances géométriques sont corrigées des données météorologiques (T°, pression et humidité).

Ce système permet aussi de déclencher une série d'alarmes via SMS ou emails si des seuils de mesure ont été franchis.

Le logiciel de pilotage peut aussi fonctionner en mode semi-automatique. Lors de la première mesure les groupes de prismes sont enregistrés par station. Le tachéomètre et l'ordinateur sont ensuite démontés et peuvent être utilisés ailleurs. Lorsqu'une nouvelle mesure est nécessaire l'opérateur positionne le tachéomètre sur chaque pilier successivement. Au lieu de réaliser des relevés manuels cible par cible, l'opérateur lance un ou plusieurs cycles de mesures sur l'ordinateur et laisse tourner le tachéomètre. On simplifie et on fiabilise ainsi les mesures par rapport à des mesures complètement manuelles.

2.3 Critères qualité du système

Les critères de topographie manuelle s'appliquent aussi pour les systèmes automatisés.

Pour garantir la robustesse du système les points de référence doivent être bien répartis et permettre la vérification de la cohérence des résultats.

Les cibles de contrôle doivent être installées à des distances géométriques et zénithales en accord avec la précision recherchée.

Les erreurs dues aux conditions rencontrées sur le chantier et les erreurs dues à l'instrument peuvent affecter la qualité des résultats.

Conditions sur chantier :

- Les conditions météo (pluies, brouillard, réfraction...);
- Cibles endommagées ou partiellement couvertes;
- Autres éléments perturbateurs comme par exemple les vibrations en cas chantier à proximité.

Erreurs dues à l’instrument :

- Evolution dans le temps des paramètres de calibration;
- Ligne de visée trop verticale ou interrompue;
- Répétabilité dégradée de l’instrument.

Pour diminuer l’impact de ces erreurs une importance toute particulière a été portée aux méthodes employées :

- Suivi journalier des paramètres de calibration de l’appareil;
- La mesure dans les deux cercles de la lunette;
- Travailler avec un réseau robuste qui permet la détection d’éventuels mouvements dans les points de référence.

Grâce à tout cela le système CYCLOPS est un système précis et avec une grande répétabilité. Comme exemple, la précision observée sur chantier est de $\pm 1\text{mm}$ jusqu’à 130 m avec une répétabilité à 2σ (2σ signifiant que 95% des valeurs sont dans la plage annoncée) de $\pm 0,5\text{mm}$ dans les 3 directions.

2.4 Applications

Ce système a été utilisé sur de nombreux barrages à travers le monde, barrages en construction mais aussi lors d’opérations de maintenance ou pour des mesures périodiques.

Barrage de Koudiat Acerdoune (Algérie)

Surveillance de la stabilité des talus d’appuis du barrage pendant les opérations de terrassement, et système d’alerte par sirène pour les opérateurs. Deux appareils robotisés pendant 14 mois.



Figure 1 : Photos du barrage de Koudiat Acerdoune en construction avec le système CYCLOPS et sa sirène.

Barrage Big Tujunga (Etats Unis)

Deux CYCLOPS au dessus et au dessous du barrage pour surveiller les mouvements horizontaux pendant des opérations d’injection de consolidation des flancs.



Figure 2 : Photos du barrage Big Tujunga en réparation.

Barrage Aceña (Espagne)/Barrage Ribeiradio et Ermida (Portugal)

Mesures périodiques semi-automatiques et automatiques de surveillance de la stabilité du barrage.

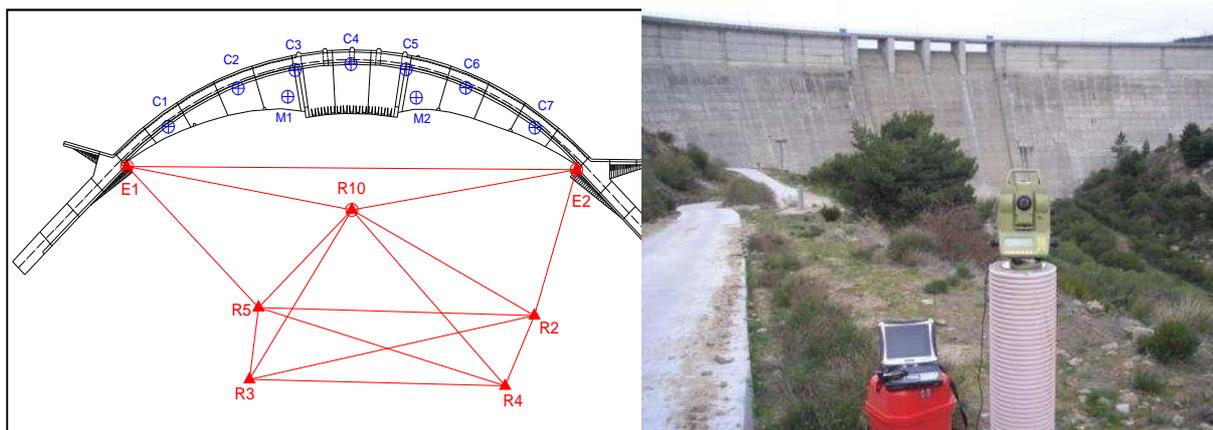


Figure 3 : Réseau géodésique et CYCLOPS en mode semi-automatique au barrage de l'Aceña.

3. STATIONS TOTALES ROBOTISEES SANS CIBLE

Note : Les stations totales robotisées sans cible sont aussi appelées RRTS pour Reflectorless Robotic Total Stations, ou CENTAURE.

3.1 Principe de fonctionnement

Le système CENTAURE a été développé suite à l'évolution des distancemètres Laser grâce à une portée accrue mais aussi à l'augmentation de leur répétabilité. Il s'agit d'une évolution assez récente de la technique, et les logiciels permettant d'utiliser au mieux ces capacités (notamment en ce qui concerne le traitement des mesures brutes) sont encore rares.

Ce système permet l'auscultation de surfaces verticales ou horizontales en utilisant la fonction de mesure sans prismes de certains tachéomètres. Il s'agit d'une mesure sans contact de points de la structure. Le fait de ne pas devoir disposer de prismes sur la structure permet de travailler avec plus de sécurité ou de rapidité mais aussi d'éviter l'intervention d'alpinistes.

Les coordonnées polaires de tous les points sont enregistrées dans le logiciel et le tachéomètre effectue le cycle de lecture en visant directement aux coordonnées fixées. De plus des cibles « normales » sont utilisées comme cibles de référence, pour le recalcul de la position du théodolite.

Il a été développé deux méthodes de traitement des données :

- La méthode directe : calcul du mouvement de points singuliers mesuré par le tachéomètre ;
- La méthode surfacique : traitement du nuage de point et interpolation du mouvement sur des points précis.



Figure 4 : Exemple de système CENTAURE. En blanc les points visés, en rouge les cibles de référence.

3.2 Critères qualité du système

Les mêmes critères de qualité sont appliqués sur le système CENTAURE que sur le système CYCLOPS. Par contre il existe sur le système CENTAURE des limitations un peu plus importantes sur la portée des mesures, sur l’incidence de la visée et sur les caractéristiques de la surface.

Voici un tableau qui résume les avantages et les inconvénients des deux méthodes utilisées ainsi que la précision obtenue sur chantier pour ce type de mesures :

Méthode	Avantages	Inconvénients
CYCLOPS	Précis et mesure d’un vrai X, Y, Z pour chaque cible	Nécessite de poser des cibles prismes sur la structure.
CENTAURE méthode directe	Rapide : le temps d’acquisition dépend du type de tachéomètre utilisé. Approximativement de 5 à 10 secondes par point. Simple d’utilisation.	Répétabilité un peu moins bonne approximativement $\pm 1\text{mm}$ à 50 m – 100 m. Risque de fautes dans les mesures ou dans les tendances dues à l’état de la surface. Mesure uniquement des mouvements verticaux ou horizontaux
CENTAURE méthode surfacique	Grande répétabilité proche de $\pm 0.5\text{mm}$ à 50-100 m. Nombreux critères de qualité vérifiés	Un procédé plus couteux et temps, chaque point nécessite entre 30 secondes et 1 minute de mesure. Mesure uniquement des mouvements verticaux ou horizontaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes CYCLOPS et CENTAURE.

A titre d’exemple , sur le barrage montré en image 4 et également utilisé pour le test scanner décrit plus bas, les données Centaure étaient corrélées à mieux que 2 mm avec les données GPS en mode statique et avec les données des pendules inverses du barrage.

4. LASER SCANNER

4.1 Introduction

Durant ces dernières années, les améliorations technologiques des mesures utilisant la technique du scanner LASER ont permis de faire évoluer les travaux du topographe. Ces évolutions offrent des nouvelles perspectives pour des relevés tri dimensionnel mais aussi pour des auscultations sans contact.

Nous présentons ici des tests réalisés avec deux laser scanners à temps de vol sur des distances relativement grandes (jusqu’à 200m) pour une application d’auscultation de barrage. Ces tests sur plusieurs cycles annuels ont permis de mesurer les mouvements du corps du barrage mais aussi de vérifier la précision et la répétabilité de ces mesures. Nous avons pour cela analysé les mesures des deux scanners différents et nous avons profité des campagnes mensuelles de mesures tachéométriques pour vérifier la précision des résultats. La précision du canevas et des intersections spatiales faites au tachéomètre est de l’ordre de $\pm 1-2\text{mm}$.

L’objet de l’étude est un barrage route à 65km au nord de Madrid (Espagne). Ce barrage d’une longueur de 200m et d’une hauteur de 70m a été construit en 1989 ; sa retenue a une surface de 115ha et une capacité de 24hm³.



Figure 5 : Photo globale du barrage étudié.

4.2 La technique du scanner Laser

La technique du scanner permet à l'utilisateur des applications de mesures sans contact dans des zones difficiles d'accès et d'obtenir un inventaire global de la structure.

Les principaux avantages de cette solution scanner à temps de vol sont :

- Acquisition rapide des données, 50000 points/s (Ex : le scan de ce barrage dure 20min)
- Longue portée pour un scanner ;
- Rendu complet de l'objet mesuré ;
- Très grand niveau de détail ;
- Mesure sans contact (pas de nécessité d'arrêter la production pour effectuer la mesure, sécurité accrue) ;
- Traitement relativement aisé du nuage de point.

Lors de nos tests nous avons utilisé deux scanners (Leica ScanStation 2 et le Leica C10) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Leica ScanStation2	Leica C10
Precision de position	6 mm	
Precision en distance	4 mm	
Precision/bruit - surface modelisée	2 mm	
Débit de scan	50 000 p/s	
Champ visuel	360° horizontal	
	270° vertical	
Portée	0.1m ~ 300 m	
Fenetre de Scan	2 fenetres	1 fenetre
Dimensions	265 x 370 x	238 x 358 x
	510 mm	395 mm
Poids	19 kg	13 kg

Tableau 2 : Caractéristiques des deux scanners utilisés.

Le scanner C10 que nous avons pu utiliser dès début 2010 a reçu des améliorations notables comme une seule fenêtre d'observation qui permet une vitesse accrue et la continuité des données. Ses dimensions et son poids se sont améliorés pour un usage plus convivial et facilité. De plus ce modèle ne nécessite plus d'ordinateur pour le piloter mais intègre une interface graphique.

4.3 Campagne de mesure

4.3.1 Positionnement des instruments

Nous avons utilisé des piliers géodésiques situés en aval du barrage pour stationner notre scanner et le référencer. Ce réseau de sept piliers étant observé par le tachéomètre de précision de façon mensuelle et de manière semi-automatique, ces coordonnées calculées sont utilisées pour géo référencer les nuages de points.

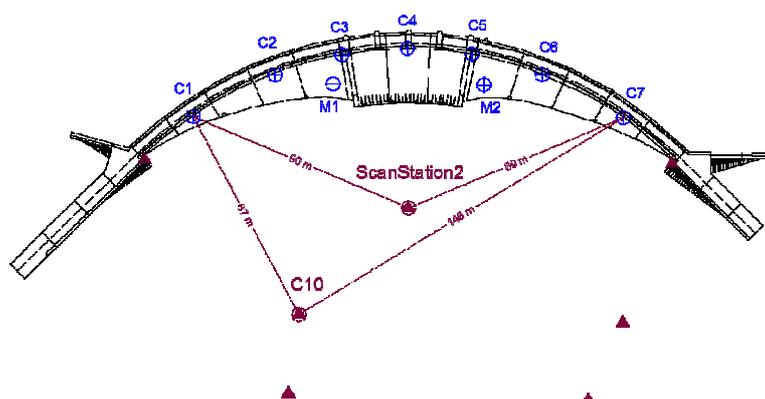


Figure 6 : Réseau de piliers géodésiques et position des scanners Laser.

Lors de la première campagne nous avons choisi de placer la Leica Scan Station 2 sur un pilier central à 50m du parement du barrage. Les distances les plus grandes utilisées sur le barrage sont de l’ordre de 90m et de 130m sur les références.

Lors des campagnes suivantes où nous avons utilisé les deux scanners en concomitance. Nous avons stationné le Leica C10 sur un pilier un peu plus éloigné de l’objet à mesurer et excentré, avec des distances maximales de l’ordre de 145 à 180m.

Pour garder les mêmes conditions de mesures et assurer leurs fiabilités, les scanners ont toujours été stationnés sur les mêmes piliers.



Figure 7 : Leica C10 sur son pilier géodésique.

4.3.2 Dates des mesures

Pour avoir des mouvements importants sur la structure et pouvoir les comparer entre eux, nous avons choisi des dates en hiver et en été avec des hauteurs d’eau et des conditions météorologiques bien distinctes pour réaliser cette expérience. Voici les dates qui ont été choisies et les conditions météo rencontrées :

Date	Instrument utilisé	Numero de scan	Hauteur d'eau (Altitude m)	Temperature moyenne (°C)
03/08/2009	Leica ScanStation 2	1	1309.28	28
03/02/2010	Leica ScanStation 2	1	1300.52	7
	Leica C10	1		
27/07/2010	Leica C10	2	1307.45	25
Tous les mois	Leica TCA2003	1 mesure		

Tableau 3 : Campagnes de mesures et leurs caractéristiques.

La première mesure a été réalisée en août 2009, une mesure concomitante avec les deux scanners a été réalisée en février 2010 et la dernière mesure ainsi qu’une mesure de répétabilité ont été réalisées en juillet 2010.

4.4 Résultats obtenus

Nous présentons dans la suite de cet article les différents résultats obtenus durant les campagnes de mesures :

- Différences des nuages de points entre les campagnes de mesures ;
- Les résultats des mesures tachéométriques mensuelles en mode semi-automatique avec un Leica TCA2003 ;
- Les résultats de répétabilité.

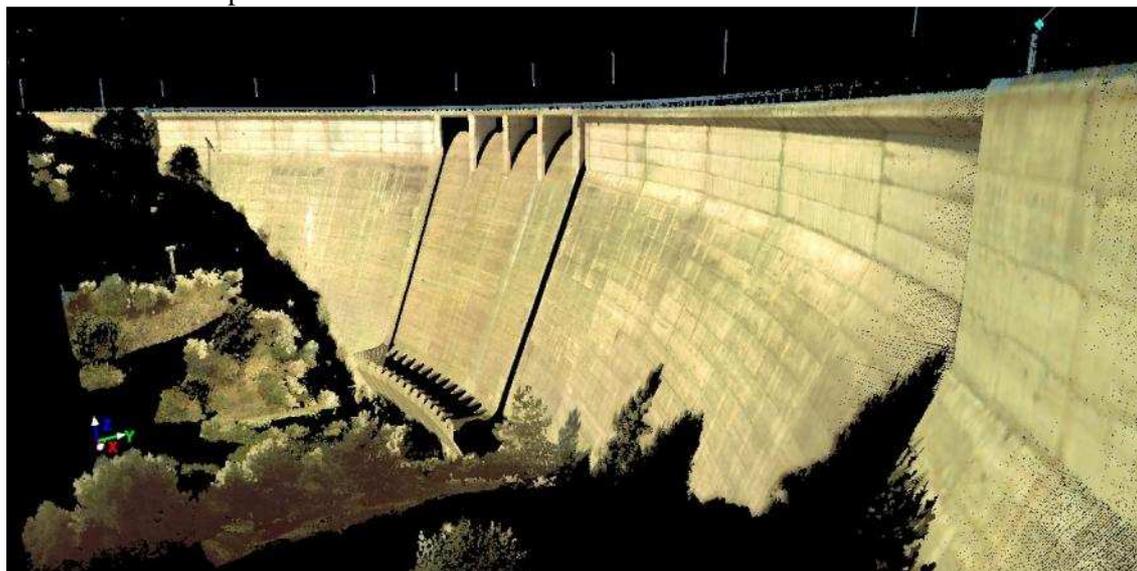


Figure 8 : Levé détaillé du barrage.

4.4.1 La comparaison des résultats

Les nuages de points ont été comparés entre eux en utilisant la méthode du « triangular mesh » du fait de l'impossibilité de mesurer exactement le même point durant les diverses campagnes. Ceci permet aussi un filtrage du bruit des mesures. Le repère a été volontairement tourné pour avoir l'axe des Y perpendiculaire au parement du barrage.

En fonction de la position et du type de scanner, des précisions différentes ont été obtenues. Nous présentons ci-dessous 2 comparaisons entre 2 mesures successives, une par type d'instrument utilisé.

4.4.1.1 Différence entre août 2009 et février 2010

Les données proviennent de deux scans avec la Leica Scan Station 2 depuis le pilier géodésique central. Voici la comparaison des deux nuages de points :

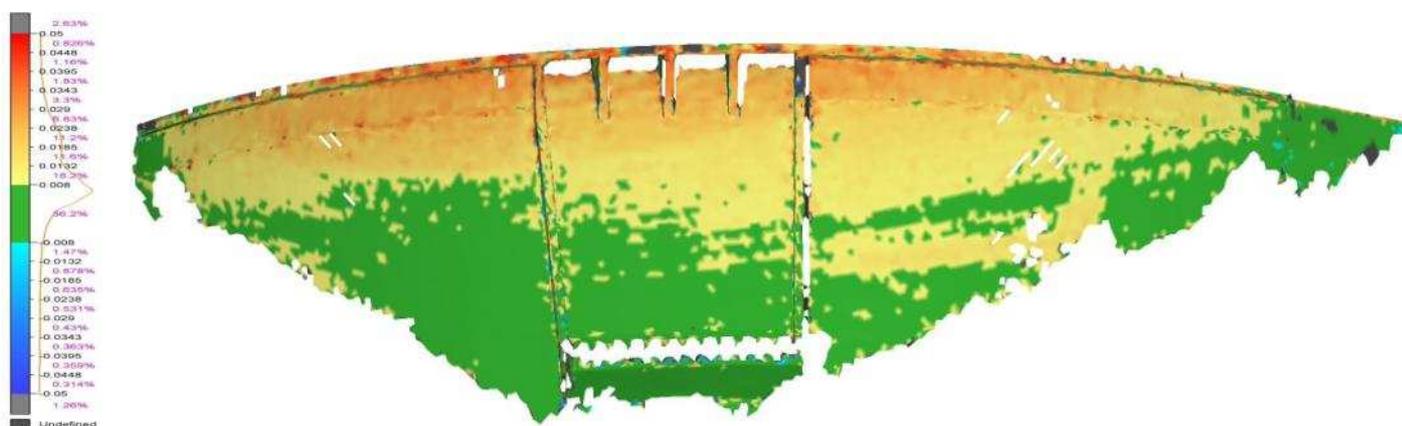


Figure 9 : Résultat de la différence des deux modèles.

Les zones vertes représentent les zones avec un mouvement inférieur à 8mm (précision de mesure telle qu'annoncée par le constructeur Leica). Les points discrets correspondant aux prismes lus par le tachéomètre

sont répartis sur la surface du barrage. On voit nettement le mouvement du barrage lié à la différence de hauteur d’eau entre été et hiver.

Le tableau 4 ci-dessous montre, pour la composante Y perpendiculaire au barrage et pour les 9 points suivis au tachéomètre :

ΔY^{THEO} : Les mouvements en m mesurés au tachéomètre selon l’axe Y entre les 2 dates de mesures, et que nous considérons ici comme mesures « vraies ». Il faut noter que ces mesures étaient confirmées à mieux que 2 mm près par les mesures sur les pendules et sur les GPS statiques du barrage.

ΔY^{LS} : Les mouvements en m mesurés au scanner laser entre les 2 dates de mesures. Ces mouvements sont obtenus par différence entre les 2 nuages de points.

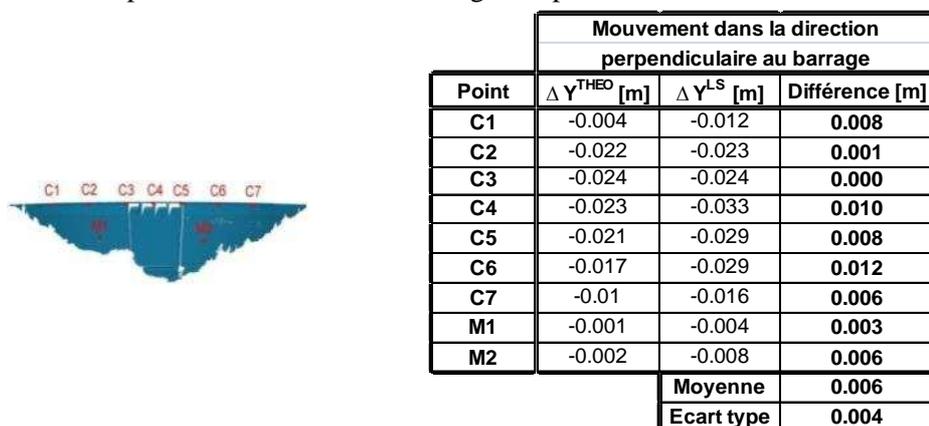


Figure 4 : Comparaison aux mesures tachéométriques.

Nous pouvons observer que la moyenne des différences est de l’ordre de 6mm pour un écart type de $\pm 4\text{mm}$.

4.4.1.2 Différence entre juillet 2010 et février 2010

Les données proviennent de deux scans avec scanner Leica C10. Voici la comparaison des deux nuages de points :

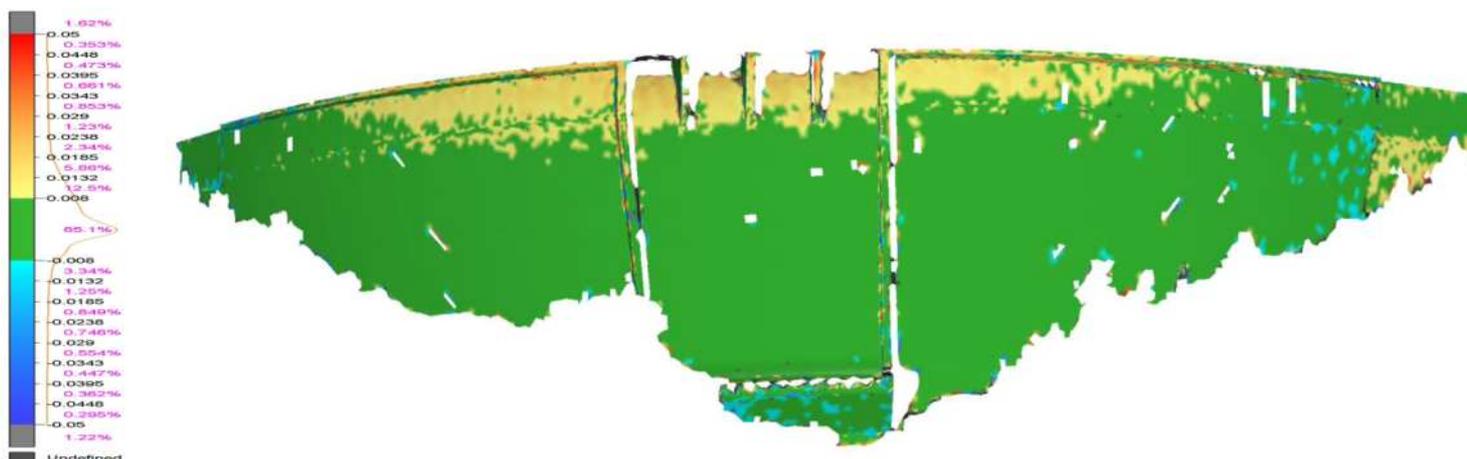


Figure 10 : Résultat de la différence des deux modèles.

Les zones vertes représentent les zones avec un mouvement inférieur à 8mm (précision de mesure telle qu’annoncée par le constructeur Leica). La différence entre été et hiver est moindre qu’à l’automne 2009 : le niveau de l’eau dans le barrage était 2 mètres moins haut et le béton du barrage n’était pas encore en température.

On estime comme au paragraphe précédant la précision des mesures au laser scanner en comparant avec les mesures au tachéomètre :



Point	Mouvement dans la direction perpendiculaire au barrage		
	ΔY^{THEO} [m]	ΔY^{LS} [m]	Différence [m]
C1	0.014	0.008	0.006
C2	0.027	0.012	0.015
C3	0.027	0.015	0.012
C4	0.025	0.010	0.015
C5	0.022	0.016	0.006
C6	0.016	0.006	0.010
C7	0.010	0.001	0.009
M1	-	-0.003	-
M2	0.002	0.000	0.002
		Moyenne	0.009
		Ecart type	0.005

Tableau 5 : Comparaison aux mesures tachéométriques.

Du fait de la position plus éloignée et des visées avec une moins bonne incidence par rapport aux mouvements recherchés le bruit des mesures est un peu plus élevé ; nous pouvons observer que la moyenne des différences est de l’ordre de 9mm pour un écart type de ± 5 mm.

4.4.2 Test de répétabilité

Pour permettre de valider ces tests nous avons réalisé un test de répétabilité pour le scanner C10. Ce test a consisté à réaliser deux mesures consécutives indépendantes et de vérifier en fonction de la distance la dispersion de l’erreur. On suppose donc que le barrage n’a pas bougé et les différences donnent une idée de la répétabilité des mesures.

4.4.2.1 Test sur l’ensemble des données

La première analyse a été fondée sur l’ensemble des données acquises avec des distances allant de 80m à 170m.

La différence des nuages de points est représentée sur l’image suivante :

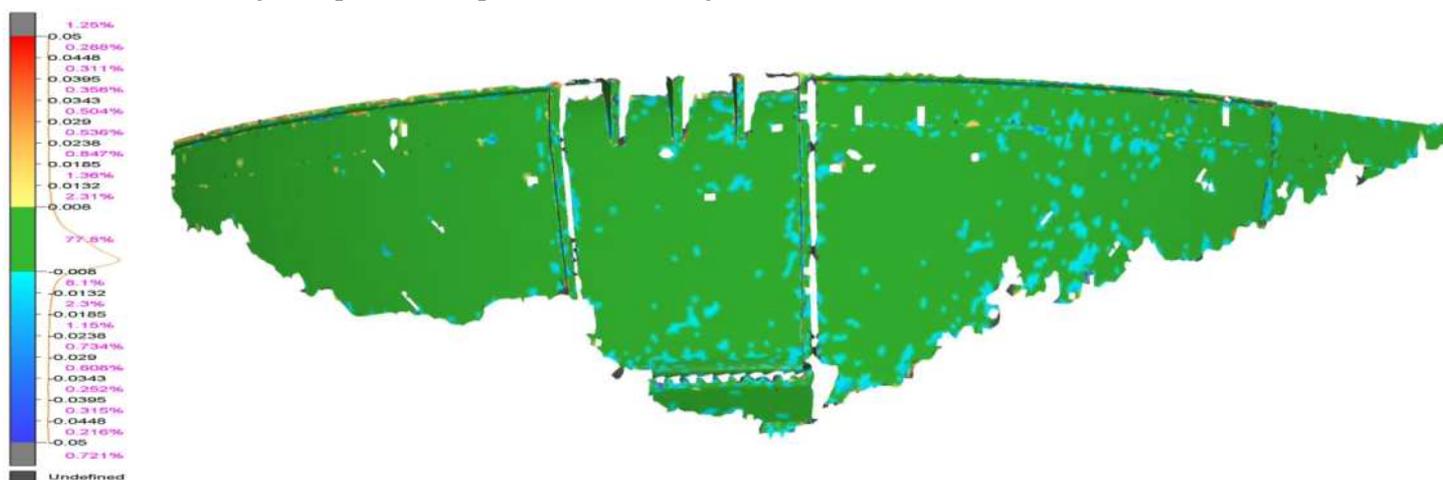


Figure 11 : Résultat de la différence des deux modèles.

Le scanner étant stationné sur la partie gauche de l’image nous voyons l’influence de la distance sur la partie droite du barrage : moins de vert (différence inférieure à 8 mm) et plus de bleu (différence de l’ordre de 10 mm). Ce test montre cependant que plus de 77% des différences sont en dessous de ± 0.008 m.

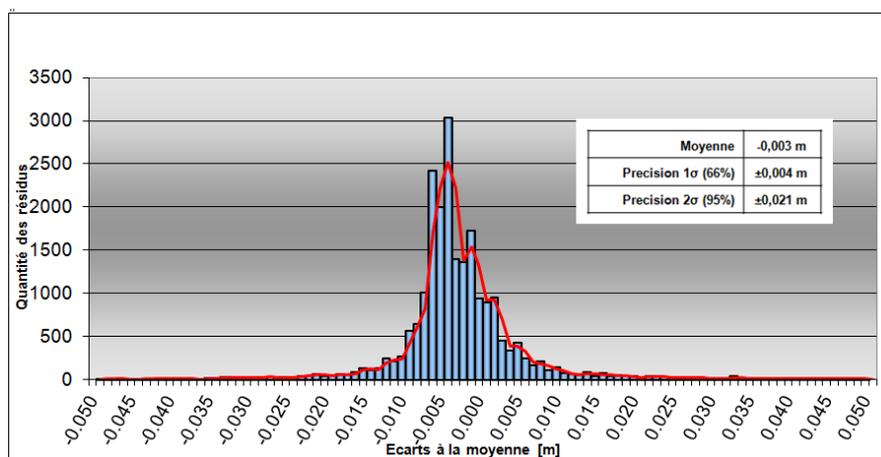


Figure 12 : Répartition des écarts à la moyenne

La distribution des écarts à la moyenne en fonction de la quantité des résidus nous permet d’en déduire une moyenne de -0.003m, une précision de $\pm 0.004\text{m}$ à 1σ (66%) et de $\pm 0.021\text{m}$ à 2σ (95%).

4.4.2.2 Test sur les données dont les distances sont inférieures à 120m

Nous avons aussi fait la différence des nuages de points dont la distance au scanner est inférieure à 120m. La figure suivante montre la zone qui correspond à ce critère. Nous observons que plus de 98% des différences sont inférieures à $\pm 0.008\text{m}$.



Figure 13 : Résultat de la différence des deux modèles.

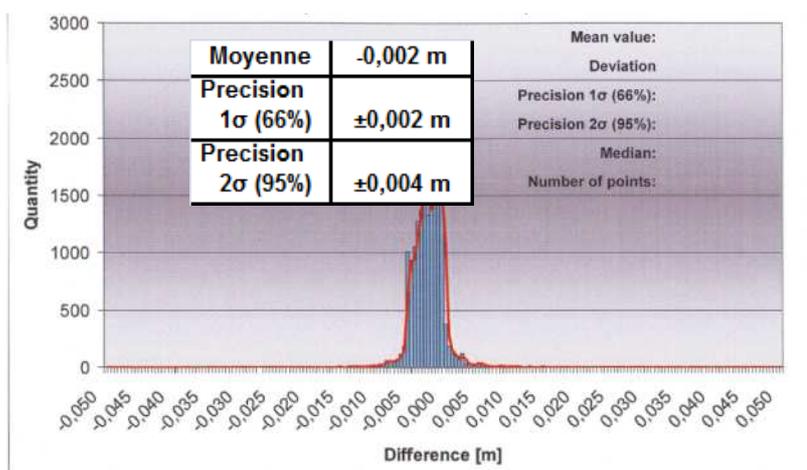


Figure 14 : Répartition des écarts à la moyenne

La distribution des écarts à la moyenne en fonction de la quantité des résidus nous permet d’en déduire une moyenne de -0.002m, une précision à 1σ de $\pm 0.002\text{m}$ et $\pm 0.004\text{m}$ à 2σ .

4.5 Conclusion

Nous avons vu que la technique du laser scanner apporte une information 3D globale pour l’analyse des mouvements d’une structure comme celle d’un barrage. Les scans en eux-mêmes sont très rapides ; cependant le mode opératoire (distance à l’objet, incidence des mesures, géo-référencement...) reste prépondérant pour obtenir des résultats avec la précision souhaitée. Il est aussi très important d’avoir un réseau de base fiable et bien dimensionné. Sur certains chantiers, les lasers scanners commencent à être automatisés depuis la mesure brute jusqu’à la chaîne de traitement. Pour certains ouvrages qui nécessitent des mesures sans contacts et un inventaire global de la structure mesurée, cette technique offre des informations très intéressantes.

5. RADAR SOL

Note : technique aussi appelée Terrestrial Synthetic Aperture Radar Interferometry, ou Ground Based SAR Interferometry. Cependant l’utilisation du terme « Synthetic Aperture » (« radar à synthèse d’ouverture » en français) limite l’application à seulement une partie des produits présents sur le marché, les autres produits utilisant un « real aperture radar », ou « radar à ouverture réelle ». Dans la suite de cet article nous englobons les 2 techniques sous le terme de radar sol. Il s’agit d’une technique dérivée des techniques de mesure de déplacements à partir des données radar satellitaires. Le radar est positionné au sol, face à la surface à surveiller. Comme pour le système Centaure, on ne mesure ici que la distance dans l’axe de la mesure.



Figure 15 : Deux exemples de radars interférométriques disponibles commercialement. (Photos Groundprobe et IDS)

La technique est particulièrement adaptée pour le suivi des barrages grâce à sa très longue portée (plusieurs centaines de mètres à 1 km et plus selon antenne) et à sa grande précision sur la mesure de distance : de l’ordre de 1 millimètre, voire meilleure que le millimètre.

5.1 Principe de fonctionnement

Une ou plusieurs antennes radar sont montées face à la zone à surveiller et enregistrent des images radar successives de la zone. Une image radar contient, pour chaque pixel, une information sur la phase du signal de retour. En comparant les différences de phase par interférométrie entre des paires d’images collectées à des instants différents, on peut calculer le déplacement de chaque pixel entre les deux images dans la direction de la prise de vue.

On voit ainsi apparaître une des limitations éventuelles de la méthode : entre deux images successives il ne faut pas que le déplacement soit supérieur à la demi-longueur d’onde du système. Les appareils actuels permettent ainsi un mouvement max de l’ordre de 5 mm entre deux images. Toutefois les hautes fréquences d’acquisition de ces appareils (1 à 5min entre deux images) permettent de contourner ce problème.

Des traitements de données supplémentaires sont effectués pour supprimer les interférences atmosphériques. Ces traitements sont le plus souvent statistiques, contrairement aux traitements appliqués en station totale robotisée qui sont physiques : En radarsol on discrimine en général les artefacts atmosphériques en analysant statistiquement les variations de signal dans le temps et dans l’espace. En station totale robotisée on corrige les mesures de distance en mesurant les paramètres météo et en appliquant une formule scientifique de correction de l’impact de la météo sur la propagation des ondes. Les distances plus importantes entre appareil et point mesuré rendent cette dernière solution moins fiable quand on travaille en radar (il faudrait connaître les paramètres météo en plusieurs points le long de la ligne de visée).

Le pilotage de l’antenne radar est effectué par un ordinateur physiquement situé à proximité de l’appareil. Les données sont ensuite envoyées à un logiciel de présentation des résultats, en général à distance via un modem GPRS. (Voir l’exemple de la mine de Chuquicamata ci-dessous).

5.2 Spécifications

La précision de la mesure de distance est excellente, meilleure que le millimètre, ou de l’ordre du millimètre, sur toute la plage de mesure. Et surtout, cette plage de mesure est importante, de 800 mètres à 4km selon les appareils.

Les appareils sont également très rapides par rapport aux autres techniques présentées dans cet article : selon les appareils, de 1 minute pour la totalité d’une petite zone de disons 200 mètres par 200 mètres, à 5minutes pour une zone complète de 1 km par 1 km.

La taille des pixels est un sujet important. Selon les appareils et la distance à l’appareil, elle peut varier de 0.5 m à 20 mètres. De plus le recalage des mesures en cas de déplacement de l’appareil n’est pas encore très bien géré. On ne surveille donc pas des points précis, mais plutôt une zone.

Enfin, les mesures restent possibles en cas de pluie ou de brouillard. Les autres techniques présentées dans cet article fonctionnent également en cas de pluie ou de brouillard d’intensité moyenne, mais sont gênées voire empêchées par de fortes précipitations.

5.3 Avantages et limitations du système

Les principaux avantages de cette technique sont :

- La mesure sans contact et d’une zone vaste permettant un aperçu global de la zone à mesurer.
- Pas de nécessité d’accéder sur la zone à ausculter pour matérialiser les points à mesurer.
- Capteur tous temps (peu influencé par les conditions atmosphériques).

Les principales limitations sont :

- Les déplacements peuvent être interprétés uniquement dans la direction de la mesure.
- L’appareil est en général positionné dans une zone dite stable. Les logiciels les plus courants ne proposent pas de rattachement à des cibles de référence ; toutefois on peut se rattacher manuellement sur des zones choisies comme stables.
- L’appareil mesure par analyse de différence de phase ; il ne faut donc pas que le mouvement entre deux images soit supérieur à une demi-phase, soit 4,5mm pour les appareils que nous avons testés.
- Appareil onéreux et interprétation immédiate difficile.

5.4 Exemple de chantier

Dans la mine de cuivre de Chuquicamata au nord du Chili Soldata récupère sur sa base Geoscope les mesures de trois radars. Ces derniers fonctionnent 24h sur 24, les données sont envoyées à la fin de chaque cycle de lecture. Les fichiers sont traités de forme automatique et en temps réel. Les mouvements et les tendances sont analysés dans une salle de contrôle qui permet d’informer les personnes sur chantier en cas de dépassement de seuils d’alarme.

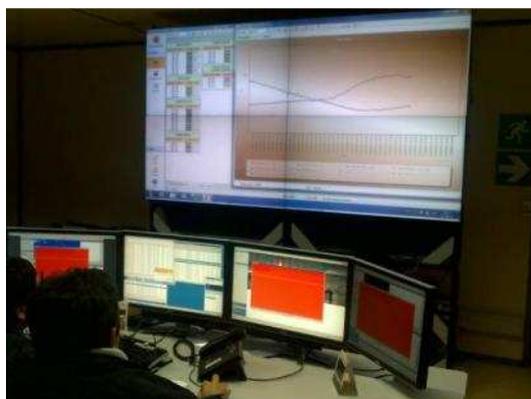


Figure 16 : Salle de contrôle de la mine de Chuquicamata pour toute l’instrumentation géotechnique.

CONCLUSION

Les 20 dernières années ont vu la multiplication de techniques topographiques nouvelles, qui viennent s’ajouter aux techniques historiquement utilisées par les ingénieurs pour les suivis de barrages.

Dans le tableau ci-dessous nous avons essayé de proposer de manière simplifiée un tableau comparatif de ces techniques topographiques. Les ingénieurs et géomètres topographes pourront ainsi choisir la technique appropriée en fonction de leurs besoins.

	<u>Topographie manuelle</u>	<u>CYCLOPS</u>	<u>CENTAURE</u>	<u>Scanner</u>	<u>Radar sol</u>	<u>GPS</u>
<u>Portée typique</u>	400m	600m	80m	150 - 600m	1000m	NA
<u>Précision</u>	3mm à 100m, 5mm à 400m	1mm à 100m, 4mm à 400m	1mm à 50m	7mm à 100m et 30mm à 500m	1mm voire mieux 500- 1000 m	3 mm
<u>Fréquence de mesure</u>	Hebdo ou mensuelle	30 minutes pour 70 cibles.	30 minutes pour 70 cibles.	20 minutes pour 100m x 100m	1 minute pour 100m x 100m	1 hr
<u>Mesure</u>	X, Y, Z sur cibles	X, Y, Z sur cibles	Distance sur points choisis	Distance sur Surface	Distance sur Surface	X, Y, Z "absolu"
<u>Coût global</u>	Faible	Faible	Faible	Moyen	Elevé	Moyen
<u>Ordre de grandeur coût matériel</u>	10 à 20 k€	25 k€	25 k€	50 k€	160 à 500 k€	5 k€
<u>Autres avantages</u>	Adaptabilité, légèreté, disponibilité	Fiabilité et retour d’expérience	Très bon rapport qualité/cout		Peu affecté par pluie et brouillard	Mesure absolue
<u>Autres inconvénients</u>	Non automatique					Coût faible par point mais un appareil par point

Tableau 6 : Comparatif simplifié des différentes techniques. Attention les chiffres indiqués représentent des valeurs moyennes typiques.

Note : Nous avons ajouté une colonne « GPS » car la comparaison nous semblait intéressante. Nous n’avons pas détaillé le sujet GPS dans le reste de l’article pour nous concentrer sur des capteurs à ligne de visée.

Et le futur ? Avec l’augmentation des capacités de traitement de données on peut s’attendre à une poursuite de l’évolution des outils à notre disposition :

- A ce jour, seule la topographie manuelle est utilisée systématiquement sur les barrages. Les tachéomètres robotisés sont en passe de devenir courants, ils le sont déjà en Italie et en Suisse. Et les techniques sans contact sont encore rarement rencontrées hors des ouvrages exceptionnels par leur ampleur ou leur criticité. On peut s’attendre à ce que toutes ces nouvelles techniques se vulgarisent, y compris sur des suivis de barrages plus petits.

- Nous n’avons pas abordé dans cet article la technique du radar satellitaire. Peu utilisée à l’heure actuelle sur les barrages mais en cours de diffusion sur les chantiers de tunnel, les améliorations techniques récentes vont permettre sa plus large diffusion.

- Enfin l’automatisation de tous ces suivis, avec base de données, centralisation de toutes les mesures, alarmes automatiques, informations en temps réel sur internet, est déjà présente sur d’autres types d’ouvrages comme les mines, les chantiers de tunnels ou certains gros barrages. Elle devrait rapidement se propager vers les moyens et petits barrages.

Il est cependant primordial de ne pas utiliser les nouvelles technologies pour leur côté gadget, mais uniquement si les rapports qualité métrologique sur prix et qualité du suivi sur prix sont intéressants et prouvés.