

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 44 (1953)  
**Heft:** 12: Centenaire de l'Ecole Polytechnique e l'Université de Lausanne

**Artikel:** Etudes expérimentales de problèmes relatifs à la construction des barrages-réservoirs  
**Autor:** Stucky, Alfred  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058080>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.01.2025

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

revanche, l'ingénieur qui durant ses études a calculé et construit à la fois des moteurs, des turbines et des machines électriques est préparé à faire ces rapprochements si féconds, à établir ces correspondances entre domaines divers qui sont d'un si riche enseignement; d'une si grande utilité aussi, car il bénéficie non seulement des mathématiques pures et des mathématiques appliquées (avec des calculs allant jusqu'aux chiffres), mais de mathématiques que leur application même à une technique déterminée a considérablement développées.

J'insiste ici encore sur les avantages de supprimer toute cloison étanche entre sections, car les ingénieurs mécaniciens risquent d'ignorer un jour ce que les techniques électriques nouvelles pourraient leur apporter.

En effet, une ère nouvelle a commencé. Le rôle éducateur de l'électrotechnique n'est pas terminé, loin de là. La radio-électricité et la technique des télécommunications ont introduit au cours de ces dix dernières années et mis au point des méthodes d'analyse et de synthèse susceptibles d'être appliquées sans difficultés majeures (c'est-à-dire sans autre effort que celui de s'adapter à un langage nouveau), à tous les mécanismes où intervient une com-

mande avec asservissement. Dès l'instant où les équations différentielles régissant des phénomènes mécaniques et électriques sont de la même forme, ces deux classes de phénomènes sont justiciables des mêmes méthodes et procédés de calcul. Mieux encore, leur analogie est telle qu'on peut, pour étudier le fonctionnement d'un appareil mécanique, construire un modèle électrique sur lequel on pourra procéder à toutes les mesures et expériences nécessaires, car toutes les grandeurs intéressant le mécanicien, du module d'élasticité à l'inertie, de la résistance de frottement des fluides à la vitesse de propagation des ondes de choc trouvent leurs correspondantes en l'électricité.

L'électrotechnique mérite notre reconnaissance pour avoir fait entrer de la manière la plus brillante qui soit les mathématiques dans le domaine de l'ingénieur. Enrichie maintenant de l'électronique, elle suscite nos espoirs en mettant à la portée des mécaniciens des moyens de travail dont les applications paraissent illimitées.

Pierre Oguey,

Conseiller d'Etat, ingénieur mécanicien, ancien professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne

## Etudes expérimentales de problèmes relatifs à la construction des barrages-réservoirs

Par Alfred Stucky, Lausanne

627.43

*L'auteur montre que certains problèmes d'hydraulique et de résistance posés par la construction des barrages-réservoirs exigent des études préliminaires sur modèles réduits, et il décrit quelques travaux effectués par le «Laboratoire d'hydraulique» et le «Centre de recherches pour l'étude des barrages» de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.*

*Parmi les problèmes d'hydraulique, l'auteur examine trois types d'ouvrages principaux: les évacuateurs de crues, les vidanges de fond, les ouvrages de dissipation de l'énergie libérée par la chute de grandes masses d'eau.*

*Quant aux problèmes de résistance, il analyse quelques-unes des difficultés particulières aux barrages de très grande hauteur (Mauvoisin 230 m, Grande-Dixence 270 m): déformation des appuis rocheux, déformations et contraintes des barrages-voûtes, distribution des contraintes au voisinage d'une discontinuité du contour.*

*Der Autor befasst sich mit einigen ausgewählten Problemen der Hydraulik und der Festigkeitslehre, die sich bei der Ausführung von Speichieranlagen ergeben und zeigt, dass diese eingehende Modellstudien erfordern. Er beschreibt einige Arbeiten, welche im «Laboratoire d'Hydraulique» und dem «Centre de recherches pour l'étude des barrages» der Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne ausgeführt wurden.*

*Bei den hydraulischen Problemen werden drei Bauwerkstypen behandelt: Hochwasserentlastungsanlagen, Grundablass und Energievernichtung.*

*Im Hinblick auf die Festigkeitsprobleme werden vom Autor einige besondere Schwierigkeiten bei sehr hohen Talsperrenbauten untersucht (Mauvoisin 230 m, Grande Dixence 270 m): Verformung der Felswiderlager, Verformung und Spannungen in Gewölbemauern, Spannungsverteilung in der Umgebung plötzlicher Querschnittsübergänge.*

### Introduction

Parmi les nombreux problèmes qui se posent à l'ingénieur établissant le projet d'un barrage, il en est plusieurs pour la résolution desquels une étude en laboratoire et des essais apportent une aide importante. Notre propos est de faire un bref tour d'horizon de ces questions en commentant quelques études récentes faites par les Laboratoires de l'Ecole polytechnique de Lausanne, plus particulièrement dans le domaine de l'hydraulique et de la statique.

Il convient de remarquer d'emblée que la plupart des problèmes de résistance des barrages ne touchent pas qu'une seule spécialité et ne peuvent donc être résolus d'une manière satisfaisante que par une étroite collaboration entre mathématiciens, physiciens et spécialistes des problèmes de résistance et de statique. C'est pourquoi il a été créé à l'Ecole polytechnique de Lausanne, en plus du laboratoire

d'hydraulique, un Centre de recherches pour l'étude des barrages, outillé pour l'étude de problèmes tels que les essais statiques sur modèles ou l'auscultation d'ouvrages achevés. S'il s'agit de questions communes à d'autres domaines, il recourt à la collaboration d'autres laboratoires et instituts.

Si la construction de barrages sur les torrents de montagne ne pose pas de problèmes hydrauliques très compliqués, étant donné les faibles débits, il n'en est plus de même pour les barrages-réservoirs sur de grandes rivières ou de fleuves, où les débits peuvent même devenir si considérables (jusqu'à plusieurs milliers de mètres cubes par seconde) que l'ensemble du projet est dominé par les questions hydrauliques. Il est souvent difficile dans ce cas d'établir un projet convenable sans l'aide d'essais sur modèles réduits, d'autant plus que le long du cours inférieur des rivières, le terrain risque fort

de ne pas être aussi résistant que ceux auxquels nous sommes accoutumés dans les Alpes suisses. Passant en revue quelques exemples de semblables études sur modèles, nous nous arrêterons à trois types d'ouvrages principaux: évacuateurs de crues proprement dits, vidanges de fond et ouvrages de dissipation de l'énergie libérée par la chute de grandes masses d'eau.

## A. Problèmes hydrauliques

### 1. Evacuateurs de crues

On peut envisager d'évacuer les crues soit par le barrage, soit en dehors du barrage. Dans le premier cas, on adopte généralement un déversoir, muni ou non de vannes; exceptionnellement, on a recours à des vannes de fond, ou à la combinaison des deux systèmes.

L'étude sur modèle réduit d'un évacuateur en déversoir placé sur le barrage peut être avantageusement précédée d'essais à deux dimensions permettant la recherche d'une forme de crête assurant le meilleur coefficient de débit possible, sans entraîner de trop fortes dépressions; il peut être nécessaire aussi de connaître exactement le point d'impact de la lame déversante.

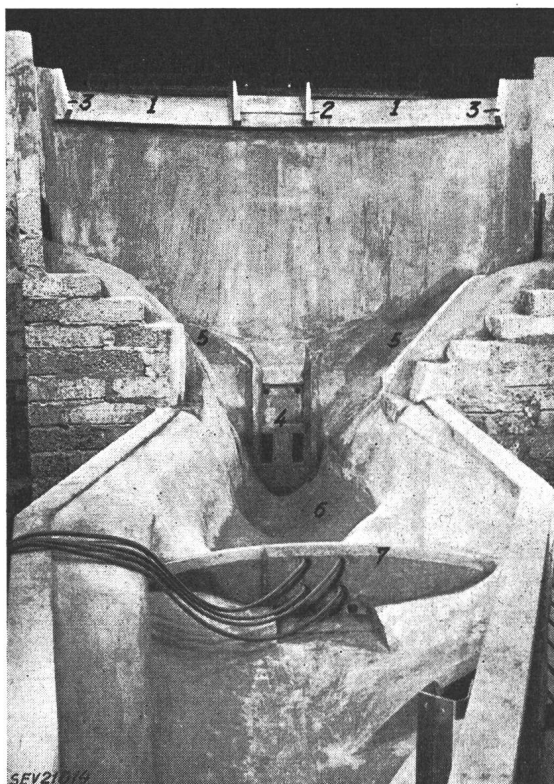


Fig. 1

Modèle du barrage du Châtelot

1 Crête déversante; 2 Becs de fractionnement; 3 Guideaux; 4 Cabine des vannes de vidange; 5 Chenaux collecteurs recevant la lame déversée; 6 Bassin d'amortissement (non revêtu); 7 Contre-barrage (avec tuyaux pour la mesure des pressions)

On peut ensuite procéder à une étude d'ensemble de l'ouvrage évacuateur, ce qui permet de choisir judicieusement les formes des extrémités latérales du déversoir, celles de guideaux éventuels ou de becs de fractionnement destinés à garantir l'aéra-

tion de la lame. Les fig. 1 et 2 sont des vues d'un modèle du barrage du Châtelot<sup>1)</sup> réalisé à l'échelle 1:40 au Laboratoire d'hydraulique de l'EPUL et dont la crête déversante avait été étudiée préalablement à 2 dimensions. Sur la fig. 2, qui montre l'évacuation d'un débit correspondant à 130 m<sup>3</sup>/s, on peut constater l'efficacité, pour l'aération de la lame, des deux becs de fractionnement et des guideaux placés aux extrémités du déversoir.

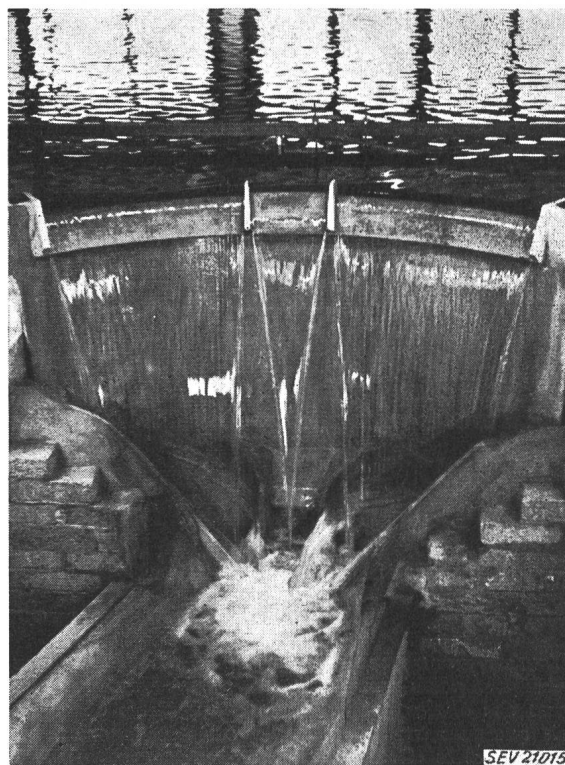


Fig. 2

Modèle du barrage du Châtelot

Déversement d'un débit correspondant à 130 m<sup>3</sup>/s

On remarque l'effet des becs de fractionnement et des guideaux sur l'aération de la lame d'eau, ainsi que le partage des jets au bas des chenaux collecteurs

Si la résistance du rocher ne permet pas d'envisager une chute libre de l'eau à l'aval du barrage, comme on l'a fait dans l'exemple du Châtelot cité plus haut, on place l'évacuateur de crues en dehors du barrage. Cette disposition a l'avantage, sur lequel nous reviendrons, d'éloigner du barrage l'endroit où doit être détruite l'énergie de l'eau de l'évacuateur. Une solution intéressante, et qui a été adoptée avec succès à plusieurs reprises, est celle d'un déversoir circulaire suivi d'un puits vertical aboutissant à une galerie, située au niveau de la rivière. On crée ainsi un long déversoir qui peut être obturé par une unique vanne cylindrique de construction simple, sur laquelle les pressions s'équilibrent, réduisant au minimum les efforts de levage.

Ce type d'ouvrage a fait l'objet d'une étude systématique du Laboratoire d'hydraulique de l'EPUL<sup>2)</sup>. Ainsi qu'on le voit sur la fig. 3, s'il n'y

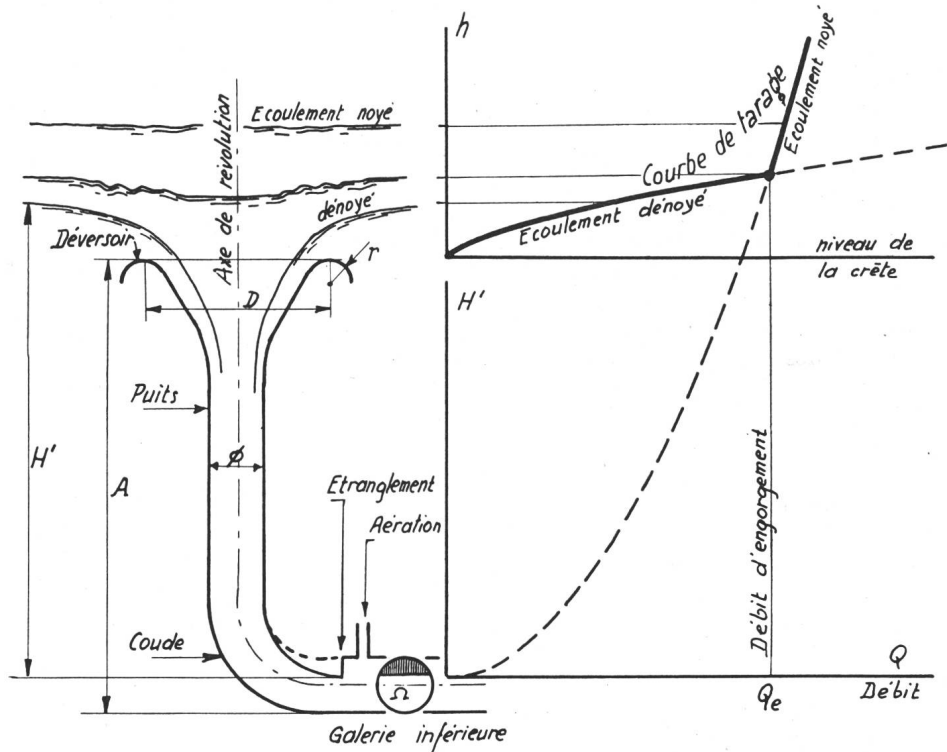
<sup>1)</sup> Situé sur le Doubs franco-suisse, ce barrage a été mis en eau au printemps 1953.

<sup>2)</sup> Publication n° 8 de l'EPUL. A. Gardel: Les évacuateurs de crues en déversoirs circulaires. Lausanne 1950.

a pas de vanne, ou si celle-ci est complètement levée, la cote du plan d'eau amont est fonction du débit seulement. Pour les faibles débits, c'est le déversoir qui commande l'écoulement (formule de Dubuat, branche horizontale de la courbe), tandis que pour les débits élevés, c'est l'orifice inférieur du puits (formule de Torricelli, branche verticale de la courbe). Le point d'intersection des deux courbes correspond à l'engorgement du puits; à partir de ce moment, le niveau du lac monte très rapidement lorsque le débit continue à croître.

Parmi les évacuateurs de crues en déversoirs circulaires étudiés par le Laboratoire d'hydraulique de l'EPUL, nous citerons celui du barrage à contreforts de Pracana, au Portugal (fig.4).

Fig. 3  
Schéma de fonctionnement d'un évacuateur de crues en déversoir circulaire



Ce déversoir, dont le diamètre en crête atteint 20 m, peut évacuer 1650 m<sup>3</sup>/s. Le passage, sur le modèle

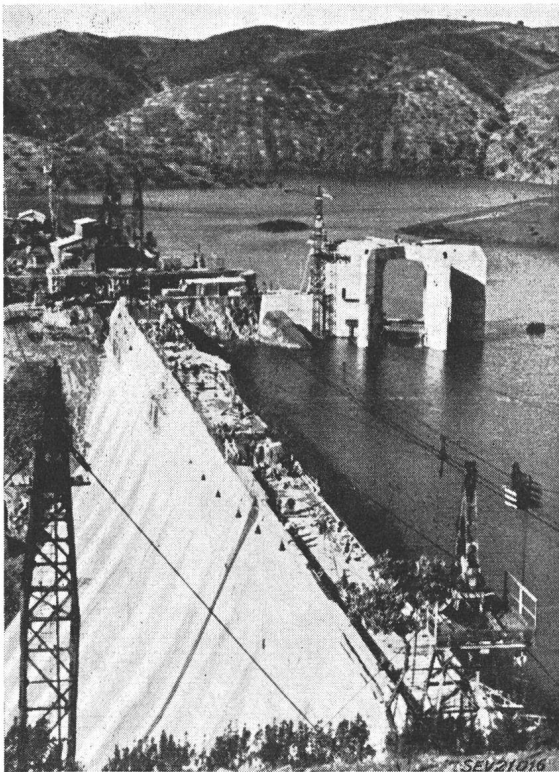


Fig. 4  
Barrage à contreforts de Pracana (Portugal) et évacuateur de crue  
(crue de 150 m<sup>3</sup>/s avant l'achèvement des travaux)  
La vanne de l'évacuateur n'est pas encore montée. Capacité d'évacuation maximum: 1650 m<sup>3</sup>/s

à l'échelle 1:40, du débit correspondant à 1000 m<sup>3</sup>/s fait l'objet de la fig. 5.

Pour le barrage à contreforts de Ben-Métir, en Tunisie, on a utilisé ce type d'ouvrage en déversoir

circulaire aussi bien pour l'évacuateur de crues définitif au niveau du lac plein, que pour un évacuateur provisoire, au niveau du batardeau destiné à protéger les fouilles du barrage principal pendant la construction; cette disposition exceptionnelle a été nécessaire pour permettre l'exploitation immédiate de la réserve créée par le batardeau. Les deux évacuateurs utilisent la même galerie de fuite, qui avait déjà servi de galerie de dérivation pendant la construction du batardeau.

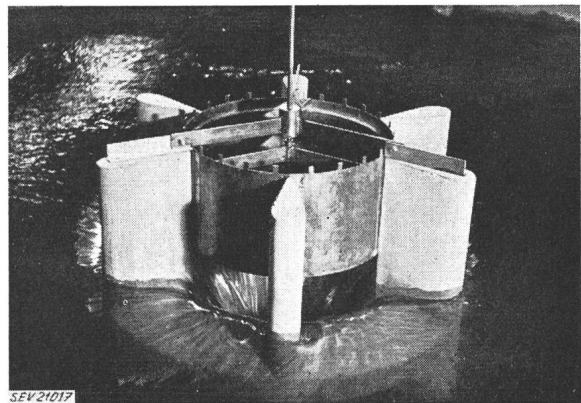


Fig. 5  
Modèle de l'évacuateur du barrage de Pracana.  
Déversement d'un débit correspondant à 1000 m<sup>3</sup>/s

La fig. 6 montre l'état des travaux en février 1953: on voit, à droite en haut, le déversoir de l'évacuateur provisoire. Celui-ci a été étudié sur modèle à l'échelle 1:60. On remarquera qu'il n'a pas été prévu de guideaux; ceux-ci, destinés à empêcher la

formation d'un vortex, ont pu être supprimés étant donné le caractère provisoire de l'ouvrage et la forme particulière de la crête à très forte courbure.

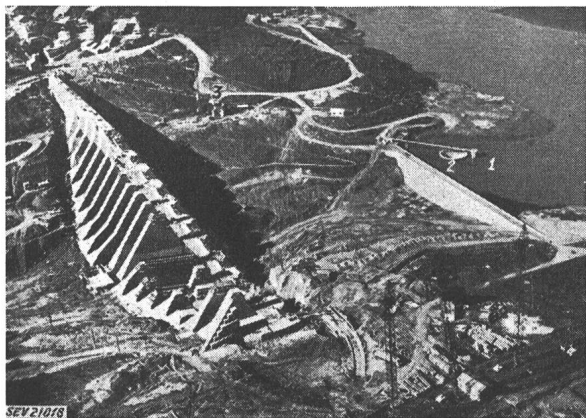


Fig. 6

Barrage de Ben-Métir. Vue aérienne des travaux (février 1953)  
1 Retenue provisoire; 2 Déversoir circulaire de l'évacuateur provisoire (capacité d'évacuation maximum: 400 m<sup>3</sup>/s); 3 Base de l'évacuateur définitif

### 2. Vidanges de fond

En dehors des questions posées par la réalisation de la vanne (capacité d'évacuation, dépressions, vibrations, force de levage, etc.) et qui concernent plutôt le constructeur de cet engin, il importe d'étudier surtout les conditions d'écoulement à l'aval de la vanne.

Lorsque celle-ci est suivie d'un canal assez long et courbe, les formes doivent être choisies avec grand soin parce que l'eau s'écoule à une vitesse très élevée (30 à 40 m/s), qui risquerait, sous l'effet de la force centrifuge, de faire jaillir la lame hors du canal, ou contre la calotte s'il s'agit d'une galerie. De telles études ont été effectuées au Laboratoire d'hydraulique\* de Lausanne, entre autres pour les vidanges de fond des barrages de Génissiat et Ben-Métir.



Fig. 7

Modèle de la sortie de l'évacuateur de crues rive gauche du barrage de Génissiat, vue de l'amont  
Passage d'un débit correspondant à 600 m<sup>3</sup>/s. Le jet est dévié vers la droite et vers le haut par des déflecteurs placés à l'extrémité de l'ouvrage en béton

### 3. Dissipation de l'énergie libérée par le déversement des crues ou l'ouverture de la vidange

Plus important que le précédent est le problème de la dissipation de l'énergie. Pour s'en rendre

compte, il suffit d'évaluer la puissance à détruire, qui dépasse souvent 100 000 kW, et atteint parfois 1 million kW. A Génissiat, par exemple, elle est même de l'ordre de 2 à 3 millions kW.

Exceptionnellement, si l'énergie en jeu n'est pas trop élevée et si la qualité du lit de la rivière le permet, on peut laisser déboucher l'évacuateur de crues (ou la vidange) à l'aval sans aucun ouvrage spécial.

L'une des mesures de protection du fond et des rives consiste à munir l'extrémité de l'évacuateur d'un déflecteur éloignant le jet des rives et le dispersant. C'est cette solution qui a été adoptée pour l'évacuateur de crues rive gauche de Génissiat. Les formes du déflecteur ont été étudiées sur un modèle à l'échelle 1:30, qui a permis en outre de mesurer les pressions s'exerçant sur cet ouvrage. Les fig. 7 à 10 permettent de comparer l'écoulement constaté au modèle et celui observé dans la réalité. On ne peut manquer, pensons-nous, d'être frappé par leur remarquable concordance, d'autant plus qu'il s'agit d'un phénomène de choc et rejaillissement pour lequel la similitude n'est pas aussi évidente que dans des cas plus simples.

Ces deux solutions (absence d'ouvrage spécial, ou sortie avec déflecteur) sont certainement économiques quant à l'ouvrage de destruction d'énergie, mais exigent généralement que l'on reporte la restitution à la rivière suffisamment loin à l'aval pour que les ouvrages principaux (barrage, usine, etc.) soient à l'abri de toute érosion éventuelle.

L'ouvrage de dissipation de l'énergie peut être rapproché du barrage si la lame peut tomber dans un bassin assez profond; on y parvient, par exemple, en surélevant artificiellement le niveau d'eau aval par un petit «contre-barrage». C'est la solution qui a été retenue au Châtelot, visible sur les fig. 1 et 2.

Enfin, lorsqu'on se trouve en présence d'un terrain dangereusement affouillable, force est de réali-

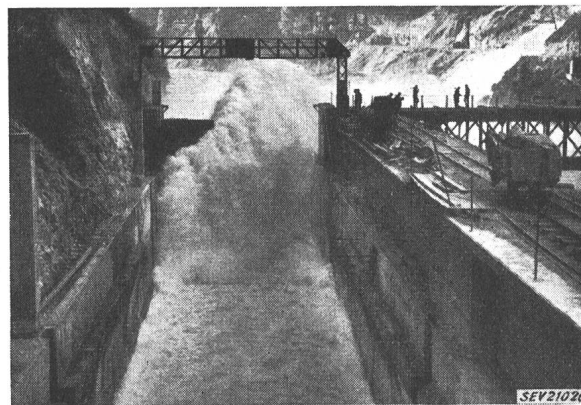


Fig. 8

Sortie de l'évacuateur de crues rive gauche du barrage de Génissiat, vue de l'amont. Passage de 600 m<sup>3</sup>/s  
A comparer avec la figure 7

ser un véritable bassin d'amortissement, entièrement revêtu de béton, dans lequel un ressaut hydraulique peut se former. Dans les cas les plus difficiles, on peut encore reporter ce bassin d'amortissement loin à l'aval du barrage; c'est ce qui a été fait au barrage de Ben-Métir. Dans ce dernier cas, le problème

était compliqué par l'étroitesse imposée au bassin d'amortissement par la stabilité des berges. On a donc recouru à un ouvrage à deux paliers. Dans un

encore modérées, de même que les pressions exercées sur la roche de fondation. La marge entre les contraintes réelles et les contraintes admissibles des

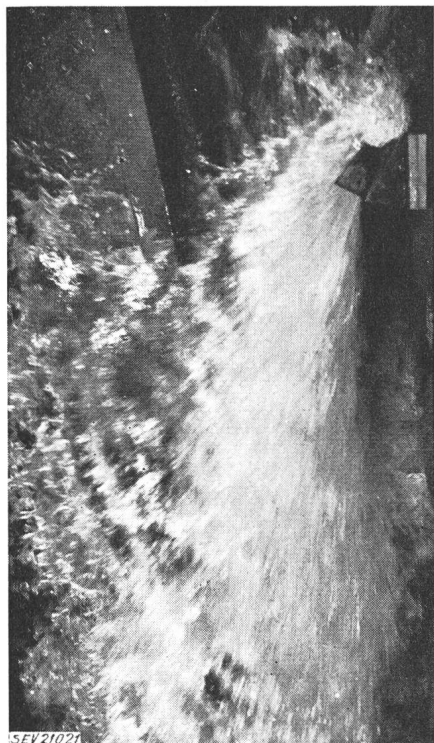


Fig. 9

Modèle de la sortie de l'évacuateur de crues rive gauche du barrage de Génissiat, vue à la verticale  
Passage d'un débit correspondant à 980 m<sup>3</sup>/s. Le déflecteur latéral est visible

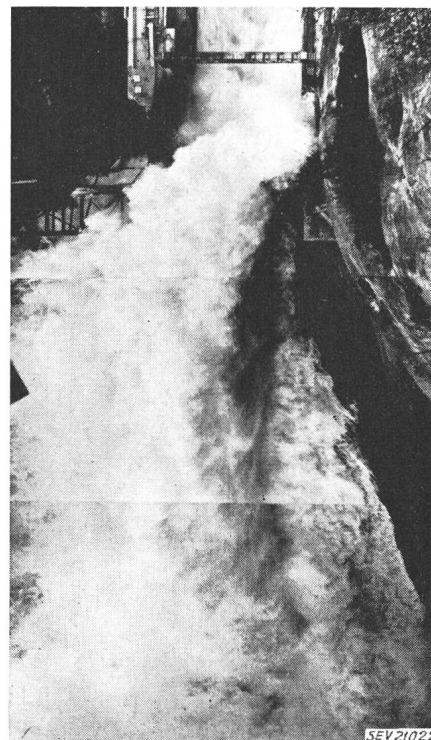


Fig. 10

Sortie de l'évacuateur de crues rive gauche du barrage de Génissiat, vue à la verticale  
Passage de 900 m<sup>3</sup>/s. A comparer avec la figure 9

premier bassin limité à l'aval par un mur-déversoir surélevant le plan d'eau, la majeure partie de l'énergie est détruite; le solde, correspondant à la chute par-dessus le mur-déversoir, est détruit à son tour dans un deuxième bassin, de plus faible longueur. Cette disposition est visible sur la fig. 11 qui montre le modèle réduit à l'échelle 1:50.

On conçoit sans peine que, parmi les questions passées en revue ci-dessus, certaines d'entre elles ne peuvent absolument pas être résolues autrement que par des essais sur modèles; c'est par exemple le cas pour l'effet des becs de fractionnement placés sur une crête déversante, ou pour les phénomènes de destruction d'énergie à la sortie d'une galerie. Pour d'autres problèmes, l'étude sur modèle apporte un utile contrôle des prévisions et permet généralement de nombreuses améliorations de détails. Dans tous les cas, une bonne solution ne peut être trouvée que par une collaboration entre l'hydraulicien et le spécialiste des problèmes de résistance, les formes choisies pour assurer un bon écoulement devant être également favorables à une bonne distribution des contraintes dans l'ouvrage.

### B. Problèmes de résistance

Tant que la hauteur des barrages ne dépassait pas une centaine de mètres, leur construction ne posait en général pas de problèmes extrêmement graves. Les contraintes à l'intérieur du béton étaient

matériaux et du sol était si grande que l'on pouvait, sauf cas spéciaux, se contenter de méthodes de calcul simplifiées. Le comportement des masses de béton mises en œuvre chaque mois, limitées à trente

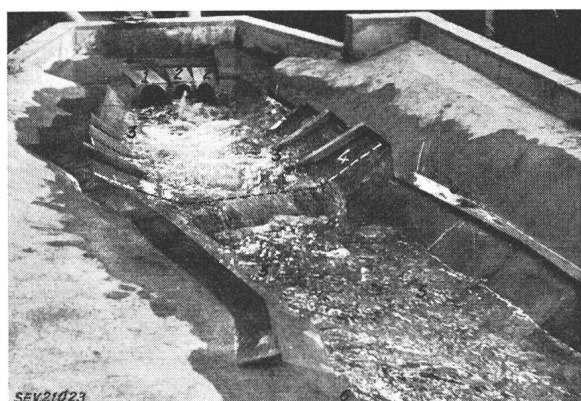


Fig. 11

Modèle du bassin d'amortissement du barrage de Ben Métir  
Écoulement d'un débit correspondant à 190 m<sup>3</sup>/s  
(vidange rive droite)

1 Sortie de l'évacuateur de crues; 2 Sorties des vidanges;  
3 Premier bassin; 4 Mur-déversoir; 5 Deuxième bassin; 6 Lit naturel de la rivière  
L'écoulement à la sortie du deuxième bassin est tout à fait tranquille

ou quarante mille mètres cubes, avait bien suscité quelques difficultés, facilement vaincues d'ailleurs par une subdivision adéquate en blocs journaliers disposés selon un plan préétabli.

Dès que l'on voulut entreprendre la construction d'ouvrages de très grande hauteur (Mauvoisin 230 m, Grande-Dixence 270 m), on se heurta rapidement à des difficultés diverses. Pour de tels barrages, non seulement les contraintes croissent en proportion de la hauteur, mais les déformations du rocher de fondation, sous l'effet du barrage et du poids de l'eau, prennent une telle importance qu'il n'est plus possible d'en faire abstraction. Les quantités de béton à mettre en place chaque jour passent de mille à cinq mille ou six mille mètres cubes, augmentant considérablement les difficultés provenant des réactions exothermiques déclenchées par des

auraient tendance à se déformer différemment. Etant liées, elles subissent des forces de coaction qui modifient considérablement la distribution des contraintes, au voisinage des parements surtout, où apparaissent généralement des pointes de contraintes.

La marge entre contraintes réelles et admissibles, très réduite pour les barrages de grande hauteur, ne permet plus d'englober purement et simplement ces influences, dites à tort secondaires, dans un coefficient de sécurité devenu insuffisant.

Il a donc fallu étudier avec soin ces divers problèmes et recourir pour cela à tous les moyens dis-

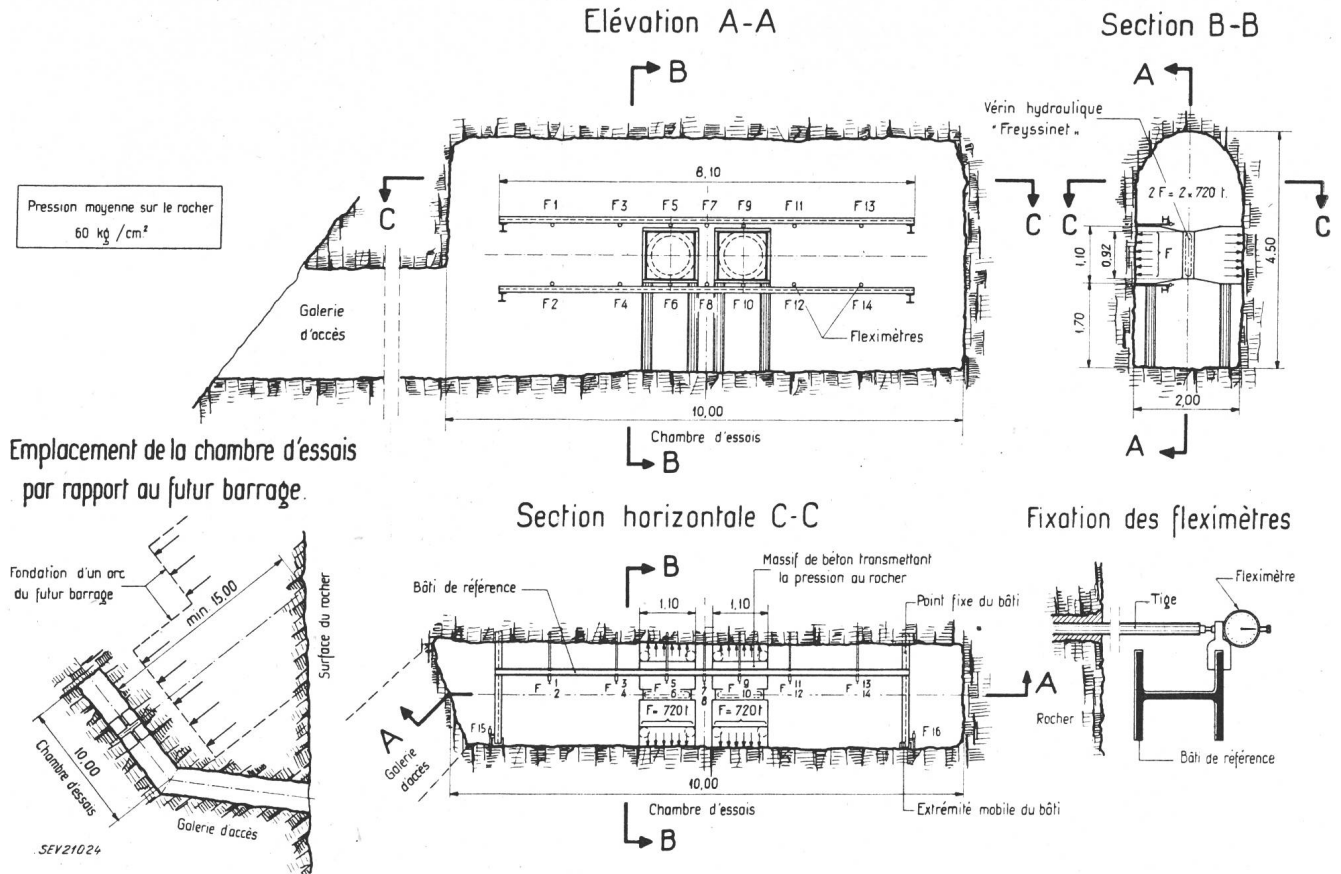


Fig. 12

Schéma de l'installation utilisée pour la détermination du module de déformation du rocher

quantités de ciment pouvant atteindre mille tonnes par jour et davantage.

Il fallut donc envisager de nouvelles méthodes de calcul plus affinées, tenant compte de l'influence des déformations à l'intérieur de l'ouvrage et des tassements des appuis. Les essais et les calculs effectués pour divers ouvrages récents avaient confirmé un fait apparu depuis longtemps aux ingénieurs mécaniciens: partout où les sections varient brusquement, comme c'est le cas au voisinage de la fondation, les contraintes sont très loin d'être réparties linéairement comme on l'admet en appliquant la règle de Navier. On conçoit aisément que des sections situées de part et d'autre de la fondation, différentes par leurs dimensions géométriques et leurs propriétés élastiques mais devant transmettre le même effort total de l'une à l'autre, à travers la ligne de discontinuité que constitue la fondation,

ponibles: analyse mathématique, essais sur modèles réduits d'ouvrages entiers, expériences sur la distribution des contraintes au voisinage des discontinuités telles que le passage de l'ouvrage à sa fondation, auscultation d'ouvrages exécutés.

Voici, par exemple, quelques recherches effectuées au cours de ces dernières années:

### 1. Déformation du rocher

La déformation des appuis d'un barrage peut, si elle est importante, modifier d'une manière appréciable la distribution des contraintes dans l'ouvrage; c'est le cas par exemple pour un barrage-voûte, hautement hyperstatique, ou pour un barrage à contreforts sur un terrain relativement compressible.

Pour analyser cette déformation des appuis, il est nécessaire de définir un module apparent de déformation du rocher,  $E_r$ , valable dans certaines li-

mites, ceci bien que la masse rocheuse ne soit ni parfaitement élastique, ni isotrope. Pour être significative à l'échelle d'un grand ouvrage, la détermination de ce module ne doit pas être faite sur un petit échantillon de la roche, ni au voisinage de la surface, ni par la simple mesure de l'enfoncement d'un vérin, qui peut être influencé par une particularité locale de la roche. Il convient d'appliquer en profondeur des efforts considérables, du même ordre de grandeur que les forces exercées par l'ouvrage, orientés dans le même sens et maintenus pendant une longue durée. Un tel essai est représenté par les fig. 12 et 13. A l'intérieur d'une chambre excavée dans la masse rocheuse, on place de gros vérins tendant à écarter les parois de la caverne; on relève la déformation de l'ensemble d'une des parois sous des charges de l'ordre de 1000 à 2000 tonnes, qui provoquent des déplacements atteignant plusieurs dixièmes de millimètres.

La surface déformée est ensuite comparée à celle que l'on peut obtenir analytiquement pour le même cas de charge (par exemple par application de la théorie de Boussinesq). De cette comparaison résulte la valeur du module apparent de déformation du rocher.

On trouve ainsi, pour des rochers réputés bons, des valeurs de  $E_r$  allant de 80 à 300 t/m<sup>2</sup>. Le module apparent d'une roche saine peut n'être qu'une fraction (le quart ou même moins) du module d'élasticité d'un échantillon de la même roche. Ce module est presque toujours inférieur à celui du béton et l'on comprend qu'il en résulte des déformations d'appui dont il est nécessaire de tenir compte.

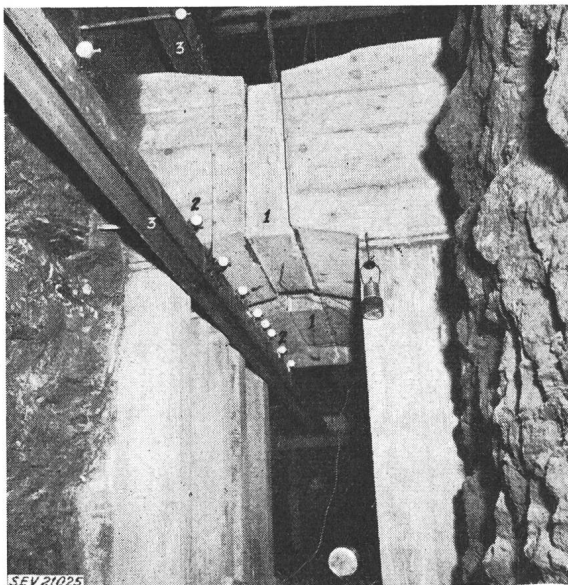


Fig. 13

Installation utilisée pour la détermination du module de déformation du rocher

1 Vérins; 2 Comparateurs pour mesure de la déformation; 3 Poutres de référence

Dès que la profondeur d'un lac dépasse la centaine de mètres, la poussée de l'eau a pour effet, entre autres, d'écarter les deux flancs de la vallée, ce qui n'est pas sans répercussions sur la tenue des

barrages, plus particulièrement des barrages-voûtes. Pour un barrage de plus de 200 mètres de hauteur, cet écartement peut être de plusieurs centimètres. La fig. 14 montre une détermination de ces déformations sur un modèle. Il est bien évident que des essais à petite échelle ne peuvent pas être transposés sans autre dans la réalité mais doivent être interprétés avec beaucoup de prudence.

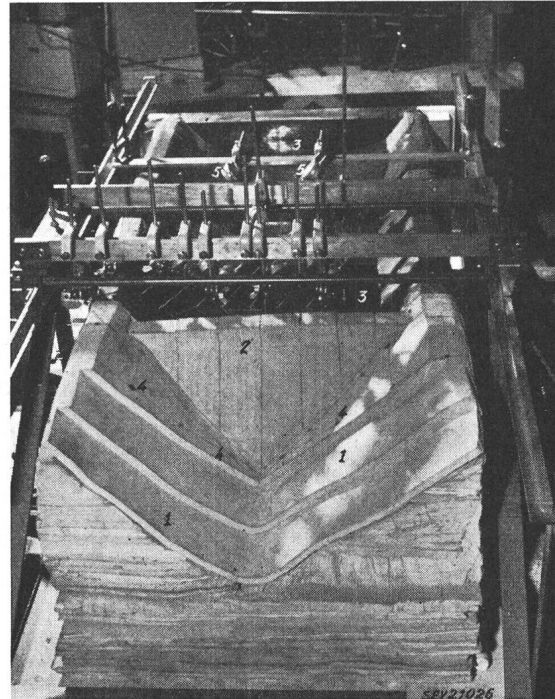


Fig. 14

Etude de la déformation d'une vallée sous l'effet du poids de l'eau accumulée

1 Zone aval de la vallée; 2 Barrage (parement aval); 3 Lac; 4 Repères dont on mesure les déplacements; 5 Comparateurs

## 2. Auscultation de modèles de barrages-voûtes

L'étude analytique détaillée d'un ouvrage aussi hyperstatique qu'un barrage-voûte ne va pas sans présenter de grandes complications, de telle sorte qu'il est quasi impossible de tenir compte de tous les facteurs qui entrent en jeu, tels que la forme exacte du contour, le module de déformabilité de la roche qui peut varier d'un point à l'autre, etc., sans s'engager dans des calculs inextricables. L'auscultation d'un modèle permet de préciser la forme la plus convenable de l'ouvrage et conduit généralement à une économie de matière ou du moins à une meilleure répartition de celle-ci. Si le calcul a été très fouillé, l'auscultation peut tout au moins apporter une confirmation souhaitable de ses résultats.

Le modèle, exécuté en une matière relativement déformable, doit être soumis à des poussées distribuées selon la loi hydrostatique, mais beaucoup plus importantes, pour que les déformations et les contraintes puissent être mesurées avec une précision suffisante. Ces pressions sont exercées au moyen de vérins prenant appui sur un bâti métallique. Les poussées étant, à l'échelle, beaucoup plus importantes qu'en réalité, il est nécessaire d'augmenter le poids de la maquette dans la même mesure, ce qui



peut se faire par exemple au moyen de ressorts qui exercent sur le modèle une précontrainte verticale. La fig. 15 montre le dispositif utilisé à Lausanne.

L'auscultation du modèle se fait essentiellement sur le parement aval, dont on détermine par exem-

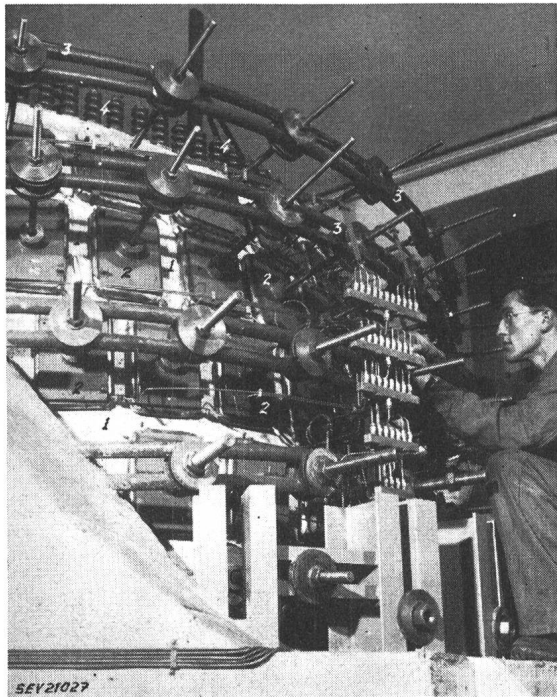


Fig. 15

Dispositif de charge pour l'étude statique d'un modèle de barrage-voûte

1 Parement amont du barrage; 2 Vérins exerçant la pression; 3 Cercles d'appui des vérins; 4 Ressorts assurant la précontrainte verticale

ple les déformations radiales et tangentielles au moyen de nombreux fleximètres (fig. 16). On mesure également les allongements et contractions au moyen d'extensomètres de type classique ou électriques.

L'analyse de la surface déformée permet ensuite de déterminer les contraintes sur toute la surface

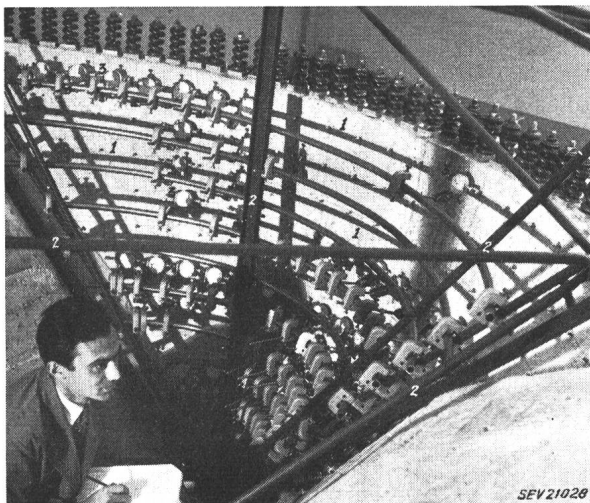


Fig. 16

Dispositif de mesure des déformations d'un modèle de barrage-voûte

1 Parement aval du barrage; 2 Bâti de référence; 3 Comparateurs

des parements, en particulier au voisinage de l'encastrement.

### 3. Distribution des contraintes au voisinage d'une discontinuité du contour

Pour étudier les contraintes dans une région particulière, il est quelquefois préférable d'ausculter le modèle d'une partie seulement de l'ouvrage, qui peut alors être réalisée à une plus grande échelle. L'expérimentation est relativement facile s'il s'agit de problèmes plans, tels que la résistance des arcs d'un barrage-voûte ou des sections verticales d'un barrage-poids.

On peut faire l'expérience sans difficulté sur un modèle plan exécuté en une matière très déformable, en mesurant les déformations au moyen de microscopes ou d'extensomètres électriques. Les points de mesure sont alors nécessairement assez espacés, de sorte que dans la zone étudiée, l'image des déformations obtenues par ce moyen reste grossière.

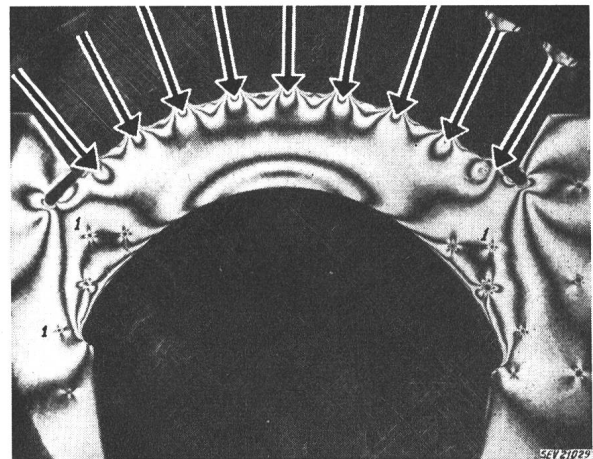


Fig. 17

Arc de barrage-voûte étudié par photoélasticité

La poussée hydrostatique est remplacée par des forces concentrées. Celles-ci provoquent des inégalités de répartition des contraintes, localisées le long du bord amont, mais sans influence sur la distribution des contraintes dans le reste de l'arc

1 Petits trous servant à la détermination des directions des contraintes principales

C'est pourquoi l'on recourt souvent aux essais de photoélasticité qui permettent d'analyser localement, avec beaucoup plus de finesse, la distribution des contraintes. On sait que dans la section d'encastrement d'un ouvrage dans sa fondation, les contraintes ne varient pas d'une façon linéaire. Si la discontinuité du contour est très accentuée, les contraintes sur les deux arêtes sont notablement plus élevées que selon la règle de Navier. C'est notamment le cas pour le barrage-poids où le parement amont aboutit perpendiculairement sur le rocher de fondation et le parement aval sous un angle de  $120^\circ$  à  $130^\circ$ . Il en est de même pour le barrage-voûte lorsque le parement forme avec le rocher un angle insuffisamment obtus ou n'est pas raccordé à celui-ci par un congé suffisant. S'il s'agit d'un barrage de grandes dimensions, les forces en jeu sont si considérables qu'il importe d'être exactement renseigné sur ces contraintes le long de l'encastrement. Un essai de photoélasticité permet dans bien des cas d'élucider ce problème. Les fig. 17 et 18 mon-

trent un arc de barrage-voûte soumis à un tel examen. Dans cet exemple l'intrados est raccordé au rocher par un large congé, aussi la «pointe» de con-

que des recherches expérimentales peuvent apporter à l'ingénieur établissant un projet de barrage-réservoir, cela dans des domaines très variés. Notre

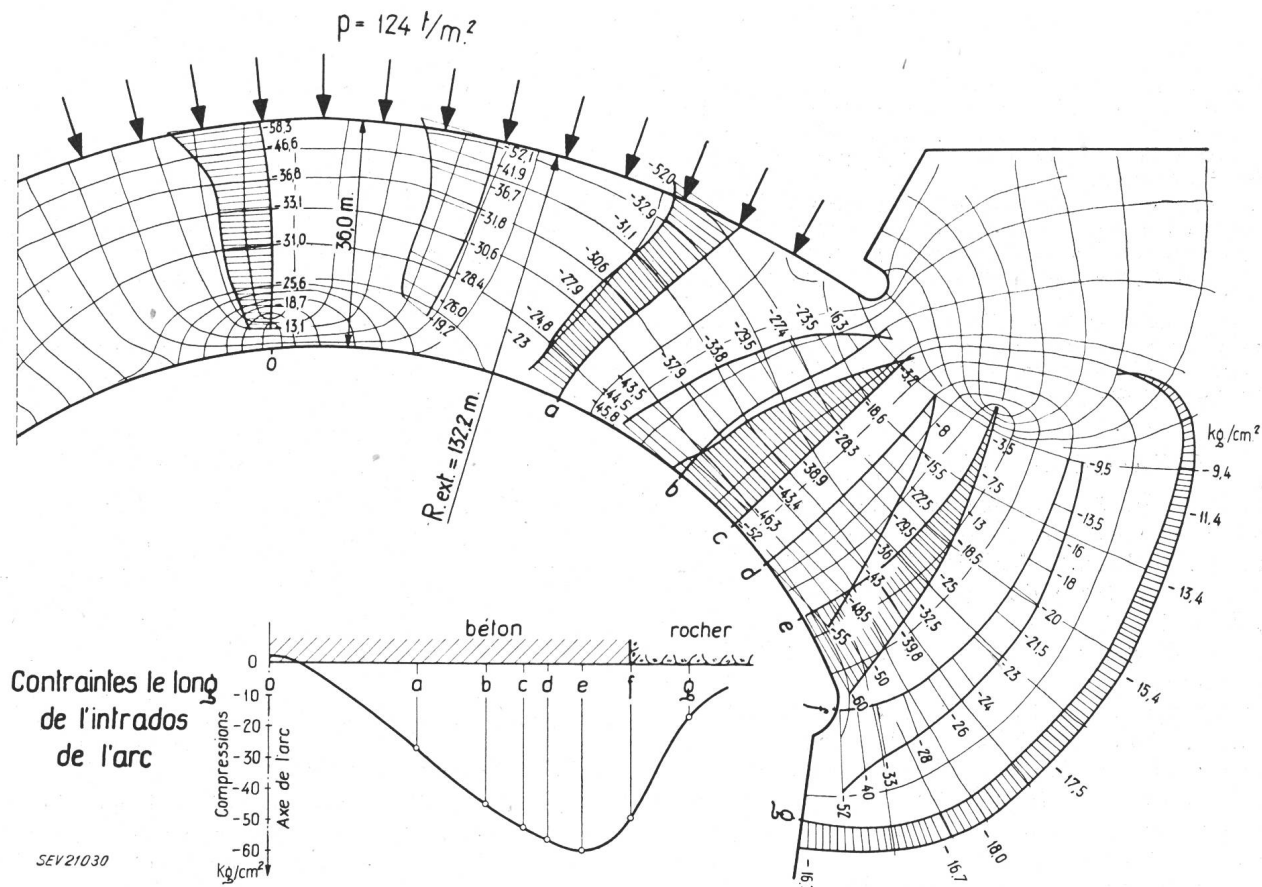


Fig. 18

Arc de barrage-voûte étudié par photoélasticité

Lignes isostatiques et distribution des contraintes dans l'arc et dans le rocher d'appui, déduites de l'expérience

trainte est-elle peu accentuée, ainsi qu'on le voit sur la fig. 18. Si le raccord était plus brutal, on verrait apparaître au contraire une pointe de contrainte beaucoup plus accentuée.

but était également d'illustrer l'activité du *Centre de recherches pour l'étude des barrages* de l'École polytechnique de Lausanne, exemple de la collaboration, aujourd'hui indispensable, entre divers instituts, en vue de résoudre les problèmes que pose la construction des grands barrages.

La présentation de ces quelques études doit permettre de se rendre compte de l'aide importante

Adresse de l'auteur:

A. Stucky, professeur de Travaux hydrauliques à l'École polytechnique de l'Université de Lausanne.