

Contribution à l'étude des barrages-voûtes: effet de l'élasticité des appuis

Autor(en): **Stucky, A. / Panchaud, F. / Schnitzler, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **76 (1950)**

Heft 26

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-57454>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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 francsPour les abonnements
s'adresser à la librairie**F. ROUGE & Cie**
à LausannePrix du numéro :
1 fr. 25

Organe 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. P. JOYE, professeur ; E. LATELTIN, architecte — *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. D'OKOLSKI, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; CL. GROSGURIN, architecte ; E. MARTIN, architecte ; V. ROCHAT, ingénieur. — *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

TARIF DES ANNONCESLe millimètre
(larg. 47 mm) 20 ctsRéclames : 60 cts le mm
(largeur 95 mm)Rabais pour annonces
répétées**ANNONCES SUISSES S.A.**5, Rue Centrale
Tél. 22 33 26LAUSANNE
et Succursales**CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE**

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

SOMMAIRE : Contribution à l'étude des barrages-voûtes (suite et fin), par A. STUCKY, professeur à l'Ecole Polytechnique de Lausanne, F. PANCHAUD, professeur et E. SCHNITZLER, chargé de cours. — **DIVERS :** L'organisation de la recherche scientifique dans l'industrie. — **LES CONGRÈS :** Mécanique des terres et fondations. — **INFORMATIONS DIVERSES :** Le gyrobus Oerlikon.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES BARRAGES-VOÛTES

Effet de l'élasticité des appuis

par A. STUCKY, professeur à l'Ecole polytechnique de Lausanne,
F. PANCHAUD, professeur, et E. SCHNITZLER, chargé de cours

(Suite et fin.)¹

IV. Influence de la déformation du rocher sur la déformation des sections verticales des barrages-voûtes.

Ce problème, aux aspects multiples, ne sera traité ici que d'une manière sommaire ; il sort d'ailleurs du cadre de cette étude, consacrée essentiellement à l'effet des déformations des appuis rocheux sur les arcs seuls.

On sait qu'il est d'usage, pour le calcul d'un barrage-voûte, de répartir la poussée totale de l'eau sur les deux systèmes porteurs principaux (les arcs horizontaux et les murs verticaux), de manière que leurs points de croisement subissent le même déplacement². Or, les mouvements des appuis rocheux influencent non seulement les efforts intérieurs des arcs, mais aussi leurs déformations. Par ailleurs, la rotation et la translation du rocher à la base du barrage influencent la déformation des murs dans une mesure au moins aussi grande que celle des arcs. Il est donc nécessaire d'en tenir compte.

Pour cela, il suffit d'introduire, dans le calcul classique, la translation horizontale et la rotation de la section de base du mur calculées par les formules de Vogt (pages 110 et 111).

A titre d'exemple, on donne ici le résultat du calcul de la déformation, sous l'effet de la poussée de l'eau, de la section

médiane d'un barrage-voûte de 220 mètres de hauteur et de 56 mètres d'épaisseur à la base, pour les valeurs du rapport

$$n = \frac{E_r}{E_b} \text{ de } n = \infty, n = 1 \text{ et } n = 0,5 \text{ (fig. 25).}$$

Cet exemple illustre l'influence des déformations du rocher de base sur la répartition de la poussée de l'eau entre murs et arcs, ainsi que sur le moment de flexion et l'effort tranchant régnant dans la section d'encastrement. On remarque que l'effet des déformations du rocher se traduit dans notre cas par un soulagement de l'encastrement dont le moment diminue de 248.360 mt à 198.710 mt, puis à 182.130 mt lorsque n passe successivement de $n = \infty$ à $n = 1$ et $n = 0,5$.

La différence sensible entre les valeurs des efforts et des déformations, lorsque $n = \frac{E_r}{E_b}$ décroît de $n = \infty$ à $n = 1$, s'atténue si n varie de $n = 1$ à $n = 0,5$.

Il semble donc qu'une approximation dans l'évaluation du coefficient $n = \frac{E_r}{E_b}$ entre certaines limites, que la nature même des matériaux permet de fixer, ait une importance plus effacée que l'hypothèse d'un rocher indéformable ou non. Comme dit plus haut, l'objet de ce mémoire n'étant pas d'étudier en détail l'influence de la déformation du rocher sur la répartition des efforts entre murs et arcs, nous nous bornerons ici à une conclusion générale :

Il faut tenir compte de la déformation du rocher si l'on veut

¹ Voir *Bulletin technique* des 8 avril, 6 mai et 17 juin 1950.² A. STUCKY : *Etude des barrages arqués* (loc. cit., page 84).

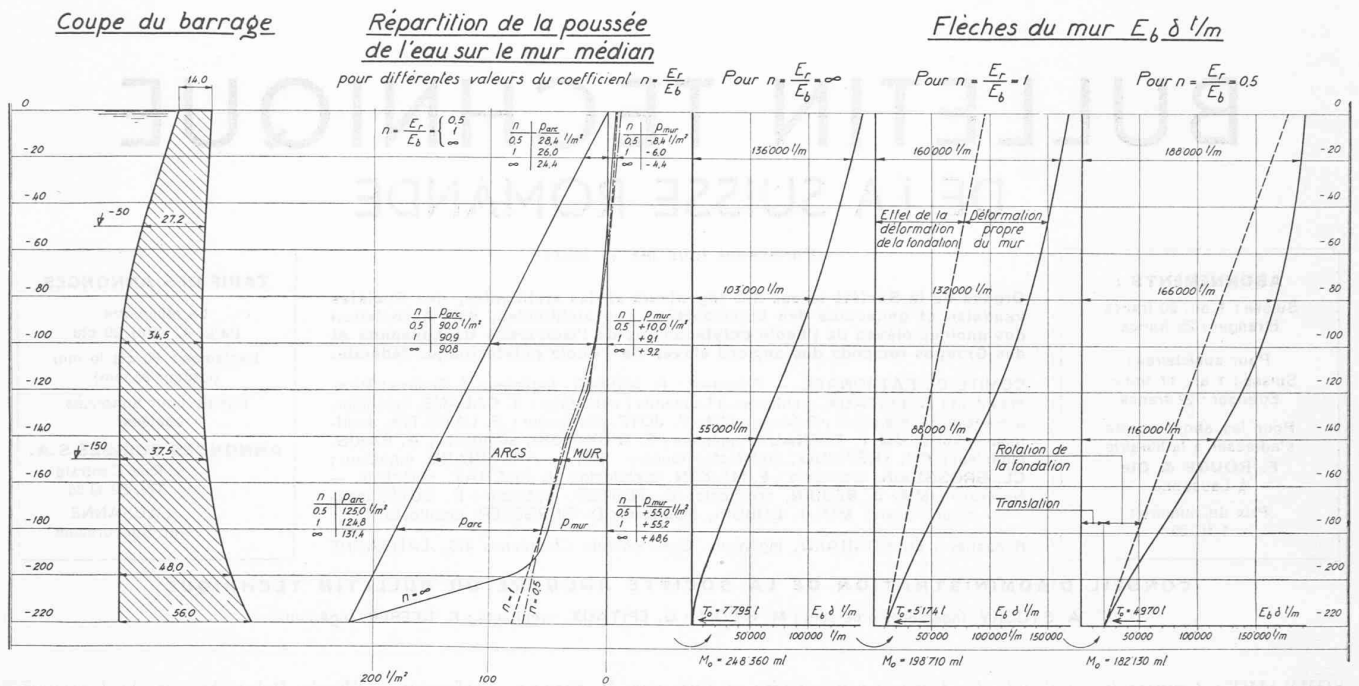


Fig. 25. — Répartition de la poussée de l'eau sur le mur médian d'un barrage-voûte et flèches de ce mur, calculées pour les trois valeurs du rapport $n = \frac{E_r}{E_b}$: $n = \infty$ $n = 1$ $n = 0,5$.

que le comportement du barrage-voûte estimé par le calcul soit plus voisin de la réalité, même si le rapport $n = \frac{E_r}{E_b}$ est mal déterminé.

V. Conclusions.

La déformation élastique des appuis rocheux joue un rôle appréciable dans le comportement statique d'un barrage-voûte, soit que l'on suppose l'ouvrage composé d'arcs superposés indépendants les uns des autres, soit que l'on tienne compte de leur solidarité.

ARCS ÉLASTIQUES MINCES SUPPOSÉS INDÉPENDANTS

Que les appuis soient déformables ou non, on peut étudier assez simplement le comportement statique d'un arc à l'aide de la notion classique de *centre élastique*. Dans le cas des *appuis indéformables*, la position du centre élastique ne dépend que des *caractéristiques géométriques de l'arc*. Dans le cas des *appuis déformables*, la position du centre élastique dépend des *caractéristiques géométriques et mécaniques du système arc-fondation*, à savoir : caractéristiques géométriques de l'arc, module d'élasticité du béton E_b et module apparent de déformation de la masse rocheuse E_r , coefficients sans dimension k_r et k_μ caractérisant la rotation de la fondation rocheuse sous l'effet d'un effort tranchant et d'un moment de flexion.

Pour des arcs ayant même angle au centre 2α et même rayon moyen r , le centre élastique du système arc-fondation se déplace vers la corde au fur et à mesure que n diminue.

L'état de contraintes se détermine en superposant les efforts régnant dans l'arc considéré comme élément d'anneau tubulaire aux efforts provenant de la force hyperstatique ΔX parallèle à la corde et passant par le centre élastique de l'arc (lors d'un état de température variant linéairement d'un parement à l'autre, intervient en outre l'effet d'un moment hyperstatique ΔM_τ).

1. Dans le cas de la poussée uniforme de l'eau :

$$\Delta X = K \cdot R$$

K est un coefficient sans dimension, fonction des caractéristiques géométriques de l'arc, du rapport des modules $n = \frac{E_r}{E_b}$, ainsi que des coefficients $k_n, k_t, k_m, k_r, k_\mu$ caractérisant les déformations de la fondation rocheuse ; $R = pr_e < 0$ est l'effort de compression régnant dans l'« arc-élément de tube ».

2. Lors d'une variation uniforme de température Δt dans l'arc entier :

$$\Delta X_t = K_t \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot E_b \cdot e$$

K_t est un coefficient de même nature que K , mais différent de lui.

3. Si l'arc est soumis à un état de température variant linéairement d'une valeur $+\Delta\tau$ sur l'un des parements à la valeur $-\Delta\tau$ sur l'autre :

$$\Delta X_\tau = K_\tau \cdot \beta \cdot \Delta\tau \cdot E_b \cdot e$$

K_τ est un coefficient de même nature que K et K_t , mais différent de ces derniers. Le moment hyperstatique agissant en outre sur l'arc dans ce cas a pour valeur :

$$\Delta M_\tau = - \frac{1}{1 + \frac{12}{k_\mu} \frac{\alpha \lambda n}{6}} \cdot \frac{1}{6} \cdot \beta \cdot \Delta\tau \cdot E_b \cdot e^2.$$

En pratique, le calcul de l'arc sur appuis déformables s'effectue à partir de celui de l'arc rigidement encastré ; on détermine d'abord, dans ce second cas, l'ordonnée du centre élastique et l'intensité de la force hyperstatique, puis on calcule les corrections à apporter à ces deux grandeurs pour tenir compte de la déformabilité des appuis rocheux. En

procédant ainsi, soit en évaluant d'abord dans le cas le plus simple (mais idéal) l'ordre de grandeur des éléments du problème, en apportant ensuite les corrections nécessaires pour se placer dans des conditions plus proches de la réalité, on évite des causes d'erreurs.

Comme les arcs ne sont plus encastrés rigidement dans les flancs de la vallée, la longueur de leur corde augmente du fait du tassement du rocher dans la direction des poussées. Il en résulte généralement aux naissances une diminution des efforts d'encastrement d'autant plus marquée que l'arc est plus épais par rapport à son rayon moyen et que son angle au centre est moindre. Au contraire, à la clé, les contraintes sont augmentées, mais dans une moindre mesure que le soulagement des naissances.

La *déformation de la fibre moyenne* de l'arc, qu'il faut connaître lorsqu'on étudie la répartition des efforts entre murs et arcs, se compose de trois termes :

- a) une déformation homothétique de l'arc considéré comme élément d'anneau tubulaire ;
- b) une déformation due aux efforts hyperstatiques qui modifie la forme d'arc de cercle de la fibre moyenne ;
- c) une translation générale perpendiculaire à la corde de l'arc, provoquée par un mouvement des appuis dans cette direction.

ARCS SOLIDAIRES. EFFET DES MURS

La déformation du rocher à la base du barrage provoque une diminution notable des efforts de flexion dans la section d'encastrement de base.

La répartition de la poussée de l'eau entre le double système solidaire des arcs horizontaux et des murs verticaux dépend dans une grande mesure de la *déformabilité relative* de ces éléments. Par suite de la déformation du rocher d'appui non seulement les arcs sont plus déformables, mais ils subissent encore une translation dans une direction perpendiculaire à leur corde, consécutive au mouvement parallèle des appuis. En même temps, les encastresments des murs subissent des rotations accompagnées de translations provoquant leur balancement général vers l'aval. Ces deux effets de la déformation du rocher se compensent partiellement, de sorte que la répartition de la poussée n'est modifiée que dans la région de l'encastrement et se traduit par un soulagement, comme le montre l'exemple de la figure 25.

Toutefois, cet exemple n'est qu'un cas particulier et l'effet relatif de la déformabilité des arcs et des murs pourra être différent dans d'autres cas ; cet effet dépendra dans une large mesure de la forme du barrage et de celle de la vallée.

L'analyse générale du comportement statique de l'ensemble du barrage-voûte sur appuis élastiques, lorsqu'on tient compte de l'interdépendance des arcs et des murs, fera l'objet d'une étude ultérieure.

D'après ce qui précède, on peut néanmoins tirer la conclusion suivante :

La déformation du rocher provoque d'une manière générale un soulagement des contraintes extrêmes de l'ouvrage dans toutes les régions où la rigidité absolue de l'encastrement a disparu par suite de cette déformation.

MODULE APPARENT DE DÉFORMATION DE LA MASSE ROCHEUSE E_r

Le module E_r , nous l'avons vu, se rapporte non pas à un échantillon de rocher, mais à l'ensemble des couches sur lesquelles s'appuie l'ouvrage. Pour calculer un barrage dans un cas particulier donné, il est nécessaire de pouvoir évaluer

le degré de déformabilité de cette masse rocheuse d'appui, non seulement en surface, mais aussi en profondeur, et sur toute la largeur d'emprise du barrage. Quoique cette masse ne soit ni parfaitement élastique ni isotrope, il est pratique, pour conduire le calcul comme nous l'avons fait, de l'assimiler à un massif élastique homogène. Le *module apparent de déformation de la masse rocheuse* E_r (appelé brièvement jusqu'ici « module d'élasticité du rocher ») est précisément le coefficient caractéristique liant la déformation spécifique à la contrainte de cette masse.

Dans chaque cas particulier, le module E_r doit être déterminé par des essais sur place. Il faut mesurer non seulement les déformations dues à l'élasticité propre de la roche, mais surtout les déformations d'ensemble de la masse rocheuse intéressée par l'ouvrage. Il importe en effet que le module exprimant la déformabilité des appuis tienne compte de leur structure effective, des fissurations qui peuvent se rencontrer dans la masse et des déformations permanentes qui peuvent résulter des efforts provenant du barrage.

En présence de l'ampleur du problème et de sa complexité, il peut paraître difficile de procéder à une auscultation assez étendue pour connaître le module de déformation de toutes les parties rocheuses intéressées. L'analyse mathématique du problème montre qu'il importe avant tout de connaître les

limites entre lesquelles peut varier le rapport $n = \frac{E_r}{E_b}$ du module apparent de déformation du rocher E_r au module d'élasticité du béton E_b . Or, dans la pratique courante des barrages, ce rapport n ne peut varier qu'entre des limites relativement étroites comprises entre 1 (déformabilité du rocher égale à celle du béton) et 0,30 (déformabilité du rocher égale à trois fois environ celle du béton).

Si, dans un cas concret, ce rapport n devait tomber au-dessous de 0,30, les abaques des figures 19, 20 et 21 montrent que les contraintes à la clé des arcs seraient considérablement augmentées, ce qui pourrait mettre en question la possibilité de construire un barrage-voûte à cet endroit.

En conclusion, *il importe de tenir compte, dans le calcul statique du barrage, de la déformabilité du rocher ; mais il n'est pas indispensable de connaître avec une très grande exactitude le module apparent de déformation du rocher ; il faut avant tout savoir entre quelles limites ce module est susceptible de varier par rapport au module d'élasticité du béton.* Cette incertitude quant aux valeurs à introduire dans le calcul rend donc assez problématique une analyse par trop compliquée du barrage-voûte.

En résumé, le présent mémoire montre la nécessité de tenir compte de la déformation des appuis rocheux pour l'étude du comportement statique du barrage-voûte. Il expose en détail le calcul de l'ouvrage supposé constitué par des arcs élastiques minces (épaisseur inférieure à deux fois le rayon moyen), indépendants, et encastrés dans des fondations élastiquement déformables. Il donne en outre un bref aperçu de l'étude de l'ouvrage lorsqu'on tient compte de l'interdépendance des arcs et des murs. Il permet de conclure qu'en général la déformation du rocher diminue tous les moments d'encastrement et aggrave quelque peu les contraintes à la clé des arcs.