

D. contrôle des mouvements lents des grands barrages et de leur fondation

par M. DOUILLET

Le problème de la mesure des mouvements du sol et sous-sol appliquée aux fondations des grands ouvrages a fait l'objet de multiples publications. En ce qui concerne les fondations des grands barrages qui constituent la partie la plus importante des ouvrages de Génie Civil auscultés par Electricité de France, on peut citer, par exemple, de nombreux articles publiés dans les comptes rendus des Congrès Internationaux des Grands Barrages de Edimbourg (1964), Istanbul

(1967), Montréal (1970), ainsi que quelques éléments de synthèse rassemblés dans le numéro spécial du 15 décembre 1975 de la *Revue de l'Industrie Minérale*.

Dans le cadre de cet exposé, nous nous bornerons à évoquer quelques points particuliers de la pratique d'Electricité de France dans la surveillance et l'auscultation qu'elle assure sur les grands ouvrages qu'elle exploite.

1. REMARQUES SUR L'OBJECTIF POURSUIVI PAR L'AUSCULTATION ET LES PRINCIPES DE SA DEMARCHE

Il est recherché de contribuer à la sécurité des ouvrages importants dont les défaillances auraient des conséquences graves sur le plan de la sécurité, par l'exercice d'une surveillance périodique de grandeurs mesurables et compréhension du comportement que l'on peut en déduire. Il s'agit de détecter, le plus longtemps possible à l'avance, tous les phénomènes affectant l'ouvrage et ses fondations, susceptibles d'une évolution. Ceci permet d'induire la sécurité de proche en proche à partir de l'état initial et de prendre, à temps, les décisions d'exploitation ou de travaux que le maintien de cette sécurité imposerait.

Dans ce cadre, le contrôle des mouvements du terrain de fondation, ou des appuis rocheux présente un grand intérêt. Il s'agit en effet, le plus souvent et malgré les multiples reconnaissances qui ont pu être faites par le constructeur, de la partie la moins connue de l'ouvrage, dans laquelle la probabilité d'apparition de phénomènes imprévus peut être plus élevée que dans les parties construites en superstructure : plots en béton, remblais de terre ou d'enrochement etc. Par ailleurs, si certains ouvrages sont conçus pour accepter sans dommage des mouvements de leur fondation, pour d'autres, la résistance aux sollicitations est étroitement liée au comportement du terrain et des appuis qui les supportent.

2. PARTICULARITE DES MOYENS MIS EN ŒUVRE

2.1. Moyens de mesure

Les moyens de mesures mis en œuvre sont très divers : mesures hydrauliques, de piézométrie et débit, mesures de déplacements d'ensemble, mesures de déformations ponctuelles, etc. Cette diversité est recherchée car elle permet d'aborder le problème du « diagnostic » sur la santé de l'ouvrage par plusieurs approches différentes, en faisant appel à des techniques totalement indépendantes qui concourent à donner aux interprétations un caractère plus sûr : aucun indice ne doit être négligé ; les recoupements sont très précieux lorsque l'ordre de grandeur des évolutions que l'on cherche à mettre en évidence est peu éloigné de celui de l'indécision qui affecte les résultats de mesures.

Pour s'en tenir aux déplacements et déformations du sol et sous-sol, les différents dispositifs utilisables sont employés au mieux suivant les circonstances. D'une manière générale, ils ont cependant en commun avec tous les dispositifs d'auscultation de l'E.D.F. les

qualités nécessaires à l'obtention de longues séries de mesures étalées sur des périodes importantes et réalisées dans des conditions identiques : mêmes appareils, même « dépouillement », adaptées aux méthodes spécifiques d'interprétation utilisées et au caractère permanent des ouvrages surveillés.

Une des méthodes citées dans le décret qui fait obligation à tous propriétaires de barrage important d'y faire des mesures est la méthode topographique.

A l'ouvrage à surveiller est alors associé un réseau de stations réparties dans son voisinage et formant une figure dont la permanence dans le temps est contrôlable, d'où sont intersectés optiquement des repères sur les points dont on veut surveiller les mouvements. C'est souvent le seul moyen disponible pour détecter des mouvements absolus de repères au rocher. Il faut cependant remarquer que pour obtenir la précision nécessaire, il est nécessaire d'opérer des mesures de triangulation très précises et d'employer des méthodes de traitement élaborées et répétitives telles que celles

faisant appel à la compensation des erreurs aléatoires sur les angles par utilisation des « moindres carrés » bien connus des géodésiens. Toujours coûteuses, souvent d'interprétation délicate, ces mesures permettent cependant de déceler des mouvements dans le plan horizontal, de faible amplitude sur longue période : de l'ordre de 1 mm en quelques années.

Un examen complet des moyens topographiques utilisés incluerait celui des moyens plus modernes tels que la photogrammétrie qui reste réservée à la surveillance des mouvements importants de zones de grandes surfaces et, bien sûr, les nivellements optiques qui sont, au contraire, d'un emploi très courant parce qu'ils peuvent être très précis, tout en restant simples d'exécution et d'interprétation.

Les mouvements relatifs dans le plan horizontal, de points placés sur la même verticale d'une structure ou d'une fondation sont aisément contrôlables au moyen du dispositif à « pendule » : ce moyen est de plus en plus utilisé pour le contrôle des mouvements des points en surface par rapport à un point situé en profondeur à une distance suffisante pour qu'il puisse être considéré comme non influencé par la structure : la réalisation la plus utilisée est constituée par un fil dont l'extrémité est scellée au fond d'un forage vertical (l'obtention d'une bonne verticalité sur des grandes longueurs et faibles diamètres est en elle-même un problème qui n'a reçu de solution satisfaisante que récemment) et qui est tendu à l'autre extrémité par un système cuve-flotteur ; une mesure de grande simplicité permet d'obtenir, pour les mouvements relatifs horizontaux, une excellente précision (meilleure que 1/10 mm).

La composante des **mouvements relatifs suivant une direction quelconque**, de deux points d'une fondation placés sur un axe ayant cette direction, est couramment mesurée par des dispositifs dits « fils profonds » : un fil en acier inoxydable ou métal Invar scellé à l'une des extrémités (fond d'un forage, par exemple) est tendu à l'autre par un dispositif exerçant une force constante pendant la mesure qui consiste simplement à contrôler la position d'un repère fixé à cette extrémité du fil par rapport à un repère en vis-à-vis lié au sol. Ce type de mesure est, en principe, d'une grande sensibilité, mais sa mise en œuvre exige de grandes précautions quant à la qualité de l'ancrage et aux contrôles de l'influence sur les résultats, des phénomènes de fluage, corrosion, dilatation thermique qui peuvent affecter le fil et simuler, si l'on n'y prend pas garde, des mouvements de fondation n'ayant aucune existence.

La composante verticale du mouvement relatif de deux points d'une fondation ou d'une structure est mesurable par une multitude de types d'appareils utilisant des principes très divers : vases communicants, détection magnétique de bagues métalliques etc. qu'il ne peut être question de décrire en détail ici. Il y a lieu d'observer cependant que, souvent mis en place dans des matériaux remblayés, ils peuvent mettre en évidence des mouvements peu représentatifs des mouvements du milieu dans son ensemble du fait de la perturbation apportée dans ce milieu par leur présence et les conditions particulières de mise en place pendant le chantier.

On peut noter que c'est un motif voisin : déformation locale sans rapport avec les mouvements d'ensemble qui a fait abandonner par l'E.D.F. les clinomètres à base courte du type niveau de haute précision, utilisés pour la **mesure des basculements par rapport à un axe horizontal**.

2.2. Les moyens de traitement

De même que la seule originalité digne d'attention des méthodes et appareils précédemment évoqués, par ailleurs d'utilisation très classique, est leur adaptation technologique à des mesures périodiques sur des durées très longues atteignant très couramment plusieurs dizaines d'années, de même les moyens de traitement adoptés utilisent des principes très simples, voire simplistes, mais très adaptés aux longues séries de mesure de la même grandeur.

Les données d'auscultation concernant les fondations et sous-sol recueillies sur les ouvrages d'E.D.F. sont, comme toutes celles concernant les structures, traitées en tant que séries statistiques.

D'une manière très générale et à la suite de la longue expérience des mesures acquise, on a pu constater que toute variation des grandeurs, habituellement mesurées en auscultation (dont les déplacements), était le plus souvent réductible à une **somme** de variations dépendantes chacune d'une seule des trois variables : charge de l'ouvrage (caractérisée par le **niveau de l'eau à l'amont** dans le cas des barrages), état thermique (pour une structure épaisse ou une fondation massive le paramètre « **saison** » est suffisamment représentatif), **date** et d'un résidu **aléatoire**. L'expérience a aussi montré que les variations, fonction de la charge et de la saison, étaient modélisables par des lois d'expression analytique simple : polynôme de degré inférieur ou égal à quatre, combinaisons simples de fonctions sinusoïdales, en assurant au résidu, une amplitude fortement réduite par rapport à l'amplitude totale de la variation mesurée. Dans le cas des fondations on observe, que, souvent, ce modèle se simplifie par absence d'effets significatifs de la variable saison.

Dans ces conditions, le traitement d'une série de résultats de mesures existantes concernant un mouvement et réalisées dans des conditions diverses de cote amont et saison consiste en :

- l'ajustement de lois « **hydrostatique** » et « **saisonnière** » moyennes sur l'échantillon disponible par une méthode de recherche de corrélations multiples ;
- la correction des résultats de toutes les mesures faites à partir des lois ainsi déterminées pour aboutir à des résultats correspondant à des **conditions constantes** : saison moyenne, même cote à l'amont ;
- la représentation de ces résultats corrigés, sur des graphiques en fonction du temps, mettent en évidence les seules **évolutions non réversibles et le résidu** prenant en compte les erreurs de mesure et l'imperfection du modèle, qui se prêtent à l'interprétation des mouvements beaucoup plus finement que les évolutions brutes déduites directement des mesures.

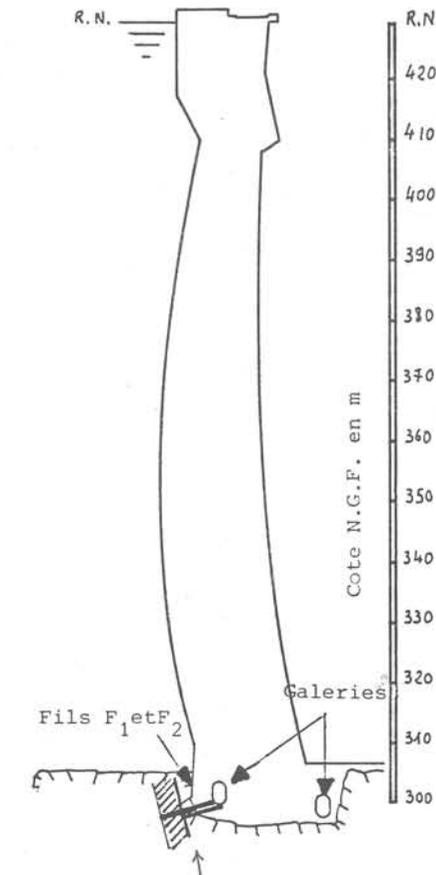
Lorsque l'on possède une analyse des phénomènes mesurés, il est possible de la considérer comme valable pour les mesures réalisées **après** la période qui a été utilisée pour l'établir (l'expérience montre que cette extrapolation est le plus souvent justifiée tandis que l'examen attentif des résultats à conditions constantes reconstituées, permet de déceler les cas où cette justification est mise en défaut). Dans ces conditions, chaque mesure peut, dès qu'elle a été réalisée, être « ramenée » à conditions constantes et être utilisée avec efficacité dans une action de surveillance à court terme.

3. EXEMPLE DE RESULTATS OBTENUS

Les graphiques ci-dessous donnent un exemple de résultats obtenus sur la variation d'épaisseur d'une couche profonde de fondation rocheuse située à l'amont d'un barrage voûte à partir de la mesure sur deux « fils profonds » ancrés à deux profondeurs différentes dans deux forages inclinés parallèles. Ils conduisent à émettre l'hypothèse qu'une ouverture de fissure s'est

produite dans cette couche au cours de l'année 1969 correspondant à la première mise en eau de l'ouvrage (mise en traction de la masse rocheuse amont par déplacement vers l'aval du pied de l'ouvrage sous l'effet de la poussée de l'eau) et que ce phénomène n'a que très peu évolué au cours des années suivantes.

Fig. 1. — Coupe verticale dans l'axe du barrage.



Couche dont la variation d'épaisseur est contrôlée par les deux fils F_1 et F_2 .

Fig. 2. — Association cote de retenue-saison des mesures effectuées de 1969 à 1976.

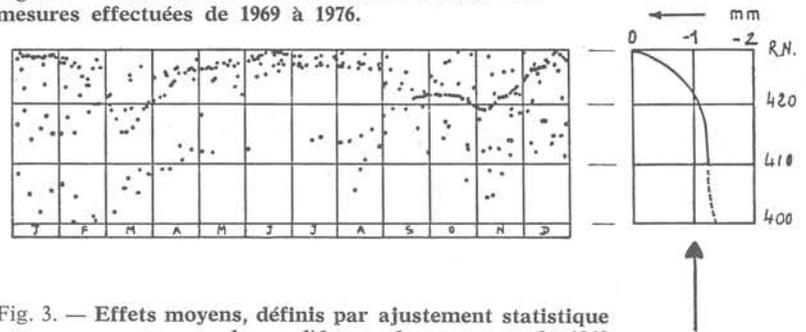


Fig. 3. — Effets moyens, définis par ajustement statistique du modèle sur les mesures de 1969 à 1976, de la saison et de la cote de retenue.

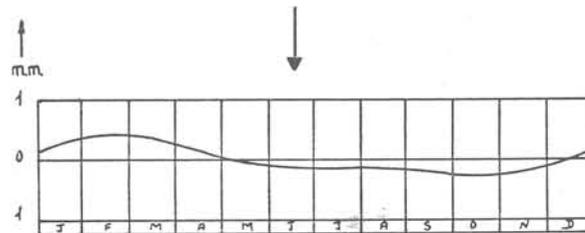
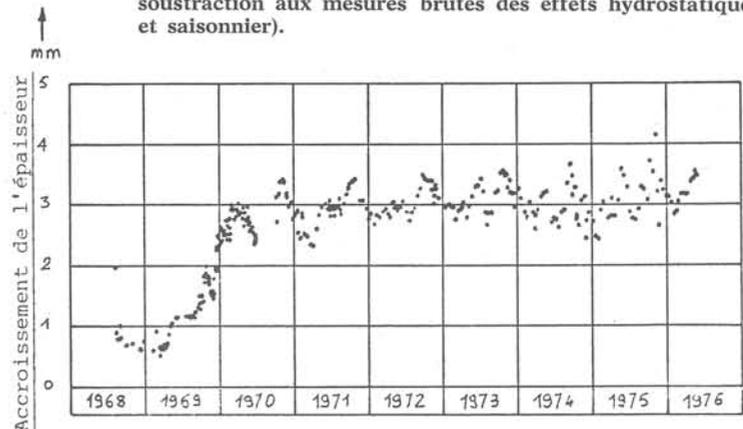


Fig. 4. — Variations d'épaisseur corrigées (ramenées à conditions constantes de saison et cote de retenue par soustraction aux mesures brutes des effets hydrostatique et saisonnier).



Remarques sur les graphiques

(2) Les mesures sont plus nombreuses aux cotes hautes : on peut estimer que l'effet hydrostatique sera défini avec plus de précision pour la retenue presque pleine que dans les autres cas.

(3) L'effet « saisonnier » trouvé est faible : il est dû à l'action des variations de température sur l'épaisseur de la couche (incluant l'effet de la dilatation du barrage) mais aussi à leur influence éventuelle sur l'appareillage de mesures.

Le sens de l'effet hydrostatique trouvé correspond bien à ce que l'on peut attendre soit une extension de la couche sous l'effet des pressions croissantes (traction par le barrage).

(4) L'ondulation résiduelle de l'épaisseur en fonction du temps sensible à partir de 1970 peut être attribuée à une certaine inadéquation du modèle ajusté, mais elle laisse cependant bien visible la faiblesse de l'évolution irréversible depuis le début de 1970 (ce qui est le résultat essentiel sur le plan de la surveillance).

**L'AUSCULTATION DES MOUVEMENTS
DU SOL ET DU SOUS-SOL
INTERPRETATION DES MESURES**

Le terme « auscultation géotechnique » signifie l'observation, la mesure, l'analyse et la prévision du comportement d'un site naturel ou d'un ouvrage et du massif sur lequel il est fondé.

En simplifiant, on peut distinguer deux préoccupations dans l'auscultation.

La première consiste à suivre le comportement normal de l'ouvrage et du site. Cela permet, entre autres, aux ingénieurs de vérifier la validité de leurs hypothèses et de leurs calculs.

La seconde consiste à déceler aussi rapidement que possible tout phénomène accidentel ou évolutif dont la connaissance permet de juger de la santé de l'ouvrage et du site et éventuellement d'en adapter la gestion.

On se limitera dans cet article à l'auscultation des déplacements. Après une description sommaire des moyens de mesure disponibles, l'attention est portée sur l'interprétation des mesures, systématique et immédiate, et les deux préoccupations de l'auscultation sont illustrées par des exemples.

**SOIL DISPLACEMENTS MONITORING
INTERPRETATION OF THE MEASUREMENTS**

The expression « geotechnical testing » covers inspection, measurement, processing results and forecasting the behaviour of a natural site or of an engineering structure and the earth mass on which it is built.

A simplified analysis of this activity underlines two basic concerns.

The first consists of continuous inspection of the normal behaviour of the structure and the site. This enables the engineers to check the validity of their assumptions and of their design.

The second consists of detecting as quickly as possible any accidental or developing phenomena, the presence of which gives an indication of the soundness of the structure and the site and if need be adapting working operations.

This article deals only with monitoring of displacements. After a short summary of measurement means available, the author discusses systematic and immediate interpretation of measurements. The basic concerns of testing are illustrated by examples.