

Influence du module d'élasticité du rocher sur le comportement des barrages-voûtes ou barrages en coupole

Autor(en): **Stucky, J.-P.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **90 (1964)**

Heft 19: **Association amicale des anciens élèves de l'École polytechnique de l'Université de Lausanne, Congrès mondial, Lausanne, 18-22 septembre 1964**

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-67011>

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.

des quelques essais que nous avons faits en laboratoire, si d'une part les valeurs mesurées en fonctionnement au double du synchronisme correspondaient assez bien à celles déduites des mesures faites à l'arrêt, d'autre part nous nous sommes heurtés à des phénomènes parasites lors de la «synchronisation» de la machine: calage à des vitesses angulaires ω et environ $\frac{4}{3}\omega$, au lieu de 2ω . Nous pensons que ces phénomènes sont dus à la présence et au couplage d'harmoniques.

Nous pensons donc que, si un jour la machine double-synchrone prend un intérêt industriel, il sera nécessaire

d'étudier à fond les divergences que peuvent introduire les harmoniques entre les essais sous les deux modes de fonctionnement envisagés. Si ces divergences s'avéraient obligatoirement négligeables, on aurait alors la possibilité de faire à l'arrêt tous les essais électriques d'une machine donnée. On conçoit aisément les avantages d'une telle possibilité.

BIBLIOGRAPHIE

EL MAGHRABI: *Allgemeine Theorie der Doppelt-gespeisten Synchronmaschine.*

INFLUENCE DU MODULE D'ÉLASTICITÉ DU ROCHER SUR LE COMPORTEMENT DES BARRAGES-VOÛTES OU BARRAGES EN COUPOLE

J. P. STUCKY, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

1. Préambule

Ce que l'on convient d'appeler *module d'élasticité du rocher de fondation*, mais qui est en réalité un module apparent de déformation de l'ensemble des masses rocheuses (ni parfaitement élastiques ni isotropes) sur lesquelles s'appuie le barrage, constitue l'un des nombreux facteurs qui conditionnent le comportement d'un barrage-voûte. Même aujourd'hui sa valeur est encore difficile à déterminer: l'observation des barrages en exploitation montre qu'elle peut atteindre le double des valeurs déterminées par les reconnaissances classiques *in situ* au moyen de vérins ou par la mise en pression de galeries d'essai. En revanche, deux processus d'études intéressants se sont développés au cours de ces dernières années, qui permettent de résoudre, non pas un cas particulier, mais toute une gamme de cas, basés sur des hypothèses aussi variées qu'on le désire. Il s'agit tout d'abord de l'emploi de *calculatrices électroniques*, qui assurent la rentabilité de calculs très compliqués sans augmenter le délai imparti à l'ingénieur pour l'ensemble des études, puis des *essais sur modèles réduits*. Les résultats obtenus par cette double recherche justifient pleinement l'importance attachée de nos jours à l'influence du module d'élasticité des appuis rocheux sur les déformations et surtout sur les efforts et les contraintes régnant dans un barrage-voûte. A vrai dire, il ne s'agit pas tant de l'élasticité de la roche elle-même que de son *rapport* avec l'élasticité de l'ouvrage, elle-même assez difficile à prévoir à l'avance à une si grande échelle.

2. Particularités du calcul des barrages-voûtes, du point de vue de la déformation des appuis rocheux

Parmi les cas de charge usuels auxquels un barrage est soumis, poussée hydrostatique, poids propre, variations de température, effet d'une déformation de la vallée sous la poussée du lac, tremblement de terre, nous examinerons les deux premiers, qui sont prépondérants. Un procédé de calcul classique consiste à ad-

mettre que l'ouvrage est découpé en un certain nombre de tranches horizontales, les arcs, et de tranches verticales, les murs. Si ces tranches verticales sont, de plus, bombées vers l'amont, comme c'est le cas de la plupart des barrages-voûtes, l'ouvrage travaille comme une véritable coupole. Cependant, la courbure dans le plan vertical ne peut souvent pas être choisie arbitrairement. Elle dépend des conditions d'appui, l'essentiel étant en effet de rechercher les *meilleurs appuis possibles*, mais non pas les courbures les plus spectaculaires. C'est ce qui explique la différence de courbure des murs des deux barrages de Limmern et de Curnera examinés dans cette étude (voir fig. 3). La *poussée hydrostatique* est répartie entre ces deux systèmes porteurs, de manière à obtenir une concordance aussi parfaite que possible des déformations aux points de croisement des arcs et des murs. Cet ajustement se fait pour les déformations radiales, les plus grandes, mais aussi pour les déformations tangentielles et angulaires, de moindre importance. Une fois posées les équations de déformation, qui font intervenir le rapport des modules d'élasticité du rocher et du béton, $n = E_r : E_b$, il n'est pas beaucoup plus

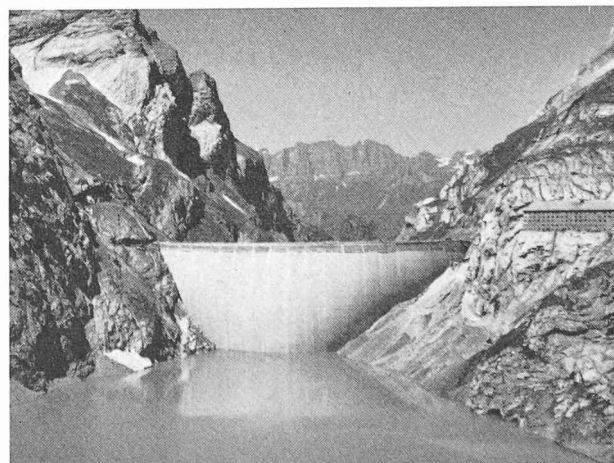
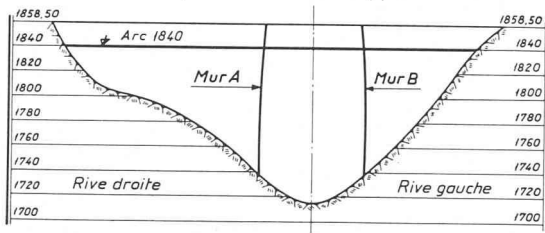


Fig. 1. — Barrage de Limmern. (Photo Schönwetter, Glaris)

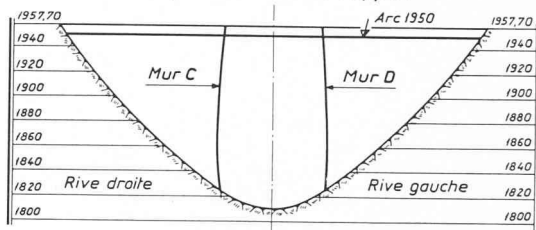
Barrage de Limmern

Coupe verticale développée

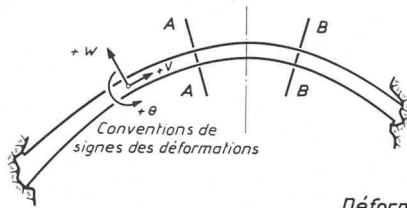


Barrage de Curnera

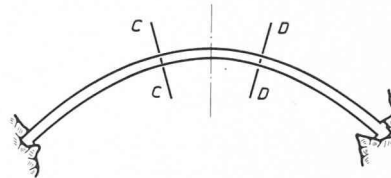
Coupe verticale développée



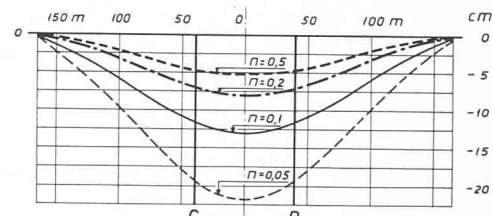
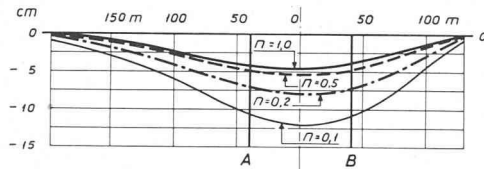
Arc au niveau 1840



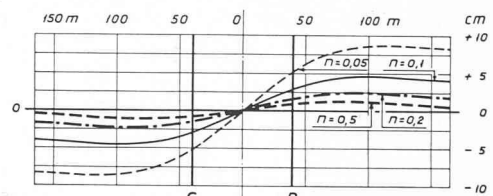
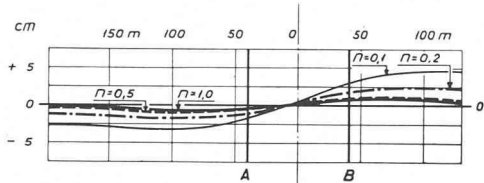
Arc au niveau 1950



Déformations radiales W



Déformations tangentielles V



Déformations angulaires theta

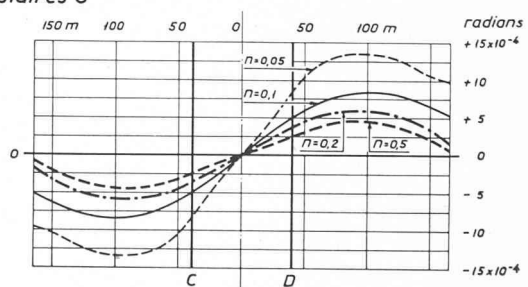
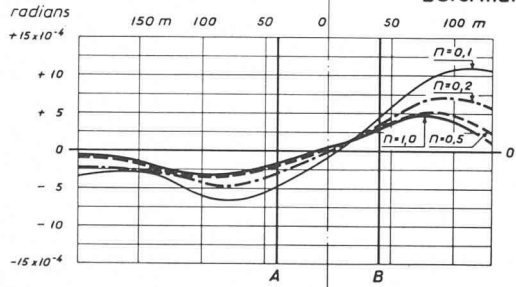


Fig. 2. — Influence du module d'élasticité de la fondation sur les déformations d'un barrage-voûte. Déformations d'un arc voisin du couronnement.

Barrage de Limmern : barrage dissymétrique, $n = 1$ à $0,1$.

Barrage de Curnera : barrage symétrique, $n = 0,5$ à $0,05$.

$$n = \frac{\text{Module d'élasticité du rocher}}{\text{Module d'élasticité du béton}}$$

Module d'élasticité du béton admis égal à 200 t/cm^2 .

compliqué de donner à ce rapport n diverses valeurs qui embrassent justement les valeurs extrêmes auxquelles on devra s'attendre en réalité. Le barrage étant construit par voussoirs jointifs, clavés après coup, on doit admettre que le poids propre est supporté uniquement par les éléments verticaux. Par une forme convenablement choisie du profil des murs, on peut créer dans le barrage un état de contrainte initial (analogue à une précontrainte du béton) qui, se superposant à l'état provoqué ensuite par la poussée de l'eau, permet sou-

vent d'atténuer les plus fortes contraintes dues à ce dernier effet et surtout de supprimer les contraintes de traction ou en tous les cas de les réduire à un strict minimum.

La présente étude décrit quelques résultats obtenus par le calcul de deux barrages-voûtes, celui de Limmern (fig. 1), dans le canton de Glaris, achevé en 1963, et celui de Curnera, actuellement en construction dans le canton des Grisons, dont les caractéristiques sont les suivantes :

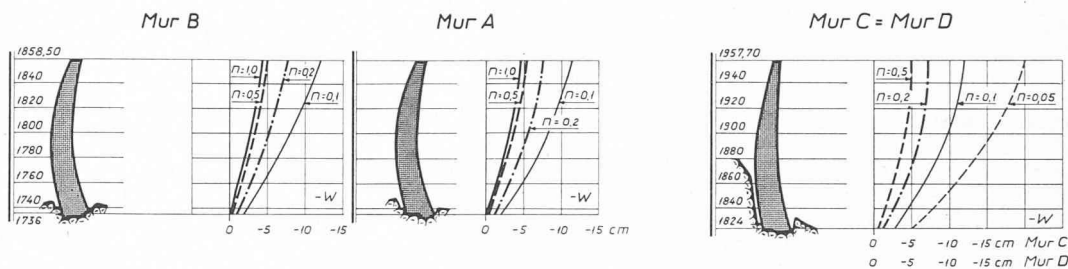
Barrage de Limmern

Voûte dissymétrique

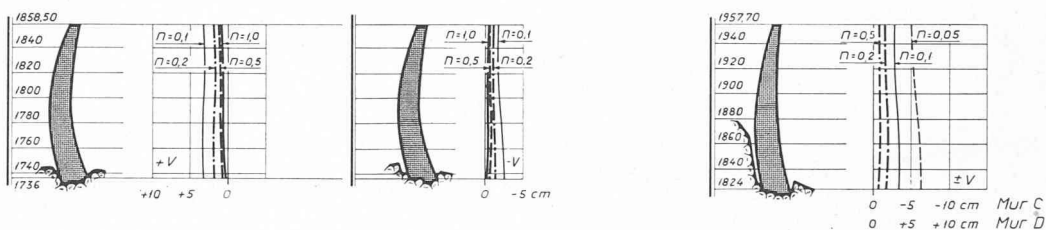
Barrage de Curnera

Voûte symétrique

Déformations radiales W



Déformations tangentielles V



Déformations angulaires θ

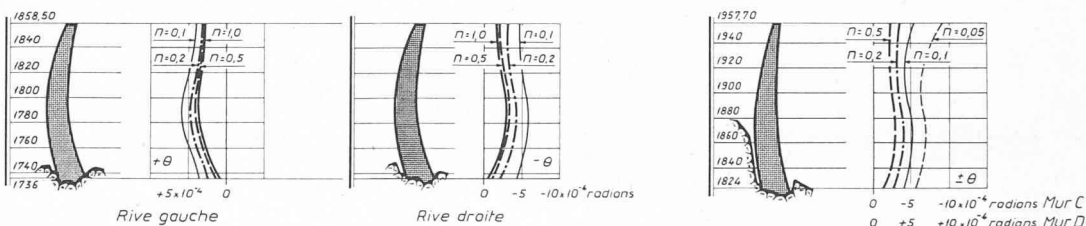


Fig. 3. — Influence du module d'élasticité de la fondation sur les déformations d'un barrage-voûte. Déformations de deux murs disposés symétriquement par rapport au mur central.

Barrage de Limmern : barrage dissymétrique, $n = 1$ à $0,1$.

Barrage de Curnera : barrage symétrique, $n = 0,5$ à $0,05$.

$n = \frac{\text{Module d'élasticité du rocher}}{\text{Module d'élasticité du béton}}$

Module d'élasticité du béton admis égal à 200 t/cm^2 .

	Limmern ¹	Curnera ²
Hauteur maximum	145 m	150 m
Longueur du couronnement	375 m	340 m
Épaisseur minimum au couronnement	9 m	7 m
Épaisseur à la base	25 m	24 m
Volume du béton	550 000 m ³	650 000 m ³

¹ Maître de l'œuvre : Kraftwerke Linth-Limmern AG.

² Maître de l'œuvre : Kraftwerke Vorderrhein AG.

L'intérêt de la comparaison réside en outre dans le fait que le premier est dissymétrique et le second symétrique. Ces deux barrages ont été calculés en ajustant les déformations aux intersections de trois arcs et de six murs (Limmern), respectivement de quatre arcs et de sept murs (Curnera). On a admis pour le rapport des modules des valeurs décroissant de 1 jusqu'à $0,1$ pour le premier, et même jusqu'à $0,05$ pour le second. Une valeur de I (module du rocher égal à celui du béton) ne se rencontre pratiquement pas dans la réalité ; elle est trop élevée. De même, des valeurs de $0,1$, voire $0,05$ (module du rocher supposé égal au dixième seule-

ment ou au vingtième de celui du béton) sont beaucoup trop basses. Les valeurs les plus courantes se situent autour de $0,5$. Il a cependant paru intéressant de pousser le calcul au-delà des limites présumées résultant des reconnaissances géologiques, pour pouvoir juger du comportement de ces barrages à l'égard d'un rocher dont le module serait très différent de celui auquel on doit raisonnablement s'attendre. Cette méthode permet justement de s'affranchir de l'exactitude du module qui, nous l'avons vu, est illusoire en réalité.

La figure 2 représente les diagrammes des déformations radiales, tangentielles et angulaires d'un arc voisin du couronnement pour chacun des deux barrages, sous l'effet de la poussée hydrostatique et pour des valeurs décroissantes du rapport n . La figure 3 représente les diagrammes de ces mêmes déformations pour deux murs disposés symétriquement par rapport au mur central.

On remarque que lorsque la valeur du rapport n diminue, les déformations augmentent relativement peu jusqu'à $n = 0,2$, mais dans une mesure de plus en plus grande pour $n = 0,1$ et $n = 0,05$: par rapport à leur

Barrage de Limmern

Parement aval

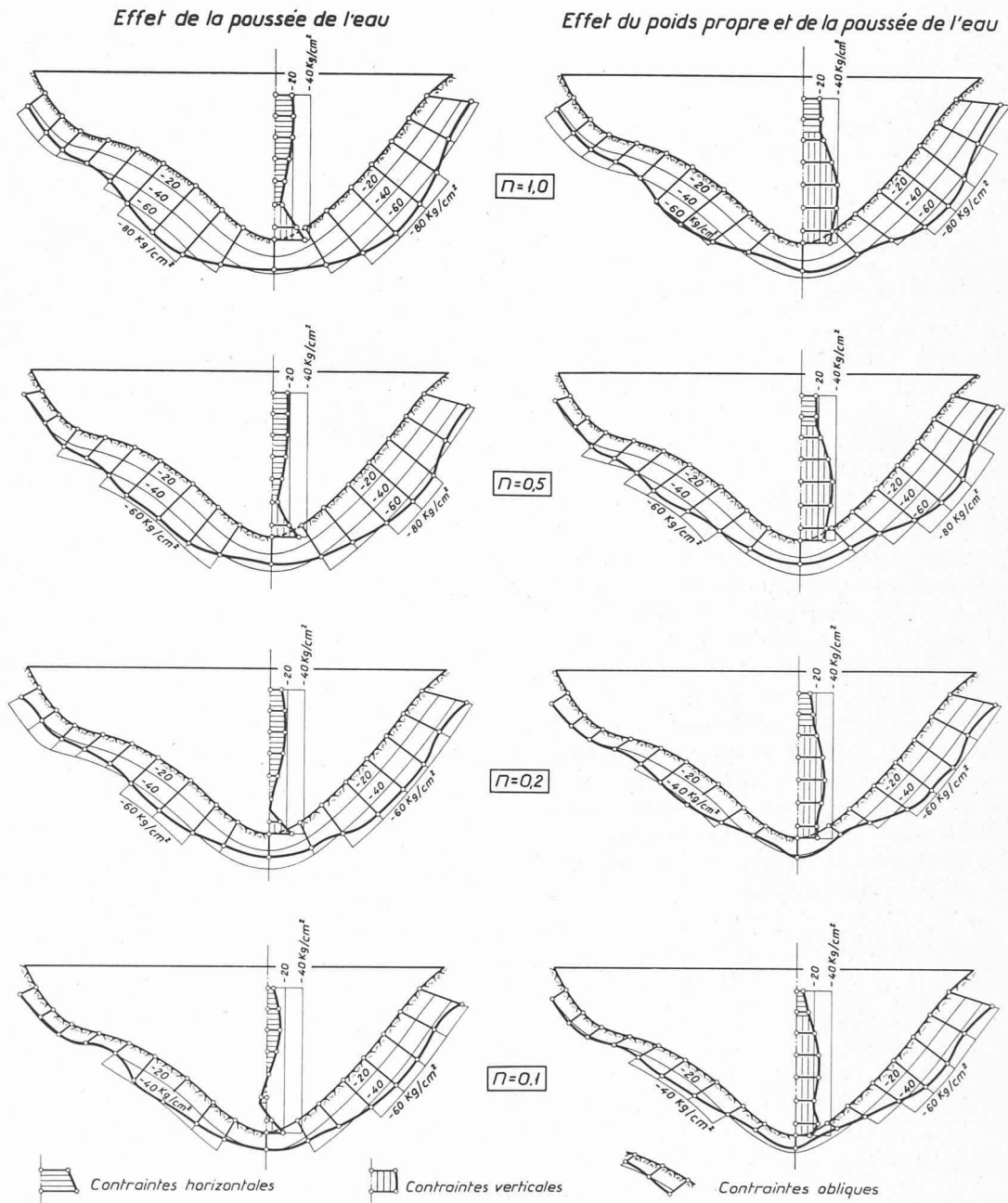


Fig. 4. — Influence du module d'élasticité de la fondation sur les contraintes dans un barrage-voûte. Parement aval du barrage de Limmern, $n = 1$ à $0,1$. Contraintes principales le long de la fondation et le long de la section de clé. (Le signe — correspond à la compression.)

Effet de la poussée de l'eau seule.
Effet de la poussée de l'eau et du poids propre.
 $n = \frac{\text{Module d'élasticité du rocher}}{\text{Module d'élasticité du béton}}$

grandeur pour $n = 1$ ou $0,5$, elles peuvent quintupler dans la région centrale du barrage ou même décupler dans la région des appuis.

Dans le cas du barrage de Limmern, l'influence de la dissymétrie du profil de la vallée est peu accusée pour les déformations radiales, davantage pour les déformations tangentiellles et angulaires. Or, ce sont précisément les déformations radiales qui jouent le plus grand rôle au point de vue du comportement de l'ouvrage. Ainsi se trouve vérifié le fait que par une variation progressive et convenablement choisie des formes de

l'ouvrage, il est possible de corriger dans une certaine mesure l'effet de la dissymétrie d'un profil de vallée.

La figure 4 représente, pour le barrage de Limmern, les diagrammes des contraintes principales maxima sur le parement aval, le long de la fondation et le long de la section de clé, correspondant (à gauche) à l'effet de la poussée de l'eau seule et (à droite) aux effets cumulés de la poussée de l'eau et du poids propre. On constate que sur ce parement la décroissance du rapport n de 1 à $0,1$ a pour conséquence une diminution des compressions maxima, et cela aussi bien le long de la fonda-

Barrage de Limmern

Arc au niveau 1840

Déformations radiales W

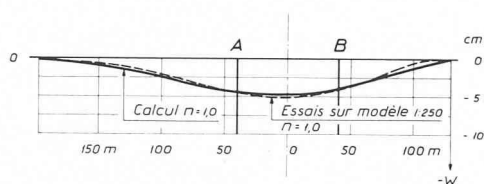


Fig. 5. — Comparaison entre le calcul et l'essai sur modèle. Barrage de Limmern, dissymétrique. Déformations radiales de l'arc au niveau 1840.

$$n = \frac{\text{Module d'élasticité du rocher}}{\text{Module d'élasticité du béton}} = 1$$

Module d'élasticité du béton admis égal à 200 t/cm².

tion qu'au droit de la section de clé. La raison en est essentiellement due au fait que la diminution supposée du module d'élasticité du rocher entraîne une diminution des moments d'encastrement de la voûte. En réalité, à ce soulagement du parement aval, lorsque le rapport n diminue, correspond une augmentation des compressions sur le *parement amont*, en particulier dans la région de clé. Mais, en définitive, tout se passe *comme si les contraintes étaient distribuées de manière différente dans le barrage, mais sans que la valeur maximum maximum des compressions varie beaucoup*, aussi longtemps que n ne descend pas au-dessous de 0,1. En revanche, la diminution du rapport n au-delà de 0,1, par exemple jusqu'à 0,05 (Curnera), entraînerait une sensible augmentation de la compression maximum maximum, comme le montre le tableau suivant :

Rapport n	Barrage de Limmern		Barrage de Curnera	
	Parement ¹	Compr. max. max. ²	Parement ¹	Compr. max. max. ²
1	aval	69,8	—	—
0,5	aval	67,0	aval	56,7
0,2	amont	58,6	amont	62,6
0,1	amont	66,2	amont	71,8
0,05	—	—	amont	83,6

¹ Parement sur lequel se rencontre la compression maximum maximum.

² Contraintes en kg/cm².

Ces résultats permettent de conclure, une fois de plus, au comportement remarquable des barrages-voûtes ou barrages en coupole, du fait que leur forme en voûte à double courbure confère à ces barrages une résistance quasi analogue à celle d'un système autoportant.

3. Essais sur modèles réduits

Les essais sur modèles réduits constituent aujourd'hui un élément d'appréciation indispensable à l'étude des barrages-voûtes. Ils permettent en effet d'analyser leur comportement d'une manière globale, ce qui est particulièrement précieux pour une structure hautement hyperstatique, et d'établir une comparaison judicieuse avec les résultats des calculs. On peut utiliser des modèles en béton de pierre ponce avec forces exer-

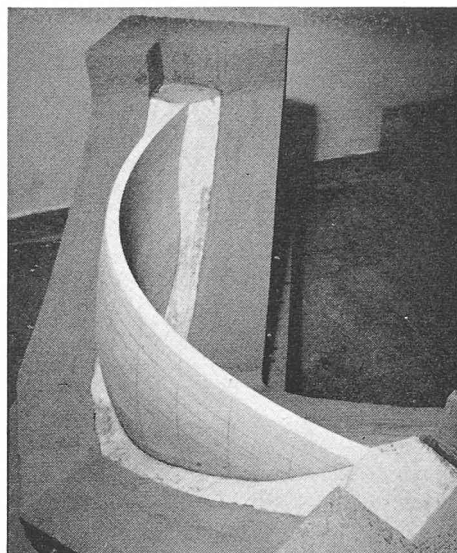


Fig. 6. — Barrage de Limmern. Modèle en plâtre taillé. Echelle 1 : 250. (Photo de Jongh, Lausanne)

cées par des vérins isolés, des modèles en caoutchouc avec poussée d'eau, des modèles en plâtre ou en résine synthétique avec poussée de mercure. A chacun de ces types de modèles correspond une technique d'essai particulière. Ceux en plâtre ou en résine sont les plus pratiques, parce qu'ils peuvent être réalisés à une échelle relativement petite, tout en garantissant encore une bonne précision des mesures. On peut en modifier successivement les formes ou les exécuter en plusieurs exemplaires sans trop de frais. De plus, la poussée du mercure réalise rigoureusement l'analogie avec la poussée hydrostatique, ce qui n'est pas tout à fait le cas des vérins isolés. En revanche, ils exigent des précautions particulières pendant les mesures, telles que la climatisation des locaux ou la prise en compte du fait que leur déformation lors de la mise en charge n'est pas instantanée. En changeant les caractéristiques de la matière formant l'encastrement, sans modifier celles du barrage, il est possible de faire varier le rapport n des modules d'élasticité. L'auscultation du modèle, par fleximètres sur le parement aval, et par extensomètres électriques sur les deux parements, permet de déterminer les déformations normales et tangentielles, de même que les contraintes dans différentes directions, dont on peut déduire ensuite les contraintes principales.

Les deux barrages qui font l'objet de la présente étude ont été auscultés sur modèles en plâtre taillé, celui de Curnera, en outre, sur modèle en résine, à l'échelle 1 : 250. Ils ont montré que pour un profil de vallée très dissymétrique on peut, au moyen d'un épaissement judicieux de la voûte, réaliser des déformations sensiblement symétriques par rapport à la section verticale principale.

La figure 5, qui établit la *comparaison entre le calcul et l'essai sur modèle* des résultats trouvés pour les déformations radiales de l'arc au niveau 1840 du barrage de Limmern, sous l'effet de la poussée de l'eau, confirme cette réalisation de la symétrie *en même temps qu'elle montre la bonne concordance des résultats découlant des deux procédés*.