

Concept de l'auscultation topométrique De la théorie à la pratique

*Displacement survey concept :
from theory to practice*

Philippe SCHOLTES
HYP-ARC, Parc d'Affaires International, Bât Héra 1, (F) 74160 Archamps
p.scholtes@hyp-arc.com

Raphaël LEROY
Alpiq Suisse SA, Ch. de Mornex 10, CP 570, CH - 1001 Lausanne
raphael.leroy@alpiq.com

MOTS CLÉS

Auscultation topométrique, précision, fiabilité, ellipses ou ellipsoïdes d'erreurs moyennes, vecteurs ou rectangles de fiabilité.

RÉSUMÉ

L'évolution de la technologie a permis d'appréhender l'analyse des mouvements des barrages de manière plus précise et fiable. Les calculs traitent, par méthodes statistiques, des mesures surabondantes et indépendantes. Ces mesures sont validées sur le terrain selon des seuils de précision préétablis. Nous présentons ici les moyens techniques, méthodes, logiciels utilisés en insistant sur les notions de précision et surtout de fiabilité des résultats que le géomètre se doit de fournir à l'ingénieur civil pour qu'il puisse appréhender les mouvements détectés de manière éclairée. Deux exemples d'auscultations topométriques sont présentés l'un pour le barrage de la Rouvière, pour lequel nous utilisons le logiciel d'analyse et d'ajustement LTOP en 2D, l'autre pour le barrage des Toules pour lequel nous utilisons le logiciel d'ajustement TRINET+ en 3D. Le barrage des Toules a fait l'objet d'une surveillance renforcée durant les travaux de confortement. Des mesures mensuelles de surveillance d'une durée journalière, durant les 3 ans de chantier, ont été réalisées en toute saison. Afin de garantir la fiabilité et la précision des résultats des mesures le barrage a été équipé de prismes. Les mesures géodésiques sont confrontées aux autres mesures réalisées dans le barrage.

ABSTRACT

The evolution of technology has enabled us to grasp the movement analysis of dams in a more accurate and reliable way. The process calculates, through statistical methods, using independent and redundant measurements. These measurements are validated on the field according to predetermined accuracy thresholds. We present here the technical means, methods and software that have been used, with special emphasis on precision and reliability. The surveyor must provide these results to the civil engineer so that he can understand the detected movements. Two deformation survey examples are presented: one is the Rouviere dam where we use the analysis and adjustment software LTOP in 2D mode and the other is the Toules dam where we use the TRINET+ adjustment software in 3D mode. The Toules dam has been under increased surveillance during the reinforcement works. During the three construction years, one day-long monthly supervision measurements were performed in all seasons. To ensure reliability and measurement accuracy of the results, the dam was equipped with prisms. Geodetic measurements are compared with other measurements carried out in the dam.

1. INTRODUCTION

Le but de l'auscultation topométrique est de réaliser des comparaisons de l'évolution du modèle par rapport à un état antérieur et par rapport à l'état origine.

Pour garantir la fiabilité des résultats cette comparaison repose sur plusieurs principes :

- le modèle doit se trouver dans une situation comparable, température, ensoleillement, pression d'eau sinon les paramètres influents doivent être fournis afin de corriger les calculs de déplacements ;
- les mesures doivent être calées dans un référentiel de points fixes intangible ce qui nécessite une remise en cause et un entretien permanent de ce réseau de points fixes ;
- seules sont exploitées des mesures entachées d'erreurs accidentelles, les fautes et erreurs systématiques sont éliminées avant le calcul de compensation ;
- le modèle de calcul statistique est élaboré en exploitant des mesures indépendantes et surabondantes.

2. TYPES DE MESURES TOPOMETRIQUES

Dans cet exposé nous nous intéressons à l'auscultation topométrique d'Ouvrages d'Art qui met en œuvre la détermination de la position de points variables par résolution d'équations à deux ou trois inconnues (X, Y, Z). L'exploitation des mesures à une inconnue telles que le Z pour les nivellements directs ne sera pas évoquée dans cette présentation bien que l'ajustement de réseaux complexes réponde au même mode de traitement.

Les techniques d'auscultation topométrique d'Ouvrages d'Art font appel généralement aux différents types de mesures suivants:

- mesures au théodolite, uniquement des angles horizontaux et verticaux ;
- mesures tachéométriques, s'ajoutent aux précédentes les mesures de distances ;
- mesures au distancemètre de haute précision, par exemple au laser tracker, à l'interféromètre laser ;
- mesures directes de distances, au fil invar, au distinchaine, au palmer, etc... ;
- mesures GPS de haute précision.

3. ANALYSE STATISTIQUE D'OBSERVATIONS

Afin de fournir des données objectives concernant une campagne de mesures il est impératif de disposer d'un échantillon de mesures surabondantes et indépendantes qui sera traité par la méthode d'analyse statistique d'observations. Les méthodes basées sur la précision intrinsèque de mesures univoques ne permettent pas de détecter des fautes et conduisent donc à la livraison de données non contrôlées. Ces méthodes doivent être bannies des travaux d'auscultations topométriques qui sont liés à la sûreté des ouvrages et à la sécurité des personnes. Pour l'auscultation topométrique d'Ouvrages d'Art, deux méthodes sont applicables.

3.1 Méthode par répétition

Cette méthode permet d'élaborer un modèle statistique par répétition des mesures en utilisant des cycles courts tels que ceux utilisés pour les mesures de télésurveillances selon des fréquences horaires voire en temps réel pour des capteurs à mesures instantanées.

3.2 Méthode globale par mesures redondantes et indépendantes

Cette méthode fait appel à l'élaboration d'un modèle statistique par l'exploitation de mesures indépendantes et surabondantes, chaque point variable étant observé depuis 2, 3 ou 4 stations selon le nombre d'inconnues à déterminer et la configuration des visées. Le traitement global des mesures nécessite aussi le contrôle des points fixes comprenant impérativement les mesures de distances entre ces points afin de vérifier les déformations et la mise à l'échelle du réseau.

Le logiciel de traitement fait ressortir les critères de précision et de fiabilité qui permettent de qualifier la confiance que l'on peut attribuer aux résultats fournis. Il reste à l'ingénieur civil qui interprète les résultats à introduire les paramètres de corrections de l'état de l'ouvrage au moment des mesures.

Hormis les contrôles réalisés sur les barrages gérés par EDF et traités par leurs services, nous mettons systématiquement en œuvre cette méthode de traitement global afin de fournir les résultats des déplacements avec leurs critères de qualité.

4. CONTRAINTES DE MESURES

Le plus grand obstacle au contrôle de déplacements des grands Ouvrages d'Art par mesures topométriques de haute précision est l'instabilité dimensionnelle de ces ouvrages durant les mesures.

Différents moyens permettent de limiter les biais dus à la dilatation ou aux mouvements durant les mesures :

- tout d'abord, il est impératif que ces mesures soient réalisées durant un laps de temps le plus court possible, à une période permettant de limiter au mieux les effets de la dilatation, l'idéal étant de réaliser les mesures de nuit, l'ouvrage au repos. Cette méthode est applicable aux ouvrages équipés de prismes, ce n'est malheureusement pas le cas pour la surveillance de la plupart des barrages équipés de cocardes ;
- la bonne connaissance des paramètres de température extérieure et interne fournissent au bureau d'ingénieur civil les éléments de correction de la dilatation de l'ouvrage ;
- de même la bonne connaissance des pressions exercées sur l'ouvrage durant les mesures complète le modèle de correction. Pour les barrages, un relevé des niveaux d'eau en début et en fin de mesures s'avère nécessaire.

Il est à noter que trop souvent les mesures par capteurs dans l'ouvrage (inclinomètres, extensomètres, pendules, etc.) sont réalisées indépendamment des mesures topométriques. Ces mesures devraient être réalisées en simultané pour permettre de les corrélérer entre elles.

5. LA PROBLEMATIQUE DES POINTS FIXES

Les points fixes ou points de références d'un réseau d'auscultation topométrique d'Ouvrages d'Art doivent se trouver suffisamment proches de l'ouvrage pour ne pas introduire trop d'imprécisions de mesures dues à l'éloignement sans pour autant subir les influences du déplacement de l'ouvrage.

Sur certains sites instables les piliers d'observations sont rattachés à des points fixes éloignés de plusieurs kilomètres voire dans une vallée voisine par mesures GPS de précision ; ce sont des opérations lourdes avec des temps d'observations longs, de l'ordre de deux fois douze heures par point, qui mettent en œuvre une série d'antennes GPS.

Dans la pratique, sur des sites géologiquement stables, il est recommandé de mettre en place un réseau de points de références largement surabondants pour que l'élimination d'un ou plusieurs points fixes n'entraîne pas de dégradation de la qualité des résultats. Il est souvent intéressant de disposer de piliers d'observations topographiquement bien placés pour les observations, même si ces derniers ne sont pas stables dans le temps.

6- LA QUALITE DES MESURES

La précision de détermination des mouvements est étroitement liée à la qualité et à la précision des mesures.

Nous avons développé le logiciel SERIES de pilotage des tachéomètres motorisés afin d'assurer la qualité des observations et d'améliorer l'efficacité des travaux par la rapidité des mesures.



Figure 1 : Auscultation du barrage de la Gittaz, Hyp-Arc [2009]

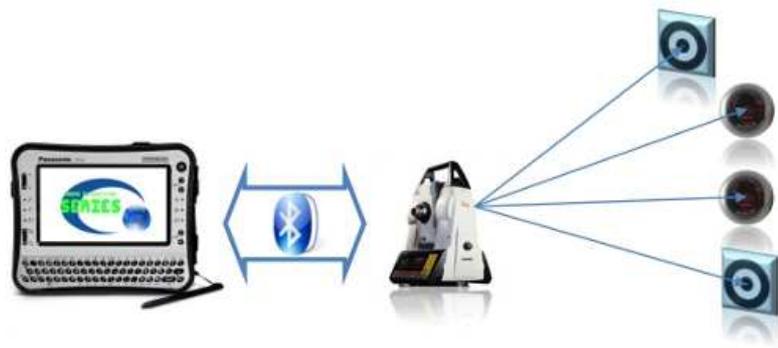


Figure 2 : Schéma du principe de fonctionnement du logiciel SERIES

Les principales fonctionnalités de SERIES sont les suivantes :

- l'ensemble des données (X, Y, Z) de suivi des contrôles d'un Ouvrage d'Art est enregistré dans un UMPC (Ultra-Mobile Personal Computer) durci ;
- au démarrage de la campagne de mesures, les précisions à priori pour les mesures planimétriques et altimétriques sont renseignées ;
- le tachéomètre est piloté en automatique par le logiciel, l'opérateur réalise seulement les fins pointés et les enregistrements ;
- la tolérance de fermeture sur la référence principale est contrôlée à chaque tour d'horizon ;
- au bout de deux paires de séquences, les écarts de mesure sur chacun des points visés sont calculés et transformés en écarts longitudinaux, transversaux et verticaux, puis un calcul de précision générale de la série de mesures est réalisé ;
- ces écarts sont comparés aux précisions exigées à priori, s'ils sont inférieurs, la série de mesures est validée, s'ils sont supérieurs, le logiciel impose de refaire des paires de séquences jusqu'à ce que la précision moyenne soit atteinte ;
- de nombreuses souplesses ont été introduites, par exemple la possibilité de supprimer des visées de mauvaise qualité, la possibilité de rajouter des nouvelles visées, la possibilité de changer de référence éloignée, la possibilité de renseigner les incidents de mesures du style; visées flottantes, mauvais contraste, cible sale etc.

7. NOTIONS DE PRECISION ET DE FIABILITE

7.1 Notion de précision

La précision de positionnement d'un point est issue d'un calcul statistique de mesures affectées uniquement d'erreurs accidentelles, c'est-à-dire d'erreurs aléatoires qui répondent à une loi de probabilité représentée par une courbe de Gauss. En géodésie, les grandeurs observées suivent le comportement d'une variable aléatoire ce que l'on appelle communément une distribution normale.

Pour que cette distribution normale soit respectée, les fautes de mesures et les erreurs systématiques doivent être éliminées. On verra plus loin dans le traitement global des mesures comment les logiciels modernes permettent de détecter les fautes.

A l'issue du traitement on retrouvera pour chaque point variable la précision de la détermination sous forme d'une erreur moyenne représentée par une ellipse pour un traitement planimétrique en 2D ou par un ellipsoïde pour un traitement en 3D.

7.2 Notion de fiabilité

Des mesures peuvent être précises mais absolument pas fiables. La fiabilité d'un calcul correspond à sa capacité de détection de fautes, cette capacité est directement liée à la configuration des mesures et à leurs redondances.

Le schéma ci-dessous illustre les risques grossiers de fautes sur le calcul de mesures en sifflet ou en recouvrement de distances à l'équerre. Les indicateurs de fiabilité mettent immédiatement l'accent sur ce risque de fautes et permettent d'analyser si par exemple le déplacement constaté est certain ou douteux.

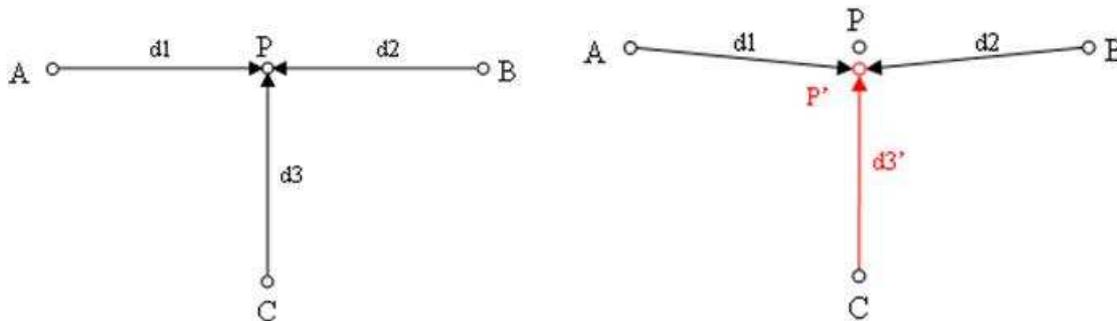


Figure 3 : Recouvrement de distances, $d1$ et $d2$ ne permettent pas de détecter une faute sur $d3$

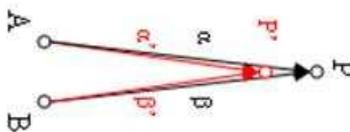


Figure 4 : Intersection en sifflet, une faible variation de l'angle entraîne un déplacement important de P

8. TRAITEMENT GLOBAL DES MESURES

ALPIQ et HYP-ARC utilisent deux logiciels de traitement et d'analyse des mesures de conception assez identiques, mais l'un LTOP traite indépendamment les mesures planimétriques et les mesures altimétriques, l'autre TRINET+ réalise un véritable traitement en 3D.

LTOP est développé par SWISSTOPO, Office Fédéral de Topographie à Berne. TRINET+ est développé par la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) à Yverdon. Les deux logiciels supportent des formats de mesures identiques et permettent de traiter ensemble des mesures topométriques et satellitaires.

8.1 Principes de traitement global des mesures

8.1.1 Compensation d'observations médiates

Chaque mesure ou observation fait l'objet d'une équation d'erreurs, l'ensemble des équations constitue le modèle fonctionnel.

La loi de propagation des erreurs doit être linéarisée pour pouvoir être traitée par des calculs matriciels. Les mesures de natures différentes (distances, angles, coordonnées GPS) sont transformées en déplacements longitudinaux, transversaux, verticaux et en variations de coordonnées. Ces mesures sont corrélées entre elles par une pondération. Les éléments de pondération forment le modèle stochastique. La combinaison des deux modèles forme le modèle mathématique.

Les incertitudes introduites a priori fournissent les poids des différentes mesures et permettent de les corréler entre elles. Ces incertitudes, à renseigner, sont du type imprécision du distancemètre, imprécisions angulaires de l'appareil de mesures, incertitude de centrage forcé, imprécision des mesures GPS etc. et sont à introduire pour chaque type d'instrument. Cette étape de paramétrage est à informer par un ingénieur topographe expérimenté afin de ne pas fausser les résultats par des poids inappropriés.

A la fin du traitement, un indicateur fournit le rapport entre les imprécisions a priori et les imprécisions provenant du calcul à postériori ; ce rapport doit être proche de 1 sinon le calcul n'est pas validé et il y a lieu de revoir les paramètres de précision a priori.

L'ensemble des vecteurs d'erreurs résiduelles qui affectent la précision de détermination d'un point variable est représenté par son ellipse ou ellipsoïde de précision (voir tableau au paragraphe 8.2.3).

8.1.2 Test de fiabilité locale Z_i

Le test Z_i , fiabilité locale ou redondance partielle, montre quelle est la participation de la i ème mesure à la surdétermination du réseau ; il s'exprime par un nombre compris entre 0 et 100%.

La valeur de Z_i dépend de la géométrie du réseau et de la précision des mesures. Pour illustrer cette notion, prenons par exemple une distance mesurée à l'interféromètre laser et la même au ruban. On comprendra aisément que la première méthode contrôle très bien la seconde avec un Z_i proche de 1 ; par contre le ruban ne permettra pas de contrôler des mesures au micron d'où un Z_i proche de zéro.

A chaque mesure est liée sa fiabilité locale Z_i . On admet que la mesure est correctement contrôlée si Z_i est $>25\%$.

8.1.3 Test de fiabilité interne $nabla$

Pour éviter des erreurs de jugement concernant le test statistique des mesures, il convient de fixer la valeur de rejet, ou niveau de risque, appelée erreur de deuxième type β ; ainsi si l'on fixe $\beta=5\%$ cela revient à accepter un modèle avec un intervalle de confiance à 95%.

En fonction de β et pour chacune des observations, le calcul de la plus grosse faute grossière possible est déterminé. Cet indicateur de fiabilité $nabla$ servira à élaborer le test de fiabilité externe.

8.1.4 Test de fiabilité externe N_a

L'ensemble des vecteurs d'incertitudes ($nablas$) qui affectent la fiabilité de détermination d'un point variable est représenté par son rectangle de fiabilité plus communément appelé fiabilité externe (voir tableau paragraphe 8.2.4).

8.1.5 Recherche des fautes de mesures

Plusieurs outils permettent d'éliminer des fautes dans les mesures avec en premier lieu la possibilité de réaliser une compensation robuste pour détecter et éliminer des fautes grossières. Ensuite et en resserrant les paramètres de précision a priori par rapport au calcul à postériori, le logiciel signale les erreurs résiduelles normées appelées W_i .

W_i correspond au rapport de l'erreur résiduelle sur son erreur moyenne :

$$W_i = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{Q_{vv}^{(ii)}}} = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}}$$

v_i erreur résiduelle sur une mesure, σ_{v_i} erreur moyenne de l'erreur résiduelle, $Q_{vv}^{(ii)}$ matrice des variances-covariances des erreurs résiduelles.

W_i max est choisi entre 2,5 et 3,5 à l'identique d'un intervalle de confiance pour une distribution normale. Le logiciel fonctionne par calculs itératifs, à la suite d'une correction le calcul est relancé, l'impact de la correction est vérifiée et ainsi de suite. Pour une campagne de mesures comportant très peu de fautes, il est nécessaire de réaliser au moins une dizaine d'itérations pour obtenir un résultat satisfaisant.

8.1.6 Ajustement libre

Dans une première étape de traitement des mesures, le réseau d'observations est laissé complètement libre afin de pouvoir analyser la qualité des mesures avec les relations d'observations qui les lient entre elles sans contraintes extérieures. L'ajustement est rendu libre soit en laissant flotter les points fixes avec un certain degré de liberté soit en fixant un seul point et une orientation.

Les calculs d'ajustements sont menés jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant, le fichier de l'ajustement libre détaillé est conservé, il contient les indicateurs de précision et de fiabilité intrinsèques de la campagne des observations.

8.1.7 Ajustement contraint

Pour réaliser des comparaisons par rapport à un état antérieur et par rapport à l'origine, il est indispensable de bloquer le calcul sur le même référentiel de comparaison.

Cette étape du traitement est atteinte en bloquant le calcul sur les points fixes du site. Comme on l'a déjà vu, si le site est particulièrement instable on se rattache à des points GPS de haute précision choisis dans la zone stable la plus proche de l'Ouvrage à contrôler. Dans ce cas les mesures GPS sont intégrées aux autres mesures pour un traitement global qui à l'intérêt de renforcer la fiabilité générale des observations.

Durant cette étape le calcul fait généralement apparaître des tiraillements dans les résultats provenant de points supposés fixes mais qui, en fait, bougent. La surabondance de points fixes permet de déclarer ces points variables et de relancer le calcul en s'appuyant sur les références s'avérant stables.

L'exercice est délicat et demande une très bonne maîtrise des mesures de déplacements. Un compromis doit être trouvé entre le relâchement des contraintes et l'effet sur les mouvements de l'Ouvrage qui risquent d'être légèrement biaisés du fait de ce relâchement. Une bonne connaissance de l'historique du réseau et le suivi rigoureux des mouvements des points de référence permet de connaître les tendances générales du site et de savoir quels points bougent véritablement. N'oublions pas que les références subissent aussi des mouvements cycliques dus essentiellement aux variations de températures, d'ensoleillement et de pression hydrostatique dans le terrain.

8.2 Analyse des résultats des calculs LTOP (cas concret du barrage de la Rouvière)

8.2.1 Schéma du réseau d'observations

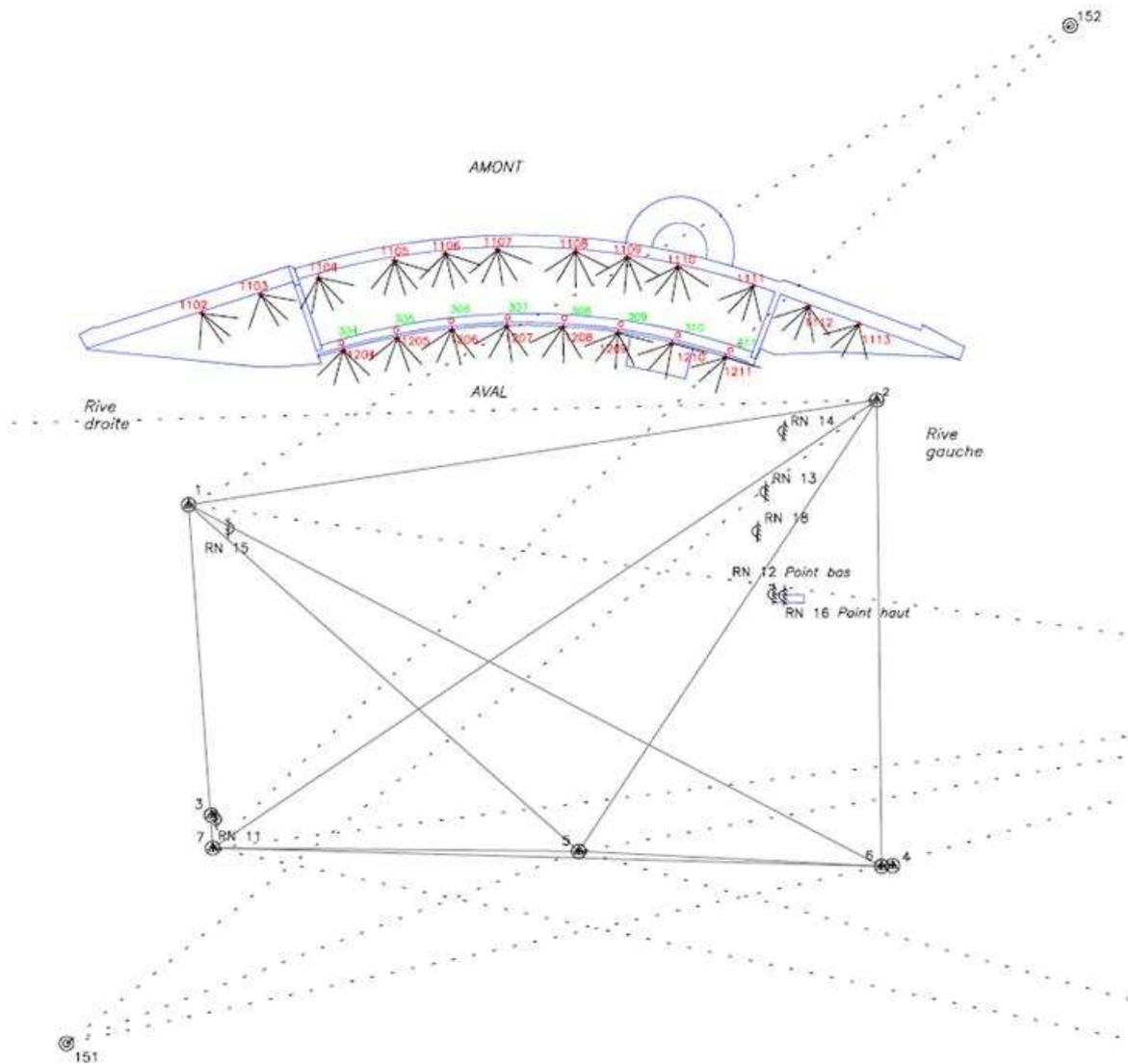


Figure 5 : Schéma des visées du barrage de la Rouvière (cocardes, piliers et points de référence)



Figure 6 : barrage de la Rouvière pendant la submersion de septembre 2002, Bressand [2002]

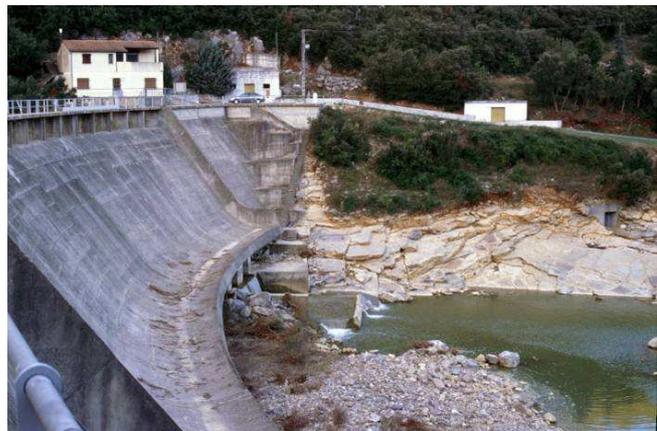


Figure 7 : barrage de la Rouvière après la submersion de septembre 2002, Hyp-Arc [2002]

8.2.2 Tests généraux

La page d'entête du fichier de traitement LTOP comporte des informations générales importantes. L'indicateur général $Q > / < Q^{\wedge} =$ fournit une information sur la bonne convergence des calculs ; en pratique on considère que le calcul est correct si l'indicateur est $>$ à 20%. Ce tableau fournit aussi des indications sur les redondances de mesures, les précisions moyennes au km, ci-dessous $\pm 1,3\text{mm}$ pour les distances et $\pm 3,5\text{cc}$ pour les angles soit une incertitude de $\pm 5\text{mm}$ au km

BARRAGE DE LA ROUVIERE - Janvier 2012
POINTS FIXES 1-2-6-7-151-152-153-156

	PLANIM.	ALTIM.	
QUOT. ERR.MOY. TOTAL:			NOM DES FICHIERS:
SANS ARRONDI (Q^{\wedge})	1.05	INDET.	-----
CONTROLE FINAL	1.05	INDET.	COMMANDE: K10935g.dat
PROBABIL. QUE $Q > / < Q^{\wedge}$:	25.1%	INDET.	COORDONNEES: K10935g.KOO
NOMBRE D'OBSERVATIONS	140	0	OBSERVATIONS: K10935g.MES
NOMBRE D'INCONNUES	49	0	
NB. D'OBS. SURABOND.	91	0	OUTPUT RES.: K10935g.PRN
NB. DECIM. SIGNIFICAT.	3.3	6.6	COORD.COMP.: K10935g.RES
E. M. MAX. DES COORD.	3.7 MM	INDET MM	INPUT PLOT:
NB. D'ITERATIONS (MAX)	1 (2)	0 (2)	MATRICE A: (PAS PREVUE)
CORR. MAX. DERN. IT.	5.6 MM	0.0 MM	
LIMITE D'INTERRUPT.	20.0 MM	20.0 MM	OPERATEUR: pjesse
VAL. LIM. COMP. ROB.	PAS ROB.	PAS ROB.	
DUREE DU CALCUL	0.1 SEC.	(CPU)	
Y,X,H APRES ARRONDI	4 DEC.		
NB. DE STATIONS	15		
NB. D'OBS.(LIGNES)	260		

ERREURS MOYENNES DES GROUPES D'OBSERV.:			GR	NBR	A PRIORI	FINALES	QUOT.	REDOND.			
DISTANCES (EM POUR 1KM):											
CORR.ECH.EN PPM		CORR.ADIT.EN MM									
ECH	CORR	EM	ADIT	CORR	EM						
1	0.00	DONNE				3	20	1.0 MM	1.3 MM	1.29	19.303
DIRECTIONS (EM:1KM):						3	120	3.5 CC	3.4 CC	0.97	71.697

8.2.3 Tableau des accroissements et ellipses d'erreurs moyennes

Ce tableau fournit pour tous les points variables, par exemple les cocardes d'auscultation du barrage, les accroissements de coordonnées DX et DY par rapport aux coordonnées origines et la taille de l'ellipse d'erreur moyenne ou incertitude. EMA correspond à la longueur du demi grand axe, EMB celle du demi petit axe et GISA l'orientation du grand axe.

COORD. ET ALT. ,PTS VARIABLES AVEC ACCROISSEMENTS ET ELLIPSES D' ERREUR MOYENNES											PAYS : CH	

POINT	TYPE	Y	X	H	DY	DX	DH	EMA	EMB	GISA	EMH	ELEM.MES.
		M	M	M	MM	MM	MM	MM	MM	G	MM	PLAN. ALT.
LOCAL		0.0000	0.0000	0.0000								0 0
5		109.5098	408.7878	7.3290	-0.8	0.1		0.18	0.14	97.3		38 30
1102		46.2279	499.7419	0.0000	-0.3	-0.2		0.55	0.22	-1.4		4 4
1103		56.0522	502.9370	0.0000	-0.8	0.5		0.48	0.24	14.9		4 4
1104		65.7662	505.8293	0.0000	-0.9	-0.5		0.44	0.26	24.0		5 5
1105		78.5646	508.6408	0.0000	-1.5	0.2		0.40	0.29	35.0		5 5
1106		87.1696	509.9085	0.0000	-1.9	0.0		0.38	0.32	43.3		5

8.2.4 Tableau des fiabilités externes

Ce tableau fournit entre autre les éléments du rectangle de fiabilité qui représente la taille de la plus grosse faute qui pourrait être commise sur la détermination d'un point variable sans que l'on s'en aperçoive. NA correspond à la taille du demi grand coté du rectangle, NB à celle du demi petit coté et GIS(NA) à l'orientation du grand coté.

FIABILITE EXTERNE ET ELLIPSES D'ERREUR MOYENNE A PRIORI

POINT	TYPE TC	NA	NB	GIS(NA)	NH	NO.A	NO.B	NO.H	DY	DX	DH	EMA	EMB	GISA
		MM	MM	G	MM				MM	MM	MM	MM	MM	G
5		0.43	0.32	35.79		61	62		-0.8	0.1		0.17	0.13	97.31
1102		5.03	2.32	132.55		7	121		-0.3	-0.2		0.52	0.21	-1.38
1103		4.54	1.99	137.35		8	122		-0.8	0.5		0.46	0.23	14.91
1104		2.26	1.70	149.82		9	123		-0.9	-0.5		0.42	0.25	23.99
1105		2.06	1.69	153.42		10	124		-1.5	0.2		0.39	0.28	34.99
1106		1.93	1.74	27.53		125	11		-1.9	0.0		0.37	0.30	43.33
1107		2.02	1.60	28.53		126	12		-1.6	0.7		0.35	0.32	65.57
	1108		2.21	1.40	29.68			127	13				0.35	0.30 -

8.2.5 Vecteurs de déplacements, ellipses de précision et rectangles de fiabilité

Voir page suivante.

8.2.6 Synthèse des résultats

Le barrage de la Rouvière a subi de très fortes sollicitations en septembre 2002 lors d'une crue dont la période de retour a été estimée à environ 1000 ans. Deux des piliers d'observations ont été emportés par la crue. Malgré ce grave incident, un contrôle d'urgence a pu être mené à bien sans perte de qualité des résultats ; de nouveaux piliers ont été construits par la suite.

Les extraits du dernier contrôle montrent que la précision de détermination des positions des cocardes reste $\pm 0,5\text{mm}$ et la fiabilité $\pm 3\text{mm}$ sauf pour quatre points près des rives comportant des visées plus en sifflet. Les résultats rentrent bien dans les exigences du Conseil Général du Gard qui demande une précision inférieure au mm.

Les cahiers des charges, très stricts, des marchés publics d'auscultation topométrique des six barrages écrêteurs de crues du Gard ont permis d'assurer une très bonne continuité des résultats depuis de nombreuses années. Notre démarche continue d'amélioration globale de la qualité, tant au niveau de la formation de nos ingénieurs qu'au niveau des développements de logiciels métiers et de l'acquisition d'instruments les plus précis, rend notre méthode efficace et compétitive. Par exemple une campagne complète d'auscultation du barrage de la Rouvière revient à 2200€ H.T. hors frais de déplacements et d'hébergement.

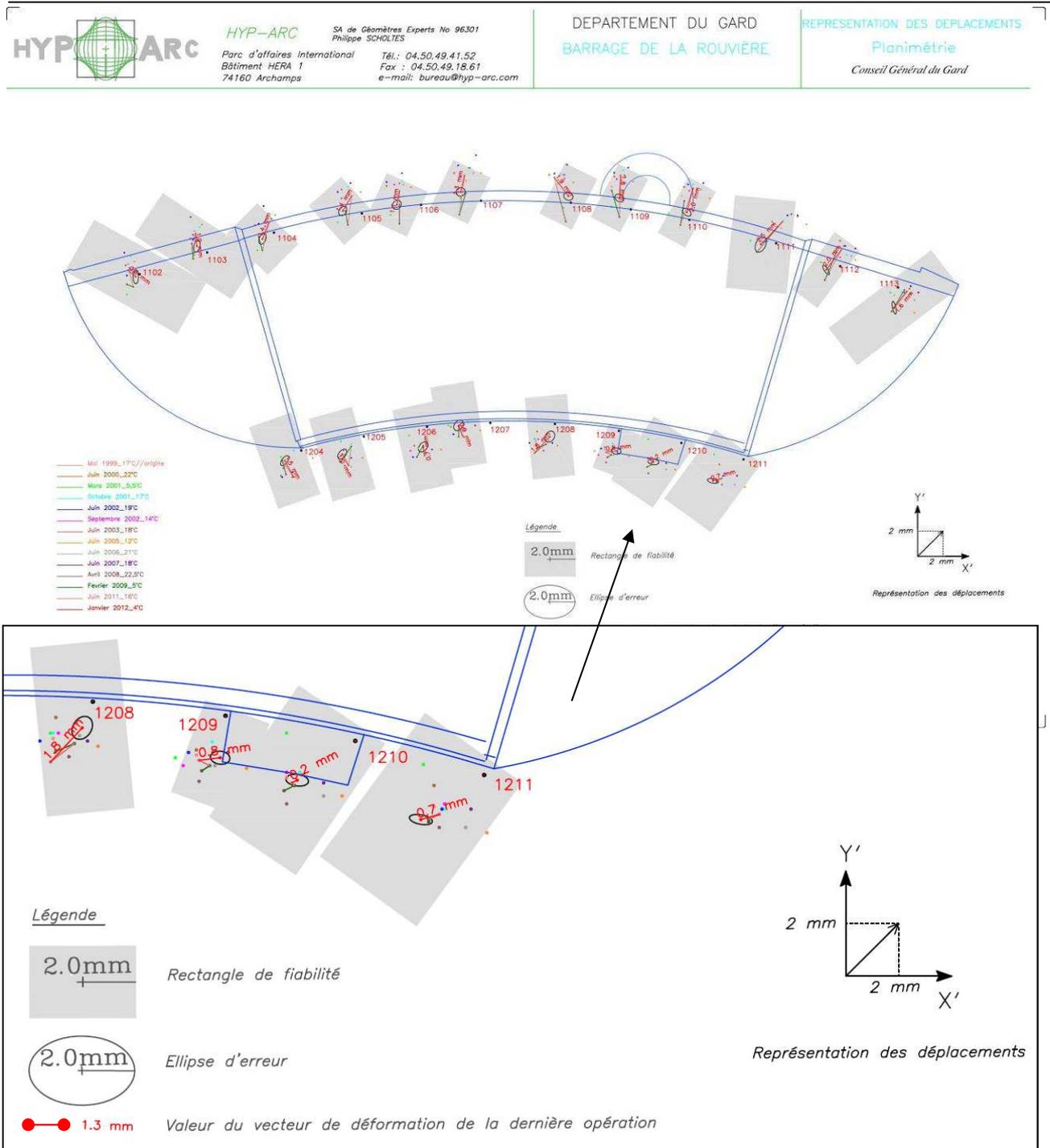


Figure 8 : Barrage de la Rouvière, représentation des déplacements planimétriques

9. BARRAGE DES TOULES – SURVEILLANCE GEODESIQUE DURANT LES TRAVAUX DE CONFORTEMENT

9.1 Confortement

Depuis le printemps 2008, le barrage des Toules fait l'objet d'importants travaux de confortement dans l'objectif de renforcer l'assise de la voûte sur les flancs de la vallée, d'améliorer la résistance du rocher de fondation en rive gauche, d'augmenter la sécurité du barrage contre les crues extrêmes et d'adapter ce dernier aux exigences sismiques actuelles. Les mesures constructives liées au confortement se résument essentiellement à l'épaississement des deux murs d'aile sous la forme d'épaulements aval en béton sur la rive gauche et sur la rive droite. La partie du rocher de fondation de mauvaise qualité en rive gauche sous les plots 5, 6 et 7 a été excavée puis remplacée par du béton sain.

Un parapet d'environ 1 m a été construit sur le côté amont du couronnement et neuf colonnes de cisaillement ont été ajoutées de manière centrée dans les joints à partir du couronnement dans le but respectif d'augmenter la sécurité de l'ouvrage contre les crues et les séismes. De nombreuses injections dans le massif rocheux directement sous les fondations ont été réalisées afin d'obturer les fissures présentes, d'augmenter la résistance ainsi que de diminuer la perméabilité du massif rocheux dans le but d'assurer un bon contact béton-rocher. Finalement, des forages de drainage ont été réalisés afin de contrer d'éventuelles sous-pressions susceptibles de se produire suite à la nouvelle configuration de l'ouvrage.

Le suivi du comportement de l'ouvrage a également été renforcé par la mise en place d'un système d'auscultation impliquant notamment l'installation additionnelle de quatre pendules directs et un pendule inversé. Préalablement, du début des travaux et jusqu'à la fin de ceux-ci en mai 2011, le barrage des Toules a fait l'objet d'un contrôle renforcé, contrôle qui s'est prolongé durant la phase de remise en eau correspondant à l'exercice 2011-2012.



Figure 9 : Barrage des Toules, Alpiq

9.2 Contexte

Durant les travaux de confortement du barrage des Toules, tout ou partie du réseau géodésique de surveillance utilisé avant le confortement a été détruit. Ainsi, afin de maintenir une surveillance optimale durant le chantier, un réseau réduit géodésique a été mis en place. Les mesures mensuelles de surveillance, durant ces 3 ans de chantier, ont été réalisées en une journée et en toute saison.

Au vu de la configuration du réseau existant, il n'était pas réaliste de faire des mesures sur cibles depuis trois stations et de garantir la fiabilité et la précision des résultats. En effet, certaines cibles n'auraient été visées que deux fois, donc sans surabondances. Il a ainsi été décidé d'équiper le barrage de prismes, afin d'augmenter le nombre de déterminations sur chaque point et de garantir les résultats. Avec deux visées indépendantes on obtient quatre mesures planimétriques (2 angles horizontaux, 2 distances) soit 2 surabondances. Pour une surabondance équivalente il faudrait viser chaque cocarde depuis quatre stations bien distribuées.



Figure 10 : Pilier 3 en été, Alpiq

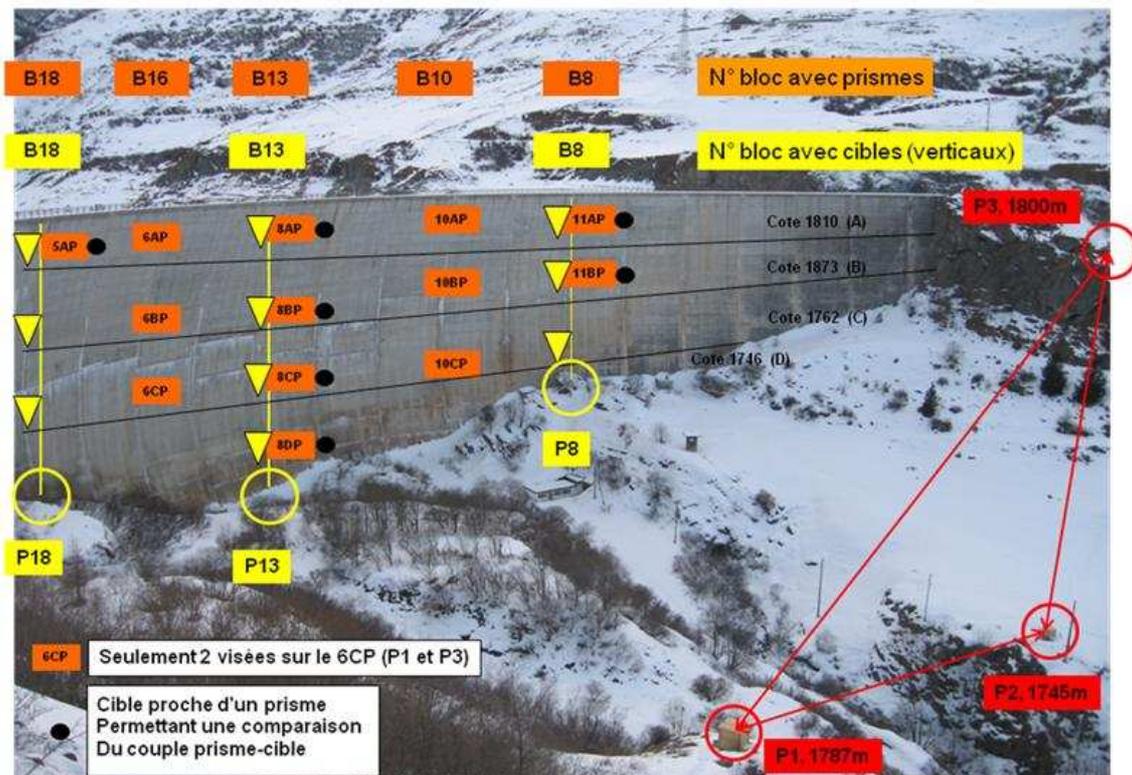


Figure 11 : Pilier 3 en hiver, Alpiq



Figure 12 : Prisme 360°, cible (réseau+pendule optique), Alpiq

Avec le retour d'expérience et la maîtrise acquise pour les mesures des distances en utilisant des tachéomètres de haute précision et des prismes étalonnés, la précision des mesures de distances est équivalente à celle des angles sur des courtes distances comprises entre 50 et 500m ; au-delà, les phénomènes météo peuvent créer plus de distorsions pour les mesures de distances.



9.3 Phase de validation

De février 2007 à janvier 2008, avant le début des travaux, des mesures simultanées ont été faites sur des couples cible-prisme. 18 états ont permis de valider le système de mesures sur prismes qui allait remplacer les cibles sur le parement. Ce système a permis également de palier l'absence de deux piliers (sur trois) servant aux mesures verticales (pendule optique). En effet, ces deux piliers se trouvaient dans l'emprise des épaulements en béton sur la rive gauche et sur la rive droite.



Figure 14 : Pendule optique par visées verticales, Alpiq

Les résultats obtenus ont montré une très bonne cohérence entre les couples cible-prisme et ont permis de diminuer l'ellipse d'erreur, par rapport aux mesures uniquement des cibles, en rajoutant les mesures de distance.

9.4 Surveillance mensuelle

Le réseau « réduit » sur prismes a été mesuré chaque mois, simultanément avec les mesures ordinaires internes du barrage. Les calculs de compensation ont été réalisés simultanément dans LTOP et dans Trinet+ (Logiciel de compensation 3D).

Représentation 3D – TRINET +

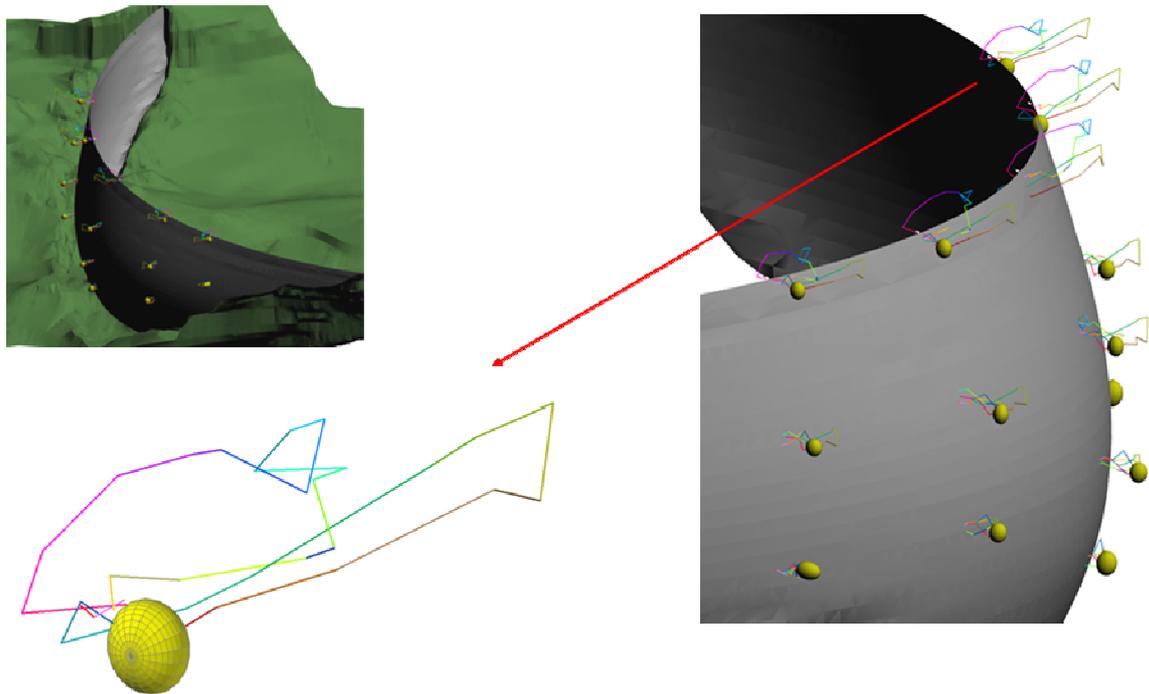


Figure 7 : Ellipsoïdes de confiance sur les déplacements à 95%

9.5 Etat complet

Un état complet en 2007 et un état étendu en 2009, ont permis de vérifier les hypothèses, dont notamment la stabilité des 3 piliers de référence des états réduits (P1, P2, P3).

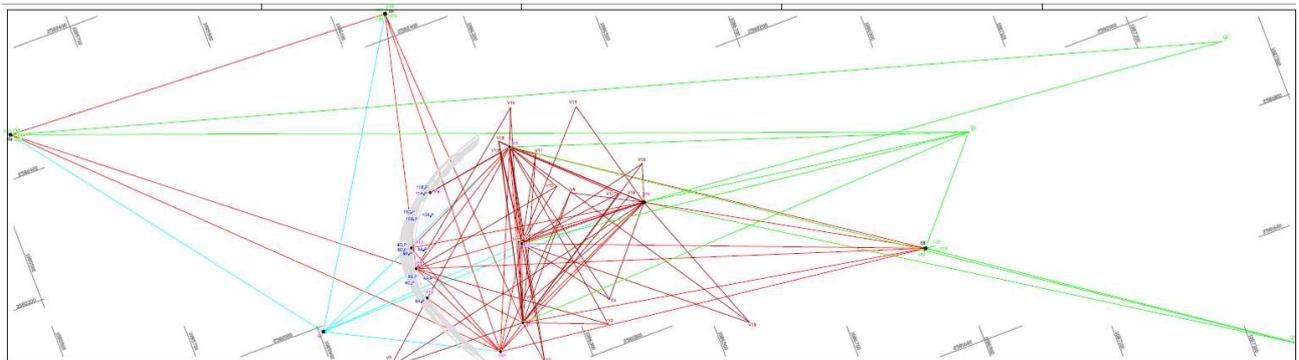


Figure 15 : Schéma des visées

Pour la phase de remise en eau jusqu'au niveau maximum de la retenue (1810.00 m s.m.) et afin de lever la restriction d'exploitation (1800.00 m s.m.) imposée par l'Office Fédéral de l'Energie à l'issue de l'examen de l'aptitude au service du barrage, il a été procédé à l'état complet de référence du barrage consolidé (lac vide), à un état à lac plein (septembre 2011) et un état à lac abaissé (avril 2012).

CONCLUSION

L'auscultation topométrique d'Ouvrages d'Art, mise en œuvre avec la rigueur indispensable et les moyens de calculs modernes, permet de fournir des mesures de déplacements fiables et comparables d'une campagne de contrôle à une autre. Cette méthode de mesure, bien que moins précise que d'autres types de mesures, par exemple les déplacements de pendules, possède le grand avantage de fournir des mesures de mouvements généraux de l'ouvrage et même du site si ce dernier est instrumenté. De plus l'auscultation topométrique fournit des mouvements en 3D très appréciables pour appréhender l'interaction des mouvements sur des ouvrages de génie civil complexes.

L'apport récent de mesures de distances de hautes précisions permet d'améliorer nettement la fiabilité des résultats tout en diminuant les stations d'observations et de ce fait augmente l'efficacité des travaux.

L'application de la méthodologie des mesures d'angles et de distances et du traitement en 3D pour le barrage des Toules a permis de mettre en évidence les effets du confortement. L'analyse des résultats en corrélation avec le dispositif d'auscultation interne du barrage se poursuit actuellement.