

<b>Zeitschrift:</b>	Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
<b>Band:</b>	53 (1961)
<b>Heft:</b>	6-7
<b>Artikel:</b>	Le comportement des digues en terre pendant leur construction et durant l'exploitation de l'aménagement
<b>Autor:</b>	Schaerer, C.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-920757">https://doi.org/10.5169/seals-920757</a>

### 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:** 23.02.2026

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

## Le comportement des digues en terre pendant leur construction et durant l'exploitation de l'aménagement

Ch. Schaefer, chef de section,

Laboratoires de Recherches hydrauliques et de mécanique des terres annexés à l'EPF, Zurich

CDU 627.839.1

Les contrôles du comportement des barrages sont affaire du maître de l'œuvre. Les autorités fédérales se réservent toutefois un droit de supervision et d'approbation dont les bases légales sont fixées par la Loi Fédérale complétant celle qui concerne la police des eaux du 27 mars 1953 (Art. 3<sup>bis</sup> et 13<sup>bis</sup>), ainsi que par le Règlement d'Exécution de cette loi (du 9 juillet 1957). La Confédération exerce la haute surveillance sur l'exécution des ouvrages.

Sont soumis à ce règlement les barrages dont la hauteur de retenue au-dessus du niveau d'étiage du cours d'eau ou du niveau du talweg est de 10 m au moins ou, si cette hauteur est de 5 m au moins, ceux dont la retenue est supérieure à 50 000 m<sup>3</sup>.

L'Art. 7 précise: Durant la période de construction et après l'achèvement de l'ouvrage, l'autorité de haute surveillance sera renseignée sur:

- a) les résultats des essais de béton, ainsi que des examens de contrôle en matière de mécanique des terres. Ces essais seront exécutés suivant un programme établi en collaboration avec un laboratoire d'essai des matériaux ou de mécanique des terres reconnu. Ces organes effectueront ensuite des contrôles périodiques sur le chantier. Les résultats de tous les essais et examens seront consignés chaque fois dans un procès-verbal;
- b) les résultats des injections nécessaires pour la consolidation et l'étanchement du sous-sol;
- c) les résultats des mesures de déformation, de contraintes de températures, de sous-pressions, de tension de l'eau intersticielle et de pertes d'eau par infiltrations, effectuées pendant la période de mise en eau et au cours des premières années d'exploitation;
- d) les principaux plans d'exécution.

La responsabilité de l'ingénieur et des autorités civiles a été suffisamment mise en évidence par les récentes catastrophes qui ont résulté de la rupture d'ouvrage de retenue, pour qu'il soit superflu de souligner pour quoi des contrôles systématiques et minutieux sont indispensables. Nous préciserons par contre ce qu'il importe de contrôler, à quel moment ces mesures et observations doivent être faites, qui les exécute, puis comment et avec quelle fréquence elles doivent s'opérer et, pour terminer, qui les interprète et en dégage les conclusions. Nous ne parlerons ni des essais préliminaires sur la base desquels se fera l'étude du projet, ni des essais sur place avant ou juste au démarrage des travaux qui eux permettront de mettre au point la technique de mise en place des diverses zones du barrage, limitant notre exposé aux digues en terre corroyées.

### Nature et objet des contrôles

Un barrage en terre (tout comme son frère en béton), doit être stable et étanche. La différence essentielle du point de vue technique entre ces deux types de construction réside dans l'adaptabilité de la digue, qui peut s'accommoder aux mouvements du sous-sol et aux tassements propres, sans perdre les deux qualités précédentes.

L'étude qui fixera la géométrie du barrage devra tenir compte des propriétés particulières du sous-sol et des matériaux constituant l'ouvrage, de façon à ce que les déformations provoquées dans le temps par les forces

de la pesanteur (les forces de masse pour le cas du tremblement de terre), la pression de l'eau et les efforts résultant de la percolation à travers le massif restent dans les limites que l'analyse théorique et l'expérience ont sanctionnées. Il s'agira donc de vérifier pendant la phase de construction que l'exécution soit conforme aux hypothèses à la base du projet, d'autre part de contrôler la bonne tenue de l'ouvrage terminé.

Selon les dimensions du barrage, son site, la grandeur de la retenue, la nature de l'assise et celle des matériaux constitutifs, les dispositions de contrôle et l'appareillage seront plus ou moins importants; de même, la fréquence et le degré de précision de toute mesure devra être adapté au résultat escompté (sans oublier le facteur «personnel à disposition», ses aptitudes, ses connaissances).

Pour pouvoir suivre le comportement des assises et compte tenu des possibilités d'accès, on prévoit des mesures de tassements, de pressions interstitielles à l'aide de jauge électriques ou électro-mécaniques, de déformations (nivelllements, alignements, triangulations), de perméabilité (dans des forages, évtl. pour contrôler l'efficacité d'injections), de débit de résurgeances ou de sources, de niveaux piézométriques.

Le contrôle des matériaux constituant la digue implique en général des mesures en deux emplacements distincts:

a) dans les divers sites de prélèvement: Ces essais renseignent sur l'homogénéité de la formation exploitée et sur la grandeur du fuseau de dispersion des caractéristiques physiques. On déterminera p.ex. les teneurs en eau naturelles, les limites de consistance (Atterberg), les granulométries (évtl. partielles), la compactibilité (Proctor). Les principaux résultats de ces essais doivent être obtenus dans des délais de une à six heures au plus. De cette façon, l'instance chargée d'exploiter les essais de contrôle et de les traduire en langage du conducteur des travaux pourra intervenir en temps utile.

b) Sur le barrage lui-même, après compaction:

Ces essais permettent d'apprécier les qualités de bien-façon de l'ouvrage. Il s'agit de mesures de densité apparente (matériau sec), de teneur en eau (calcul de la porosité et du degré de saturation), de granulométrie (afin de pouvoir réduire les propriétés mesurées «in situ» aux «étalons» déterminés en laboratoire et de contrôler une éventuelle ségrégation), de perméabilité «in situ», évtl. de résistance au cisaillement «in situ».

L'observation du comportement de l'ouvrage dans son ensemble implique des mesures de tassement, de pressions (totales ou de l'eau intersticielle dans le massif), de déformation du massif, des parements et du couronnement, de percolation et de débit des drainages. L'appareillage utilisé à cette fin doit donner les garanties que les mesures sont dignes de foi pendant huit à dix ans au moins (pas de variation du point «0» dans les appareils électriques p.ex.).

La traduction en langage du conducteur des travaux des résultats des investigations préliminaires se fait dans deux documents:

- le cahier des charges,
- les prescriptions relatives à l'excavation, le transport et la mise en place des matériaux constitutifs de la digue. Ces spécifications préciseront les valeurs moyennes et le fuseau de dispersion tolérable pour chaque zone.

Le conducteur des travaux et les surveillants seront par la suite consultés avec profit pour établir le programme des essais de chantier. Ils seront sur place le plus souvent possible lors de l'exécution de ceux-ci. Le programme des essais de contrôle, leur nature et leur but leur seront commentés. Les résultats de ces essais de contrôle leur seront rapportés avec le commentaire correspondant.

### Rôle du laboratoire de contrôle. Efficacité des liaisons entre le laboratoire et le chantier

Le laboratoire de contrôle (labo de chantier) assume les cinq fonctions essentielles suivantes:

1. informe la direction des travaux de la qualité des matériaux mis en place, du comportement de l'ouvrage pendant son exécution;

2. veille à ce que les matériaux constitutifs soient acheminés selon leur qualité sur la partie de l'ouvrage qui leur correspond;

3. propose à la direction des travaux les mesures à prendre pour éliminer, améliorer ou rectifier les erreurs de mise en place ou des malfaçons. Il propose en particulier, sur la base des observations météorologiques, l'interruption de la mise en place dans les zones de l'ouvrage, où le matériau est sensible à une variation de la teneur en eau en cas de pluies. Il fixe également la reprise du travail dans cette zone;

4. met en place, entretient et observe les repères et les divers appareils de mesure nécessaires pour contrôler le comportement de l'ouvrage;

5. rédige un rapport

a) quotidien sur les résultats des essais de contrôle de la veille. Ce rapport mentionnera également les observations météorologiques (nébulosité, précipitations, vents, températures), les volumes mis en place chaque jour séparément pour chaque zone de la digue, le nombre des essais effectués, les valeurs moyennes obtenues, ainsi que les valeurs extrêmes.

N. B. L'emplacement de chaque essai de contrôle doit être fixé par un système de coordonnées en situation et en cote.

b) hebdomadaire, mensuel ou trimestriel (selon l'importance de l'ouvrage et le rythme de la construction) sur les mesures des repères de tassement, des appareils de contrôle des pressions interstitielles, des températures et des tensions à l'intérieur du massif, des teneurs en eau, des percolations et du débit des sources, des mesures de déformation horizontales (visées ou pendules), etc.

c) annuel sur l'ensemble des investigations et des travaux effectués par le laboratoire de contrôle, le personnel affecté, les faits essentiels observés, propositions pour la prochaine campagne de construction.

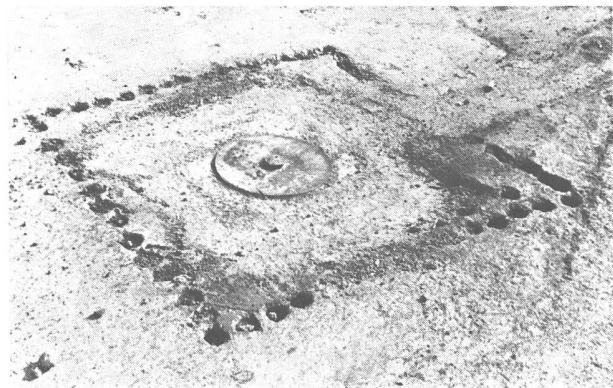


Fig. 1

Cellule pour mesure de la pression du sol (Galileo). Le rocher a été excavé à l'explosif (forages visibles) et la cellule posée dans un lit de béton. A droite, arrivée du câble également enrobé dans du béton.

Eingebaute Bodendruckdose (Galileo). Der Fels wurde ausgesprengt (Bohrlöcher sichtbar) und die Dose in Beton verlegt. Rechts: Einmündung des einbetonierten Zuleitungskabels.

Soil-pressure-gauge (Galileo). Rock has been blasted (boring holes are visible) and the gauge bedded in concrete. At the right, embedded in concrete, the cable.



Fig. 2

Cellule «Maihak» pour la mesure des pressions interstitielles.

«Maihak»-Porenwasser-Druckdose.

«Maihak»-gauge for measuring the pore-water pressure.

Fig. 3

Les câbles et cellules «Maihak» sont recouverts de matériau fin du noyau. Die Kabel und «Maihak»-Porenwasser-Druckdosen sind mit feinem Kernmaterial überschüttet.

The «Maihak» pore-pressure cells and cables are covered with fine core material.



- Ces rapports sont à adresser:
- à la direction locale des travaux
  - à la direction générale des travaux
  - au laboratoire de mécanique des sols ayant collaboré à l'établissement du projet.

Pour assurer l'indépendance intellectuelle et personnelle ainsi que pour garantir l'efficacité des interventions du laboratoire de contrôle, l'organisation suivante a fait ses preuves:

- Le laboratoire de contrôle ne doit pas dépendre de la direction locale des travaux, mais toujours de l'instance supérieure, c'est-à-dire en général de la direction générale des travaux.
- Le laboratoire de contrôle ne doit jamais dépendre de l'entreprise, surtout pas si les travaux sont exécutés en règle propre.
- Le chef du laboratoire de contrôle (ingénieur ou technicien, selon l'importance de l'ouvrage, la formation et les qualités du titulaire) doit disposer d'un personnel, d'installations ainsi que de moyens autonomes et suffisants. Il faut tenir compte par exemple

du travail en deux ou trois postes par journée, du rythme des travaux, des distances à parcourir, etc.

- La liaison avec l'instance compétente qui décide des mesures à prendre en cas de pluies, de malfaçon ou autre désordre doit être permanente et rapide. Il faut que le chef du laboratoire de contrôle soit certain de trouver en tout temps une personne compétente à la direction générale des travaux pour décider.
- La supervision des résultats de contrôles de mise en place, des mesures des appareils de contrôle, la formation du personnel du laboratoire, etc. par le laboratoire de mécanique des sols qui a collaboré pour établir le projet est indispensable.

Il reste toutefois bien entendu que — comme pour toute organisation d'une collectivité — la personnalité, le caractère, les aptitudes et les connaissances ainsi que la formation des chefs appelés à collaborer pour la construction d'un ouvrage, restent des facteurs déterminants.

#### **Contrôles pendant l'exécution des travaux au barrage de Göscheneralp<sup>1</sup>**

Les particularités de cet ouvrage — le fait notamment que le noyau est constitué par un béton d'argile (agrégats alluvionnaires  $\phi$  0—100 mm avec adjonction de 10 à 12 % en poids de poudre d'argile «Opalinus») — ont fait l'objet de publications antérieures.

Les travaux du laboratoire de chantier, effectués par le personnel de la direction des travaux (1 ingénieur, 1 technicien, 4 à 5 aides par poste de travail) comprenaient:

- Le contrôle des matériaux dans les zones d'emprunt, puis, après sa mise en place, sur la digue,
- la mise en place, l'entretien des dispositifs de mesures et, pendant la période des travaux, leur lecture.

Ces mesures se rapportent à:

- 8 cellules à pressions, type «corde vibrante» (Galileo) pour la mesure de la pression des terres. Ces palpeurs sont placés directement sur le rocher, enrobé dans un socle en béton (fig. 1);
- 61 cellules à pressions, type «corde vibrante» (Maihak MDS 75) pour mesurer les pressions interstitielles. Ces palpeurs sont disposés en majeure partie dans deux profils caractéristiques «340» et «440» à divers niveaux (fig. 2);
- 8 repères télescopés, type «Bureau of Reclamation» avec bras transversaux tous les 1,5 m permettant de suivre les tassements propres du massif; 4 repères sont placés en quatre profils dans le noyau (fig. 3), 2 dans le massif d'appui aval et 2 dans le sous-sol compressible à l'amont;
- 42 repères superficiels, disposés sur les parements, renseignant sur les déformations du corps de la digue;
- la mesure des débits de percolation qui sont receuillis dans les drainages (à cet effet l'aire du noyau au droit de son talus aval a été subdivisé en trois zones drainées chacune séparément dans la galerie d'injection).



Fig. 4

Mise en place d'un bras du repère de tassement dans le noyau.  
Einbau eines Querarmes des Setzungspegels in der Kernzone.  
Putting in place of a cross arm of the settlement-gauge in the core-zone.



Fig. 5

Essai de contrôle dans la zone 3a.  
Verdichtungskontrolle in der Drainagezone 3a.  
Compaction test in the zone 3a.

<sup>1</sup> Concernant la situation géographique, la géométrie et les caractéristiques de cette digue, cf. Prof. G. Schnitter: Diques en terres et en enrochements, p. 206; G. Schnitter and J. Zeller: Geotechnical investigations of mixtures of bitumen, clay or bentonite with sandy gravel, Congrès des Grands Barrages, Juin 1961, Rome, Question No 27 (contenant 12 références bibliographiques).

Le coût de ce laboratoire de chantier, les installations de mesures, l'exploitation et les travaux en régie pour la pose des appareils s'élèvent à environ 1,2 millions de francs, soit environ 1,4 % du coût du barrage.

Les expériences acquises peuvent se résumer comme suit:

#### a) Contrôle des matériaux

Les résultats des essais de contrôle effectués sur les matériaux des diverses zones du barrage sont groupés au tableau 1. On y trouvera aussi les volumes examinés et le nombre d'essais entrepris. La fig. 6 renseigne sur les valeurs mensuelles moyennes des caractéristiques du noyau étanche. Dans ce diagramme figurent également les dispersions des résultats; les deux courbes de valeurs extrêmes délimitent la plage dans laquelle se trouvent les % de tous les résultats. Ces déterminations ont été faites de façon systématique dans les deux profils de mesures 340 et 440; elles ont été complétées par

des prélèvements opérés à dessein dans les emplacements que le surveillant a désigné comme étant de moindre qualité (environ 1/3 de toutes les mesures).

Toutes les grandeurs caractérisant le matériau ont été «réduites» à la fraction 0—30 mm pour les zones (1) et (2); respectivement 0—100 pour les zones (3a) et (3b) et 0—200 pour les zones (4/6). Cette façon de procéder permet de comparer les essais «in situ» avec l'«échantillon» du laboratoire. Le calcul s'est fait selon la formule empirique suivante valable pour les courbes granulométriques de Göschenenalp et pour p de 75 à 100 %.

$$\gamma_e' = \frac{\gamma_e \cdot p}{1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_s} (1-p)}$$

$\gamma_s$	= poids spécifique	= 2,72 t/m³
$\gamma_e'$	= poids spécifique app. mat. sec, fraction	0—100 mm
$\gamma_e$	= poids spécifique app. mat. sec, fraction	0—30 mm
p	= pourcentage (poids) des grains compris entre 30 et 100 mm	

Contrôles de mise en place pour la digue de Göschenenalp

Tableau 1

Zone		1957	1958	1959	1960	Total (resp. moyenne générale)
1	Volume m³ nomb. essais m³ par essai Val. moy. 0-30 mm	97 600 293 330 $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_e' \text{ t/m}^3 \\ w \% \\ p \% \end{array} \right.$ (30-100 mm)	306 000 535 570 2,09 7,45 16,9	341 000 440 776 2,10 7,31 22,1	131 000 220 595 2,13 7,1 22,7	876 200 1488 (592) (2,1) (7,2) (22,6)
2	Volume m³ nomb. essais m³ par essai Val. moy. 0-30 mm	16 100 51 320 $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_e' \text{ t/m}^3 \\ w \% \\ p \% \end{array} \right.$ (30-100 mm)	93 000 45 2 060 2,15 7,7 21,0	153 000 159 962 2,23 7,2 30,8	90 000 61 1 475 2,19 6,5 39,3	352 100 316 (1 125) (2,18) (6,85) (35,8)
3 a	Volume m³ nomb. essais m³ par essai Val. moy. 0-200 mm	18 700 (6) 3 133 $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_e' \text{ t/m}^3 \\ w \% \\ p' (> 30 \text{ mm}) \% \end{array} \right.$	137 000 44 3 100 2,28 3,0 55,0	193 000 130 1 480 2,25 3,2 54,7	106 000 59 1 797 2,15 3,4 53,1	624 700 239 (2 610) (2,25) (3,2) (53,8)
3 b	Volume m³ nomb. essais m³ par essai Val. moy. 0-200 mm	7 400 — — $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_e' \text{ t/m}^3 \\ w \% \\ p' (> 30 \text{ mm}) \% \end{array} \right.$	53 000 28 1 900 2,23 2,15 70,4	92 000 112 821 2,13 1,4 75,7	16 000 13 1 231 2,15 1,45 77,0	168 400 153 (1 100) (2,16) (1,66) (74)
4/6	Volume m³ nomb. essais m³ par essai Val. moy. 0-100 mm	936 000 5 187 200 $\left\{ \begin{array}{l} \gamma_e' \text{ t/m}^3 \\ w \% \end{array} \right.$	1 520 000 8 190 000 2,18 6,5	2 380 000 2 1 190 000 2,21 7,2	788 000 4 197 000 2,13 —	5 624 000 <sup>4</sup> 19 (296 000) (2,16) (6,55)

<sup>2</sup> Il s'agit des volumes établis sur la base des profils levés périodiquement.

<sup>3</sup> La densité apparente humide qui en résulte pour le noyau (matériau 0—100 mm) est donc de

$\gamma_e^* = 2,3 - 2,35 \text{ t/m}^3$ .

<sup>4</sup> Le volume total du barrage est de 9,2 millions de m³. Aucun essai n'a été effectué sur le matériau des zones 5 et 7 ni sur celui du remblai de surcharge au pied amont (total 5/7/R = 1 147 000 m³).

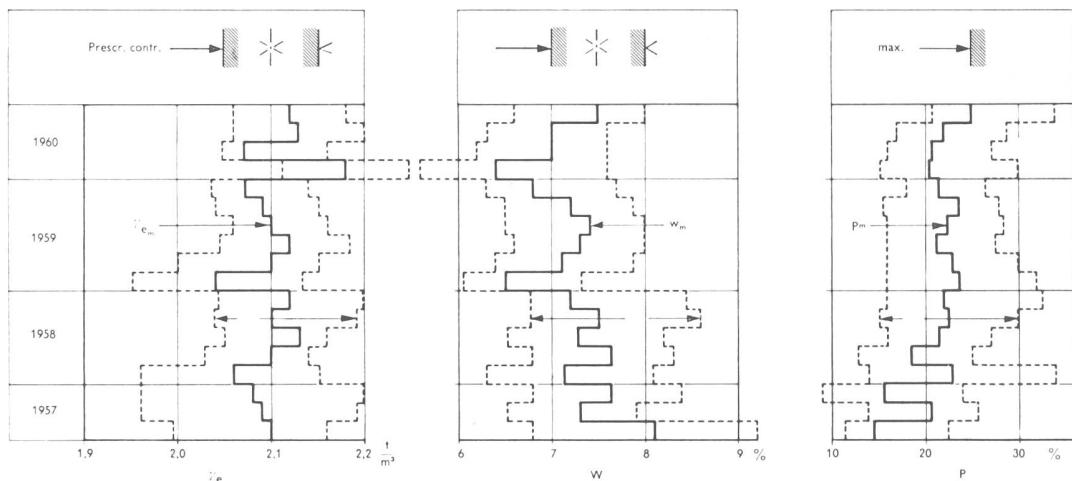


Fig. 6

Essai de compactage, sur le chantier, du matériau du noyau (éléments de 0 à 30 mm), valeurs moyennes mensuelles  $\gamma_e^m$ ,  $w_m$ ,  $p_m$ ;  $\gamma_e$  = densité sèche en  $t/m^3$ ;  $w$  = teneur en eau en % du poids sec;  $p$  = pourcentage des éléments de 30 à 100 mm.

Verdichtungskontrolle des Kernmaterials (Anteil 0—30 mm), Monatsmittelwerte  $\gamma_e^m$ ,  $w_m$ ,  $p_m$ ;  $\gamma_e$  = Trockenraumgewicht in  $t/m^3$ ;  $w$  = Wassergehalt in % des Trockengewichtes;  $p$  = Gewichtanteil in % der Fraktion 30 bis 100 mm.

Compaction test in the core zone (particles 0—30 mm), monthly mean values  $\gamma_e^m$ ,  $w_m$ ,  $p_m$ ;  $\gamma_e$  = dry density in  $t/m^3$ ;  $w$  = water content in % of dry weight;  $p$  = percentage of elements of 30—100 mm size.

La confrontation des valeurs obtenues au cours des travaux et celles exigées dans le cahier des charges (c'est-à-dire correspondant aux hypothèses à la base du projet) montre que, en moyenne, la densité apparente a pratiquement atteint avec  $2,12 \text{ t/m}^3$  la valeur exigée de  $2,15 \text{ t/m}^3$ . Les teneurs en eau sont avec  $w = 7,1\%$  en moyenne légèrement inférieures aux valeurs exigées ( $7,5$ ). Il s'est confirmé que le matériau du noyau très peu plastique est très sensible aux variations de la teneur en eau. Il n'était plus possible de compacter au rouleau à pneu de 45 t pour une teneur en eau supérieure à  $8\%$ . Le degré de saturation moyen varie de  $60$  à  $70\%$ .

Les volumes des échantillons examinés dans la zone 4/6 étaient importants; ils atteignent en moyenne  $220 \text{ m}^3$ !

#### b) Cellules à pression

Les deux types de cellules à pression (électro-mécaniques) mises en place ont donné au début passablement de difficultés quand à leur stabilité électrique. Il est prématûré de juger de leur durabilité. Les pressions intersticielles sont très petites en raison de la faible saturation. Les mesures de pression sur le bedroc sont très intéressantes; elles permettent de déceler l'effet de voûte qui provient des différences de tassements entre le noyau, relativement rigide, et les massifs d'appui plus déformables. La pression max. enregistrée dans le profil 440 s'élève à  $38 \text{ kg/cm}^2$  au droit de la zone 3b pour  $15 \text{ kg/cm}^2$  dans l'axe, ceci pour une surcharge statique du remblai de  $\gamma_e^* \cdot h = 17,3$  resp.  $25 \text{ kg/cm}^2$ .

#### c) Tassement, déformations

Les tassements mesurés en fin de construction atteignent  $3,5 \text{ m}$  pour le remblai amont dans le profil de plus grande hauteur (environ  $3\%$  de la hauteur du barrage). (Le tassement du noyau n'est que de l'ordre de  $1,5\%$  de la hauteur.) Des déplacements horizontaux importants ( $1,70$  à  $2,20 \text{ m}$ ) ont été enregistrés aux %

environ de la hauteur du barrage; aucun désordre n'a été constaté lors de la mise en eau partielle en août 1960. L'expérience a montré qu'il était indispensable que tous les appareils et leurs accessoires se trouvent sur le chantier plusieurs semaines avant d'être mis en place, afin de pouvoir être étalonnés, essayés, remaniés.

Il convient de reconnaître ici l'effort fourni par l'entreprise pour édifier un ouvrage de bonne qualité. Nous tenons à remercier aussi le maître de l'œuvre pour nous avoir autorisé à publier ces documents.

#### Contrôles durant l'exploitation, exemple du barrage de Castileotto/Marmorera

La construction de l'aménagement étant achevée, l'ouvrage est repris par le personnel d'exploitation. Ce dernier n'a, en général, pas assisté aux difficultés de l'édition et ne comprend que rarement des organes ayant les connaissances techniques adéquates et l'optique de l'ingénieur civil. Son attention d'ailleurs se concentre sur la production et l'entretien. Il s'agira donc pour le maître de l'œuvre, de désigner une instance ou un fonctionnaire responsable pour procéder aux mesures périodiques de contrôles indispensables, pour les collationner, voire les exploiter et d'en tirer les conséquences.

L'expérience acquise au barrage de Castileotto depuis sa mise en eau le 6 août 1954, servira certes de ligne directrice pour l'observation du comportement des deux autres grandes digues en terre de Suisse: Göschenenalp et Mattmark. Que M. Zingg, ingénieur en chef aux Services Industrielles de la Ville de Zurich et M. Bickel, ingénieur, trouvent ici l'expression de notre gratitude pour leur travail digne des meilleures traditions nationales.

Une brève description des caractéristiques de cet ouvrage, partie des aménagements de la Ville de Zurich, se trouve dans l'article «Les barrages en terre ou en enrochements». Nous nous bornons à commenter ici les résultats des mesures de pressions intersticielles, les déformations horizontales et les débits des percolations.

Les installations comprennent:

- 4 repères télescopiques, type «Bureau of Reclamation» avec bras transversaux tous les 1,5 m. Lectures faites jusqu'ici deux fois par an; ultérieurement une fois tous les 2 ans;
- 127 repères superficiels au total dont 16 également pour les mouvements horizontaux sont disposés sur le couronnement et les parements (2 lectures par an, ultérieurement 1 tous les 2 ans);
- 10 repères superficiels sur le terrain (glissement post-glaciaire) prolongeant le barrage sur la rive gauche;
- 45 cellules à pression, type «Bureau of Reclamation» (pastille poreuse saturée d'eau et reliée par un circuit de conduite à une série de manomètres); 33 sont placés dans le noyau, 1 dans le filtre amont, 6 dans les piézomètres (prof. + 191; 3 à l'amont, 3 à l'aval du noyau), 5 au contact du mur-parafouille, respectivement du diaphragme en béton. Lectures mensuelles.
- 8 pendules et alignements dans les 3 galeries de contrôle pour vérifier les déformations et l'action de la poussée de l'eau sur le massif naturel prolongeant le barrage. 2 lectures par an, ultérieurement 1 lecture annuelle.
- Mesure des débits de percolation et résurgeances à l'aval.

#### a) Déformations horizontales

Les plus grands déplacements horizontaux du barrage, vers l'aval, ont atteint 9,3 cm. Il s'agit d'un point situé sur le parament aval, au profil + 155, à la cote 1660 (soit au  $\frac{1}{3}$  de la hauteur du barrage). Fait intéressant: la moitié de cette déformation a eu lieu avant la mise en eau. Le couronnement, au profil médian (+ 225,99) s'est déplacé de 55 mm vers l'aval lors de la première mise en eau à la retenue max. (1680). Lors de la vidange qui suivit, le repère s'est déplacé de 33 mm vers l'amont. La déformation rémanente de 22 mm est restée sans modification depuis; les déformations élastiques lors des variations ultérieures du lac sont de l'ordre de 20 mm.

Les talus du terrain naturel sur la rive gauche (ancien glissement) entre les cotes 1640 et 1650, c'est-à-dire immergés en moyenne de juin à février et hors de l'eau les 3 autres mois de l'année, ont flué en direction de la plus grande pente de 11,6 cm en moyenne (9 à 14,4 cm) en 3 ans (1954 à 1957). Ce mouvement s'est stabilisé depuis. Les repères placés dans le terrain naturel à l'aval n'ont bougé que de quelques centimètres sans qu'il soit possible de dégager une tendance. Toutes les mesures sont faites avec une erreur moyenne de  $\pm 3$  mm.

Le diaphragme en béton imperméabilisant le glissement rive gauche au-dessous de la cote 1638 est un élément rigide. Une articulation a été créée en intercalant un bouchon d'argile (matelas plastique) entre les cotes 1618 et 1620. Les déformations de cet ouvrage intéressent particulièrement le constructeur, puisqu'il n'était guère possible de les calculer préalablement. La première mise en eau totale en 1955 a provoqué des déplacements vers l'aval de 3,7 à 9,9 mm dans la partie inférieure comprise entre les cotes 1595 et 1612 et de 2,3 à 7,1 mm dans la partie supérieure (clé de la voûte de la galerie «1612» à 1638). Lors de la vidange qui suivit, on

constata que le  $\frac{1}{3}$  seulement des déformations précitées étaient permanentes. Depuis les premières mesures (en 1954) les déformations rémanentes ont atteint 9 mm en moyenne (2,5 à 12 mm) dans la partie inférieure et 2 à 2,6 mm dans la partie supérieure. Ces déformations horizontales du diaphragme en béton sont limitées pratiquement entre les profils 0 et + 185.

Le bouchon d'argile formant articulation dans le diaphragme s'est tassé de 13 à 30 mm depuis 1954, selon la surcharge du terrain susjacent. Fait intéressant: Chaque année ce tassement est interrompu pendant que la construction est immergée.

#### b) Débits de percolation

Avant la mise en eau, les débits totaux des pertes d'eau au droit du barrage atteignaient quelques litres par seconde. Ils augmentèrent rapidement lors de la mise en eau partielle en 1954, suivant de très près le niveau ascendant de la retenue. Il s'avéra que les  $\frac{9}{10}$  des résurgeances provenaient de venues d'eau surgissant des failles du rocher dans le premier tronçon de la galerie d'accès à la chambre des vannes. Le débit max. mesuré le 23 septembre 1954 atteignit 162 l/s (niveau du lac 1645). L'injection de cette partie du rocher permit de réduire les percolations à 4,3 l/s. L'ensemble des pertes d'eau varie depuis entre 4 et 10 l/s et n'a pratiquement plus changé.

Les percolations à travers le noyau sont mesurées séparément et atteignent 0,02 l/s pour lac vide et 0,08 l/s pour lac plein. Il est fort probable que des apports d'eau superficielle provenant des deux versants et du parement aval de la digue soient compris dans ce chiffre.

#### c) Pressions intersticielles

Les pressions intersticielles mesurées en fin de construction dans le noyau atteignirent au profil + 275 environ 53 % de la surcharge (pour une valeur de 70 % calculée)<sup>5</sup>.

Nous avons reporté aux fig. 7 et 8 la situation des cellules et les résultats des observations pour les premières années d'exploitation. Ces mesures mensuelles dans les profils + 191 (digue sur glissement ancien) et + 275 (digue sur rocher) permettent de suivre la dissipation des pressions intersticielles dans le temps (consolidation du noyau). Elles donnent également une très bonne image de la propagation de la pression dans le milieu incomplètement saturé. Il est clair que les palpateurs réagissent d'autant plus rapidement à la variation du niveau de la retenue qu'ils se trouvent plus proche du parement amont. (Fig. 7a profil + 191, cellules 27 [filtre], 16 [amont], 18 [aval] ou cellules 12/14/15.) Le déphasage atteint environ 1 mois pour les cellules placées à 4 m seulement du parement amont du noyau.

On constate que la consolidation des couches situées vers le  $\frac{1}{3}$  inférieur du noyau n'est pas encore achevée (par exemple cellule 39, profil + 275). Les pulsations dues aux variations de la retenue se superposent aux pressions intersticielles de la construction. La cellule 39 (profil + 275) avait indiqué en fin de construction une pression intersticielle max. de 5,65 kg/cm<sup>2</sup>; 6½ ans plus tard elle était encore de 1,85 kg/cm<sup>2</sup>, soit environ le 18 % de la surcharge.

<sup>5</sup> Bickel/Schildknecht, Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1957, London.

### CASTILETTO/MARMORERA

Fig. 7a resp. 8a

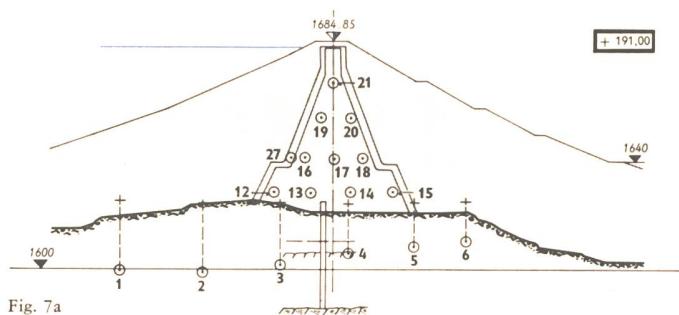


Fig. 7a

Disposition des cellules pour la mesure des pressions interstitielles dans les profils + 191.0 resp. + 275.0 (I—I et II—II voir Fig. 3b, article prof. G. Schnitter).

Anordnung der Porenwasserdruckdosen in den Querprofilen + 191.0 resp. + 275.0 (I—I und II—II in Fig. 3b, Aufsatz Prof. G. Schnitter).

Location of pressure cells for the measuring of pore pressure in the profiles + 191.0 and + 275.0 (I—I and II—II in Fig. 3b, article Prof. G. Schnitter).

N. B. Cellule 11 devant, cellule 81 derrière le diaphragme en béton dans le profil + 213.0. — Zelle 11 vor, Zelle 81 hinter dem Betondiaphragma im Profil + 213.0. — Pressure cell 11 before, cell 81 behind concrete diaphragm in profil + 213.0.

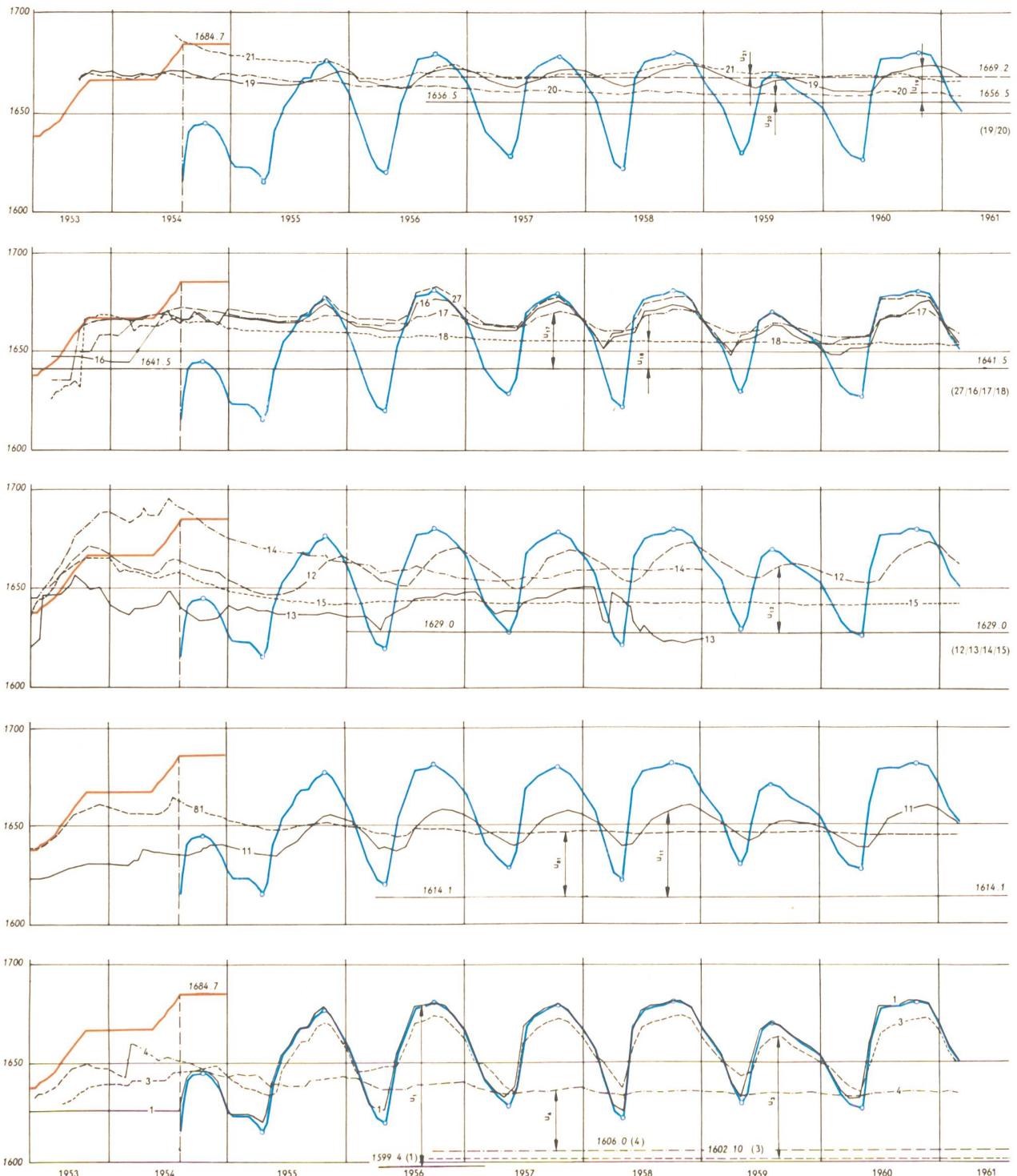


Fig. 7b

## CASTILETTO/MARMORERA

Fig. 7b resp. 8b

- Remblai de la digue  
Damschüttung  
Dam fill
- Variation du niveau de la retenue  
Schwankung des Stauspiegels  
Variation of the storage level
- Pressions interstitielles dans la zone du noyau  
Porenwasserspannungen in der Kernzone  
Pore pressure in the core zone

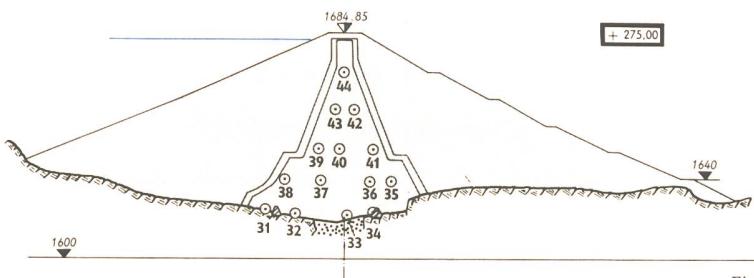


Fig. 8a

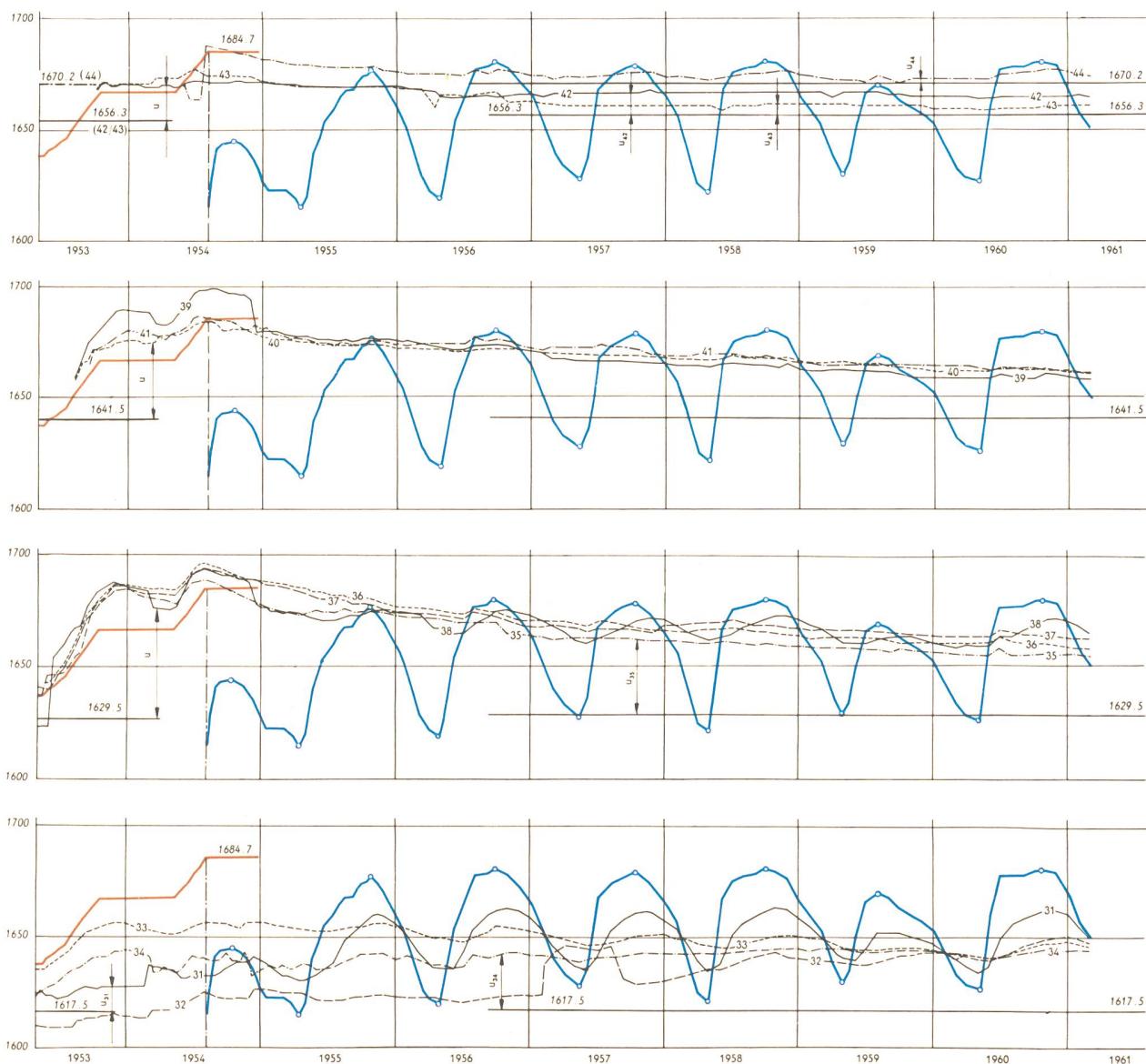


Fig. 8b

**Expérience acquise**

Bien que modeste — si l'on la compare à celle de nos inspirateurs des grandes institutions édificatrices de barrages en terre aux Etats-Unis —, notre expérience en matière de contrôle de ce type d'ouvrage nous amène aux remarques suivantes :

L'organisation, les dispositifs, appareils et méthodes de mesure utilisés à ce jour en Suisse permettent au maître de l'œuvre de contrôler de façon rationnelle et avec une exactitude suffisante la qualité des matériaux mis en œuvre. Pour les ouvrages à venir il sera judi-

cieux de repenser le problème des mesures pendant les travaux, compte tenu du rythme de ces derniers. Nous pensons aux méthodes basées sur l'emploi d'isotopes pour les mesures de densité et de teneur en eau. La fréquence de ces déterminations — en se concentrant aux heures de pause — perturberait moins la marche des travaux.

Les mesures très complètes effectuées après la fin des travaux sur la digue de Castiletto confirme la bonne tenue d'ouvrages en terre pour autant qu'ils soient édifiés dans les règles de l'art.