

Auscultation technique d'un barrage

ou la participation du topographe à l'auscultation des barrages

*par Maurice DAUGÉ
Société du Canal de Provence*

Sommaire

- Le Cadre légal
- Le Comité Technique Permanent des Barrages
- Décret n° 68-450 du 16 mai 1968 (mesures de surveillance et d'alerte)
- Circulaire n° 70.15 du 14 août 1970 (Inspection et surveillance des barrages)
- L'auscultation - Généralités
- Les objectifs poursuivis
- La nature des mesures
- Modalités de mise en œuvre en fonction des buts poursuivis et des types de barrage
- Technologie des appareils et de leur mise en œuvre

1 — LE CADRE LÉGAL

La législation française soumet tous les barrages de plus de 20 mètres de haut à un contrôle technique exercé par des services qui dépendent du Gouvernement. On donne ci-après quelques détails à ce sujet.

1.1 - Le Comité Technique Permanent des Barrages

Ce Comité de huit membres a été créé par décret du 23 juin 1966 pour assister les ministères responsables du contrôle des barrages. Il intervient à un double titre :

- avis technique au niveau de la conception, de l'exécution et de l'exploitation des ouvrages,
- consultations sur les dispositions techniques contenues dans les projets de lois, les actes réglementaires et les instructions ministérielles.

1.2 - Décret n° 68-450 du 16 mai 1968

Ce décret est relatif aux mesures de surveillance et d'alerte destinées à faciliter la protection en aval de certains aménagements hydrauliques.

Les aménagements hydrauliques concernés doivent comporter à la fois un barrage ou une digue

d'une hauteur d'au moins 20 mètres au-dessus du terrain naturel et un réservoir d'une capacité égale à 15 millions de m³.

Pour chacun de ces aménagements, il doit être établi un plan indiquant les mesures destinées à donner l'alerte aux autorités, notamment :

- les cas d'alerte,
- les modalités de l'alerte (messages d'alerte et autorités à prévenir),
- la personne expressément chargée de donner l'alerte,
- les dispositifs techniques de détection et de surveillance,
- les caractéristiques principales de l'onde de submersion en cas de rupture,
- les liaisons et les appareillages d'alerte à la population.

1.3 - Circulaire n° 70-15 du 14 août 1970

Cette circulaire est relative à l'inspection et à la surveillance des barrages intéressant la sécurité publique.

Ce texte, très complet, précise l'utilisation qui doit être faite de tous les dispositifs de détection et de surveillance mis en place dans un barrage.

Sa préoccupation essentielle est de mettre en œuvre une méthode permettant de connaître aussitôt que possible tous les incidents qui affectent un barrage, de manière à parer à leurs conséquences, de découvrir tous les symptômes d'affaiblissement pour prévenir leur aggravation, de vérifier le bon fonctionnement de tous les organes essentiels d'exploitation et de vidange.

Pour cela, il impose :

- la constitution d'un dossier, à jour, de tous les documents relatifs à l'ouvrage,
- une surveillance particulière au cours de la première mise en eau complète,
- un registre de l'exploitant où sont mentionnés les principaux renseignements relatifs à l'exploitation du

réservoir, les manœuvres des vannes, les mesures de contrôle, les incidents et les travaux effectués,
— une surveillance périodique de l'ouvrage par l'exploitant avec rapport annuel au Service du Contrôle (1), comprenant une analyse approfondie de l'évolution du comportement de l'ouvrage tous les deux ans,
— une visite annuelle de l'ouvrage et des divers dispositifs d'auscultation par le Service du Contrôle,
— une visite décennale complète par le Service du Contrôle avec, en principe, vidange complète de la retenue.

2 — L'AUSCULTATION — GÉNÉRALITÉS

Au début de ce siècle, l'auscultation des barrages était limitée aux mouvements planimétriques obtenus par des réseaux topographiques.

Avec l'augmentation graduelle de la hauteur des structures et la diminution de leur épaisseur, la technique des mesures prit une telle expansion qu'elle devint une partie essentielle du projet ainsi qu'un facteur déterminant de sa sécurité.

L'auscultation qui, au début était purement limitée à la structure, a été étendue au barrage et aux fondations considérés comme un seul tout.

3 — LES OBJECTIFS POURSUIVIS

Il convient de distinguer, en fonction du but poursuivi, trois catégories principales d'investigations dans les programmes de mesures :

3.1 - Les contrôles pendant la construction et aux premiers remplissages

Ces contrôles répondent en premier lieu à un souci de sécurité immédiate. Ils révèlent aussi pour la première fois des particularités du comportement de l'ensemble barrages-fondations plus ou moins conditionné par les facteurs complexes et parfois mal connus, imparfaitement pris en compte dans le projet.

Les mesures aux premiers remplissages constituent enfin un point important de départ pour juger ultérieurement de l'importance ou de la gravité des évolutions éventuelles.

3.2 - Les contrôles en cours d'exploitation

Les mesures faites en cours d'exploitation doivent pouvoir fournir des éléments immédiatement utilisables dans le sens du comportement de l'ouvrage, soit dans son ensemble, soit en des points particulièrement choisis.

La partie la plus significative de ces mesures doit résider dans les possibilités de mise en évidence d'évolutions, dont les unes peuvent être favorables et dont les autres, lorsqu'elles se manifestent sous forme de dérive, constituent des signes préoccupants.

3.3 - Les recherches à but technique ou scientifique

Ces recherches peuvent intervenir à tout moment et sont orientées vers des problèmes bien délimités mais d'une portée susceptible de déborder largement le cadre de l'ouvrage considéré. Il faut noter, à ce propos, que la vérification de la validité des hypothèses du projet, qui constitue un des aspects les plus féconds de telles recherches, ne peut guère intervenir qu'après quelques années d'exploitation et la dis-

parition (ou la prise en compte) des phénomènes primitifs de fluage ou d'adaptation.

3.4 - Caractéristiques générales de l'appareillage

Ces trois objectifs mettent en œuvre souvent des moyens de mesure communs, bien que les performances souhaitables puissent différer suivant les cas. Mais les phénomènes à contrôler étant généralement caractérisés par leur faible amplitude, et l'ambiance dans laquelle doivent fonctionner les appareils de mesure peu favorable, ceux-ci doivent généralement présenter des hautes performances dans le domaine de la sensibilité, de la fidélité et de la fiabilité.

Par ailleurs, la rusticité ou la solidité des appareils et la simplicité d'emploi sont à rechercher au maximum, de façon à permettre chaque fois qu'il est possible une mise en œuvre par le personnel local qui, en exploitation courante, peut n'être que d'une qualification modeste.

Cependant, l'absence de personnel, ou la nécessité parfois de logger des moyens de mesures en des emplacements peu accessibles ou au cœur du béton peut conduire à des technologies particulières ou à des dispositifs de scrutation automatique éventuellement très élaborés.

3.5 - Définition du dispositif

Pour chaque ouvrage, la définition en fonction d'une idée directrice d'ordre expérimental du dispositif d'auscultation — c'est-à-dire de la nature des moyens d'investigation, de leur densité et de leur répartition dans l'ouvrage et à l'extérieur de celui-ci — puis leur mise en place, doivent être assurés par des spécialistes très avertis, car une rectification a posteriori est souvent impossible et des résultats inexploitable ou décevants sont presque toujours le fait d'erreur de conception ou de montage.

4 — LA NATURE DES MESURES

Les mesures concernent en principe tant l'ouvrage lui-même que ses fondations et ses abords, les différents points à contrôler étant l'état intrinsèque des matériaux (résistance mécanique, contraintes), et les déformations sous l'effet des différents facteurs naturels (charge hydraulique, température, pressions interstitielles, altérations physico-chimiques lentes).

Les moyens de mesures les plus souvent employés et donnant les informations les plus généralement recherchées, concernent :

4.1 - Les déplacements absolus en planimétrie et altimétrie

Ces mesures qui font appel aux techniques de la topographie de précision, avec quelques particularités de conception tenant au caractère de l'objectif poursuivi, c'est-à-dire essentiellement la recherche de très petits déplacements (2), concernent un cer-

(1) Le "Service du Contrôle" est un service d'Etat, indépendant (en principe) de l'exploitant.

(2) A noter des tentatives d'application de procédés photographiques ou électro-optiques susceptibles de concurrencer dans l'avenir ou même de supplanter les méthodes géodésiques classiques (stéréophotographie, trilatération).

tain nombre de points caractéristiques du comportement du barrage, de ses fondations et de ses abords.

L'erreur moyenne ou erreur probable que permettent dans des conditions normales les techniques actuelles au théodolite est de l'ordre de $\pm 2^{\text{dmg}}$ (1) dans le plan horizontal et $\pm 4^{\text{dmg}}$ en zénithal (2) - ($1^{\text{dmg}} = 1/10 \text{ mm à } 60 \text{ m}$) ; en nivellement géométrique, de l'ordre de $1/10$ de millimètre.

4.2. - Les déformations différentielles

Il s'agit du contrôle différentiel de la géométrie de la structure :

a) soit par référence à une verticale, le moyen le plus courant étant le "pendule" ou "fil à plomb" ; ces appareils sont pendus dans des puits ménagés à la construction, parfois forés a posteriori. L'erreur moyenne le plus couramment recherchée est de $0,1 \text{ mm}$, mais peut être très supérieure en cas de besoin. On utilise aussi souvent des "pendules inversés" ou "fil à flotteur" dont le fil ancré à la partie inférieure au fond d'un puits ou d'un forage, est tendu non plus par un poids, mais par un flotteur ;

b) soit par référence à un simple alignement, souvent matérialisé par un fils tendu ; entrent dans cette catégorie les "fils de fondation", dont une extrémité est scellée au fond d'un forage réalisé dans les appuis du barrage, l'autre étant solidaire d'un point de la structure - l'erreur moyenne des mesures est de l'ordre de $0,1 \text{ mm}$ (3).

4.3 - Les rotations par référence à un plan horizontal

Elles sont mesurées au moyen de clinomètres ou de clinographes parfois très sensibles, dont les sièges sont installés souvent dans les galeries inférieures des ouvrages. L'erreur moyenne d'une observation est de $+ 10^{-5} \text{ rad.}$ (soit $\pm 6^{\text{dmg}}$).

4.4. - Les déformations

Leur mesure met en œuvre les techniques classiques de l'extensométrie. Les appareils peuvent être :

— de préférence noyés dans le béton au moment de la construction, l'objectif le plus habituellement recherché étant la définition de l'état de contrainte dans un plan parallèle aux parements extérieurs de l'ouvrage. L'erreur moyenne peut être de 10^{-6} en ΔL bien que l'interprétation des lectures à mieux que 10^{-5} soit difficile et hasardeuse, à cause du nombre des paramètres susceptibles d'influencer les mesures ;

$(10^{-5} \text{ sur } 50 \text{ cm} = 5\mu)$

(1) Pour un angle mesuré avec quatre répétitions (normale et renversé).

(2) En nivellement géométrique l'erreur moyenne est de l'ordre de $\pm 1 \text{ mm/km}$.

(3) Un pendule comportant sur sa longueur plusieurs étages de points de lecture répond aux deux définitions ci-dessus.

— soit placés a posteriori sur les parements extérieurs de la structure, ce qui exige des précautions supplémentaires et augmente notablement les causes de dispersion en raison surtout des phénomènes thermiques et des difficultés d'interprétation ;

— on peut installer enfin des extensomètres scellés dans des forages en fondation.

4.5 - Les mesures de contraintes

Certains appareils sont conçus pour la mesure directe de la contrainte, sans intervention du module d'élasticité. Cependant, il faut considérer qu'en matière de barrage et surtout du point de vue de la sécurité, les déformations sont, en tout cas, les éléments essentiels desquels on peut toujours obtenir les contraintes au moins approchées. Les appareils de mesure directe de contrainte ("pressiomètres ou extensiomètres noyés en éprouvettes calibrées") sont plutôt réservés à l'obtention d'informations immédiates pour la comparaison avec les éléments du projet.

4.6 - Les mesures de température

— Téléthermomètres en des points situés à l'intérieur des barrages et représentatifs de son état thermique du moment ;

— Température de l'eau à une ou plusieurs profondeurs, sous la surface ;

— Température extérieure (maximale et minimale, ou mieux, enregistrement).

4.6 bis - Mesures de déformations internes

— Téléniveaux - tassements internes.

4.6 ter - Mesures de pressions interstitielles, de niveaux piézométriques, des drains.

— Tracé des courbes d'équipressions - Cellules glötzl.

— Niveaux piézométriques = efficacité du réseau du voile d'injection.

4.7 - Les mesures des sous-pressions et des fuites.

(analyse périodique des eaux de fuite)

Ces mesures primordiales ne mettent souvent en œuvre qu'un appareillage non spécifique (manomètre, déversoirs, capacités tarées). Cependant, la mesure des pressions hydrauliques internes dans le rocher peut exiger des dispositifs très élaborés.

4.8 - Les mesures de mouvement de joints

Elles ne sont généralement justifiées que pour le contrôle des joints séparant deux structures non clavées (plots de barrage poids rectilignes et évidés par exemple) ou dans le cas d'une voûte ou d'un poids-voûte pour surveiller l'opération d'injection des joints.

Les mesures d'ouverture de fissures mettent en œuvre les mêmes procédés mais avec des instruments utilisables en surface.

4.9 - Mesures spéciales

Elles font appel à des techniques souvent très modernes et en évolution et, à ce titre, il ne peut être question de les énumérer. On peut, cependant, citer

certaines méthodes dites de "contrôle non destructif" maintenant bien entrées dans la pratique :

- les examens en gammagraphie ou rayons X des structures minces ferraillées ou précontraintes ;
- les mesures de vitesse de propagation des ébranlements mécaniques, dont les résultats permettent de porter un jugement qualitatif sur la santé des bétons en place ;
- mesures géosismiques.

4.10 - Observations visuelles

Il convient de rappeler les consignes du rapport de synthèse du congrès des grands barrages tenu en 1967 à Istanbul : "Constituant probablement la méthode la plus élémentaire, l'observation visuelle contribue à la détermination des défauts de fonctionnement ou des détériorations d'un ouvrage. Les fissures, les inégalités de tassement, les infiltrations, la décoloration ou l'augmentation brute des eaux de cheminement, la croissance de la végétation sur les parements, les éboulements sont des signes avant-coureurs qui font l'objet d'investigations promptes et complètes".

Cette tâche d'observation et d'interprétation, ces recommandations écrites dans un rapport complété par des clichés photographiques, constituent à la longue le film de l'évolution de l'ouvrage dans le temps. Ainsi, ont pu être mis notamment en évidence des phénomènes de fluage sur un masque amont bitumineux.

5 — MODALITÉS DE MISE EN ŒUVRE EN FONCTION DES BUTS POURSUIVIS ET DES TYPES DE BARRAGE

Règles générales

Les déformations des barrages, notamment en béton, étant en grande partie conditionnés par les phénomènes thermiques, la technique des mesures doit être dominée par le souci de s'en abstraire, soit en les éliminant par un artifice opératoire, soit en définissant parfaitement la loi de ces effets perturbateurs.

D'autre part, un barrage en béton peut se déformer localement ou dans son ensemble assez rapidement d'une façon sensible : un autre impératif est donc d'opérer les mesures assez rapidement pour que les mouvements éventuels pendant la durée de l'opération restent inférieurs à la précision escomptée des mesures.

Enfin, certaines mesures comportant des visées topométriques peuvent être gravement faussées par les gradients de température dans l'air ambiant et les réfractions qui en résultent.

Ces considérations imposent dans la pratique certaines règles d'exécution des mesures qui doivent, en outre, tenir compte du fait que le problème ne se présente pas de la même façon pour un premier remplissage et en exploitation courante.

5.1 — Les mesures sur les points les plus thermiquement sensibles de l'ouvrage doivent être effectuées en évitant dans la journée les moments de températures extrêmes ou de forte insolation. Le début de la journée est de toute façon préférable à l'après-midi ; pour les mesures qui normalement demandent

une assez longue durée d'exécution (mesures topographiques), les visées sur les points sensibles doivent se grouper dans un temps aussi court que possible et toujours au cours de la même période de la journée.

5.2 — Dans les contrées à très forte insolation, on peut être amené à opérer au lever du soleil.

5.3 — Si un barrage est le siège de plusieurs types de mesures, il y a lieu d'effectuer au même moment, et éventuellement pendant la même heure, toutes celles dont les résultats sont comparables (exemples : topographie, topométrie, pendules, clinomètres).

5.4 — Si en exploitation le programme des mesures géodésiques ne prévoit leur exécution, comme c'est souvent le cas, qu'une ou deux fois par an, il faut toujours choisir les mêmes périodes de l'année (de préférence en saison moyenne) et les mêmes conditions météorologiques et de remplissage ; si au contraire en vue d'une connaissance plus fine du comportement de l'ouvrage, le programme prévoit plusieurs mesures annuelles, il est préférable de les répartir de façon à réaliser le maximum de combinaisons de température et de remplissage.

6 — TECHNOLOGIE DES APPAREILS ET DE LEUR MISE EN ŒUVRE

6.1 - Procédés topométriques

Les informations recherchées étant à la limite de la précision des appareils et des méthodes, les mesures topométriques doivent faire l'objet de précautions toutes particulières, et leur exécution exige un personnel hautement qualifié.

La méthode décrite ci-après est celle utilisée à l'Electricité de France pour l'auscultation de ses barrages et fait appel à l'aide de la méthode de mesure différentielle.

La **mesure différentielle** consiste à comparer les écarts de mesures entre une opération origine et des opérations successives et à utiliser ces écarts pour déterminer l'importance des mouvements. Cette méthode exige de se replacer toujours dans des conditions identiques d'une opération à l'autre (centrage, hauteur d'appareil, moment de la journée, etc...). De plus, la méthode de dépouillement dite différentielle graphique permet de connaître immédiatement dès le début des mesures l'ordre de grandeur des mouvements.

Les unités utilisées dans la surveillance des ouvrages sont le **millimètre** et la **seconde centésimale** ou décimilligrade (la seconde centésimale est l'angle sous lequel on voit 1/10 de millimètre à 60 mètres).

La précision habituellement réalisée est caractérisée par l'erreur moyenne quadratique dont la probabilité est de 66 %.

- $emq = \pm 3^{dmg}$ dans la détermination des angles horizontaux
- $emq = \pm 1$ mm en planimétrie.
- $emq = \pm 0,3$ mm en altimétrie (nivellement direct)
- $emq = \pm 3$ mm en altimétrie (nivellement indirect)

Les instruments utilisés couramment sont le théodolite Wild T3 pour la mesure des angles et le niveau

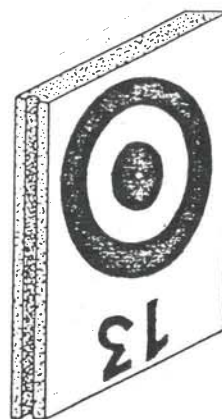
Wild N3 accompagné de mires Invar étalonnées pour le nivellement.

Les observations des angles sont faites à **quatre tours** (4) et **cinq pointés** (5). Le théodolite est toujours posé de la même façon sur la plaque de centrage : une vis de l'appareil est repérée par rapport à la plaque et bloquée à une position fixe (5 tours) ; la mise en station s'effectue en agissant uniquement sur les deux autres vis. Bien entendu, le calage de la bulle est particulièrement soigné et un parasol protège l'appareil des rayons du soleil.

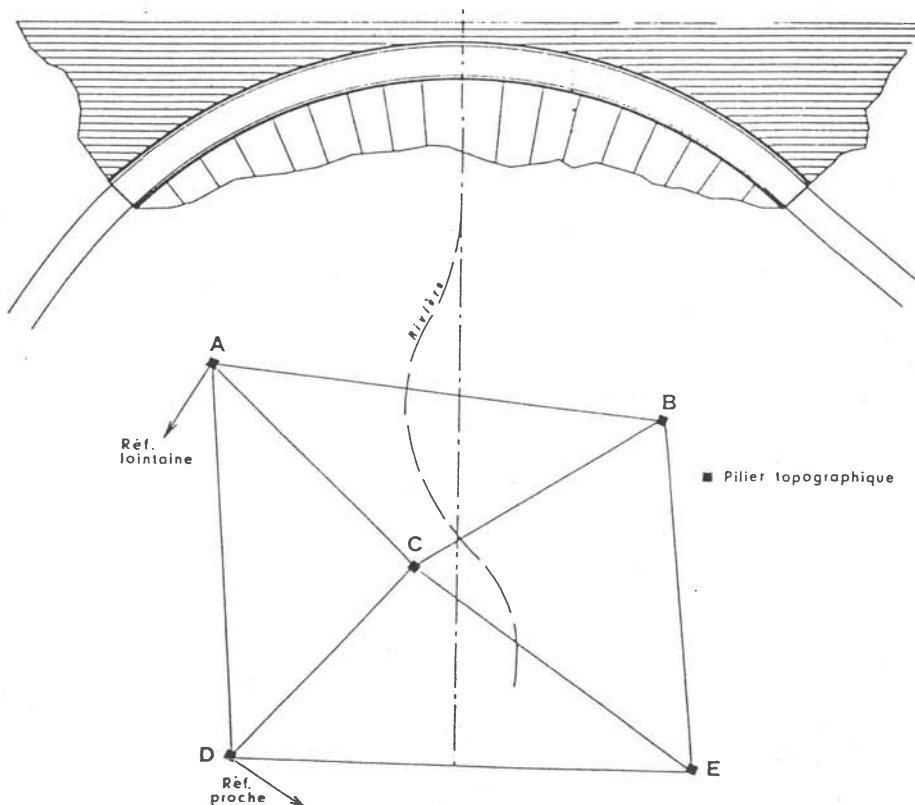
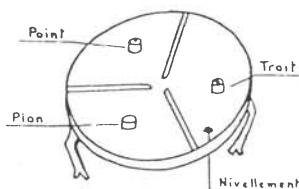
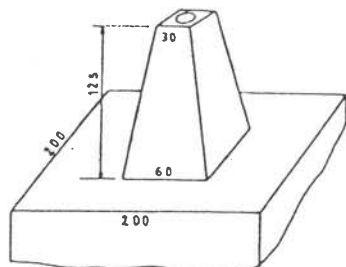
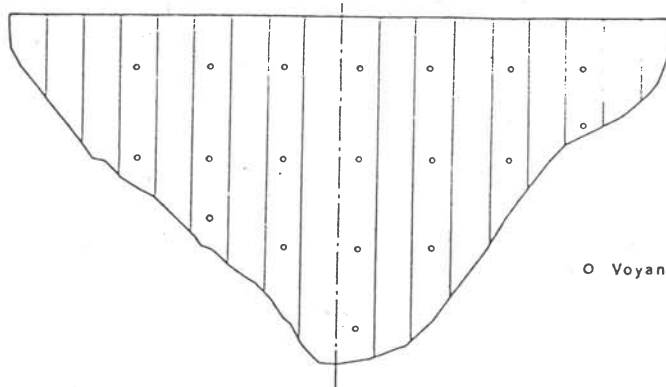
Le nivellement est mené suivant un cheminement aller et un cheminement retour, en utilisant les deux échelles de mire et des portées égales.

des piliers d'observation en béton munis de plaques de centrage (système trait, point, plan, dit de Lord Kelvin), ancrés solidement dans le sol, situés en dehors de la zone d'action du barrage et supposés fixes. Toutefois, le contrôle de la stabilité des piliers d'observation est effectué lors de chaque mesure et le déplacement de l'un d'eux peut ainsi être déterminé par le calcul.

des voyants cibles inaltérables (cocarde en lave émaillée) scellés directement au ras du parement sans aucune protection et dont le nettoyage s'effectue automatiquement par l'eau de pluie. Ces voyants sont intersectés à partir des piliers d'observations. Trois bonnes intersections sont en général suffisantes pour la détermination d'un voyant.



CANEVAS TOPOGRAPHIQUE



Le canevas est installé dès le début de la construction du barrage et sert d'abord à l'implantation de l'ouvrage. Ce réseau est ensuite amélioré par quelques piliers supplémentaires pour assurer la surveillance de l'ouvrage.

Le canevas est disposé de façon à assurer de bons angles d'intersection sur les voyants de l'ouvrage et à permettre le calcul de l'éventuel mouvement d'un pilier. Il comporte généralement deux références, l'une éloignée, l'autre rapprochée.

Avant remplissage a lieu l'**opération zéro** (0) puis successivement les opérations 1, 2, 3, etc... durant les différents paliers du remplissage, puis durant la vidange et enfin durant l'exploitation de l'ouvrage.

Le **couronnement** de chaque ouvrage comporte généralement des repères de nivellement qui sont déterminés par un nivellement de précision dont la stabilité est recherchée sur les rives à quelque distance de l'ouvrage.

Certains ouvrages, en terre ou enrochement, voient leurs cocardes situées sur le parement aval déterminées en **nivellement indirect** à l'aide du théodolite Wild T3. Les angles verticaux sont mesurés par série de trois voyants, lunette droite puis lunette renversée à raison de trois pointés par voyant. Le contrôle de la valeur des mesures est

assuré par la surveillance de la constante d'addition. Si l est la longueur horizontale de la visée, α l'angle de pente mesuré, la dénivelée h a pour valeur :

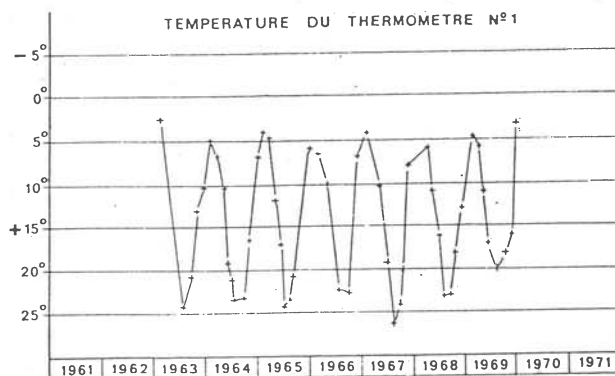
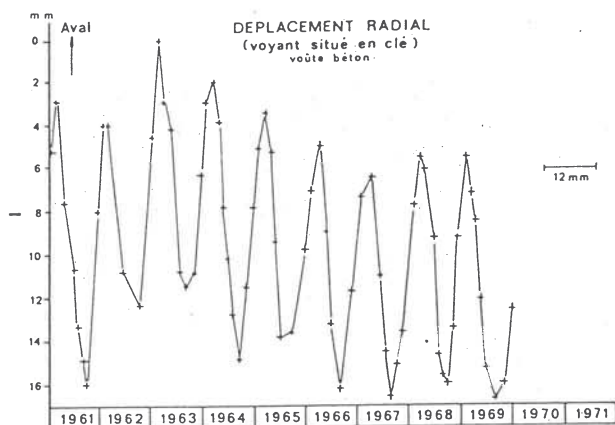
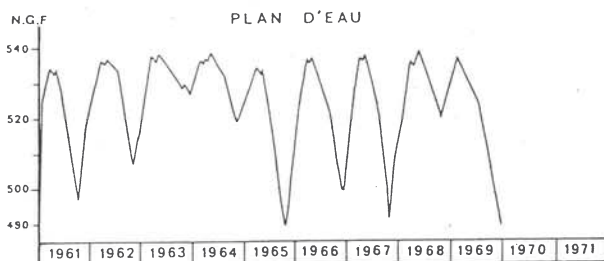
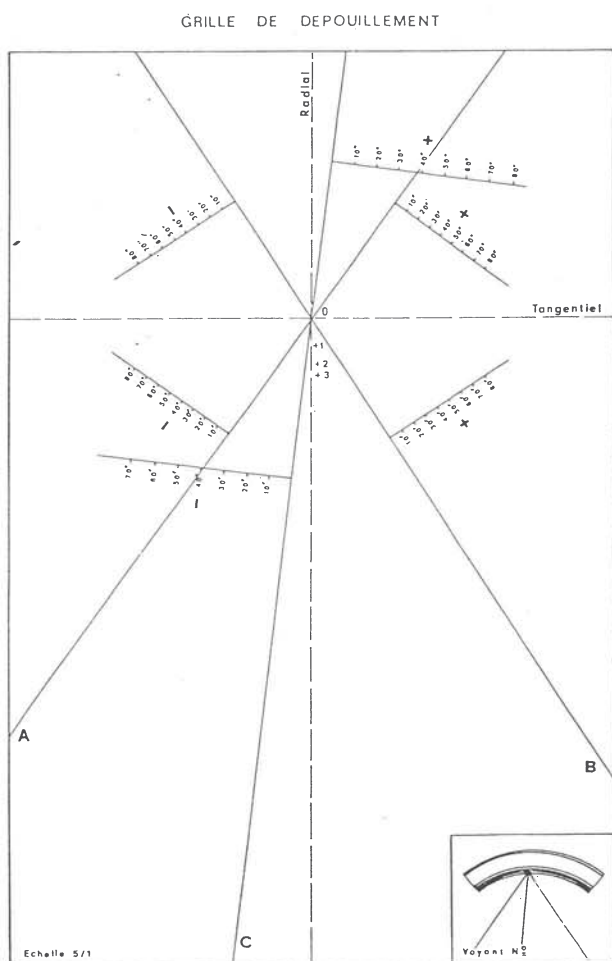
$$h = l \operatorname{tg} \alpha \text{ et } dh = l \frac{d\alpha}{637} + dl \operatorname{tg} \alpha$$

Toutefois, la précision du nivellement indirect est plus faible que celle du nivellement direct ($\text{emq} = \pm 3 \text{ mm}$). Néanmoins, dans le cas envisagé elle est très suffisante pour l'étude de l'évolution de l'ouvrage.

Le **dépouillement selon la méthode différentielle** consiste à faire les différences entre les observations faites à l'opération (n) et les observations faites à l'opération zéro (0).

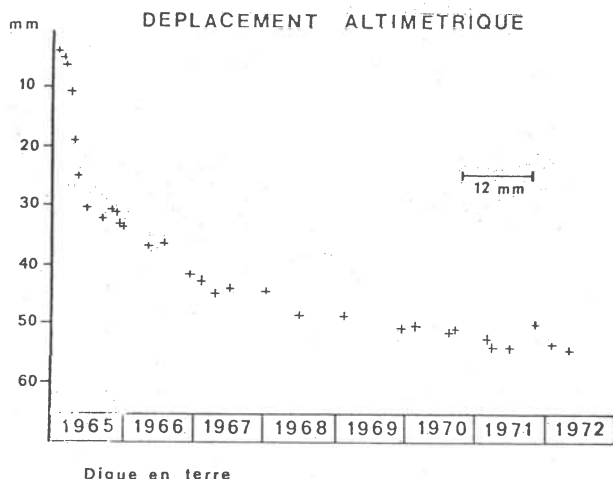
Pour la **planimétrie**, les différences angulaires sont reportées sur une "grille", sorte de graphique à grande échelle (5/1 ou 10/1) où figurent les directions des visées. Perpendiculairement à ces directions sont tracées des échelles graduées en secondes centésimales en fonction de la distance du voyant au pilier d'intersection. Ainsi sont reportées les différences angulaires indiquées ci-dessus et peut-on déterminer les déplacements du voyant par rapport à sa disposition origine.

En **nivellement direct**, les nouvelles cotes absolues sont calculées et comparées à celle de l'opération zéro.



En nivellement indirect, le calcul est mené en fonction du déplacement planimétrique mesuré sur la grille et de la différence angulaire observée.

Aujourd'hui, la méthode différentielle graphique est concurrencée par les calculs à l'ordinateur, mais elle garde tout son attrait pour obtenir rapidement sur le terrain, c'est-à-dire immédiatement, la valeur des déplacements des voyants.



Les **résultats** sont présentés d'une manière très simple de façon à faciliter au maximum l'interprétation. On porte en abscisse le temps, en ordonnée le mouvement étudié : celui-ci peut être l'écart altimétrique, ou l'écart radial, ou l'écart tangentiel. Des corrélations intéressantes peuvent être faites avec l'évolution de la hauteur du plan d'eau dans la réserve, la température extérieure ou la température intérieure de l'ouvrage.

De plus, lorsque le nombre d'observations est suffisant il est possible de procéder à une étude plus poussée de l'évolution de l'ouvrage et de déterminer à l'aide d'un programme sur ordinateur ce qui dans les écarts observés appartient :

- a) à l'influence de la charge hydrostatique (hauteur d'eau dans la retenue) ;
- b) à l'influence thermique (température du barrage).

Ainsi peut être mise en évidence soit la parfaite stabilité de l'ouvrage, soit l'évolution d'un phénomène particulier.

6.2 - Mesures référencées à la verticale du lieu

6.2.1 - La verticale du lieu constitue une direction de référence remarquablement sûre et stable. Les perturbations que peuvent y apporter le voisinage et la masse d'eau ($1 \text{ à } 2 \times 10^{-6}$ au maximum) et l'influence conjuguée de la lune et du soleil (environ 100 fois moins) sont en tout état de cause trop faibles pour qu'il soit nécessaire, dans la pratique, de les prendre en considération.

6.2.2 - Contrôle des composantes horizontales des déplacements différentiels :

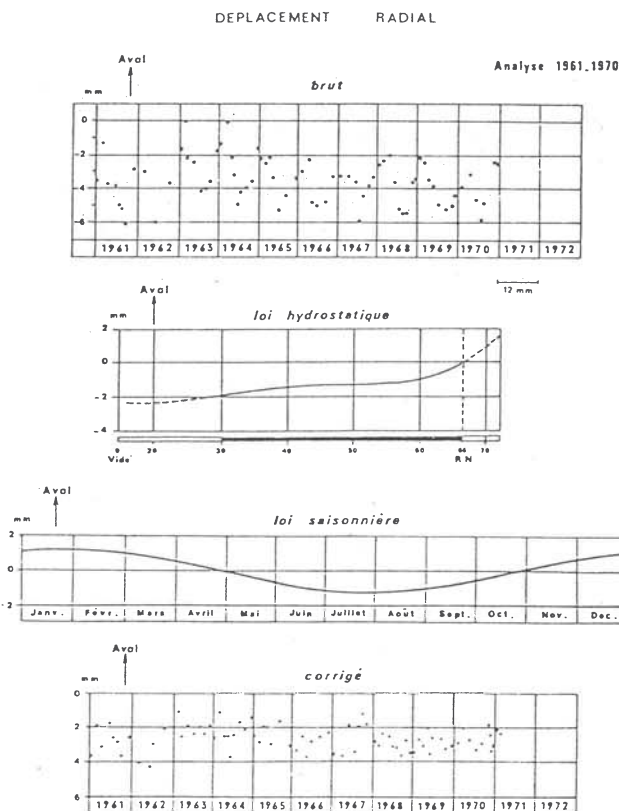
6.2.2.1 - Pendule ou fil à plomb.

Le fil à plomb constitue une matérialisation fidèle de la verticale du lieu, appelée à servir de référence pour mesurer les déformations relatives de l'ouvrage dans un plan vertical.

L'appareil, très simple dans son principe, comporte un fil ancré à sa partie supérieure et centré de façon parfaitement définie par rapport à l'ouvrage par une pièce dite : "centrage supérieur" ; le fil porte à sa partie inférieure un poids en relation avec la résistance mécanique du fil plongeant dans un liquide amortisseur. Un dispositif (coordinmètre, table de mesure, etc...), solidaire du barrage ou du rocher, permet de mesurer les déplacements relatifs du fil, c'est-à-dire du point de centrage supérieur par rapport au plan où le dispositif est placé, suivant des composantes choisies généralement radiales et tangentielles.

La conception et la réalisation de l'appareil doivent être telles qu'un incident mécanique ou la détérioration d'un de ses éléments ne perturbe pas la continuité des mesures dont le raccordement doit toujours pouvoir être assuré.

La longueur du pendule doit être suffisante pour donner lieu à des déviations facilement mesurables par



des moyens simples et pas trop grande pour éviter une trop grande sensibilité aux courants d'air ou aux courants de densité dans le pot d'amortissement. A ce titre, une longueur de l'ordre de 50 m donne de bons résultats ; de toute façon, pour des barrages atteignant ou dépassant 100 m, il y a intérêt à fractionner les longueurs du pendule (cette disposition est souvent impérative pour les barrages à double courbure).

Dans le cas d'installations à l'extérieur du barrage, le fil devra passer dans un tuyau vertical le protégeant du vent et dont le diamètre intérieur ne devra pas être inférieur à 150 mm.

Le point supérieur de suspension sera situé quelques mètres plus bas que le couronnement pour éviter les mouvements thermiques rapides qui affectent la crête des barrages.

Le point de mesure inférieur doit être placé le plus bas possible, éventuellement au fond d'un puits approprié, creusé dans le rocher de fondation. Il devient alors solidaire des couches profondes du terrain de fondation et pourrait à la limite avec un puits suffisamment profond être considéré comme pratiquement fixe.

6.2.2.2. - Le pendule inversé remplit les mêmes fonctions que le pendule direct avec cet avantage que le point d'ancrage du fil peut être scellé au fond d'un forage.

Dans ce cas, et si le forage est assez profond, ce qui dépend des contraintes transmises par le barrage au rocher et des caractéristiques géologiques, on peut admettre que l'appareil indique des mouvements absolus.

Un tel forage constitue une certaine sujétion car il doit être suffisamment vertical et rectiligne pour que le fil ne risque pas d'en toucher les parois : étant donné les aléas de ce travail, une précaution élémentaire est d'adopter un diamètre de forage assez grand et en relation avec la profondeur.

Le contrôle de la verticalité et de la section utilisable du trou réalisé est absolument nécessaire. On n'évoquera pas ici les techniques permettant cette vérification.

Le réservoir dans lequel est immergé le flotteur est ordinairement rempli d'eau, additionnée éventuellement d'antigel. Le volume du flotteur lui-même doit être tel qu'il entraîne une traction suffisante sur le fil (par exemple, 20 kg pour un fil de 1 mm de diamètre).

Les conditions d'emploi du pendule inversé ne diffèrent pas sensiblement de celles d'un pendule direct. Il est simplement indiqué que des mouvements de convection s'amorcent facilement dans le liquide de la cuve à la faveur de gradients thermiques et risquent de fausser très sensiblement les mesures ; de ce fait, il peut devenir nécessaire dans certains cas d'isoler thermiquement toute la cuve.

6.2.2.3 - Les moyens de lecture des déplacements des fils de pendule direct ou inversé obéissent aux mêmes impératifs et sont notamment conditionnés par le fait que le fil peut être dévié de sa position d'équilibre par une force transversale très faible ; un calcul élémentaire montre que tout frottement parasite dans un dispositif de lecture de position du fil peut engendrer des erreurs supérieures à la précision souhaitée, généralement de l'ordre de 0,1 mm, mais souvent supérieure.

Les moyens de lecture les plus sensibles sont optiques : palpeur optique ou électro-optique ou lunette de visée si l'on recherche une très grande finesse ; mais certains dispositifs de lecture à l'œil nu donnent facilement mieux que 0,1 mm.

Les coordimètres mécaniques sont commodes, mais leur construction doit être très soignée pour éviter les frottements.

Des appareils à lecture électrique peuvent permettre une grande finesse de mesure, mais leur principe doit

être tel qu'aucune réaction électro-mécanique ne s'exerce entre l'appareil et l'équipage mobile.

Enfin, il existe des appareils à palpeur optique et lecture digitale qui constituent sans doute l'optimum dans le sens de la fidélité, de la précision et de l'aptitude à la télétransmission.

6.2.2.4 - Pendule optique.

Lorsque les dispositions locales ne permettent pas l'emploi d'un pendule à fil, on peut avoir recours à une lunette spécialement adaptée aux visées verticales. Ce procédé qui se rattache aux méthodes de la géodésie peut rendre service, mais sa précision est en principe inférieure à celle du pendule mécanique.

6.2.3 - Mesure locale de l'angle de rotation de l'ouvrage dans un plan vertical : que ce plan soit orienté dans le sens amont, aval ou dans le sens perpendiculaire, cette mesure se réfère également à la verticale du lieu. L'appareil peut être un niveau à bulle comportant une fiole de grand rayon (par exemple 30 ou 40 m), il est alors généralement amovible ; ou un pendule court vertical ou horizontal équipé d'un moyen de lecture électrique ou micrométrique, susceptible d'être installé à demeure et de comporter une possibilité de télétransmission. L'information diffère de celle que peut donner un pendule long, du fait que le clinomètre donne une indication locale, alors le pendule intègre sur toute sa hauteur un ensemble de déplacements élémentaires (rotations ou cisaillements).

Il est souvent intéressant de prévoir des cheminements clinométriques avec chevauchement des bases successives.

En ce qui concerne plus spécialement les clinomètres amovibles fréquemment utilisée, une bonne conception du siège est très importante : la base de mesure ne doit pas être inférieure à 0,10 m, les touches sur lesquelles reposera le clinomètre doivent définir sans ambiguïté le plan dont on mesure les variations d'inclinaison, l'embase ne doit pas être montée sur un socle en béton rapporté mais doit être scellée directement au contact du béton d'origine, en radier de galerie ou en niche et de toute façon dans un lieu où les variations de température sont très atténuées.

Les clinomètres amovibles sont généralement installés dans une singularité de la structure, telle qu'une galerie et du fait du caractère très local de la mesure, on constate souvent que l'angle de rotation ainsi relevé ne coïncide pas avec l'angle qui peut résulter de la prise en considération d'autres mesures par exemple les variations de pente locale des déformations tracées à partir des indications des mesures topographiques ou des pendules.

Les inconvénients propres aux clinomètres amovibles sont compensés par le fait qu'ils permettent, grâce à la pratique du retournement à 180°, une mesure absolue de la pente, ce qui exclut toute erreur due à la dérive de l'appareil.

6.3 - Mouvements des joints ou des fissures

Il faut distinguer les joints ou les fissures débouchant à l'amont, donc généralement immergés et ceux accessibles depuis l'aval.

Dans le premier cas, les appareils les plus simples et les mieux adaptés sont du type potentiométrique étanche.

Dans le deuxième, on peut se contenter de mesurer au comparateur ou pied à coulisse l'écartement de touches scellées en béton.

Souvent, ces touches sont conçues de façon à permettre des mesures tridirectionnelles.

Pour les mesures des joints de construction sont généralement employés des dilatomètres à variation de fréquence (électro-acoustiques), ou à variation de résistance, placés à l'intérieur du barrage pendant la construction.

Bibliographie

— Communication au Treizième Congrès des Grands Barrages New Delhi, 1979.

Méthodes de détection des déformations des Barrages.

— Groupe de travail animé par M. J. COMBELLE (Electricité de France) et réunissant M. DAUGE (Société du Canal de Provence), M. P. DUBOIS (Compagnie Nationale du Rhône) et M. GAUTIER (Bureau Coyne et Bellier).

— Bulletin n° 23 de juillet 1972 de la Commission Internationale des Grands Barrages.

— Dépliant "La Surveillance des Ouvrages à la Société du Canal de Provence" par M. Maurice DAUGE. (Août 1972).

12

E

11

E

10

E

09

E

08

E

07

E

Ets GUIZOU
215, RUE DU ROUET
13008 MARSEILLE

LOCATION

notre parc d'instruments
topographiques
à votre disposition

 **91/79.41.41**



ne restez pas
en panne...

louez un appareil.

NIVEAUX
THEODOLITES
TACHEOMETRES
DISTOMATS D13S
LASERS

Expédition Express sur toute la France
Tarif location sur demande

13