

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 75 (1949)
Heft: 11

Artikel: La querelle des barrages
Autor: Paschoud, Maurice
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-56867>

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs

Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 17 francs
Etranger : 22 francs

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie

F. ROUGE & Cie
à Lausanne

Prix du numéro :
1 Fr. 25

Organ de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président: R. NEESER, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. EPITAUX, architecte, à Lausanne; secrétaire: J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres: Fribourg: MM. †L. HERTLING, architecte; P. JOYE, professeur; Vaud: MM. F. CHENEAUX, ingénieur; E. D'OKOLSKI, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; Genève: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. MARTIN, architecte; E. ODIER, architecte; Neuchâtel: MM. J. BÉGUIN, architecte; G. FURTER, ingénieur; R. GUYE, ingénieur; Valais: MM. J. DUBUIS, ingénieur; D. BURGENER, architecte.

Rédaction: D. BONNARD, ingénieur. Case postale Chauderon 475, LAUSANNE

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président; M. BRIDEL; G. EPITAUX, architecte; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE: *La querelle des barrages*, par MAURICE PASCHOUD, Lausanne. — *Les barrages de la Société Adriatic à d'Electricité en Vénétie* (suite et fin), par M. C. SEMENZA, Venise. — **NÉCROLOGIE:** *Max Baumgartner*, architecte. — Société suisse des ingénieurs et des architectes: *Jugement du Conseil suisse d'honneur de la S.I.A. du 2 avril 1949*; *Communiqués du Secrétariat*. — **BIBLIOGRAPHIE.** — **COMMUNIQUÉ.** — **SERVICE DE PLACEMENT.**

TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
larg. 47 mm.) 20 cts.

Réclames : 60 cts. le mm.
(largeur 95 mm.)

Rabais pour annonces
répétées

ANNONCES SUISSES S.A.

5, Rue Centrale
Tél. 2 33 26
LAUSANNE
et Succursales



LA QUERELLE DES BARRAGES

par MAURICE PASCHOUD, Lausanne

I

Alertées par le bombardement des deux barrages-poids massifs de la Ruhr, que les aviateurs anglais ont détruits dans la nuit du 17 au 18 mai 1943, nos autorités se sont préoccupées d'assurer la protection des ouvrages de retenue du pays. Le 23 septembre 1943 déjà, le Conseil fédéral prit, en vertu de ses pleins pouvoirs, un *Arrêté concernant la protection des barrages hydrauliques suisses*.

Entre temps, quelques professeurs de l'Ecole polytechnique fédérale avaient étudié l'action des explosifs sur les barrages ainsi que les conséquences que pourrait avoir sur les régions situées à l'aval, la destruction de ces barrages par bombardement. Ils s'occupèrent ensuite de l'action des bombes sur les barrages de Lucendro (barrage-poids évidé) et de Rossens (barrage-voûte). Le résultat de leurs études est une doctrine exposée dans des *Richtlinien zur Beurteilung neuer Projekte von Staumauern*. Ces « Directives » sur le choix des types de barrages à utiliser lors de la création de nouvelles retenues sont secrètes et les constructeurs de barrages ne les connaissent pas. Après un premier projet de 1944, leur texte définitif doit avoir été arrêté en février 1945.

Le délégué fédéral à la protection des barrages et l'Institut fédéral des travaux publics, adoptant une doctrine qu'ils sont seuls à connaître, ont exigé d'ATEL (Société d'électricité Aar-Tessin) le remplissage partiel des évidements du barrage de Lucendro, remplissage qui a été ordonné en 1948 par le Département fédéral de l'intérieur. ATEL a recouru contre cette décision auprès du Conseil fédéral. Celui-ci ne s'est pas encore prononcé et le barrage de Lucendro

est en eau depuis 1947. Il se comporte bien. Si le remplissage de ses évidements doit réellement être exécuté, ce sera aux frais du Département militaire fédéral.

Se conformant aussi à cette doctrine, le Département fédéral de l'intérieur a intimé à EOS (Société de l'Energie de l'Ouest-Suisse) l'ordre de construire à Saint-Barthélemy-Cleuson un barrage à gravité plein au lieu du barrage évidé qu'elle était en train d'exécuter. Les recours formés par EOS et par la Gouvernement du Valais contre cet ordre ont été rejetés par le Conseil fédéral au début de 1949. Le litige est encore pendant, car le Conseil d'Etat du Valais a adressé au Tribunal fédéral une requête lui demandant de statuer que le Département fédéral de l'intérieur n'était pas compétent pour prendre sa décision.

Cleuson sera terminé cette année et EOS prépare la construction à Salanfe d'un autre barrage évidé pour lequel elle utilisera la plus grande partie des installations de Cleuson.

L'Institut fédéral des travaux publics a demandé, en 1947, à quelques experts, dont un des professeurs de Zurich, d'examiner si le projet de barrage évidé présenté par EOS pour Cleuson était réalisable dans la forme et avec les dimensions prévues, en lui apportant peut-être quelques changements, ou s'il ne serait pas préférable d'exécuter, en le modifiant éventuellement, le projet de barrage *plein* étudié par EOS pour Cleuson également. La comparaison des deux types de barrages avait à porter en particulier sur leur coût et sur la durée de leur construction, en se limitant aux conditions que des barrages doivent remplir en temps de paix et sans

s'étendre aux exigences spéciales du temps de guerre. Le rapport de ces experts est daté de mars 1948.

En mars 1948 également, la *Schweizerische Bauzeitung* a publié sous le titre « Grundsätzliches zur Wahl des Staumauertyps für grosse Staubecken » des « Mitteilungen » de M. E. Meyer, ingénieur délégué à la protection des barrages suisses. M. Meyer a eu le mérite de faire connaître par ses « Communications », sans justification il est vrai, et très succinctement, les principes de la doctrine des « Directives ».

Au mois d'octobre 1948, Salanfe S. A., désirant compléter un rapport fourni à EOS par deux experts, sur les calculs statiques et sur le bombardement du barrage de Cleuson, chargea un groupe d'ingénieurs de se prononcer au sujet du choix du type de barrage à employer à Salanfe. Ces ingénieurs, après analyse du rapport des experts de l'Inspectorat, devaient donner leur avis sur toutes les questions d'ordre technique soulevées à propos des barrages de Cleuson et de Salanfe.

Enfin, le 5 janvier 1949, dans les considérants du rejet des recours d'EOS et du Conseil d'Etat du Valais au sujet de la construction du barrage de Saint-Barthélemy-Cleuson, le chancelier de la Confédération énumère un certain nombre des raisons d'ordre technique qui ont motivé ce rejet. Il cite généralement les rapports d'où ces raisons sont extraites et les noms des auteurs de ces rapports.

Nous allons exposer, aussi objectivement que pourra le faire un partisan des barrages évidés, membre du groupe d'ingénieurs consultés par Salanfe S. A., les arguments et les objections des adversaires et des partisans des barrages évidés, sans indiquer dans chaque cas les auteurs de ces arguments et de ces objections. La plupart des critiques formulées contre les barrages évidés émanent de la *doctrine officieuse* des « Directives » tandis que les arguments en faveur de ces barrages sont tirés de la littérature classique et du rapport des ingénieurs consultés par Salanfe S. A.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il convient d'ajouter que les adversaires des barrages évidés, rompant une trêve tacite, ont porté devant le grand public, dans des articles publiés par des quotidiens, la « querelle des barrages ». En effrayant l'opinion publique, ils espéraient la soulever contre les barrages évidés. L'un de ces articles prétend qu'il serait possible de détruire le barrage de Cleuson avec la charge de tretyl que l'on peut transporter dans un sac de montagne. Dans un autre, que l'agence C. P. S. attribue à un correspondant particulièrement qualifié, l'auteur rappelle quelques grandes catastrophes (Jonstown, en Pensylvanie (1889), Gleno (1923) et Molare (1935) en Italie) dues à la *rupture* et non à la destruction par bombardement, de barrages parmi lesquels il n'y a aucun barrage évidé.

Ces articles ont manqué leur but, mais ces brèves indications suffisent pour en montrer la valeur et pour caractériser la mentalité de ceux qui les ont inspirés.

II

Dans la comparaison à laquelle nous allons procéder entre les barrages pleins et les barrages évidés, nous subdiviserons les arguments que l'on peut avancer pour ou contre un type de barrage donné en arguments d'ordre technique et en arguments d'ordre économique. Cette subdivision, qui facilitera notre exposé, est évidemment artificielle. Les deux

points de vue auxquels on peut se placer, le technique et l'économique, sont le plus souvent étroitement liés et c'est à juste titre que, dans son article sur les barrages de la Société Adriaticà d'Elettricità en Vénétie¹, M. Semenza écrit : « La technique qui fait dépenser un seul centime de plus que ce n'est nécessaire pour le résultat à atteindre tout en tenant compte de la sécurité est une pauvre technique. »

En se plaçant au point de vue technique, on pourra examiner pour les deux types de barrages, successivement, la plus ou moins grande sécurité que présente leur calcul statique, c'est-à-dire la valeur des hypothèses qui servent de base à ce calcul, les avantages et les inconvénients qu'ils offrent pour leur exécution, les mesures à prendre pour leur entretien et les difficultés auxquelles ces mesures se heurtent, leur résistance aux intempéries, gel, variations de température et leur comportement à l'égard de certains événements d'ordre naturel, comme les tremblements de terre. Il y a par le monde des déséquilibrés qui sont tentés de commettre des actes de sabotage, en temps de paix. Les barrages évidés seront-ils plus exposés à de tels actes que les barrages pleins ?

Dans l'ordre économique, les questions essentielles à élucider sont celles du *coût* d'exécution des barrages et du *temps* nécessaire pour cette exécution. Un ouvrage doit être solide et durable, mais il doit être établi avec la plus grande économie possible de matériaux. Un barrage évidé permettra d'économiser du béton. En revanche, il nécessitera des coffrages plus étendus et plus compliqués. Le coût d'une construction et le temps qu'elle exigera dépendront essentiellement des installations que possède celui qui construira. L'entrepreneur disposant d'installations perfectionnées, amorties en tout ou en partie par des travaux exécutés précédemment ou qu'il pourra utiliser immédiatement pour des travaux analogues à ceux qu'il est en train d'achever, réalisera des économies substantielles de temps et d'argent. La main-d'œuvre qu'il occupera, entraînée à l'emploi des installations dont elle se sert, travaillera plus sûrement et plus rapidement que si elle devait s'accoutumer à des installations nouvelles. L'économie d'un pays a le plus grand intérêt à ce que la construction d'un ouvrage, par exemple d'un barrage en montagne, soit rapide. Elle disposera plus vite de l'énergie dont elle a besoin. Elle a aussi tout intérêt à ce que le prix de revient de cet ouvrage soit le plus bas possible puisque c'est sur ce prix de revient que sera basé, finalement, le prix de vente de l'énergie.

Mais, depuis la destruction des barrages de la Ruhr, plus exactement depuis l'élaboration de la *doctrine officieuse* sur les barrages, l'ingénieur suisse, même s'il est d'avis que l'on doit construire avant tout pour la paix, est obligé de se placer aussi au point de vue du comportement des barrages sous l'action des bombes. Le délégué aux barrages estime en effet que la sécurité qu'un barrage d'un type donné offre au point de vue statique n'est pas le seul critère que l'on doit appliquer quand on construit un nouveau barrage. Des barrages ont été détruits au cours de la guerre et l'on doit tenir compte du comportement des barrages à l'égard des destructions. Il ne peut pas s'agir d'obtenir une sécurité absolue, mais on doit choisir un type de barrage qui, tout en ne coûtant pas trop, offre une sécurité aussi grande que possible contre les destructions par les bombes.

¹ Voir *Bulletin Technique de la Suisse romande* du 23 avril 1949.

Dans l'examen des effets des bombes sur les murs de barrages, la nature et le poids de ces bombes joueront le rôle capital, rôle plus important que celui du type de barrage qui sera attaqué. La doctrine officieuse a pris pour base de ses calculs des bombes du poids de 4000 kg, contenant environ 2000 kg de tretyl. Depuis lors, on utilise des explosifs plus puissants. Le poids des bombes a augmenté. Les charges que peuvent transporter les avions qui les lanceront sur les objectifs à détruire et le rayon d'action de ces avions ont doublé ou triplé. Ce sont là des éléments nouveaux et les calculs de la doctrine officieuse sont périmés, ils doivent être révisés.

D'autre part, M. Meyer pense, et sur ce point il suit la doctrine officieuse, que dans le cas d'un barrage du type Lucendro ou Cleuson, il suffit qu'une bombe, après avoir brisé la tête amont d'un des contreforts, ouvre dans le parement amont une brèche par laquelle l'eau pénétrera dans un des évidements, pour que les contreforts qui limitent cet évidement se renversent sous l'effet de la pression latérale de cette eau et que, successivement, tous les autres contreforts tombent comme un château de cartes.

Nous ne possédons aucune indication sur les calculs ou sur les essais qui permettraient de justifier cette opinion qui paraît résulter d'une idée préconçue. En revanche, des calculs et des essais sur modèle, dont nous parlerons plus bas, prouvent que, même si des brèches de grande surface dues à des bombes sont ouvertes dans le parement d'un barrage évidé, l'eau, pénétrant par ces brèches, s'écoulera en grandes masses à travers l'évidement, mais sans compromettre en aucune façon la stabilité des contreforts du barrage.

Enfin, une question importante que nous devons élucider maintenant déjà, se pose à propos de la destruction des barrages par bombardement. C'est celle de l'abaissement préalable, en cas de complications internationales, du niveau de l'eau dans les retenues dont les murs risquent d'être attaqués à la bombe. La doctrine officieuse, en partant toujours des bombes à 2000 kg d'explosif, estime cet abaissement nécessaire même dans le cas des barrages massifs dont la destruction ne sera sans danger pour l'aval que si le niveau de la retenue a été abaissé de façon qu'au nouveau niveau de l'eau l'épaisseur du mur soit de douze mètres. Pour les barrages évidés, à cause du renversement des contreforts par l'eau qui entrerait dans un évidement, l'abaissement devrait aller jusqu'au fond de la retenue. Nous verrons plus loin qu'en réalité, pour les barrages pleins comme pour les barrages évidés, un abaissement considérable du niveau des retenues est le seul moyen de mettre les régions de l'aval à l'abri des conséquences de la destruction des barrages qui ferment ces retenues.

Le délégué aux barrages, pensant aux conséquences de cet abaissement pour l'économie du pays et oubliant qu'il est nécessaire même pour les barrages pleins, se demande avec angoisse qui ordonnera cette opération et à quel moment il faudrait y procéder pour qu'elle soit utile.

En cas de danger, aucune des entreprises électriques de notre pays ne cherchera à se soustraire à un ordre d'abaissement du niveau des retenues qui serait donné par le Conseil fédéral. Et, aussi graves que puissent être les conséquences de cet abaissement, elles ne seront pas pires que celles de la sécheresse de l'hiver dernier pour notre économie électrique. En hiver, la production totale possible d'énergie électrique

par voie hydraulique est de l'ordre de 4,5 milliards de kWh. La plus grande partie en est produite par les usines au fil de l'eau. La capacité totale de nos bassins de retenue n'atteint pas 1,2 milliards de kWh. En supposant qu'au moment où tous ces bassins sont pleins (cela n'arrive pas toutes les années et la période où ils sont tous pleins ne dure que quelques jours par an) on doive les vider *tous* de moitié, sans que l'on puisse utiliser aucune partie de l'énergie mise en jeu par l'écoulement de cette eau, la perte sera de l'ordre de 600 millions de kWh. C'est un gros chiffre, mais il ne constitue que le 15 % de la production totale de l'hiver et l'on ne peut pas soutenir sérieusement que, même en temps de guerre, cette perte puisse compromettre l'économie du pays ainsi que sa capacité de résistance.

III

Avant d'aborder la comparaison, du point de vue technique, entre les barrages à gravité pleins et les barrages à gravité évidés, rappelons certaines données concernant la forme et les dimensions des murs de ces barrages ainsi que la nature des forces qui les sollicitent.

Un barrage plein est un gros bloc de béton qui, par son poids élevé, ferme la sortie d'un bassin d'accumulation. Sa section par un plan vertical a la forme d'un triangle à base horizontale dont le côté amont est à peu près vertical et le côté aval incliné. Les forces qui agissent sur lui sont son poids propre et la poussée de l'eau dans la retenue. Soit que le béton soit poreux, soit qu'il s'y trouve de légères fissures, l'eau de la retenue s'infiltre dans le mur, surtout à la surface de contact du mur avec le roc des fondations sur lesquelles il repose et elle exerce, à l'intérieur de ce mur, des forces verticales, dirigées de bas en haut, des *souspressions*, dont il faut tenir compte dans le calcul statique du mur.

Pour construire un barrage à gravité, il faut fabriquer, chaque jour, un cube considérable de béton. Dans un mur plein, la chaleur de prise de ce béton ne peut pas se dissiper facilement et la température de la masse du mur s'élèvera parfois assez haut. Il faudra au mur plusieurs années pour se refroidir et, au cours de ce refroidissement et des changements de volume qui l'accompagnent, il s'y produira des contraintes qui pourront amener des fissurations dans sa masse, fissurations dont, vu l'épaisseur du mur, il sera difficile de déceler l'existence et la position.

D'autre part, la résistance du béton est mal utilisée par un mur plein où, dans des régions assez étendues, les contraintes admissibles pour le béton préparé par les méthodes modernes sont loin d'être atteintes.

C'est le désir d'éviter tout gaspillage de béton dans la construction des barrages à gravité qui a conduit les ingénieurs à l'invention des barrages à gravité évidés. L'utilisation de ce type de barrage permet des économies dans le volume des terrassements à exécuter et dans celui du béton à mettre en œuvre. Elle donne des facilités pour restreindre les effets du retrait et ceux de la température, car les évidements permettent au béton de sécher et de se refroidir rapidement. Enfin, la possibilité d'accès au cœur même de l'ouvrage permet de contrôler comment il se comporte et d'entreprendre en temps utile les travaux d'entretien qui sont nécessaires.

Il y a d'ailleurs d'assez grandes différences entre un barrage évidé du type Dixence et ceux du type Lucendro, Cleuson

ou Salanfe. Le barrage de la Dixence se compose d'une succession de piliers triangulaires en béton, épaisse à l'aval et à l'amont de façon à réaliser des masques continus, en laissant à l'intérieur du mur des évidements en forme de cellules verticales, dont le fond est au niveau de la fondation et le sommet à 20 m. au-dessous du couronnement. Les piliers sont jumelés deux à deux. Le parement amont est incliné de 4 % seulement sur la verticale, tandis que le fruit du parement aval est important. Dans les autres barrages, le parement amont est incliné, il y a des joints de contraction sur l'axe de chaque évidement et les contreforts ont des épaisseurs légèrement inférieures à celles des piliers de la Dixence,

La doctrine officieuse, d'après laquelle on pourrait se figurer que les barrages à gravité massifs sont sans défauts, n'a pas beaucoup de sympathies pour les barrages évidés, pour ceux du type Cleuson tout spécialement.

Ainsi, on pourrait s'imaginer que les barrages évidés présentent un avantage sur les barrages pleins par le fait que, dans ces derniers, l'on est mal renseigné sur la valeur des sous-pressions, ce qui en rend le calcul incertain, tandis que dans les premiers, s'il se produit des sous-pressions, ce sera tout au plus dans les têtes des contreforts. Erreur. Il y aura aussi des sous-pressions dans les couches de la roche située sous les fondations des barrages évidés et le danger y sera le même que pour les barrages pleins. Mais, s'il en est bien ainsi, quelques trous percés dans la roche du fond des évidements ne suffiront-ils pas pour draîner l'eau qui s'y trouverait ? Pouvoir pénétrer à l'intérieur des murs évidés pour y observer ce qui s'y passe n'a aucun intérêt, car, dit la doctrine officieuse, connaître les accidents qui se produisent dans les murs, ce n'est pas encore les corriger. C'est à peu près comme si l'on affirmait que, pour le médecin, il n'y a pas d'intérêt à pouvoir, par exemple au moyen des rayons X, poser un diagnostic exact du mal dont souffre un malade, car connaître ce mal, ce n'est pas encore le guérir.

Il est vrai que les évidements permettent à la chaleur de prise du béton de se dissiper facilement, mais on oublie que les murs évidés sont beaucoup plus sensibles aux variations de température que les murs pleins. Cette question de l'influence des variations de température revient constamment dans les critiques adressées aux barrages évidés. Elle a déjà été soulevée lors de la construction de la Dixence. Les calculs et les mesures de M. Stucky ont montré qu'il n'y avait rien à craindre à cet égard. La doctrine officieuse accepte bien les résultats de M. Stucky, mais elle estime qu'ils ne s'étendent pas sans autre à un barrage du type Cleuson. Et il a fallu que les ingénieurs consultés par Salanfe S. A., reprenant la question, montrent que, moyennant les précautions habituelles, en montagne, pour éviter des variations trop amples de la température dans les évidements, les contraintes dues aux variations de température dans les contreforts, dans leurs têtes en particulier, ne présenteraient aucun danger.

Quoi qu'il en soit des remarques qui précèdent, les calculs faits par EOS pour Cleuson (calculs contrôlés par les experts de part et d'autre) n'ont été mis en doute par personne et ils donnent une image complète de l'état de tension du barrage en pleine charge.

Toutefois, dans les barrages évidés, il existe certains facteurs de dissymétrie (des sous-pressions, des modules d'élasticité, du sol de fondation) dont l'importance échappe à une

analyse quantitative. On pourrait en tenir compte en prenant certaines précautions d'ordre constructif.

Il y aurait aussi un certain intérêt à examiner les questions qui se posent par le fait que dans les calculs, on n'a considéré que des éléments perpendiculaires au plan médian des piliers, sans examiner ce qui se produirait sur des plans obliques. Dans cet examen statique plus poussé, le calcul serait efficacement soutenu par des essais de photoélasticité ou de déformation sur modèle réduit.

Comparons encore le comportement des barrages pleins et celui des barrages évidés sous l'action d'un phénomène d'ordre naturel qui intéresse particulièrement le Valais, celui des *tremblements de terre*. Le délégué aux barrages se contente de soulever la question. La doctrine officieuse est muette à ce sujet. Toutefois, dans le rapport des experts de l'Inspectorat, on lit cette phrase : « Il est hors de doute que les barrages évidés sont particulièrement sensibles à des sollicitations mécaniques extraordinaires (tremblements de terre, sabotage, bombardements), mais comme ces sujets sortent du cadre de notre expertise, nous ne les aborderons pas. »

Feu Maillart, le distingué ingénieur-conseil, dans un rapport de 1932 au sujet de la Dixence, affirmait déjà que des barrages évidés se comporteraient au moins aussi bien que des barrages pleins sous l'action des tremblements de terre. Et Tölke, dans son volume sur les *Talsperren*, écrit qu'un barrage évidé supportera sans grand risque les accélérations qui, sous l'action d'un tremblement de terre, se produisent dans un barrage reposant sur un terrain sans failles actives. (C'est le cas à Cleuson et à Salanfe.) Le barrage évidé offre une grande stabilité contre le renversement et, en outre, son élasticité lui permettra d'emmager un travail de déformation élevé sans qu'il en résulte des contraintes importantes. Il en sera tout autrement d'un barrage plein dont la stabilité au renversement est plus petite et la rigidité beaucoup plus grande.

Les calculs des ingénieurs consultés par Salanfe S. A., calculs qui, éventuellement avec d'autres, pourraient faire l'objet d'articles spéciaux dans le *Bulletin Technique*, démontrent qu'à Cleuson comme à Salanfe, conformément aux avis de Maillart et de Tölke, des murs évidés résisteront mieux que des murs pleins à l'action des tremblements de terre.

Examinons encore rapidement la question du *sabotage*. Remarquons d'abord que dans le monde actuel il existe une foule d'ouvrages qui sont plus exposés que les barrages à des actes de sabotage. On a lu récemment le récit d'une catastrophe qui s'est produite en Espagne, à la suite du déboulonnement d'un rail à l'entrée d'un pont. Ce déboulonnement d'un rail est une opération plus facile à exécuter que celle qui consisterait à monter à Cleuson avec 100 kg. de trotyl pour tenter d'y faire sauter le barrage. Pourtant, cette possibilité de sabotage n'empêche personne de voyager en train.

La seule différence, au point de vue sabotage, entre un barrage plein et un barrage évidé est que, dans ce dernier, sur le parement amont, il y a, au droit de chaque évidement, un joint où l'épaisseur du béton est relativement faible (2,5 m à Cleuson). Admettons qu'un détraqué, d'une habileté consommée, réussisse, en trompant la vigilance du surveillant du barrage, à placer sur le joint de l'évidement, dans l'eau,

une charge d'explosif et à la faire déflagrer. Cent kilogrammes de trotyl, c'est déjà une belle charge, difficile à se procurer et lourde à manier. Qu'en résultera-t-il pour le barrage ?

Pour calculer l'effet de destruction de cette charge, nous utiliserons la formule empirique de Zschokke, bien connue de tous ceux qui s'occupent de ces questions. Cette formule a la forme $L = 10 R^3$, où L est la charge de trotyl en kilogrammes, R le rayon d'action de l'explosif en m et où le coefficient 10 tient compte de l'excellent bourrage produit par l'eau et de la nature du béton à faire sauter. Pour 100 kg de trotyl, R est inférieur à 2,5 m. Le parement ne sera donc pas crevé par l'explosion et c'est tout au plus si, par les fissures que l'explosion aura produites dans le béton, quelques litres d'eau pénétreront dans l'évidement. Seule une charge de trotyl beaucoup plus forte, placée très bas dans l'eau sur le joint d'un évidement, pourra ouvrir une brèche d'une surface telle que la quantité d'eau qui ferait irruption dans l'évidement et qui coulerait à l'aval, d'ailleurs sans compromettre en rien la stabilité des piliers, soit assez élevée pour y produire des dégâts. Il faut donc être doué de beaucoup d'imagination pour croire qu'un saboteur réussira à détruire un barrage évidé du type Cleuson. Pour terminer ce chapitre, et puisque nous parlons d'imagination, citons encore, sans commentaires, la phrase suivante tirée des « Communications » du délégué aux barrages : « Il n'est pas impossible qu'un avion étranger chargé de bombes et survolant en temps de paix le territoire de notre pays vienne à heurter *sans le vouloir* (ungewollt) un barrage facile à détruire » (entendez un barrage évidé).

IV

Dans les considérants du rejet des recours d'EOS et du Conseil d'Etat du canton du Valais, du 5 janvier 1949, le Conseil fédéral, sur la base du rapport des experts de l'Inspectorat, a admis que pour Cleuson un barrage plein, tout en n'étant pas plus long à construire, demanderait à peu près la même dépense qu'un barrage évidé. Cette affirmation des experts a évidemment joué un rôle important dans la décision du gouvernement fédéral. Nous allons l'examiner de plus près et nous ferons suivre cet examen des résultats, très différents, obtenus par les ingénieurs consultés par Salanfe S. A.

Les experts de l'Inspectorat ont calculé d'abord, sur la base des projets d'EOS pour Cleuson, le cube total du type évidé, qu'ils arrêtent à 300 000 m³ et celui du type massif, qu'ils fixent à 406 000 m³. Ils ont dressé ensuite un tableau comparatif détaillé du coût du barrage évidé et de celui du barrage plein. Ce tableau contient successivement les postes suivants : installations, terrassements, injections, coffrages, ciment, agrégats (sable et gravier), fabrication, transport et pervibration du béton, fermeture aval du barrage, frais généraux et divers. Pour chaque poste, il indique le prix du mètre cube de béton et, là où il y a lieu, la quantité par mètre cube de béton ainsi que le prix unitaire par mètre cube de béton. Par exemple, au poste coffrages, il donne les chiffres suivants, pour le barrage évidé : 0,40 m² mètre cube de béton, prix unitaire, 16 fr. 50, prix par mètre cube de béton, 0,4.16,5 = 6 fr. 60. Prix total : 1 980 000 fr. Pour le barrage plein, les chiffres correspondants sont, successivement 0,20 m², 12 fr. 50, 2 fr. 50 et 1 015 000 fr.

On obtient ainsi pour le coût du barrage évidé la somme de 30 895 000 fr., soit 95 fr. 65 par mètre cube et pour le barrage plein, le montant de 31 330 500 fr., soit 71 fr. 75 par mètre cube. Sur le vu de ces résultats, le Conseil fédéral était justifié à admettre que le barrage plein demanderait à peu près la même dépense que le barrage évidé.

Les ingénieurs consultés par Salanfe S. A. ont refait les mêmes calculs et voici les chiffres qu'ils trouvent : pour le cube total du type évidé : 280 000 m³, pour celui du barrage plein : 380 000 m³. Le coût total du barrage évidé est de 20 670 031 fr., soit 73 fr. 82 par mètre cube et celui du barrage plein est de 25 156 949 fr., soit 66 fr. 20 par mètre cube. Voici encore le détail de leur calcul pour les coffrages :

	Quantité par m ³	Prix de béton	Prix unitaire	Prix par m ³ de béton	Total en francs
Type évidé	0,387 m ²	7,46 fr.	2,89 fr.	2,89 fr.	809 525
Type plein	0,179 m ²	6,50 fr.	1,165 fr.	1,165 fr.	442 650

Ces chiffres diffèrent totalement des premiers et, sur leur base, il n'est plus possible d'affirmer que le coût du barrage plein serait à peu près le même que celui du barrage évidé.

Voyons d'où proviennent les principales différences.

Les experts de l'Inspectorat n'ont pas eu à disposition les mètres d'EOS alors que cette documentation a pu être communiquée aux ingénieurs consultés par Salanfe S. A. Ces derniers ont pu utiliser les attachements d'exécution des fouilles et déduire des dossiers d'EOS, après la campagne de 1948, les diverses quantités spécifiques par mètre cube de béton.

Les prix unitaires admis par les experts de l'Inspectorat résultent de prix d'entrepreneurs pratiqués sur les chantiers de Lucendro et de Rossens. Ceux des ingénieurs sont les prix obtenus effectivement par EOS sur le chantier de Cleuson pour la campagne de 1948.

Les chiffres que les experts ont donné pour les installations résultent d'estimations, ceux des ingénieurs consultés par Salanfe S. A. ressortent de la comptabilité d'EOS pour le chantier de Cleuson. Ces ingénieurs ont tenu compte du fait que pour les deux types de barrage, les installations de Cleuson, après l'achèvement de ce barrage, passeraient en totalité au chantier de Salanfe et ils ont prévu une provision de 2 millions de francs pour remonter et compléter ces installations à Salanfe.

Le type de coffrages étudié et appliqué par EOS au chantier du barrage évidé de Cleuson, très rationnel, a conduit à un prix de revient de pose, y compris entretien et révision, de 7 fr. 50 par mètre carré. En tenant compte de certaines simplifications possibles dans l'exécution du barrage massif, le prix a pu être ramené pour ce dernier type de barrage à 6 fr. 50 le mètre carré. La différence minime entre les deux types provient de ce que le système étudié par EOS convient, à quelques détails près, aussi bien à un type qu'à l'autre.

Quant à l'économie de ciment que l'adoption du type évidé permet de réaliser, les calculs détaillés effectués sur la base des cubes de béton réels et des dosages admis pour l'exécution montrent qu'elle est de 19 696 tonnes pour Cleuson et non pas seulement de 6042 tonnes comme l'indiquent les experts de l'Inspectorat.

En ce qui concerne les délais d'exécution, les experts de l'Inspectorat estiment qu'ils ne peuvent pas être plus courts pour un barrage évidé que pour un barrage plein. Au contraire,

un mur massif de 400 000 m³ sera plus vite construit qu'un mur évidé de 300 000 m³, cela à cause des coffrages dont la surface nécessaire est beaucoup plus grande dans le mur évidé que dans le mur plein. Si l'on songe, disent ces experts, aux difficultés que l'on a de trouver des charpentiers (ces difficultés n'existent plus, puisque maintenant, en Valais, les charpentiers cherchent du travail), on comprendra que le mur massif puisse être construit au moins aussi rapidement que le mur évidé. Les installations de bétonnage les plus perfectionnées (celles de Cleuson sont effectivement très perfectionnées) deviennent inutiles à cause des difficultés que présentent les coffrages, car ce ne sont pas les machines qui règlent l'allure du travail, mais la main-d'œuvre. Conclusion : le programme d'EOS qui prévoit le bétonnage du mur de Cleuson en deux ans n'est pas réalisable.

Voici la réalité à ce jour. Au cours de la campagne 1948, il a été mis en place au barrage de Cleuson environ 90 000 m³ de béton, la production journalière pouvant atteindre 1400 m³. Il reste donc pour la campagne 1949 à bétonner environ 190 000 m³ pour terminer le barrage du type évidé. Si l'on ne vient pas, par des mesures artificielles, la gêner dans son travail, EOS sera en mesure de tenir son programme.

En revanche, s'il avait été nécessaire d'édifier un barrage massif, il resterait à exécuter 290 000 m³ de béton. Il serait impossible d'achever Cleuson à la fin de 1949 et cela entraînerait un décalage d'une année pour chacun des chantiers de Cleuson et de Salanfe. Cet allongement des délais jouerait un rôle dans le prix de revient des ouvrages et il priverait l'économie électrique suisse d'apports importants d'énergie d'hiver, à un moment où elle en a un besoin urgent.

Les experts de l'Inspectorat font diverses suggestions concernant les projets, l'un du type évidé, l'autre du type plein, qu'EOS a présentés pour Cleuson. Pour le barrage évidé, ces suggestions concernent des mesures d'isolation thermique du parement et de la fermeture aval du barrage. Ces mesures auraient pour effet de diminuer les oscillations de température dans les évidements. D'autre part, il serait nécessaire aussi de prolonger, en profondeur, le mur parafouille. Pour le mur massif ils estiment, en faisant des hypothèses particulières sur le calcul des sous-pressions, que l'on pourrait sans inconvénient diminuer son cube de 27 000 m³. On pourrait également diminuer les dosages de ciment prévus par EOS pour le mur plein.

Ces suggestions sont discutables, spécialement celle qui concerne le calcul des sous-pressions dans le mur plein. D'ailleurs, leur prise en considération, qui aurait pour effet d'augmenter le coût du barrage évidé de 500 000 fr. et de diminuer celui du barrage massif d'un million et demi, n'arriverait pas de loin à combler la différence de 4,5 millions qui existe entre le coût des deux types de barrage.

V

Si les considérations d'ordre économique ont joué un rôle important dans les décisions prises par le Conseil fédéral, celles d'ordre militaire, qui se rapportent au comportement des barrages sous l'action des bombes, n'ont pas joué un moins grand rôle.

Nous avons vu plus haut que, suivant la doctrine officieuse, l'hypothèse de l'emploi d'une bombe à 2000 kg de trotyl rendait nécessaire un abaissement préalable du niveau de

l'eau dans les retenues fermées par un mur massif jusqu'à une profondeur telle qu'au niveau abaissé, l'épaisseur de ce mur plein soit de 12 m (11 m dans les barrages arqués, à cause de l'effet de voûte).

Entre temps il semble, d'après les considérants du Conseil fédéral, que la doctrine officieuse, décidément périmée, a été révisée. Ces considérants parlent maintenant de charges de 2600 kg et même de 5600 kg, dont l'action sur un mur massif, aurait fait l'objet d'études détaillées. « Ces charges ne seraient en mesure de provoquer une brèche complète dans le barrage que si ce dernier était atteint dans sa partie supérieure. Au cas où le bassin d'accumulation serait plein, l'eau s'écoulerait par ces brèches et en provoquerait l'élargissement dans la zone d'ébranlement du béton. L'écroulement du barrage ne serait pas à craindre vu les charges d'explosif entrant en ligne de compte. »

Ces indications sont précieuses par ce qu'elles disent. On peut se demander si, sous l'effet des sous-pressions agissant dans les fissures du béton produites par l'explosion de charges de 5000 kg, effet auquel peut venir s'ajouter l'action des ondes de choc dues à la déflagration d'autres bombes dans l'eau du bassin, le barrage ne s'écroulera pas. Elles sont précieuses par ce qu'elles ne disent pas. Si le bassin est plein, la quantité d'eau qui s'engouffrera dans les brèches ouvertes par ces charges de plus de 5000 kg dans la partie supérieure du barrage ne sera-t-elle pas suffisante pour provoquer une catastrophe à l'aval ? Et si le niveau de l'eau a été abaissé par mesure de précaution, on ne nous dit pas jusqu'à quelle profondeur il aura fallu pousser l'abaissement préalable si l'on veut que l'ouverture de la brèche soit sans danger pour les régions à l'aval du barrage. Ce sera en tout cas jusqu'au niveau où l'épaisseur du mur sera de plus de 12 m pour un barrage plein et de plus de 11 m pour un barrage-voûte. Que deviennent alors les objections du délégué aux barrages contre cet abaissement préalable ? Mais, celui-ci n'est pas au bout de ses soucis, les progrès réalisés dans les moyens de destruction se poursuivent sans trêve. Ces derniers jours encore, les quotidiens publient des clichés montrant les effets de l'explosion d'une bombe nouvelle de 5000 kg sur le champ d'essai d'Aberdeen (USA). Ces progrès continueront, et comme les barrages que nous construisons aujourd'hui doivent bien durer une vingtaine d'années, ceux-ci doivent être en mesure de résister aux bombes que l'on emploiera dans vingt ans d'ici.

Du reste, il n'est pas nécessaire de faire des prévisions à si longue échéance. La bombe atomique existe. Certains pays en ont de grosses réserves. Au rapport des ingénieurs consultés par Salanfe S. A. est jointe une étude des effets radioactifs de l'explosion d'une bombe atomique sur un barrage d'altitude. Que se passerait-il si une bombe atomique venait à éclater dans un bassin de retenue ? Elle produirait l'élévation d'une colonne d'eau de gros diamètre qui, après être montée assez haut, s'étalerait en chapeau de champignon et retomberait. Cette masse d'eau, qui pourrait être de plusieurs millions de mètres cubes, ou bien s'écoulerait par la brèche du barrage, si celui-ci était rompu, ou bien déferlerait par-dessus le barrage si celui-ci résistait à l'explosion. Dans les deux cas, que le barrage soit d'un type ou d'un autre, une masse d'eau descendra dans la vallée en l'inondant brusquement, et ce sera de l'eau radioactive dont les effets pernicieux sur tout être vivant aggraveront singulièrement

pendant quelque temps les dégâts causés par l'inondation. Dans ce dernier cas, le type du mur qui fermera la retenue ne jouera aucun rôle, et l'on sent combien il est vain de vouloir, par des distinctions d'espèce entre les divers murs, essayer de modifier un résultat qui ne dépend pas du type de ces murs.

D'autre part, les considérants du Conseil fédéral citent un rapport daté du 30 novembre 1948 dans lequel un des professeurs de Zurich, répétant une affirmation erronée de la doctrine officieuse, affirme que la destruction d'un joint amont du barrage de Cleuson peut être obtenue déjà avec une charge réduite de 100 kg environ de trotyl ou d'un explosif équivalent. Cette destruction, dit-il, pourrait provoquer la pénétration de l'eau dans l'évidement correspondant et ainsi amener, par une sollicitation excessive du béton (manque de résistance à la traction) la rupture des piliers. Il ajoute qu'avec une plus grande quantité d'explosif, les effets seraient plus sûrs et plus rapides ; la hauteur à laquelle se produirait l'explosion ne joueraient pratiquement aucun rôle. La destruction du barrage serait due essentiellement au fait que l'ouverture produite permettrait l'entrée de l'eau dans les évidements et ainsi l'endommagement des piliers par la pression latérale de l'eau.

Cette opinion n'est pas exacte. Le calcul, appuyé sur des expériences faites, sur un modèle au $1/33$ du barrage évidé de Salanfe, au laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, le démontre clairement. Ces expériences ont été entreprises à la suite d'une lettre que M. Coyne, l'éminent président de la Commission internationale des grands barrages, a adressée à EOS à la fin de 1948. Il s'y occupe de la résistance comparée, en cas de bombardement, d'un barrage poids massif et d'un barrage poids évidé. Après avoir constaté que la défense des ouvrages est complètement dominée par la puissance des moyens d'attaque, ce qui est aussi l'opinion générale en Amérique, M. Coyne se demande si l'irruption de l'eau pénétrant en force, par une brèche du parement, entre deux contreforts d'un barrage évidé serait suffisante pour exercer sur ces derniers une forte poussée latérale et les renverser. Pour écarter la possibilité d'un remplissage accidentel de l'intervalle compris entre deux contreforts et ses conséquences catastrophiques, le mieux ne serait-il pas, écrit M. Coyne, de laisser à l'eau un large débouché à l'aval ou à travers les contreforts qui seraient munis de grandes ouvertures à cet effet ?

Entrant dans la voie indiquée par M. Coyne, les ingénieurs consultés par Salanfe S. A. ont estimé qu'à Cleuson, comme à Salanfe, il fallait réaliser une fermeture aval du barrage qui, tout en protégeant l'intérieur des évidements contre les variations de la température ambiante, puisse être facilement enlevée par l'eau qui viendrait à pénétrer dans les évidements, et ils ont indiqué divers dispositifs permettant de réaliser cette fermeture aval. En outre, pour empêcher l'eau de monter trop haut dans les évidements et augmenter la stabilité latérale des piliers en équilibrant en partie les pressions dues à cette eau, sur les deux faces des piliers, ils ont suggéré de ménager dans ces piliers, par exemple au voisinage des trous de visite, des ouvertures circulaires d'un diamètre de l'ordre de huit mètres.

Ces dispositions prises, les barrages évidés résisteront à la destruction par renversement des piliers. Ainsi, dans les essais de laboratoire, on a percé dans le parement amont,

sur le joint d'un évidement, trois ouvertures dont la surface serait, dans la réalité, de 20 m^2 pour chaque ouverture, ces ouvertures étant placées respectivement au bas, à mi-hauteur et au haut de l'évidement. La retenue étant à son niveau maximum, l'eau qui s'écoule par ces ouvertures s'échappe à l'aval sans remplir l'évidement à plus du tiers de sa hauteur, et les pressions mesurées sur les faces des piliers qui limitent cet évidement, diminuant du bas vers le haut, ne dépassent nulle part le 30 % de la charge dans la retenue. Le calcul montre alors nettement que ces pressions ne compromettent en aucune façon la stabilité latérale des piliers sur lesquels elles s'exercent. Toutefois, si les brèches faites par les bombes dans le parement amont sont importantes et si elles sont situées au bas de ce parement, la quantité d'eau qui s'y engouffrera et qui traversera le barrage (sans compromettre la stabilité des piliers) sera si élevée qu'elle produira des inondations à l'aval, inondations qui n'auraient peut-être pas la même importance et la même durée pour des brèches de même surface ouvertes dans la partie supérieure d'un barrage massif. Mais alors, et sur ce point les ingénieurs consultés par Salanfe S. A. suivent aussi une suggestion de M. Coyne, il suffirait d'armer le parement amont de façon à réduire la surface des brèches pour réaliser un barrage évidé dont le comportement, sous les bombes, serait le même que celui d'un barrage massif.

On voit combien ces résultats diffèrent de ceux qui ont formé l'opinion du Conseil fédéral.

VI

Avant de terminer, résumons en quelques lignes les principales conclusions des ingénieurs consultés par Salanfe S. A.

1. *Les barrages à gravité évidés prévus pour les aménagements de Cleuson et de Salanfe présentent, au point de vue statique, les mêmes garanties que des barrages à gravité massifs.*
2. *Ces barrages évidés résisteront, au moins aussi bien que des barrages pleins, aux effets des variations de température.*
3. *Ces barrages évidés résisteront mieux que des barrages pleins à l'action des tremblements de terre.*
4. *Des barrages évidés du type Cleuson ne sont pas plus exposés que des barrages pleins à des actes de sabotage.*
5. *Le coût du barrage évidé de Cleuson sera très inférieur à celui du barrage plein que l'on aurait pu utiliser pour la même retenue.*
6. *Si les travaux de Cleuson ne sont pas retardés artificiellement par des mesures administratives, ce barrage sera terminé cette année et les installations de Cleuson pourront être utilisées dès le début de 1950 pour le barrage de Salanfe.*
7. *Il est non seulement vain, mais aussi dangereux, de vouloir, par des discriminations pérémises entre les barrages des divers types, protéger les murs des retenues contre la destruction par les bombes. Aucun barrage, qu'il soit d'un type ou d'un autre, ne résistera à l'attaque avec des bombes modernes, lancées par un ennemi puissant et résolu. Le seul moyen de protéger les régions situées à l'aval d'un bassin de retenue contre les risques de destruction du barrage qui le ferme est l'abaissement préalable, poussé assez loin, et en temps utile, du niveau de l'eau dans la retenue.*
8. *Il est faux de prétendre que l'on peut, avec une bombe contenant 100 kg de trotyl (ou même beaucoup plus) détruire un barrage évidé par renversement des piliers.*

Ces conclusions sont en complète contradiction avec la doctrine officieuse. Seul un collège d'ingénieurs, collège étendu, procédant sans hâte à l'examen des questions posées au cours de la querelle des barrages, en s'appuyant sur des essais sur modèle, collège formé d'ingénieurs qui ne seraient pas déjà liés par des positions prises, pourra trancher le différend.

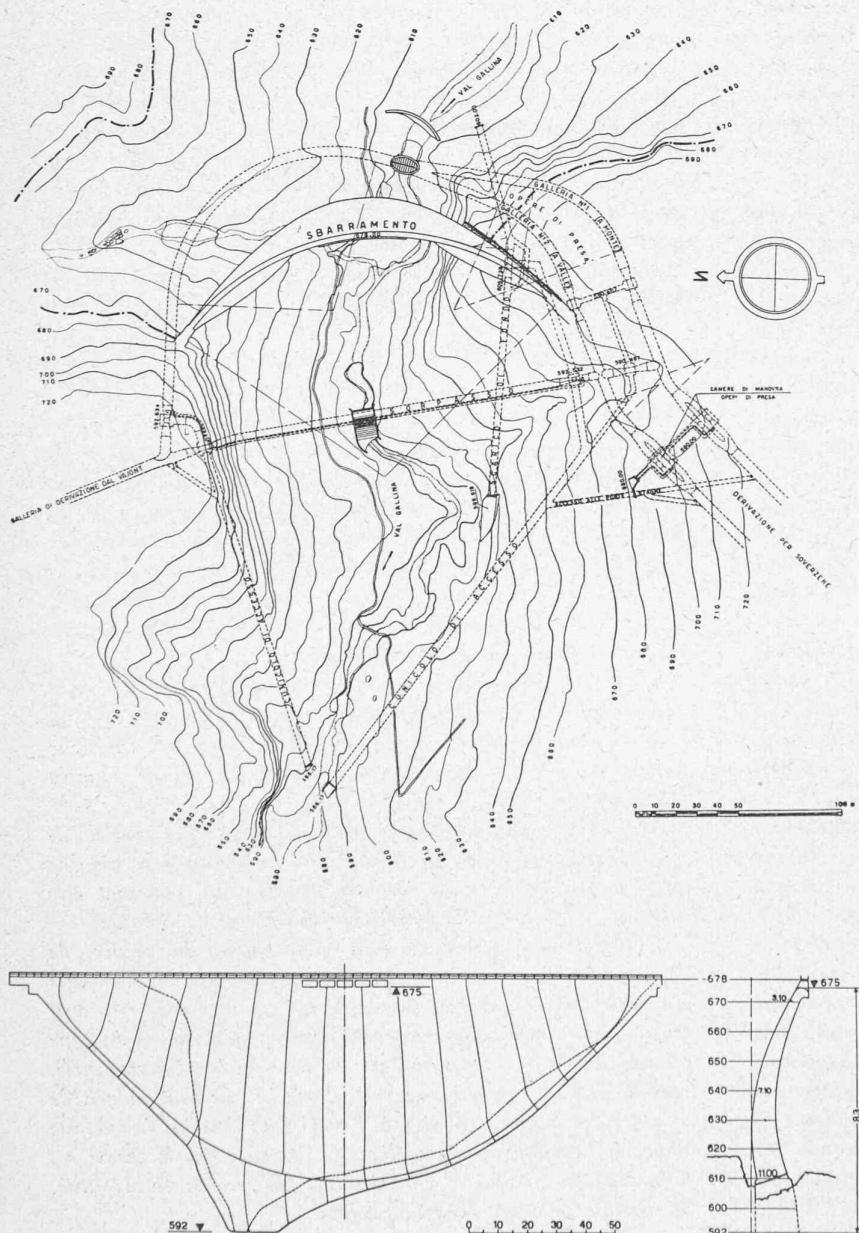
La politique du secret et de monopole suivie dans cette affaire, politique qui est devenue actuellement une politique de prestige, a été néfaste, et l'on envie les pays qui

nous entourent, en particulier l'Italie où, comme l'écrivit M. Semenza, les autorités militaires ne mettent aucun obstacle de principe à l'adoption des types de barrages qui conviennent au temps de paix et se contentent d'assurer la protection des barrages hydrauliques par des mesures que le Conseil fédéral avait déjà prévues dans son Arrêté du 23 décembre 1943, à savoir l'abaissement préalable du niveau des retenues et l'organisation d'un service d'alarme contre les inondations.

Les barrages de la Società Adriaticà d'Elettricità en Vénétie

par M. C. SEMENZA, directeur des Constructions hydrauliques de la « Stà Adriatica di Elettricità », à Venise¹

(Suite et fin.)²



¹ Conférence donnée à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, le 20. I. 49, et à Zurich, le 22. I. 49, devant les membres du Groupe des Ponts et Charpentes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (Réd.). — ² Voir Bulletin technique du 23 avril 1949.