

# Superposition précise des canevas successifs d'auscultation des grands ouvrages

---

par Pierre DE FONTGUYON

Pour mesurer les déplacements en XYZ des repères d'auscultation des grands ouvrages, les géodésiens et les ingénieurs topographes chargés de ces travaux ont à résoudre le problème de la superposition précise des canevas successifs.

Cette question a fait l'objet d'un intéressant rapport établi par le regretté géodésien, M. NEVIÈRE, ingénieur-conseil EDF, Comité d'Auscultation des grands barrages EDF. Ce rapport est intitulé "Calcul périodique des réseaux géodésiques instables".

Il s'agit, bien sûr, du calcul périodique par la méthode des moindres carrés.

Soyons lui en reconnaissants, ainsi qu'à ceux, tel LAGRANGE, qui mit au point la méthode qui porte son nom, à ceux qui l'enseignent, enfin à ceux qui en tirent la quintessence, par des programmes pour ordinateur de plus en plus performants, tel M. LEVALLOIS. Grâce à eux tous, une véritable mutation s'est produite. Il n'y a plus de problème de calcul périodique des réseaux géodésiques instables.

En effet, les canevas successifs peuvent être actuellement calculés très rapidement, en y introduisant toutes les données surabondantes qui assurent la rigidité du canevas, et en toute sécurité, même si des fautes se sont glissées parmi elles. Les coordonnées sont obtenues, accompagnées d'une surabondance de renseignements : précision des mesures et précision des résultats, gisements, distances, dénivelées, et, même, si on le désire, les résidus correspondant à chaque résultat.

Le seul problème qu'il faut résoudre, parfois péniblement, c'est celui de la superposition du nouveau canevas au canevas de référence, avec une précision indiscutable, et comparable si possible à la précision intrinsèque des canevas. Cette dernière est souvent telle, que rares sont les stations dont la minime instabilité n'est pas du même ordre.

La superposition n'est bien assurée que si elle résulte d'une multiplicité de concordances.

C'est pourquoi, en complément des stations, en général sur piliers, des repèlements sont rattachés à ces stations. Et même des repères scellés, que l'on espère stables, jusqu'à preuve du contraire, sont intersectés en plus de ceux destinés à l'auscultation de l'ouvrage. Dans ce bref exposé je ne m'occuperai que de la planimétrie.

La superposition de deux canevas est assurée en X et Y lorsque 1) l'Orientaion, 2) l'Échelle et 3) l'Origine des coordonnées sont identiques compte tenu de l'imprécision, malgré les déplacements inconnus des stations.

## 1) L'ORIENTATION

Chaque fois que cela est possible, l'orientation est assurée par des visées lointaines depuis plusieurs stations. Dans le cas contraire, il ne reste plus qu'à s'orienter sur les astres ou sur les côtés stables du canevas de référence... Dans tous les cas, il convient de faire sur le terrain, le calcul des gisements des côtés, et c'est souvent facile, car le nombre de stations est limité, et il ne manque que peu de visées réciproques, ce qui rend possible ce calcul, sans machine, par la méthode des moindres carrés, avec un système simplifié d'équations linéaires résoluble à une constante près.

Les gisements ainsi obtenus sont tous comparés aux gisements de référence. Si tout était parfait, mesures et stabilité, ils en diffèreraient d'une constante.

L'expérience des canevas antérieurs observés dans les mêmes conditions nous procure la valeur de la précision probable. On sait à quoi on doit s'attendre comme dispersion, si la stabilité était parfaite. Les côtés instables seront donc décelés d'abord, et les stations instables seront éliminées dès la détermination de l'orientation.

Enfin si une faute s'est glissée dans les lectures inscrites, il est encore temps d'y remédier, que ce soit une faute de l'observateur ou une faute de secrétaire. Une telle détermination de l'orientation pourrait

évidemment être programmée pour être calculée par l'ordinateur, mais, le plus souvent, il est intéressant de la calculer sur place, pour pouvoir donner quelques résultats avant de quitter le site.

## 2) L'ÉCHELLE

Actuellement, la solution la plus classique est de mesurer un ou deux côtés au fil invar. Si les côtés sont longs les mesures électroniques deviennent de plus en plus concurrentielles. On peut parfois mesurer, plus facilement, une ou deux distances entre une station et un repère intersecté, ou même la distance entre deux repères intersectés situés de façon plus facile à mesurer. On a du reste intérêt à équiper le parcours, choisi comme base, de points intermédiaires permanents, évitant de recommencer l'alignement et la mise en station de trépieds.

Permettez-moi, à cette occasion de vous proposer l'utilisation de fils à flotteur, ancrés momentanément aux repères scellés comme points intermédiaires, pour en remonter les verticales, et mesurer horizontalement. Pour que le parcours choisi le permette facilement il ne doit pas y avoir de dénivelées de plus de 60 cm entre points intermédiaires. Mais on s'abstient parfois de mesure de base, surtout, si par chance assez rare, la longueur d'un côté est restée constante à l'occasion des mesures antérieures dans les mêmes conditions.

Dans ce cas, pour vérifier ou rétablir l'échelle, il convient de faire un premier calcul par ordinateur pour pouvoir comparer aux précédentes les nouvelles longueurs des côtés entre stations et aussi les distances entre repèrtements et autres repères intersectés et stations.

Évidemment les piliers instables pour l'orientation sont aussi instables pour la mise en échelle. Il est bon d'établir sur un calque les déplacements des stations et repères espérés stables pour visualiser le défaut d'échelle éventuel. Il y a souvent hésitation pour décider de l'élimination d'une distance légèrement instable qui semble discordante, et ce sera peut-être une donnée d'un autre genre qui fera prendre la décision. Nous en parlerons plus loin, mais c'est pourquoi je crois préférable de ne pas charger l'ordinateur de faire la mise à l'échelle sans contrôle humain.

## 3) ORIGINE DES COORDONNÉES

Après mise à l'échelle, un deuxième calcul à l'ordinateur est fait, en essayant de garder fixe le point semblant le plus stable, d'après le calcul et le graphique précédents.

Après ce 2<sup>e</sup> calcul, il sera bon de faire sur le calque un nouveau graphique des déplacements apparents des stations et repères quasi stables. Il se peut qu'en translatant le calque sans procurer de déplacement supérieur à l'imprécision calculée par l'ordinateur, on soit amené à trouver une position occasionnant des déplacements moindres de la plupart des stations quasi stables, mais un déplacement possible du point gardé fixe, point qui n'a pas le privilège d'être déterminé sans aucune imprécision dans les 2 canevas à superposer. On pourrait aussi charger l'ordinateur de faire cette petite translation, mais je crois préférable le contrôle humain, même si finalement il est d'accord avec l'ordinateur.

Je dois vous l'avouer. Je ne crois pas au point fixe, sur pilier, à partir du moment où la précision des résultats du calcul est de l'ordre de 1/3 de mm, précision obtenue malgré les imprécisions angulaires et les petits mouvements diurnes des piliers. Il s'agit bien sûr de côtés relativement courts et de mesures angulaires avec une précision de l'ordre de 1 décimilligrade et demi.

Dieu m'a permis de participer pendant 25 ans à quelques auscultations de barrages, mais en particulier à celle d'un barrage que je connais particulièrement bien pour avoir pris part à son implantation, et plus tard (en 1945) à son canevas d'auscultation. Il s'agit du barrage du Chabet el Akra sur l'Oued AGRIOUN, à l'entrée amont des Gorges de KHERRATA, en Algérie. C'est un barrage voûte de cinquante mètres de rayon et d'une petite trentaine de mètres de haut.

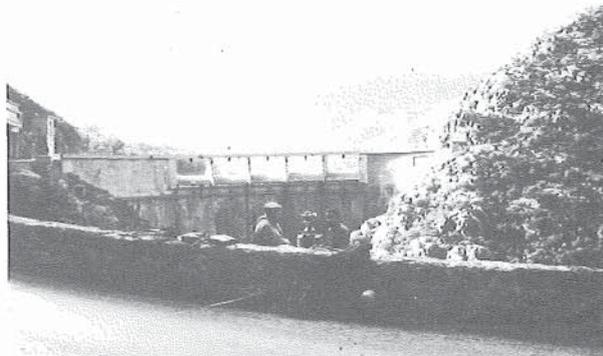
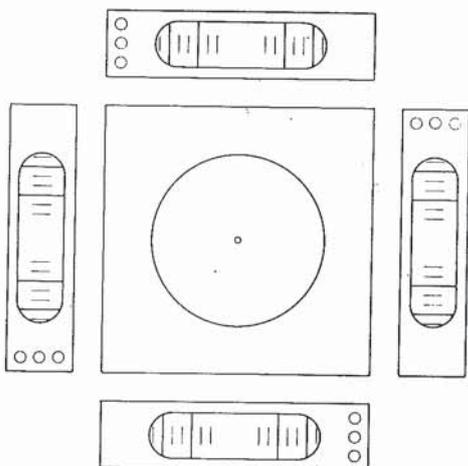


Fig. 1 Barrage du Chabet el Akra dans les gorges de Kherrata.

Je remercie la S.F.S, dont j'ai fait partie de 1929 à 1971, de m'avoir bien aimablement communiqué ses dossiers d'auscultation de ce barrage, et de celui d'ERRAGUENE, et laissé photocopier les documents intéressants mon exposé. C'est ainsi que j'ai relevé les mesures d'inclinaison des plaques métalliques scellées au sommet des 6 piliers actuels du canevas du barrage de CHABET. Ces mesures sont faites depuis 1967 à chaque série d'observations, avec précision, en utilisant le cercle vertical du théodolite T 3 et sa nivelle indépendante à coïncidence. L'opérateur dispose, de plus, d'une nivelle spéciale dont l'embase rectangulaire est munie d'un petit axe vertical qui permet de la centrer à la place du théodolite. Cette nivelle ainsi centrée sert à rechercher l'orientation de l'horizontale de la plaque (car rares sont les plaques rigoureusement horizontales), en opérant d'abord dans une position de la nivelle, puis en lui faisant faire un demi-tour. Si la plaque est bien usinée, la direction de l'horizontale est celle de la bissectrice des traits de crayon tracés contre l'embase de la nivelle dans les 2 positions. Le sens montant de la ligne de plus grande pente est indiqué en marquant le point haut au crayon sur la plaque. Le théodolite est posé sur la plaque, l'embase centrée, mais en gardant la possibilité de la faire tourner. La lunette en position C.G est dirigée vers le point haut. Cette direction est repérée par rapport à l'environnement, avec le viseur à cran de mire. La nivelle indépendante est amenée à la coïncidence des 2 demi-images de la bulle, par action sur la vis de réglage. En agissant sur la vis de fin pointé de la lunette on amène la lecture du cercle vertical à 100,000. L'embase du théodolite est tour-

Triangulation d \_\_\_\_\_  
 Date : \_\_\_\_\_  
 Opérateur : \_\_\_\_\_  
 Théodolite : \_\_\_\_\_ **INCLINAISON**  
 Nivelles n° \_\_\_\_\_ **DU DISQUE DU PILIER**



Gis<sup>t</sup> du point haut : \_\_\_\_\_ gr (en direction de \_\_\_\_\_)  
 Gis<sup>t</sup> de l'horizontale : \_\_\_\_\_ gr (en direction de \_\_\_\_\_)  
 MESURE DE LA PLUS GRANDE PENTE  
 lect. CG, après demi-tour de l'étoile : \_\_\_\_\_ Lunette dirigée vers le point haut pour chacun des deux  
 lect. CD, après 2<sup>e</sup> demi-tour : \_\_\_\_\_ bulgées référence CG et CD  
 angle de plus grande pente : \_\_\_\_\_ (ne pas diviser par 2 pour T.3)

Composante amont aval : CG \_\_\_\_\_ Lunette vers amont à l'origine  
 CD \_\_\_\_\_  
 Composante RG RD : CG \_\_\_\_\_ Lunette vers RG à l'origine  
 CD \_\_\_\_\_

Indiquer le gisement 0 les 4 positions de la bulle les 3 vis de scellement l'ouverture, le point haut, l'horizontale moyenne. Opérer : pier resté à l'ombre, nivelle abritée du vent.

Fig. 2 Imprimé pour la mesure de l'inclinaison du disque du pilier.

Fig. 3 Tableau des différences de coordonnées entre repèrtements et piliers. Variations saisonnières moyennes.

née de 200 grades, avec précaution, sans toucher aux vis calantes, ni à la lunette. Après ce demi-tour, le cercle vertical indique toujours 100,0000, mais la nivelles n'est plus en coïncidence. L'opérateur l'y ramène avec sa vis de réglage et lit sur le cercle vertical la distance zénithale 99,9... et quelques, correspondant au complément de l'angle de site du point haut.

En effet, par retournement de l'embase et donc de la nivelles à coïncidence, on a fait apparaître le double du manque d'horizontalité de la plaque, mais il ne faut pas oublier que la graduation du cercle vertical du T 3 correspond à des angles divisés en 2. Pour vérifier cette mesure, l'opérateur recommence les mêmes manœuvres en position C.D. et à leur fin, il lit 100,0... et quelques, soit 100 grades de plus que l'angle de site du point haut. En général la somme des lectures CG et CD est égale à 200 grades à moins d'un milligrade. Malheureusement, si on recommence ces mesures après l'ensoleillement du pilier, les lectures sont assez différentes. Aussi, sur l'imprimé sur lequel sont relevées les lectures et un croquis de l'orientation de l'horizontale, et de la position du point haut, il est recommandé de mesurer l'inclinaison avant l'ensoleillement du pilier.

Ci-joint un tableau sur lequel sont repertoriées 10 mesures, sur chacun des 6 piliers, depuis août 1967 jusqu'en novembre 1978. En regardant les résultats, on s'aperçoit que la dispersion des mesures d'inclinaison est beaucoup plus grande pour les piliers P<sub>2ter</sub>, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> que pour P<sub>1</sub> et P<sub>5 bis</sub>. Mais si on compare les mesures faites à peu près à la même saison, août-septembre ou février-mars ou novembre-décembre, la dispersion diminue beaucoup. Ce qui paraît curieux, c'est que les changements de saison ont un effet inverse sur P<sub>2ter</sub> et P<sub>3</sub> ou P<sub>4</sub>. L'explication est simple le point haut du pilier P<sub>2ter</sub> est en direction de la montagne, tandis que les points hauts de P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> sont en direction du vide. Quand on passe de août-

## BARRAGE DU CHABET

### INCLINAISONS DES PLAQUES DES STATIONS SUR PILIERS

La première ligne indique les gisements des points hauts des plaques - en grades  
 La deuxième ligne indique les angles de site en grades à diverses époques.

		Août 1967	Déc. 1967	Sept. 1968	Mars 1969	Sept. 1969	Février 1970	Août 1970	Mars 1971	Mars 1972	Nov. 1978	Différence moyenne février-mars août-sept.
Point Haut vers le versant	P 1	66 0,0813	74 0,0867	64 0,0789	61 0,0880	72 0,0930	61 0,0941	68 0,0854	66 0,0848	60 0,0797	55 0,0833	non significatif + 0,0020
Plaque presque horizontale Point Haut vers le versant	P 2ter	- 0,00	- 0,00	21 0,0026	361 0,0207	368 0,0089	344 0,0204	324 0,0163	359 0,0277	355 0,0220	350 0,0253	+ 0,0157
Point haut vers le vide	P 3	216 0,1641		217 0,1571	222 0,1335	217 0,1447	223 0,1277	216 0,1542	219 0,1214	218 0,1407	197 0,1277	- 0,0242
Point haut vers le vide	P 4	339 0,1075	337 0,1025	342 0,1008	350 0,0939	344 0,0948	353 0,0875	343 0,0905	354 0,0892	357 0,0708	360 0,0912	- 0,0131
Plaque presque horizont.	P 5 bis	9 0,0075	0,00	315 0,0100	310 0,0102	379 0,0106	291 0,0110	398 0,0020	283 0,0066	322 0,0097	26 0,0115	non significatif - 0,0018
Point haut vers l'amont en général Plaque presque horizontale	P 6	0,00	252 0,0115	203 0,0082	234 0,0068	261 0,0092	226 0,0103	229 0,0066	253 0,0105	265 0,0093	373 0,0113	non significatif. - 0,0032 (4) ou + 0,0012 (3)

Au printemps les 3 piliers dont la variation d'inclinaison de la plaque est significative s'inclinent un peu vers le vide. Mais où est le centre de rotation ?

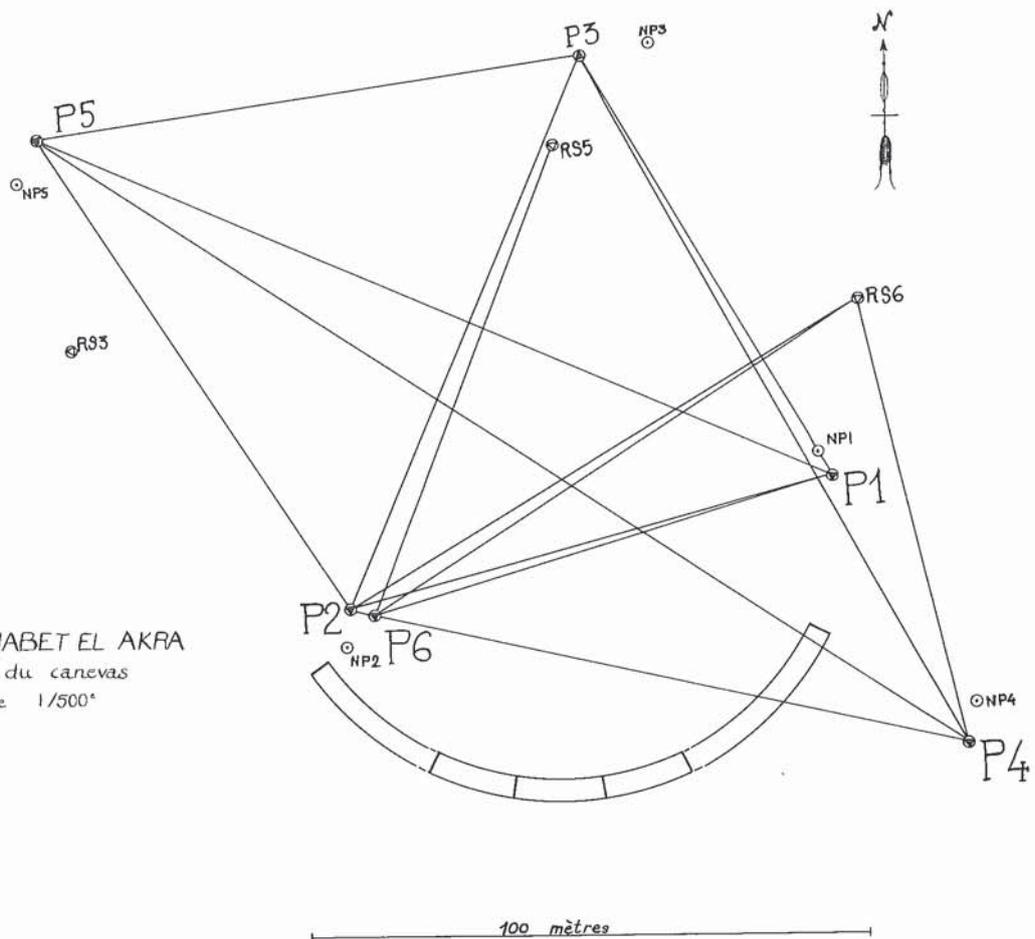


Fig. 4 Barrage du CHABET EL AKRA  
Schéma du canevas  
Echelle 1/500<sup>e</sup>

P (Pilier d'observation)  
NP (Repère des stations)  
RS (Repère de référence)

septembre à février-mars, il y a pour P<sub>2</sub><sup>ter</sup> une augmentation de l'inclinaison de 157 décimilligrades en moyenne, et de ce fait P<sub>2</sub><sup>ter</sup> s'incline vers le vide. Tandis que pour P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> il y a une diminution de l'inclinaison, en moyenne de - 242 décimilligrades pour P<sub>3</sub>, et de - 131 décimilligrades pour P<sub>4</sub>, et, de ce fait, P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub> s'inclinent aussi vers le vide au printemps.

Mais quel est le déplacement en plan ?

Il se trouve que le repèrement NP3 du pilier P3 est à peu près à l'est de ce pilier, et que le vide est à peu près au sud de P3. Si nous relevons dans les dossiers originaux les gisements P3-NP3, nous constatons une concordance remarquable des gisements mesurés en août étant donné la distance de 12,312 m avec une valeur moyenne 88<sup>o</sup>,6748, et aussi une concordance en mars, mais avec une valeur moyenne 88<sup>o</sup>,6691, soit 57 décimillig de moins, ce qui correspond à un mouvement vers le vide de 1,1 mm du pilier par rapport à son repèrement, scellé au pied du rocher de l'autre côté de la route.

Le sens de ce déplacement m'a étonné.

Le sens inverse m'aurait paru plus naturel. En effet, en août la falaise au haut de laquelle est situé le pilier P3 est ensoleillée une grande partie du jour, car elle est orientée à peu près Est-Ouest. Le rocher est fortement chauffé et doit donc se dilater, et le pilier P3 doit aller vers le vide. C'est, du reste, ce qui se passe tous les après-midi ensoleillés. La preuve de ce mouvement diurne existe dans le dossier sans qu'elle ait été recherchée. En effet le tour d'horizon en P3 commencé par M. MASSON le 30 août 1967 à 6 h 15

a dû être arrêté à 8 h 35, sans doute à cause du contre-jour ensoleillé. La reprise, providentielle, oserai-je dire, a été faite par M. MASSON l'après-midi du 1<sup>er</sup> septembre de 16 h à 17 h 45, en visant à nouveau à 4 pointés au T3, les piliers P1 et P5 bis, entre autres, pour assurer le raccordement des observations.

Eh bien ! le matin l'angle P1 P3 P5 bis est de 125<sup>o</sup>,0830<sub>3</sub> et l'après-midi du surlendemain, il est de 125,0841<sub>0</sub> sans que la vérification des originaux fasse déceler de faute. Soit 1 milligrade 1 de différence.

Admettons qu'on n'a pas eu de chance avec les imprécisions des mesures, alors que l'erreur moyenne quadratique des dossiers est de moins de 2 décimilligrades. Il reste tout de même une augmentation sensible de l'angle en P3 dans un triangle qui ferme bien, du reste, en prenant pour angle en P3 la moyenne des 2 mesures discordantes. Le pilier P3 se rapproche donc de la corde du segment capable, et va vers le vide sous l'effet de l'ensoleillement.

Il aurait été très intéressant d'avoir aussi, en double, les visées de P3 sur son repèrement (gisement et site), matin et après-midi, ainsi que les mesures d'inclinaison de la plaque matin et après-midi. Je propose que tout cela soit mesuré si l'occasion se présente. Il y a aussi un mouvement diurne de P3 en altitude, et cela doit être très sensible sur la dénivelée entre P3 et son repèrement proche.

Admettons que la hauteur du pilier + son soubassement est 1,60 m et que le coefficient de dilatation est 1/80.000. Comptons 25 degrés d'échauffement diurne. En dehors de l'échauffement de la falaise, on doit s'attendre à une montée de l'ordre de 5 dixième

de millimètre du sommet du pilier par rapport à son repèrement, qui, lui, est scellé au pied du rocher et ne doit donc pas bouger beaucoup. Quoi qu'il en soit, on n'a pas été sans remarquer depuis longtemps les variations saisonnières des différences de coordonnées Y et Z de P3 et de son repèrement. Il existe du reste un répertoire de ces variations, et, cette variation saisonnière en Z a atteint 2 mm, ce que ne saurait expliquer la seule dilatation du pilier :

Comment expliquer alors que cette falaise qui se dilate en Z se rétracte en Y, au mois d'août, malgré l'ensoleillement ?

Eh bien, la surface seule du rocher est sensible à l'ensoleillement, alors que la grande masse du rocher doit être sensible à une autre cause dont l'effet est inverse de façon saisonnière aussi.

En mars, les eaux de pluie de l'hiver ont du pénétrer par les diaclases dans la masse rocheuse, et la faire gonfler sur une épaisseur bien plus considérable que celle, peu épaisse, sensible aux variations thermiques.

En plan, en Y, c'est le gonflement printanier qui est prépondérant.

En Z, c'est la variation thermique qui est prépondérante en P3 sur une falaise bien ensoleillée. Que se passe-t-il pour les autres piliers ? Le rocher doit gonfler aussi au printemps. Si oui, cela doit se répercuter sur les longueurs des côtés transversaux à la vallée, tels que P1-P2 ter et P1-P6, en particulier, donc sur leurs X. Sur le répertoire de coordonnées je remarque huit séries entre août 1967 et mars 1972, dont 4 en mars et 4 en août ou début septembre, voici les différences des X de P1 et P2 ter.

Mars 1969	mars 1970	mars 1971	mars 1972
X P1-P2 ter			
85,1667	,1662	,1667	,1672

mars

X moyen 85,1664<sub>5</sub>

Août 1967	sept. 1968	août 1969	août 1970
,1678	,1674	,1671	,1675

août

X moyen 85,1674<sub>5</sub>

Effectivement la distance est plus courte en mars qu'en août de 1 mm en moyenne.

Comparons de même les distances P1-P6

X P1-P6

80,4282	,4279	,4281	,4276

mars

X moyen 80,4279<sub>5</sub>

,4291	,4290	,4289	,4292

août

X moyen 80,4290<sub>5</sub>

la distance est plus courte en mars qu'en août de 1,1 mm en moyenne.

### CONSÉQUENCE :

Si on effectue des observations en considérant les piliers P1 P2 ter et P6 (qui sont quasi stables) comme fixes, on risque une erreur saisonnière d'échelle de l'ordre de 1/80.000.

Il doit nous rester quelques minutes pour entrevoir les problèmes posés par la superposition des canevas successifs d'auscultation du barrage d'ERRAGUÈNE situé sur l'Oued DJENDJEN à quelques dizaines de kilomètres à l'est de celui du CHABET.

C'est un grand barrage à voûtes multiples, qui barre la vallée de l'Oued DJENDJEN, sur une largeur de près de 500 mètres, avec une retenue importante à la cote maximale 670. Ce barrage alimente l'usine hydroélectrique souterraine de Zianna-Mansouria, au bord de la mer, après avoir fait tourner une turbine au pied du barrage.

Contrairement au barrage du CHABET fondé sur du rocher, les onze voûtes plein cintre, de 35 mètres de diamètre, ainsi que les contreforts de celui d'ERRAGUÈNE sont fondés sur du schiste.

Pour augmenter la participation du terrain à la résistance des contreforts contre les poussées des voûtes, une fosse profonde a été aménagée, dans le schiste, à l'aval du pied de chaque contrefort, et des vérins plats, à huile, ont été mis en action pour presser le bas du contrefort, en prenant appui sur la paroi aval de la fosse.

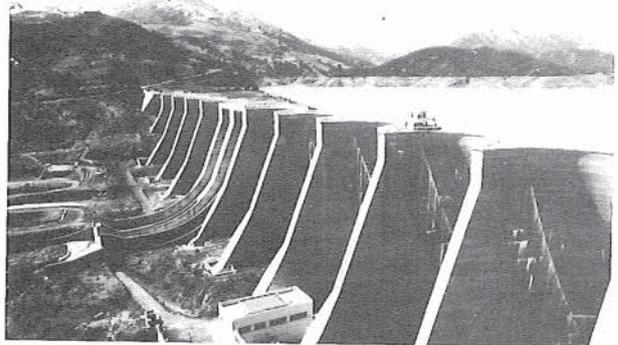


Fig. 5 Barrage d'Erraguène.

Un important dispositif d'auscultation topométrique a été mis en place, et donc un important canevas, comportant une quarantaine de piliers extérieurs. Ce sont ces piliers qui nous intéressent pour le moment.

Une rangée de 13 piliers PO à P12 a été installée à l'extrémité aval du sommet des contreforts et sur les 2 culées.

La plupart des autres piliers est répartie dans le terrain naturel et ces piliers sont fondés dans le schiste qui, malheureusement, a été plus ou moins atteint par les racines profondes de la forêt qui existait depuis des millénaires. Malgré la profondeur des fondations, malgré le cube du béton coulé à pleine fouille, pratiquement aucun pilier n'est tout à fait stable, ni, non plus, les repèrements voisins.

Voilà qui ne facilite pas la superposition des canevas !

Pendant une des séries d'observations, le point G a tellement bougé que la discordance des gisements trouvés pour les visées réciproques a obligé à exclure le pilier G de ce canevas. On a dû se contenter du relèvement pour utiliser les visées d'intersection données depuis ce pilier sur les repères d'auscultation.

Les mesures d'inclinaison des disques en bronze scellés au sommet des piliers nous ont aidé, lors des observations successives, à sélectionner les piliers les moins instables, et, dans la détermination de la translation pour superposition, il a été tenu compte de la direction et de l'importance de la variation d'inclinaison constatée.

Je crois qu'il est intéressant d'expliquer ce qui a été fait à l'occasion d'une observation partielle, urgente, en octobre 1968. Cette observation a été demandée à la suite de l'apparition d'une fissure dans la culée rive gauche, culée en forme de voûte. Evidemment 4 couples de repères triaxiaux ont été installés, à cheval sur la fissure, 3 à l'extérieur et 1 dans la galerie qui descend sous la culée, vers les fondations des voûtes. Mais ne nous occupons que du canevas stationné pour intersecter les repères extérieurs anciens et nouveaux, et rattacher la polygonale en galerie.

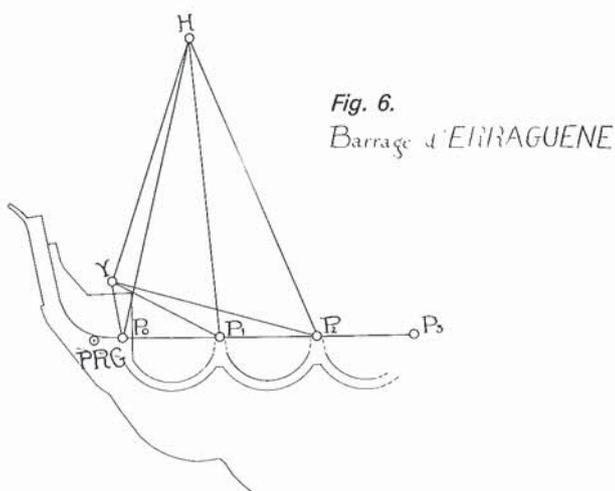


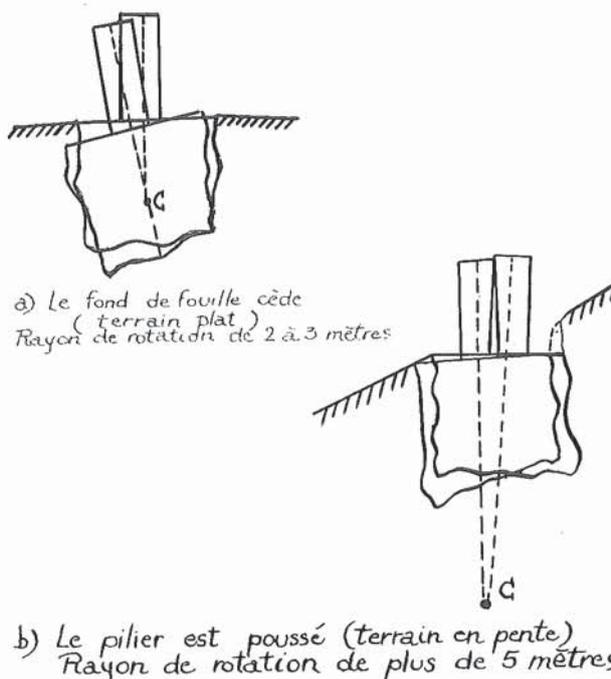
Fig. 6.  
Barrage d'ENRAGUENE

Ce canevas est réduit aux cinq points P0, P1, P2, H, Y. En 3 de ces 5 piliers, P0, P2 et H un relèvement a été fait sur une douzaine de piliers anciens du canevas général. Des visées lointaines ont aussi été faites à nouveau pour assurer l'orientation. Le côté P0-P2 a été mesuré aux fils invar de 35 m sous tension de 15 Newtons, en deux portées, P0-P1 et P1-P2. La précision de ce canevas réduit, à distances relativement courtes, est très bonne. L'erreur moyenne quadratique des coordonnées calculée par ordinateur, en prenant P0 comme origine, est de 1 dixième de mm pour P1, P2 et Y. Elle est de 4 dixièmes pour H, en X et de 3 dixièmes en Y, car H est nettement plus loin.

Mais il y a eu un problème pour la mise en place de ce petit bloc rigide. En effet les piliers anciens ont bougé depuis les observations de 1963, et les "chapeaux" obtenus montrent un éparpillement qui ne peut provenir que de l'imprécision des coordonnées utilisées pour les piliers visés. Du reste, comme les points P0 et P2 sont voisins, et que H n'est pas très loin, les chapeaux ont la même allure. Les écarts sont analogues. Mais l'incertitude aussi est la même sur les 3.

Nous nous doutions un peu de l'instabilité des piliers dont nous nous étions servi pour nous relever. Aussi les mesures d'inclinaison des plaques ont-elles été effectuées pour ces piliers aussi. Pour chacun de ces piliers un petit graphique a été fait pour montrer la variation de direction et de valeur de l'inclinaison, et des hypothèses vraisemblables ont en été déduites sur la direction, et même sur l'importance du basculement du bloc de béton en supposant que le rayon auquel il fallait appliquer la rotation n'aboutissait pas à un centre bien plus bas que la fouille, en terrain plat. Il faut bien reconnaître que cela améliore tous

les "chapeaux". Mais il reste tout de même une incertitude de 1 ou 2 mm sur la bonne superposition du canevas d'octobre 1968 à celui de 1963.



a) Le fond de fouille cède  
(terrain plat)  
Rayon de rotation de 2 à 3 mètres

b) Le pilier est poussé (terrain en pente)  
Rayon de rotation de plus de 5 mètres

Fig. 7 Basculement d'un pilier en béton. Hypothèses sur la position du centre de rotation.

Ce problème de superposition ne risque plus de se représenter. En effet 2 pendules inversés, réclamés par les ingénieurs responsables de l'auscultation, ont été installés en 1970, l'un PRG sur la culée R.G., dans un sondage de 60 m de profondeur, à 10 mètres environ de P0, sensiblement dans le prolongement de l'alignement P12-P0, l'autre PRD, dans un sondage d'une trentaine de mètres de profondeur, sensiblement dans le prolongement de l'alignement P0-P12 à 35 mètres environ de P12.

Un édicule a été construit sur chaque culée pour y installer le récipient contenant le flotteur et aussi la table de lecture type E.D.F. permettant de mesurer les déplacements de la culée par rapport au pendule.

Deux fenêtres, l'une transparente, l'autre à l'opposé, translucide, permettent de viser le petit câble souple inox de 1,5 mm de diamètre tendu verticalement par le flotteur noyé.

Pour faciliter les visées les plus longues, une olive bi-conique a été enfilée sur chaque câble et fixée, par serrage concentrique, à bonne hauteur. Même à 455 m (de P0 à PRD), avec un T3, on trouve facilement l'olive et le câble qui se détachent bien sur la fenêtre translucide.

La distance PRG-PRD a été mesurée aux fils et au ruban invar en 1970. (On lit très bien les appoints sur les réglettes ou sur le ruban en observant l'image du câble sur leur surface bien polie, et en faisant les lectures correspondant aux 2 côtés du câble. A neuf ans d'intervalle cette distance entre pendules (465 m environ) a été trouvée la même, aux imprécisions de la comparaison des mesures (pas plus du millimètre). Les gisements PRG-PRD et P0-P12 se déduisent facilement l'un de l'autre. Or le gisement de P0-P12 est

assuré de façon directe et indirecte par visées lointaines.

Le problème de la superposition des canevas successifs d'auscultation est donc résolu grâce aux pendules. De plus, certaines mesures d'auscultation peuvent être assurées grâce aux pendules de façon rapide et très simple. Il s'agit en particulier de la détermination des composantes amont aval des déplacements des piliers P0 à P12.

Il suffit en effet de stationner uniquement le pilier en question, et de viser PRG et PRD pour mesurer l'angle voisin de 200 G ayant ce pilier pour sommet.

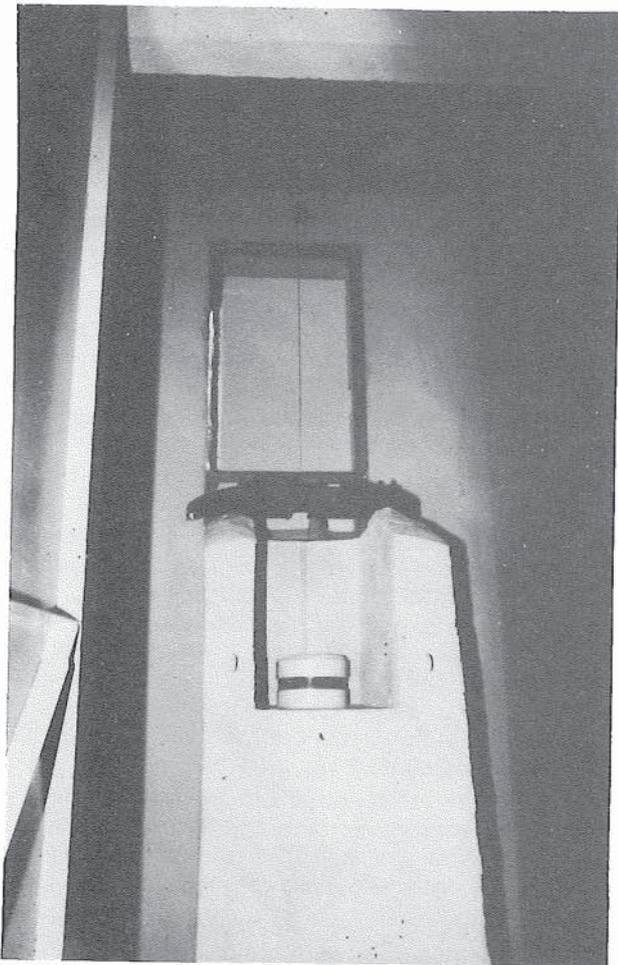
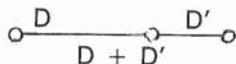


Fig. 8 Fil à flotteur dans son édicule.

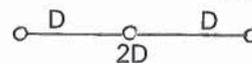
Il ne reste plus qu'à lui soustraire la valeur inscrite au répertoire référence, et à multiplier la différence obtenue par la sensibilité correspondante inscrite au même répertoire, pour obtenir le déplacement avec son sens (aval +, amont-).

Remarquons que cette façon d'opérer est plus précise qu'une mesure de hors d'alignement faite depuis la rive la plus proche. En effet, dans ce cas, la sensibilité du relèvement est toujours plus faible que celle de la visée la plus courte.



$$\frac{D \times D'}{D + D'} \sin 1'' \text{ car} = D \frac{D'}{D + D'} < D$$

et même, au milieu du barrage la sensibilité du segment est la moitié de celle de la visée



$$D \frac{D}{2D} = \frac{D}{2}$$

## CONCLUSION

Ma conclusion est un plaidoyer pour l'emploi de références enterrées d'une profondeur fonction du terrain et de la précision recherchée, dont les verticales sont "remontées" au niveau du canevas, matérialisées soit par des fils à flotteurs - appareils portatifs utilisés momentanément en des lieux divers - soit des pendules inversés - appareils installés en permanence.

Les références profondes ont en effet beaucoup plus de chance de procurer des verticales stables que des repères en surface.

Leur emploi, à condition qu'il soit multiple pour assurer les garanties, est le meilleur moyen d'obtenir une bonne superposition des canevas successifs d'auscultation des grands ouvrages.

Les exemples d'emploi au barrage d'ERRAGUÈNE ont montré que c'était le moyen approprié pour obtenir des renseignements précis et immédiats sans réobservation du canevas.

D'autre part c'est le seul moyen de matérialiser la verticale d'un repère noyé, et même d'un repère inaccessible, cas plus fréquent dans l'auscultation d'ouvrages concernant l'énergie ou la recherche nucléaire.

Mais revenons au barrage d'ERRAGUÈNE. Pour éviter les inconvénients des basculements des piliers malgré l'importance de leurs fondations dans le schiste, il serait envisageable de disposer de plusieurs piliers tubulaires dont le disque de stationnement, percé en son axe pour le centrage du théodolite ou du signal, pourrait être recentré par un fil à flotteur, rapidement et avec précision, sur la verticale d'une référence profonde, au fond d'un tubage sensiblement vertical débouchant à l'intérieur du pilier.

Il faudrait évidemment que ce disque comporte trois lumières, à 120°, de dimensions suffisantes pour le libre passage des trois boulons de fixation, (par écrous et contre-écrous), scellés au sommet du pilier et permettant le réglage de l'horizontalité et le recentrage du disque ainsi que sa fixation provisoire sur le pilier qui ne servirait plus de référence mais seulement de bon trépied avec dispositif de translation.

Dans du schiste comme celui d'ERRAGUÈNE il n'y aurait sans doute pas besoin d'une grande profondeur pour atteindre le schiste sain. Dans certains cas on pourrait peut-être l'atteindre par puisard pour éviter de déplacer une sondeuse. Les emplacements choisis doivent ne pas être trop près de l'ouvrage et il faut éviter de modifier profondément (c'est bien le cas de le dire) la charge de schiste en le poinçonnant avec un tubage d'acier lui transmettant le poids du massif de béton de fondation du pilier.

Si c'est possible, il serait préférable (et sans doute plus économique) d'employer un tubage en plastique

approprié, d'autant plus que le haut de ce tubage serait à l'abri à l'intérieur du pilier. De plus le tubage pourrait être isolé du béton de fondation par de la mousse de polystyrène expansé.

Une ouverture latérale ménagée dans le pilier, fermée habituellement avec dispositif de sécurité, permettrait d'accéder au câble souple inox en attente dans le tubage et de le raccorder au moment du centrage seulement, par son embout femelle, à l'embout mâle du fil à flotteurs dévidé sous l'appareil.

C'est seulement après ce raccordement que le câble inox serait libéré du dispositif l'empêchant de tomber dans le tubage.

De même, après le centrage du disque, le câble inox serait repris dans le dispositif d'amarrage avant de dévisser les embouts mâle et femelle.

Il n'y a pas que les canevas d'auscultation qui ont besoin de références plus ou moins profondes "remontées" par fil à flotteur. C'est le cas de certains chantiers de travaux sur terrains remblayés. C'est aussi le cas de canevas d'implantations peu étendus, mais de grande précision pour l'installation de machines.

Pour certaines mesures on pourra se passer des coûteux et encombrants piliers et stationner les références profondes avec un bon trépied et une embase classique qui sera centrée sur le fil à flotteur avec le dispositif à visées orthogonales simultanées qui a été décrit dans le n° 3 - Mai 1980 - de la revue de l'A.F.T. page 9 et suivantes.

En ce qui concerne les terrains remblayés, bien qu'il ne s'agisse plus de superposition de canevas d'auscultation, mais de conservation du canevas malgré l'épaississement du remblai, il est intéressant de décrire ce qui a été réalisé au grand barrage d'IRIL

#### **Note de la rédaction**

*Le dispositif de fil à flotteur a été présenté à l'occasion de divers colloques A.F.T., notamment à VERSAILLES, LYON, STRASBOURG et TOURS, et son promoteur, M. de FONTGUYON est toujours disponible pour en faire la démonstration.*



*Gorges de Kherrata (Algérie).*

EMDA sur l'Oued AGRIOUN, à 2 kilomètres environ en amont du barrage du CHABET.

Pour conserver un accès vertical à travers le remblai en construction, remblai fait par de gros engins, c'est un puits qu'il faut construire au fur et à mesure au lieu de le creuser. Pour que les engins ne poussent pas de remblai dans le puits, il faut être toujours en avance d'un anneau. Il existe deux puits qui traversent toute l'épaisseur de la digue. Les parois de ces puits sont constituées par des anneaux en béton moulé. Il y a deux sortes d'anneaux : ceux de grand diamètre et ceux de petit diamètre. Le diamètre intérieur des grands est légèrement supérieur au diamètre extérieur des petits. En descendant dans le puits on rencontre successivement un grand et un petit anneau. Deux tiges d'acier traversant les grands de façon à pouvoir supporter les petits tout en laissant un large espace pour circuler sur les échelles métalliques qui sont accrochées à une série de barres mais ne sont ni assemblées ni scellées, pour ne pas freiner les mouvements relatifs des anneaux les uns par rapport aux autres. Les grands anneaux reposent sur le remblai et supportent les petits sans les toucher en principe. Les anneaux peuvent donc accompagner le remblai dans le tassement que l'on a voulu étudier dans la grande digue du barrage de l'IRIL EMDA.

Il est bien dommage que l'on n'ait pas prévu l'utilisation de fils à flotteur dans ces puits, car les mesures faites au fil à plomb amorti à la main par un opérateur perché pendant des heures sur des échelles métalliques brinquebalantes ont été bien pénibles, mais le fil à flotteur n'existait pas à cette époque (1952-1954).

Ce n'était donc pas une occasion manquée. Mais, depuis que le fil à flotteur existe, à peu près tout continue partout à être fait comme s'il n'existait pas... et comme si personne ne l'avait vu.