Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 48 (1956)

Heft: 7-9

Artikel: Le comportement du barrage de Rossens durant les premières années d'exploitation

Autor: Gicot, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921514

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

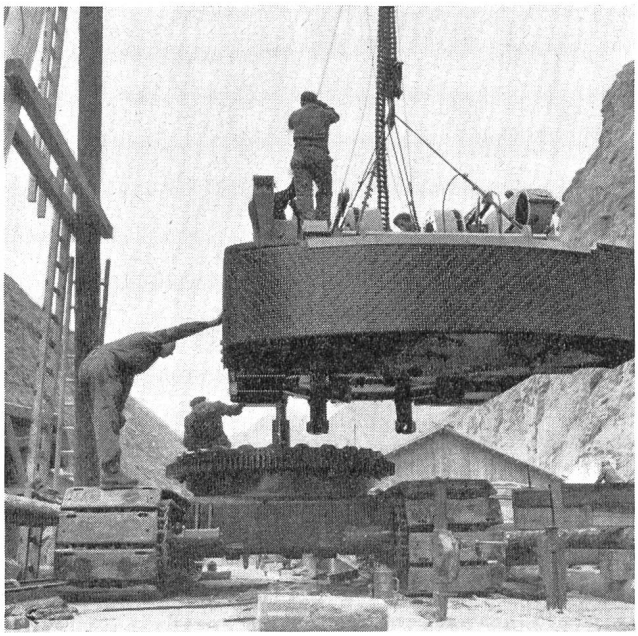

Abb. 15 Montage eines großen Raupenbaggers (Gewicht 60 t) auf der Baustelle Mauvoisin

Schlußbemerkungen

Die Baumaschinen auf einer Großbaustelle, insbesondere bei Talsperrenbauten im Gebirge, sind außerordentlichen Beanspruchungen ausgesetzt. Für die Pflege, den Betrieb und den Unterhalt der Maschinen sind zweckdienliche und neuzeitlich ausgerüstete Reparaturwerkstätten mit Montagehallen und sorgfältig sortierte Ersatzteillager notwendig. Sauberen und rationellen, stationären wie mobilen Einrichtungen für die Brennstoff- und Schmierstoffversorgung ist besondere Beachtung zu schenken.

Große Geräteparks der Bauunternehmungen erfordern schließlich zentrale, d. h. ortsgebundene Geräteverwaltungen mit einem Werkstattbetrieb, welcher gestattet, einwandfreie Generalrevisionen schwierigster Art durchzuführen. Daselbst ist auch die Möglichkeit geboten, geeignetes Fachpersonal heranzubilden. Das Ziel einer derartigen Zentrale ist, in Verbindung mit den Baustellenleitungen eine vorteilhafte Beschaffung, eine schnelle Zuweisung sowie eine zweckmäßige und sichere Lagerung der Baugeräte und Ersatzteile zu gewährleisten und den Baustellen technisches Fachpersonal zur Verfügung zu stellen.

Le comportement du barrage de Rossens durant les premières années d'exploitation

H. Gicot, ing.-conseil, Fribourg

Les expériences faites dans l'exploitation de l'aménagement hydro-électrique de Rossens-Hauterive des Entreprises Electriques Fribourgeoises ont déjà fait l'objet d'une étude parue en 1951*

Cette étude ne contenait toutefois aucun renseignement sur le comportement de l'ouvrage principal de l'aménagement: le barrage-voûte de Rossens. Pour aborder l'examen des multiples mesures et observations effectuées sur cet ouvrage, il fallait non seulement disposer d'un nombre suffisant d'auscultations, mais encore, et surtout, du temps nécessaire au dépouillement de la documentation et aux calculs longs et souvent fastidieux indispensables à une confrontation valable entre l'analyse théorique et les réalités.

Les résultats qui sont analysés ici ne sont d'ailleurs que partiels. Leur commentaire doit être considéré plutôt comme une étude préliminaire et n'a pas l'ambition de répondre à toutes les questions soulevées par les divergences et les contradictions, souvent inexplicables en apparence, entre les mesures «in situ» et les prévisions des calculs.

Nous ne traiterons ici que des déformations radiales mesurées jusqu'en 1952, en laissant aussi de côté celles de 1948, effectuées durant une période où l'effet combiné d'un tout premier remplissage, de l'injection des joints du barrage, du fluage du béton et du gonflement du sous-sol de fondation rendent l'analyse des premières déformations particulièrement ardue, pour ne pas dire inextricable.

Les mesures postérieures à 1952 sont en voie d'examen, mais leur étude n'est pas terminée.

Rappelons tout d'abord quelques données essentielles sur la nature du sol, nature particulière qui fait du barrage de Rossens un ouvrage d'exception.

Construit de 1945 à 1948 sur la Sarine, le barrage de Rossens est implanté dans la mollasse marine miocène, formation essentiellement gréseuse, d'une grande variété pétrographique. On y rencontre principalement des grès de grain moyen, parfois de grain assez grossier, en bancs épais, alternant avec des lits plus minces de grès fins et de schistes gréso-marneux.

Les grès moyens sont très homogènes. La fissuration affecte plutôt, sans toutefois être importante, la mollasse à grain fin, plus dure. Les diaclases ne sont ouvertes qu'au voisinage de la surface, et perdent de leur signification avec la profondeur.

L'implantation d'un grand ouvrage dans la mollasse, c'est-à-dire dans une roche tendre connue pour sa grande déformabilité et qui était considérée autrefois comme inapte à recevoir un grand barrage, posait un problème nouveau et délicat et demandait une connaissance approfondie du comportement du sol sous des charges d'intensité variable, répétées et prolongées. De nombreux essais furent exécutés, durant les années 1943

* L'aménagement hydroélectrique de Rossens-Hauterive après deux ans d'expérience, par J.-F. Bruttin, ingénieur, Bulletin Technique de la Suisse Romande, No 6, 1951.

et 1944, sur place et en laboratoire, pour déterminer les propriétés géotechniques des différentes catégories pétrographiques en présence.

En voici les résultats essentiels.

Sous l'action de charges de brève durée, mais répétées, la déformation totale et la déformation permanente, ou plus exactement résiduelle, croissent à peu près parallèlement après les premières sollicitations. La différence, représentant la partie élastique de la déformation, est à peu près constante sous une pression donnée, avec tendance à décroître quand la pression augmente. La valeur du module de déformation élastique et celle du module de déformation plastique apparente, ainsi que leur rapport, sont assez différents suivant la nature pétrographique de l'échantillon essayé en laboratoire ou du banc rocheux éprouvé sur place.

Dans le cas d'une sollicitation constante d'une durée de quelques jours, la déformation totale, partant d'une valeur initiale immédiatement acquise, augmente plus ou moins rapidement les premiers jours, pour rester presque stable les jours suivants. Dès la mise hors de charge, la déformation tombe brusquement à une valeur de déformation plastique apparente. Il n'y a guère d'hystérésis, mais il n'est pas exclus qu'avec le temps se manifeste une certaine élasticité différée.

La proportion entre déformation permanente et déformation totale varie suivant que l'essai est fait sur une roche vierge ou sur une roche déjà fatiguée par des sollicitations répétées. Dans ce dernier cas, l'essai de charge prolongé durant quelques jours a parfois décelé une déformation plastique presque nulle, celle-ci ayant déjà été acquise par l'épreuve précédente.

Ici aussi, la valeur des modules de déformation et la proportion de déformation plastique dépendent du caractère pétrographique de la roche.

Enfin, les essais de fluage exécutés sur place et en laboratoire ont montré que la déformation plastique se poursuit encore durant de nombreux mois. Au bout d'une année, la déformation totale atteint dans certains cas plus du double de la déformation initiale, mais n'est pas encore stabilisée, bien que la courbe de déformation en fonction du temps soit très aplatie.

Une autre particularité géotechnique mise en relief par ces essais tant sur place qu'en laboratoire, particularité qui n'est d'ailleurs pas exclusive à la mollasse, est la différence entre la déformabilité d'une même roche dans le sens de la stratification et perpendiculairement à cette dernière. La seconde est toujours supérieure à la première. L'écart varie de 20 à 80 %, mais il s'est révélé, en général, de l'ordre de 50 %.

Les valeurs des modules de déformation élastique mesurées variaient dans la mollasse à gros grain et à grain moyen, entre 15 000 et 25 000 kg/cm² dans le sens vertical, et entre 20 000 et 40 000 kg/cm² dans le sens horinzontal, en chiffres ronds. Dans les bancs à grain fin et gréso-marneux, les valeurs correspondantes étaient de l'ordre de 20 000 à 45 000 kg/cm² dans le sens vertical et 25 000 à 80 000 et même 120 000 kg/cm² dans le sens horizontal. Quant aux déformations plastiques, elles représentaient, en général, de 20 à 50 % des déformations totales.

La valeur importante à déterminer en vue des calculs était cependant moins le module absolu du rocher que le rapport η entre le module du béton E_b et le module de la roche de fondation E_r, soit

$$\eta = \frac{E_b}{E_r}$$

Compte tenu des résultats des essais géotechniques et de la prudence qui s'imposait, on a admis pour les calculs principaux du barrage un rapport η de 10 dans le sens horinzontal et de 15 dans le sens vertical, ce que nous désignons par:

$$\eta = 10\ (15)$$

En outre les conditions de contraintes ont été vérifiées pour d'autres valeurs de η, et jusqu'à $\eta = 20\ (30)$.

Le barrage de Rossens est du type voûte, d'une hauteur totale de 83 m et d'une longueur de 320 m au couronnement (fig. 1 et 2). Le rayon de l'extrados décroît de haut en bas, de 166,70 à 120 m. L'épaisseur, de 5 m au couronnement, augmente d'abord rapidement dans le tiers supérieur, pour atteindre 14 à 15 m dans la partie moyenne. Le bas du profil en travers s'épanouit en un pied de 28 m de largeur. Cette base, exceptionnellement large par rapport à l'épaisseur moyenne, a été commandée par des considérations statiques. Etant donné la très grande déformabilité du sol, particulièrement dans le sens vertical, il était nécessaire de réduire la rotation des consoles sur leur base, afin de limiter à une valeur admissible les fatigues d'extension verticales dans la région supérieure aval, fatigues d'extension engendrées par la résistance opposée par la région du couronnement à la déflexion des têtes des consoles vers l'aval.

Les arcs sont d'épaisseur constante, avec un élargissement local aux appuis, élargissement ayant pour but de limiter la pression spécifique sur la fondation ainsi que de réduire la rotation des naissances des arcs et, par voie de conséquence, les sollicitations à la clef.

Le niveau maximum est à la cote 677,0, créant une retenue totale de 200 millions de mètres cubes. Le niveau minimum d'exploitation est à la cote 642,0. La tranche de 35 m utilisable représente 180 millions de mètres cubes.

La mesure des déflexions radiales et tangentielles s'effectue au moyen de trois pendules disposés dans la section médiane II et dans deux sections latérales I et III (fig. 2). Certaines des mesures au pendule sont contrôlées par des mesures de triangulation. Afin de limiter l'étendue de cet exposé, nous ne donnons ici que les résultats donnés par la console principale II, dans l'axe du barrage. Les conclusions que nous en tirons sont aussi applicables aux sections I et III.

Le barrage a été exécuté uniformément avec un béton dosé à 250 kg de C. P. normal par mètre cube de béton en place, et fabriqué avec des graviers et sables naturels de très bonne qualité, provenant de dépôts interglaciaires.

Les résistances obtenues ont été excellentes. A l'écrasement, elles ont atteint en moyenne 420 kg/cm² à 28 jours. Compte tenu des modules d'élasticité mesurés sur éprouvettes ainsi que de la relation entre module et résistance à l'écrasement, on peut évaluer le module d'élasticité du béton de l'ouvrage, une fois le fluage effectué, à environ 400 000 kg/cm², chiffre que nous adoptons ici pour la suite de l'étude.

Le calcul d'un ouvrage au stade projet ayant pour but de vérifier que dans les hypthèses extrêmes encore possibles, les conditions de stabilité et de sollicitation

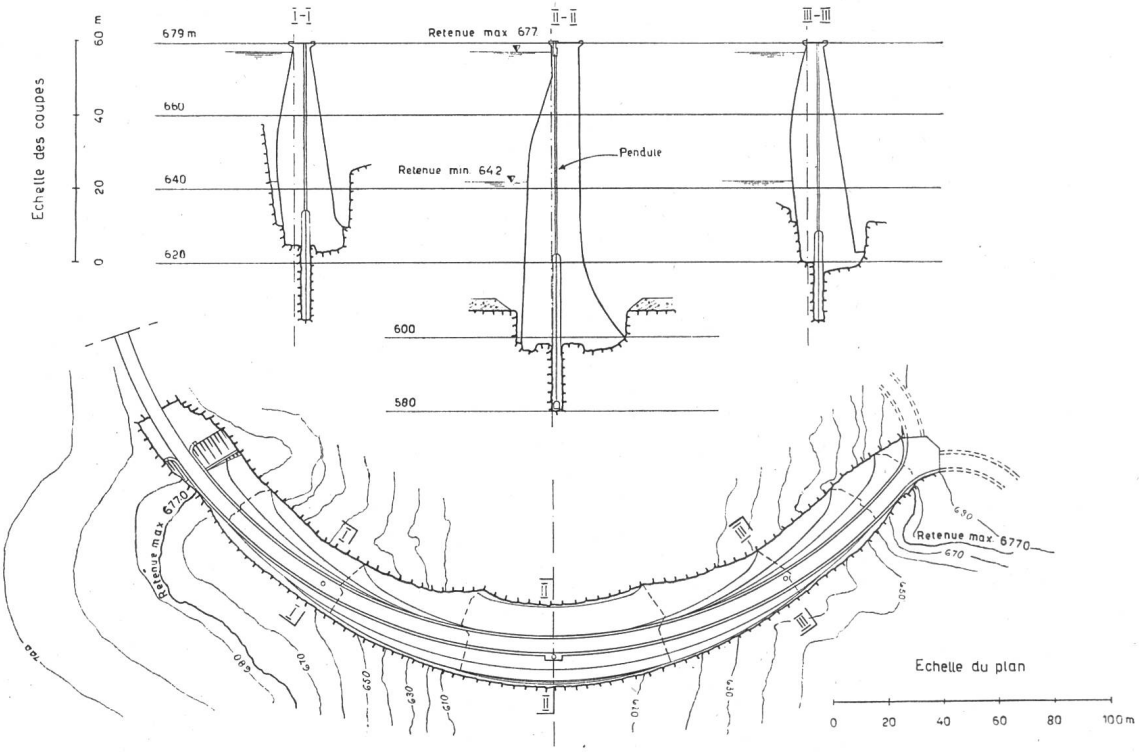

Fig. 1 Barrage de Rossens, plan de situation et coupes

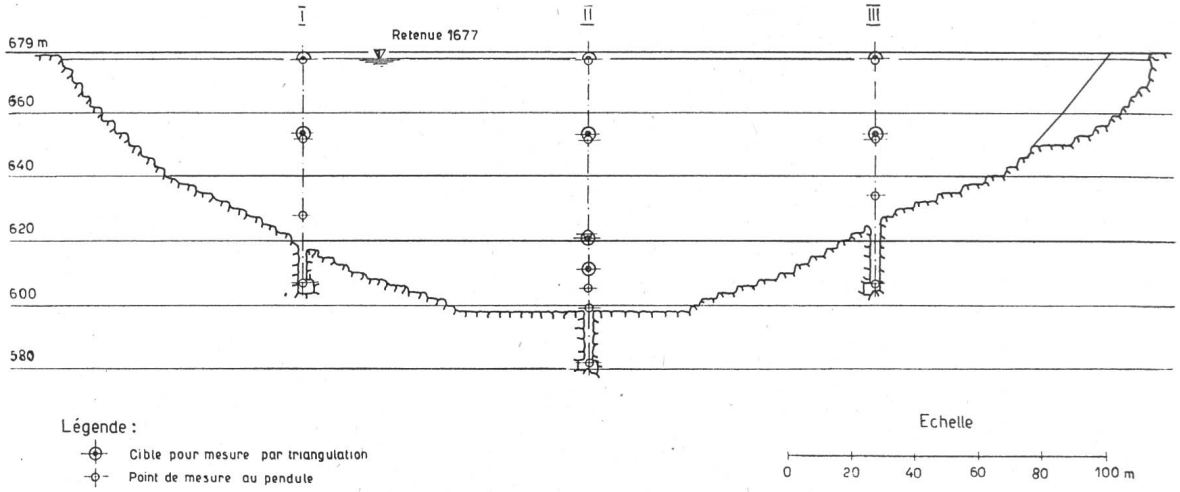

Fig. 2 Barrage de Rossens, coupe en long développée

restent admissibles, ce calcul a été fait ici, comme nous l'avons dit, pour un rapport prudent $\eta = 10$ (15), et pour les cas limites de charge et de température.

Les mesures effectuées sur l'ouvrage ont de leur côté pour premier but de s'assurer que les conditions que l'on a fixées sont respectées. On pourrait donc, en première analyse, se contenter de cette vérification et se borner à constater, en ce qui concerne les déformations, qu'elles restent inférieures aux valeurs maxima calculées, et qu'il ne se passe rien d'anormal.

Si l'on veut, par contre, passer d'une confrontation qualitative à une comparaison quantitative et tirer de cette comparaison des enseignements valables sur le comportement de l'ouvrage et du sol de fondation, et sur le processus de déformation, il est nécessaire de serrer la réalité de beaucoup plus près.

Or, la valeur réelle du rapport η ne nous est pas connue exactement. Nous savons seulement qu'elle varie avec le temps, et qu'elle comprend une part élastique et une part plastique. D'autre part, si nous connaissons les niveaux du lac régnant au moment des mesures, et entre les mesures, si nous connaissons aussi la valeur de la température en de nombreux points du barrage, ces niveaux ne coïncident pas toujours avec les niveaux

limites, mais sont souvent quelconques, et les variations de température offrent une image beaucoup plus complexe que les écarts thermiques extrêmes admis dans le calcul du projet.

Il faut donc, pour pouvoir tenter une comparaison entre mesures et calculs, déterminer auparavant analytiquement les déformations du barrage dans chaque cas particulier, en tenant compte aussi exactement que possible des températures enregistrées et, bien entendu, des niveaux du lac. Cette détermination analytique doit en outre être faite pour deux valeurs extrêmes η' et η'' de η, entre lesquelles les déformations peuvent être interpolées. Nous l'avons exécutée pour $\eta' = 1$ (1,5) et pour $\eta'' = 10$ (15). Comme la variation des déformations entre ces deux valeurs est pratiquement linéaire en fonction de η, l'interpolation n'entache pas le calcul d'erreur appréciable.

La figure 3 donne, à titre d'exemple, les lignes élastiques dans l'axe du barrage pour les niveaux du lac 677,0 et 654,80, pour les deux valeurs de η, soit $\eta' = 1$ (1,5) et $\eta'' = 10$ (15).

Des diagrammes semblables à ceux de la figure 3, établis pour une variation de température montrent que les déformations du barrage sont particulièrement sensibles à ces variations, mais par contre que, pour une variation de température donnée, l'influence du rapport η sur les déformations est beaucoup moins sensible que pour la poussée hydrostatique.

Nous étudions donc ici, comme on l'a dit plus haut, les mesures effectuées de 1949 à 1952, en prenant comme mesure *initiale* celle de mars 1949. Voici, pour les cinq mesures considérées, que nous désignons par A, B, C, D et E, les dates, les niveaux du lac au moment des mesures, et les niveaux *moyens* du lac dans l'intervalle séparant deux observations consécutives.

Mesure	Date	Niveau du lac	Niveau moyen entre les observations
A	24. 3. 49	654,77	
			669,68
B	15. 6. 49	677,00	
			665,39
C	24. 3. 50	661,67	
			671,51
D	22. 3. 51	662,80	
			673,37
E	14. 12. 51	675,85	

La mesure A étant considérée comme initiale, nous avons à examiner, en fait, des *différences* de déformations. Il est évidemment plus délicat d'opérer sur des différences que sur des valeurs absolues mais les exigences de l'exploitation excluaient totalement la possibilité d'effectuer une mesure initiale, ou des mesures postérieures, à lac vide.

Nous désignerons dans la suite les *différences* de mesures par B—A, C—A, etc., et nous nous limiterons à l'examen des déformations *radiales*. Ces déformations, telles qu'elles sont fournies par les observations des pendules et par les contrôles de triangulation, sont données à la figure 4.

On notera que les déformations mesurées par triangulation et au moyen des pendules sont loin de toujours coïncider.

L'influence notable des variations de température exige que l'on en tienne compte aussi exactement que possible. L'état thermique est donné d'une façon très complète par les nombreux instruments noyés dans le béton. Mais ces instruments montrent que la répartition des températures est passablement capricieuse. Non seulement la température varie de haut en bas du barrage, parfois très irrégulièrement, mais encore de l'amont à l'aval et souvent d'une rive à l'autre. Pour ne pas être entraîné dans des complications inextricables, il est nécessaire de simplifier et de schématiser les variations thermiques sans trop s'écarter de la réalité, et

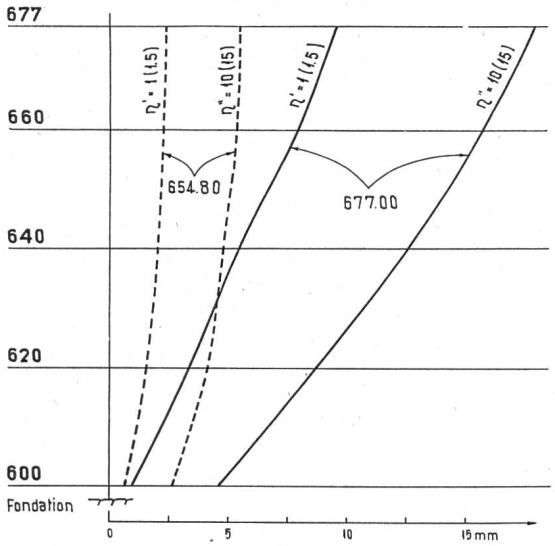

Fig. 3 Valeurs calculées des déformations radiales de la console médiane II pour les niveaux du lac 677,0 et 654,80 pour 2 valeurs extrêmes du rapport η entre les modules d'élasticité du béton et du rocher

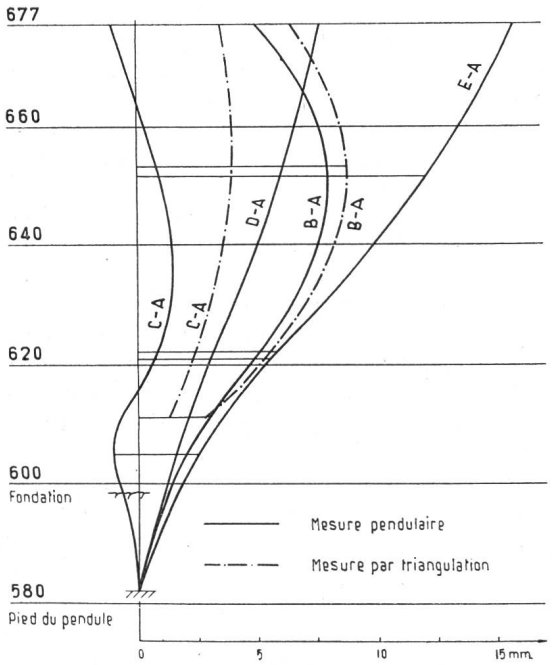

Fig. 4 Résultats des observations B, C, D, E des déformations radiales de la console médiane exécutées depuis mars 1949 à décembre 1951, la mesure A de mars 1949 étant prise comme observation initiale

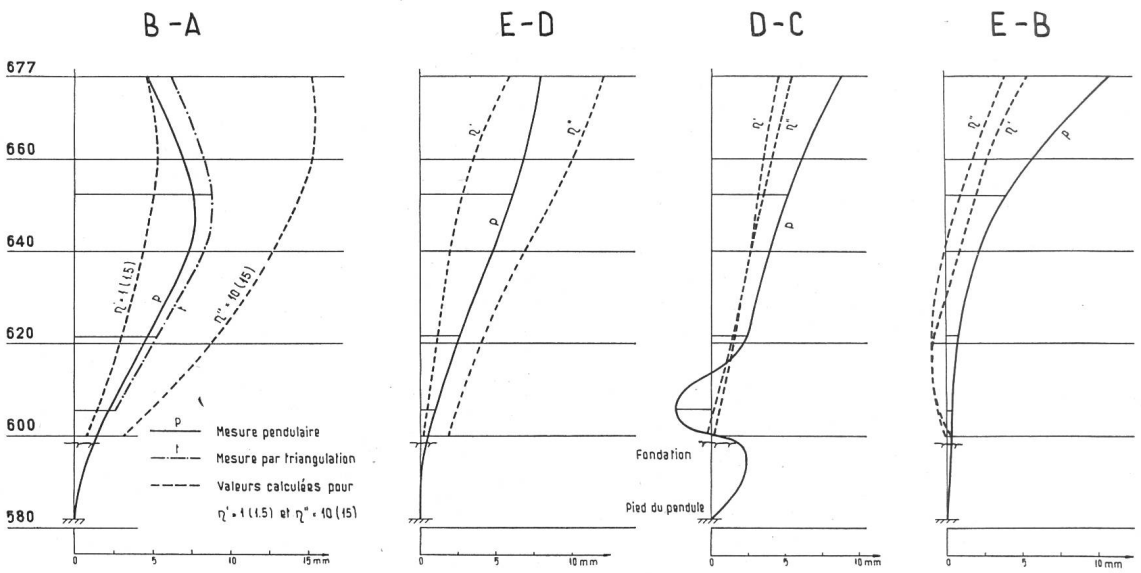

Fig. 5 Comparaison entre les déformations radiales observées et les déformations élastiques calculées pour 2 valeurs extrêmes du rapport η, et pour des combinaisons de mesures mettant en relief d'une part la partie élastique des déformations (B–A et E–D), d'autre part leur partie plastique (D–C et E–B)

c'est là précisément que gît la difficulté. C'est à cette difficulté, entre autres, que l'on peut attribuer certains écarts entre les déformations calculées et observées, surtout dans la région du couronnement dont l'état de déformation est particulièrement sensible aux conditions thermiques.

Le travail de calcul préparatoire décrit plus haut nous permet à présent d'aborder l'analyse des observations et d'essayer d'en tirer certains enseignements sur le comportement réel de la roche de fondation.

L'examen de la fig. 4 montre immédiatement qu'il ne saurait être question de considérer les déformations du barrage comme résultant seulement ou principalement du niveau momentané du lac et de l'état thermique correspondant. On voit qu'à conditions de charge semblables, les déformations sont très différentes et qu'elles ont augmenté avec le temps. La conclusion qui s'impose est qu'elles comportent non seulement une partie élastique mais aussi une partie plastique de même ordre d'importance. Nous réservons pour le moment la question de savoir si cette partie apparemment plastique est totalement irréversible ou si elle contient une part d'élasticité différée. Ce que nous voulons tout d'abord chercher, c'est à dissocier les déformations élastiques pures qui sont seulement fonction des conditions instantanées, des déformations plastiques — apparentes — qui sont fonction du temps et de toutes les conditions de sollicitation qui ont régné entre deux observations.

A cet effet, nous sommes conduits à comparer les mesures dans un ordre différent. Pour mettre en relief la déformation élastique, nous confronterons des observations faites sous des niveaux du lac différents, mais à des dates aussi rapprochées que possible, par exemple les observations B et A, ou E et D. Par contre, la déformation plastique apparaîtra dans la confrontation de mesures faites pour des niveaux du lac identiques ou peu différents, mais séparés par un certain intervalle de temps telles que D et C ou E et B.

La figure 6 donne les graphiques de déformations résultant de cette confrontation, d'une part B—A et E—D, d'autre part D—C et E—B. Dans ces graphiques figurent aussi les déformations *élastiques* calculées pour $\eta' = 1$ (1,5) et η'' 10 (15) compte tenu aussi de la température, bien entendu. La comparaison des valeurs mesurées et calculées permet de constater ce qui suit:

Dans les graphiques B—A et E—D (fig. 5), où la déformation élastique est prépondérante, la courbe mesurée est située entre η' et η'', et correspond à une valeur apparente de η de l'ordre de 4 à 5. Comme la déformation contient néanmoins une certaine part plastique, on en déduira que le rapport élastique est quelque peu inférieur à 4.

Les graphiques D—C et E—B mettent bien en évidence la déformation plastique. La courbe mesurée ne se situe plus *entre* les courbes calculées pour la déformation élastique, mais se trouve largement *en dehors*. L'écart représente la déformation plastique intervenue dans les intervalles de temps D—C respectivement E—B

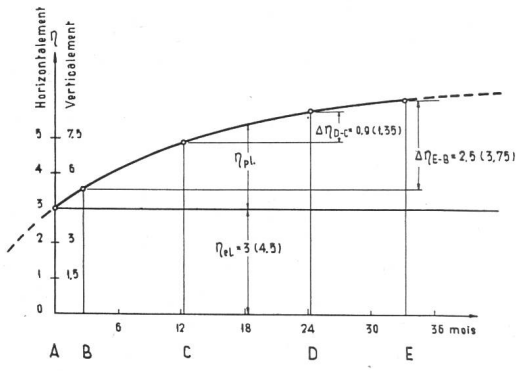

Fig. 6 Diagramme des valeurs probables des rapports η de déformation élastique $\eta_{él}$ et plastique apparente η_{pl} pour la période allant de mars 1949 (A) à décembre 1951 (E)

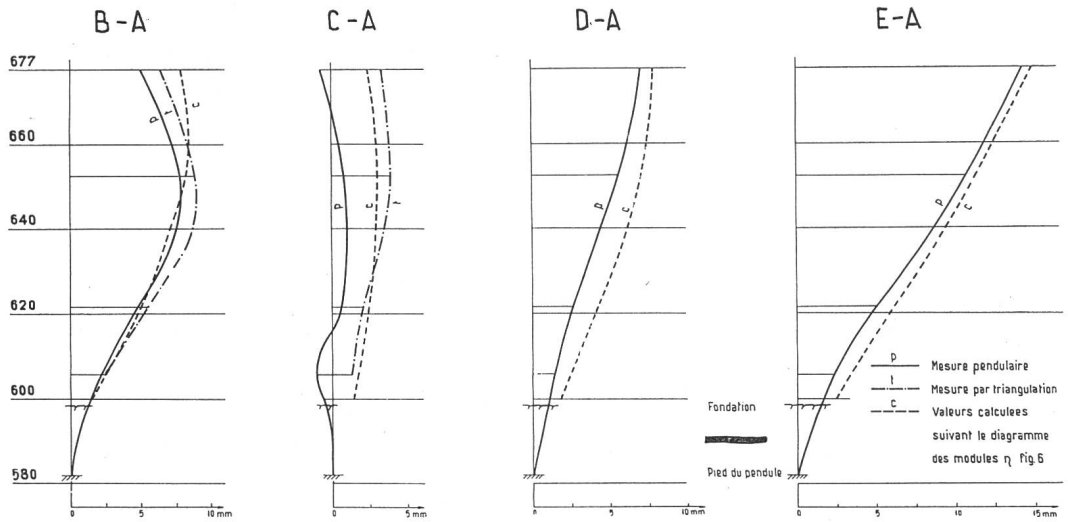

Fig. 7 Comparaison, à titre de contrôle, entre les déformations radiales mesurées et les valeurs correspondantes calculées en tenant compte de la déformabilité élastique et plastique apparente, sur la base du diagramme fig. 6

sous l'effet de la charge hydrostatique totale moyenne qui a régné durant ces intervalles. En se reportant aux graphiques de déformation calculés pour les poussées hydrostatiques en question — graphiques qui ne sont pas reproduits ici — et pour les valeurs η' et η'' on conclut que la déformation plastique intervenue dans l'intervalle D—C correspond à une variation $\Delta\eta$ de 0,9 (1,35) environ, et celle qui s'est produite dans l'intervalle E—B, à $\Delta\eta = 2{,}5$ (3,75) environ.

Compte tenu des résultats ci-dessus, et des diagrammes de fluage fournis par les essais préliminaires, on arrive après quelques tâtonnements à se proposer comme valeurs probables du rapport η_{pl} relatif aux déformations plastiques en fonction du temps, et pour la période considérée allant du début de 1949 à la fin de 1951, celles données par la courbe de la figure 6, et comme valeur moyenne probable du rapport η_{el} relatif aux déformations élastiques, la valeur $\eta_{el} = 3$ (4,5), le module d'élasticité du béton étant $E_b = 400\,000$ kg/cm².

Il nous reste à calculer, à titre de vérification, les déformations pour les conditions correspondant aux mesures B—A, C—A, D—A et E—A en tenant compte, pour la partie élastique, de $\eta_{el} = 3$ (4,5) et des différences de niveau et de température B—A, C—A, etc., et pour la partie plastique, des valeurs η_{pl} données par la courbe de la figure 6 et des niveaux moyens du lac dans les intervalles successifs. La partie élastique s'obtient aisément par interpolation entre les courbes calculées pour $\eta' = 1$ (1,5) et $\eta'' = 10$ (15) de la figure 6. Quant aux déformations plastiques, connaissant les déformations δ' et δ'' correspondant à $\eta' = 1$ (1,5) et $\eta'' = 10$ (15) pour n'importe quel niveau, et par conséquent leurs différences spécifiques $\Delta\delta = \dfrac{\delta''-\delta'}{9}$, nous les calculons en déterminant pour chaque intervalle B—A, C—B, D—C et E—D la déformée correspondant au niveau moyen du lac et à la variation $\Delta\eta$ tirée du diagramme (fig. 6), puis nous les cumulons. Pour ces déformations plastiques, nous ne tenons compte que de la poussée hydrostatique, et nous négligeons l'effet éventuel de la température. Ceci peut certainement se faire sans erreur appréciable, car les forces engendrées par les variations thermiques et s'exerçant sur la fondation sont beaucoup plus faibles que celles qui sont dues à la poussée hydrostatique. En outre, elles agissent tantôt positivement, tantôt négativement, et il n'est pas exclu que, au cours d'un cycle thermique, une certaine régénération de la déformation plastique intervienne par élasticité différée.

La figure 7 donne le résulat du calcul de contrôle. Elle vérifie que les valeurs proposées pour η_{el} et η_{pl} conduisent, pour la période considérée, à une correspondance satisfaisante avec les valeurs mesurées. Certes, la coïncidence n'est pas parfaite, mais il faut tenir compte: des imperfections du calcul, pour lequel nous avons dû adopter un certain nombre de simplifications, de l'approximation des observations, qui est mise en lumière par la confrontation des mesures au pendule et des mesures de triangulation, enfin de la complexité des phénomènes de déformation de la roche dont on sait, par les essais préliminaires, qu'ils ne se traduisent pas par une courbe idéale telle que celle de la figure 6, mais par un diagramme irrégulier, présentant des paliers suivis d'ascensions.