

**Zeitschrift:** Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie  
**Band:** 53 (1961)  
**Heft:** 6-7

**Artikel:** Conceptions et techniques de quelques barrages-voûtes suisses  
**Autor:** Gieot, Henri  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-920762>

### **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:** 15.10.2024

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

## Conceptions et techniques de quelques barrages-voûtes suisses

**Barrages de Rossens, Vieux-Emosson, Zervreila, Zeuzier, des Toules, de Schiffenen et Gebidem**

par *Henri Gicot*, ingénieur-conseil, Fribourg/Suisse

CDU 627.825

### Introduction

Il n'y a pas de recette toute faite en matière de barrages. Malgré l'interpénétration des idées et des techniques, qui fait qu'on retrouve partout certaines formules et certains procédés, les solutions adoptées sont inspirées dans leur principe ou dans leurs détails par les conditions climatiques, géologiques, géotechniques, topographiques, économiques et aussi humaines propres à chaque région et à chaque ouvrage. Elles portent aussi, dans un même pays, la marque particulière de la doctrine et du tempérament des auteurs des projets.

Tout barrage bien adapté à l'ensemble des conditions en présence possède une physionomie propre. Parfois, ce sont précisément les impératifs les plus sévères qui suscitent les solutions les plus intéressantes.

Les sept barrages-voûtes ou voûtes-poids qui sont présentés ici ne prétendent pas à ces records de masse ou de dimensions, si chers à certains esprits. Cependant, certains d'entre eux sont d'envergure respectable, et nous pensons que tous offrent des particularités dignes d'intérêt.

La plupart de ces barrages ont rencontré des conditions géologiques favorables. Les roches d'appui sont constituées soit par les gneiss (Zervreila, Vieux-Emosson, Gebidem) soit par les calcaires (Zeuzier), soit par les schistes de Casanna (Les Toules). Il faut toutefois mettre à part le barrage de Rossens, fondé sur un grès très tendre, la «mollasse», dont le module d'élasticité est de 10 à 15 fois plus petit que celui du béton, et celui de Schiffenen, actuellement en construction et qui reposera sur la même formation.

Tous ces ouvrages cherchent à exploiter le mieux possible les avantages de la voûte, non seulement là où la topographie appelait cette solution (Zeuzier, Gebidem), ou du moins s'y prêtait sans difficulté majeure (Zervreila, Rossens), mais même là où les proportions de la vallée paraissaient, au premier abord, peu favorables à ce type de barrage (Vieux-Emosson, les Toules, Schiffenen). La recherche de l'économie de volume n'a d'ailleurs pas été l'unique motif de ce choix, qui s'est inspiré aussi de considérations de sécurité, en particulier à Schiffenen.

L'examen des profils en travers de ces barrages, dans l'ordre chronologique de leur conception, souligne la tendance à réaliser des ouvrages de moins en moins épais et à profiter des avantages de la double courbure. Tandis que le profil médian de Rossens a son parement aval vertical au-dessus de l'élargissement du pied, celui de Zeuzier présente déjà un surplomb appréciable vers l'aval, de même que celui de Zervreila, tandis que le barrage de Gebidem et celui des Toules sont des barrages-coupoles fortement renversés. Même le profil du barrage-poids de Schiffenen, quoique assez massif, cherche par sa courbure à améliorer les contraintes verticales aval. Le profil triangulaire réduit de Vieux-Emosson, voûte-poids également, a été exécuté dans la région inférieure avec un surplomb amont pour améliorer l'état de contrainte du pied amont. Cette solution s'est retrouvée plus tard dans le profil-type du barrage-poids de la Grande-Dixence.

Certains de ces barrages sont implantés dans des vallées fortement dissymétriques. On n'a toutefois cherché nulle part à réaliser une symétrie artificielle au moyen de suppléments d'excavations ou à l'aide de culées, mais on s'est efforcé d'adapter au mieux la variation des formes et des épaisseurs à la topographie des lieux en vue d'obtenir des conditions de contraintes régulières, malgré la dissymétrie de la vallée. Un exemple typique d'une telle adaptation est le barrage-voûte de Zeuzier sur la Lienne. Un autre exemple de ce genre est le barrage voûte-poids de Vieux-Emosson.

A part les barrages voûtes-poids de Vieux-Emosson et de Schiffenen, les parements amont des ouvrages décrits ici ne sont pas des surfaces de révolution, mais leurs rayons de courbure décroissent du couronnement à la base, de manière à obtenir à chaque niveau la courbure la plus favorable, compte tenu des exigences de stabilité posées par la constitution des appuis rocheux et leur orientation par rapport aux poussées. Dans tous ces ouvrages, on a préféré mettre l'accent sur une bonne implantation, même au prix de quelques augmentations des rayons et des contraintes du béton.

A Vieux-Emosson, le parement amont est un cylindre à directrice parabolique. A Schiffenen, le barrage est un corps de révolution.

Le barrage de Vieux-Emosson n'est toutefois pas le seul qui s'écarte de la forme circulaire classique. Dans les derniers ouvrages en date, la recherche de l'économie de volume a mis en relief la nécessité, pour les barrages minces, d'une étude beaucoup plus poussée des formes, étude qui a conduit à remplacer les arcs circulaires habituels par des arcs elliptiques. Ces derniers offrent en effet tout un éventail de possibilités, dont sont privés les arcs circulaires. En jouant ainsi sur les formes par un véritable travail de modelage, il est possible, au prix d'un effort de patience aidé par l'intuition, d'améliorer la répartition et les valeurs des contraintes et par conséquent, à contraintes égales, de réduire les épaisseurs. Le barrage des Toules, actuellement en construction, et celui de Gebidem, en projet, sont tous deux des barrages voûtes-coupoles à arcs elliptiques.

Les calculs statiques de ces barrages ont tous été effectués par la méthode dite des «arcs-murs», et d'autant plus fouillés que les ouvrages eux-mêmes étaient plus poussés. En outre, la plupart des projets ont fait l'objet d'essais sur modèles réduits. Les calculs tiennent toujours compte de la déformabilité du sol de fondation, qui a été introduite pour la première fois en Suisse dans les calculs du barrage de Rossens (1943).

### Fondations et injections

Les plans de situation qui illustrent cet article témoignent du souci de bien asseoir les barrages dans le terrain. Les plans des fouilles ont été conçus en cherchant à éviter toute excavation superflue dans la roche saine, hormis celle qui est nécessaire pour obtenir des surfaces d'appui convenablement orientées, et pour intéresser un massif rocheux suffisant à la stabilité des appuis.



Fig. 1 ROSSENS

Vue du barrage-voûte en construction  
Die Bogenstaumauer während dem Bau  
The arch dam during its construction

(Photo: Mülhauser, Fribourg)

A part l'écran d'étanchéité habituel, on a voué une attention particulière à la consolidation du rocher au voisinage de la fondation. Les injections de consolidation sont en général poussées à une profondeur de 5 à 10 m et exécutées à une pression modérée, de préférence après bétonnage d'une certaine hauteur du barrage. Toutefois, dans certains cas, la consolidation n'a pas été limitée à la zone située immédiatement sous la fondation. Au barrage des Toules, elle s'étend à l'aval de l'ouvrage à toute la région directement intéressée par les poussées. Cette mesure est dictée ici par la présence de fractures assez nombreuses au voisinage de la surface. En outre, on a prévu aux Toules, à Schiffenen et à Gebidem, dans le barrage et dans les flancs rocheux, des galeries de contrôle à partir desquelles seront forés, en arrière du voile au large, des rideaux drainants destinés à couper les sous-pressions.

### Réfrigération du béton

Pour tous ces barrages, même ceux de faible épaisseur, et à l'exception de celui de Vieux-Emosson dont le faible volume n'imposait pas la réfrigération, on s'est préoccupé de limiter l'élévation de température du béton due à la chaleur d'hydratation du ciment et d'obtenir l'équilibre thermique de l'ouvrage avant le clavage des joints par injections, non seulement pour éviter des fissures provenant de gradients thermiques excessifs, mais encore et surtout pour claver l'ouvrage dans les meilleures conditions possibles.

Pour la réfrigération, on a utilisé partout la circulation d'eau froide dans des serpentins métalliques disposés sur la surface de chaque levée. Ce système avait été proposé déjà en 1944 pour le barrage de Rossens, d'après l'exemple américain, mais à cette époque, le Maître d'œuvre ne l'avait pas accepté. Ce barrage a donc été construit avec le système de refroidissement naturel par joints ouverts, complétés par des puits verticaux ménagés au centre des blocs et soumis à une ventilation forcée.

En raison des conditions climatiques, la réfrigération par circulation d'eau dans les barrages situés en haute altitude est soumise à des conditions assez limi-

tées. En effet, dans une région où la température moyenne de l'air est assez élevée, on peut atteindre beaucoup plus facilement l'équilibre thermique en utilisant de l'eau dont la température est abaissée au moyen de machines frigorifiques au-dessous de la moyenne du lieu. On peut même, dans certains cas, atteindre une température du béton inférieure à celle de son équilibre thermique et réaliser ainsi une précontrainte de l'ouvrage.

Par contre, sur des chantiers de grands barrages où la température moyenne de l'air se situe entre 4°C et 2°C, ou même au-dessous, l'usage de machines à froid serait peu efficace. Il faut donc tirer le meilleur parti possible de l'eau naturelle, dont la température est de l'ordre de 5 à 6°C en été, et de 1 à 2°C en hiver. La réfrigération doit être en action d'une façon, sinon continue, du moins presque continue. La réfrigération d'été permet de couper les pointes thermiques et d'obtenir un premier abaissement de température. Le complément de refroidissement s'effectue ensuite en hiver. Il est important de pouvoir opérer le clavage de joints avant que l'effet du réchauffement extérieur se fasse sentir dans la masse du béton.

Au barrage de Schiffenen situé à une altitude de 500 m environ et où la température moyenne de l'air est de 9°C, on a prévu, pour la première fois en Suisse, l'utilisation d'une machine à froid destinée à la réfrigération accélérée d'un tronçon du barrage de 51 m de longueur qui ne sera bétonné qu'en fin de travaux, pour laisser jusqu'alors le passage aux eaux de la rivière.

Nous ne parlons pas ici de la préparation des aggrégats et des bétons ni des techniques de leur mise en place, qui font l'objet d'un autre article de la présente publication.

### Détails de construction. — Joints

Pour le bétonnage, les barrages sont naturellement divisés en blocs séparés par des joints transversaux distants de 10 à 18 m ou même près de 20 m (les Toules, seconde étape). La hauteur des levées de béton a été portée pour la première fois à 3 m au barrage de Rossens. Cette hauteur s'est révélée économique et a été ensuite généralement adoptée en Suisse.

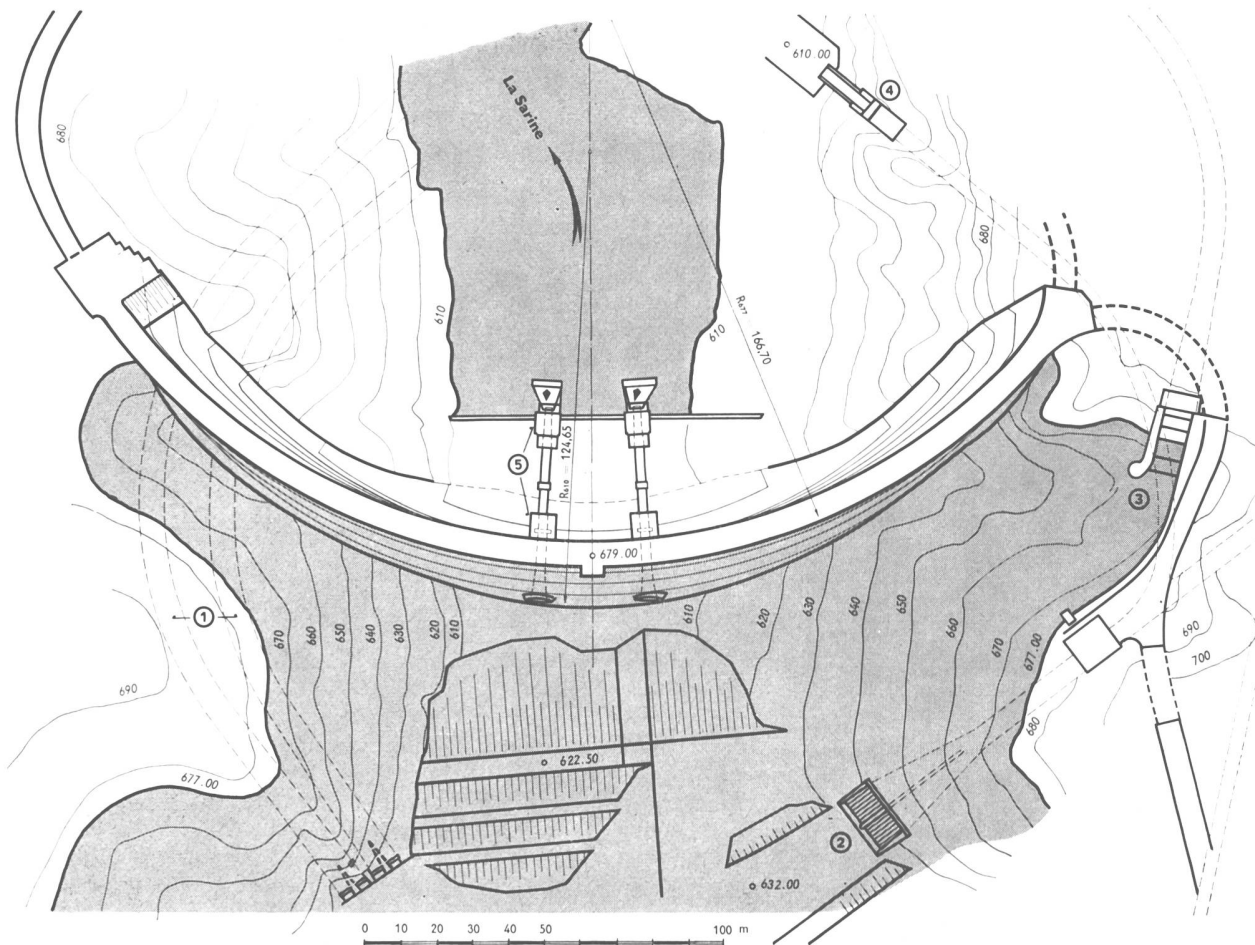


Fig. 2 ROSSENS

Situation	Grundriß	Plan
① Galeries de dérivation	Umleitungsstollen	Diversion tunnels
② Prise d'eau	Wasserfassung	Intake
③ Evacuateur de surface	Hochwasserentlastung	Spillway
④ Vidange additionnelle	Zusätzliche Entleerung	Additional discharge
⑤ Vannes des vidanges de fond	Grundablaßschützen	Gates of the unwatering conduits

La plupart des barrages-voûtes décrits ici marquent, en ce qui concerne le traitement des joints, la préoccupation d'assurer la bonne transmission des efforts de cisaillement, compte tenu de la direction dans l'espace — et non seulement dans les plans horizontaux — des trajectoires des contraintes principales. Un exemple caractéristique de cette préoccupation est la disposition en redans des joints du barrage de Rossens, où la résistance tangentielle était particulièrement importante, en raison de la grande déformabilité de la roche.

Pour les autres ouvrages, et à l'exception du barrage de Zervreila, on a cherché à améliorer la résistance des joints au cisaillement — et aussi à la traction — en découpant leur surface de façon à la rendre rugueuse. Ce système a été préféré à un gaufrage des surfaces, gaufrage qui n'est en général conçu que pour la transmission des efforts dans le sens horizontal, et qui est de toute façon inopérant pour la résistance à la traction.

Pour les barrages de Zeuzier et de Vieux-Emosson, les surfaces des joints ont été bouchardées. Toutefois, on sait que si le bouchardage est trop accentué ou pratiqué brutalement, il peut causer au béton des micro-

lésions indésirables. Aussi, pour les ouvrages plus récents a-t-on adopté soit le décapage au jet de sable, soit l'emploi d'un retardateur de prise appliqué contre les coffrages des joints, avec lavage ultérieur des surfaces au jet d'eau sous pression.

La rugosité des surfaces des joints n'est pas un obstacle à la pénétration des injections pratiquées avec soin et patience. Des carottes extraites dans le plan des joints du barrage de la Lienne ont montré la parfaite pénétration du coulis d'injection dans les joints bouchardés.

A l'époque de la construction de Rossens, les clapets spéciaux pour l'injection et la réinjection des joints n'étaient pas encore connus. On y a utilisé des boîtes métalliques branchées sur des rampes d'injection verticales. Pour les autres ouvrages décrits ici, le choix s'est porté sur des clapets, de préférence à des manchons. A Vieux-Emosson et à Zervreila, les rampes d'injection étaient horizontales, tandis qu'aux barrages de Zeuzier, des Toules, de Schiffenen et de Gebidem, les rampes étaient ou seront disposées verticalement.

A part les joints verticaux, communs à tous les barrages, on a prévu, dans les ouvrages minces des

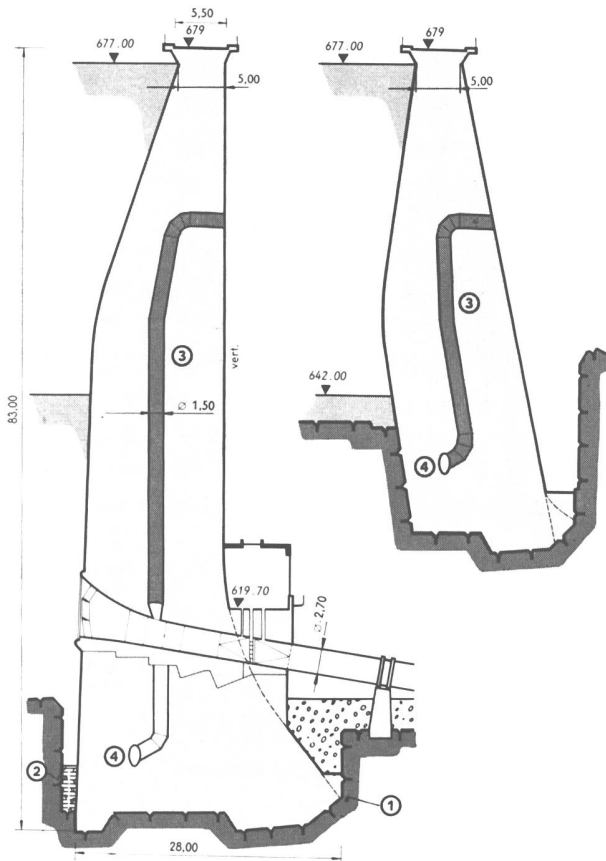


Fig. 3 ROSENS

Coupes en travers — Querschnitte — Cross-sections

- ① Grès tendre (molasse) — Weicher Sandstein (Molasse) — Soft sandstone (molasse)
- ② Remplissage argileux — Ausfüllung mit lehmigem Material — Filling with clay material
- ③ Puits de refroidissement — Kühlschächte — Cooling shafts
- ④ Galerie de base — Kontrollgang — Inspection gallery

Toules et de Gebidem, ainsi que dans le barrage voûte-poids de Schiffenen, un joint de base injectable, dont la conception s'inspire des considérations suivantes: le calcul d'un barrage-voûte mince décèle en général et surtout dans une vallée large, des contraintes de traction assez importantes ou du moins gênantes dans le pied amont. Il est difficile de dire jusqu'à quel point ces tractions se produisent réellement, mais dans certains cas, on doit admettre la possibilité de déchirures du béton ou de décollements entre béton et rocher. Il est préférable, dans de tels cas, de se prémunir contre cette éventualité. La solution adoptée s'apparente à la technique utilisée sur certains barrages italiens, mais tandis que dans cette technique, l'ouvrage est divisé en deux parties distinctes, la voûte proprement dite et le massif d'appui élargi, dit «pulvino», séparés par un joint (joint périmétral) qui n'est pas injecté, le joint de base prévu aux trois barrages précités est traité comme un joint normal de reprise de bétonnage. Mais il est protégé à l'amont, comme les joints verticaux, par une garniture d'étanchéité, et il est aussi équipé de rampes d'injections à clapets. Le problème consiste, sans favoriser l'ouverture du joint — qui doit pouvoir transmettre les efforts de cisaillement et si possible de traction — à faire en sorte que, s'il y a tendance à fissuration ou décollement,

l'ouverture se fasse là où les mesures adéquates ont été prévues. A cet effet, diverses précautions sont prises, en particulier sous forme de nappes d'armatures et d'ancrages dans le rocher.

Une autre technique spéciale va être innovée aux barrages des Toules et de Schiffenen pour accélérer le durcissement du coulis de ciment injecté dans les joints. On sait que l'eau, contenue en proportion assez forte dans ce coulis, n'est que difficilement résorbée, d'autant plus difficilement que le béton est plus étanche. Ce coulis ne durcit que lentement, alors que dans bien des cas le barrage doit être mis en charge peu de temps après les dernières injections. Afin de permettre à l'excédent d'eau du coulis de s'échapper rapidement, les joints seront munis de tubes drainants spéciaux, perméables à l'eau, mais capables de retenir le ciment. Des essais à petite échelle effectués en laboratoire ont donné des résultats étonnants, dont on peut espérer qu'ils s'extrapoleront en vraie grandeur. En tout état de cause, ces tubes drainants remplaceront avantageusement les gaines de contrôle, dont l'exécution est toujours difficile.

Telles sont les conceptions qui ont présidé à l'élaboration des barrages-voûtes que nous présentons ci-après et les techniques qui y ont été adoptées ou développées. Avant de passer à une brève description de ces sept barrages, il y aurait encore à parler des moyens et méthodes appliqués à l'observation des ouvrages, en particulier de l'extension de certains moyens à la surveillance du comportement des massifs d'appui. Mais ceci nous entrainerait au delà des limites qui nous sont assignées.

### Quelques barrages-voûtes suisses

#### Barrage de Rossens

Ce barrage est la première des grandes voûtes suisses réalisées depuis 1944. Conçu pendant la guerre, à un moment où la Suisse était pratiquement isolée et où il ne pouvait être question de faire à l'étranger une enquête sur les réalisations de grands barrages et sur les techniques employées, il doit probablement à cette circonstance de présenter certaines caractéristiques originales.

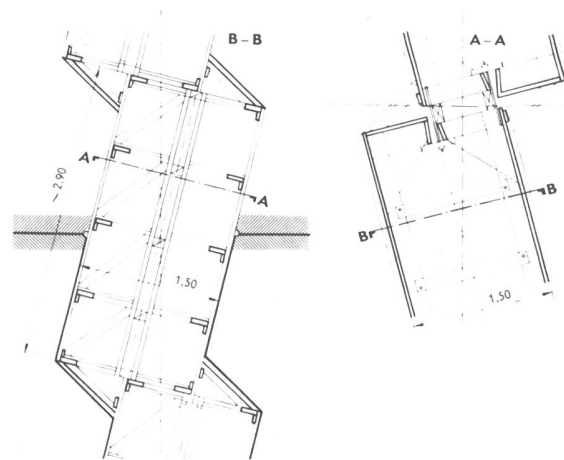


Fig. 4 ROSENS

Détails des joints et de leur coffrage  
Detail der Fugen und ihrer Schalung  
Detail of the joints and their formwork



Fig. 6 VIEUX-EMOSSON

Vue du barrage voûte-poids achevé  
 Ansicht der fertigen Bogengewichtsmauer  
 View of the completed arch-gravity dam

(Photo: Dorsaz, Martigny)

Construit de 1945 à 1948 sur la Sarine dans le Canton de Fribourg, le barrage est implanté dans la molasse marine miocène, formation essentiellement gréseuse où l'on rencontre des grès de grain moyen, parfois assez grossier et en bancs épais, alternant avec des lits plus minces de grès fins et de schistes gréso-marneux.

Tenant compte de la zone superficielle fissurée, les fouilles ont été poussées assez loin dans les flancs de la vallée, et l'angle dessiné par les poussées des arcs avec la direction générale des flancs rocheux a été choisi à une valeur très prudente (45°).

L'implantation d'un grand ouvrage dans la mollasse, c'est-à-dire dans une roche tendre et connue pour sa grande déformabilité, posait un problème nouveau et délicat et demandait une connaissance approfondie du comportement du sol. De nombreux essais furent exécutés durant les années 1943 et 1944, sur place et en laboratoire, pour déterminer les propriétés géotechniques des différentes catégories pétrographiques en présence. Ces essais ont conduit, finalement, à adopter pour

les calculs un rapport des modules de déformation béton/rocher de 10 dans le sens horizontal et de 15 dans le sens vertical.

Le barrage de Rossens est du type voûte, d'une hauteur totale de 83 m et d'une longueur de 320 m au couronnement. Le rayon de l'extrados décroît de haut en bas, de 166,70 m à 120 m. L'épaisseur, de 5 m au couronnement, augmente d'abord rapidement dans le tiers supérieur, pour atteindre 14 à 15 m dans la partie moyenne. Le bas du profil en travers s'épanouit en un pied de 28 m de largeur. Cette base exceptionnellement large par rapport à l'épaisseur moyenne a été commandée par des considérations statiques. Etant donné la très grande déformabilité du sol, particulièrement dans le sens vertical, il était nécessaire de réduire la rotation des consoles sur leur base, afin de limiter à une valeur admissible les fatigues d'extension verticales dans la région supérieure aval, fatigues engendrées par la résistance opposée par la région du couronnement à la déflexion des têtes des consoles vers l'aval.

Les contraintes d'extension en question auraient pu aussi être réduites en donnant au profil en travers du barrage une courbure vers l'aval, mais une proposition dans ce sens ne fut pas acceptée par le Maître d'œuvre, comme étant «trop audacieuse»; c'est pourquoi le parement aval est vertical.

Les arcs sont d'épaisseur constante, avec un élargissement local aux appuis, élargissement ayant pour but de limiter la pression spécifique sur la fondation ainsi que de réduire la rotation des naissances des arcs et, par voie de conséquence, les sollicitations à la clef.

Le niveau maximum est à la cote 677,0, créant une retenue totale de 200 millions de mètres cubes. Le niveau minimum d'exploitation est à la cote 642,0. La tranche de 35 m utilisable représente 180 millions de mètres cubes.

La nécessité de claver le barrage dans les meilleures conditions thermiques possibles, surtout en raison des grandes déformations tangentielles prévues, posait la question d'un refroidissement efficace du béton. A l'époque, le système américain de réfrigération par circulation d'eau était connu en principe, mais n'avait pas encore été appliqué en Europe. Il aurait permis d'exécuter le barrage avec des blocs jointifs de 15 m de largeur. Mais la proposition d'appliquer ce système à Rossens se heurta au refus du Maître d'œuvre. Le barrage fut exé-

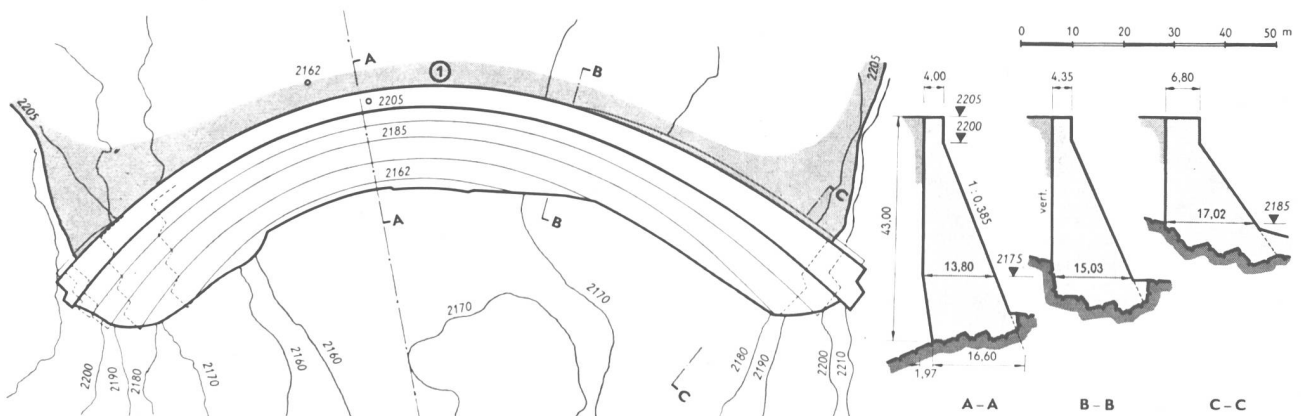


Fig. 5 VIEUX-EMOSSON

Situation et coupes en travers — Grundriß und Querschnitte — Plan and cross-sections  
 ① Arcs paraboliques — Parabolische Bögen — Parabolic arches

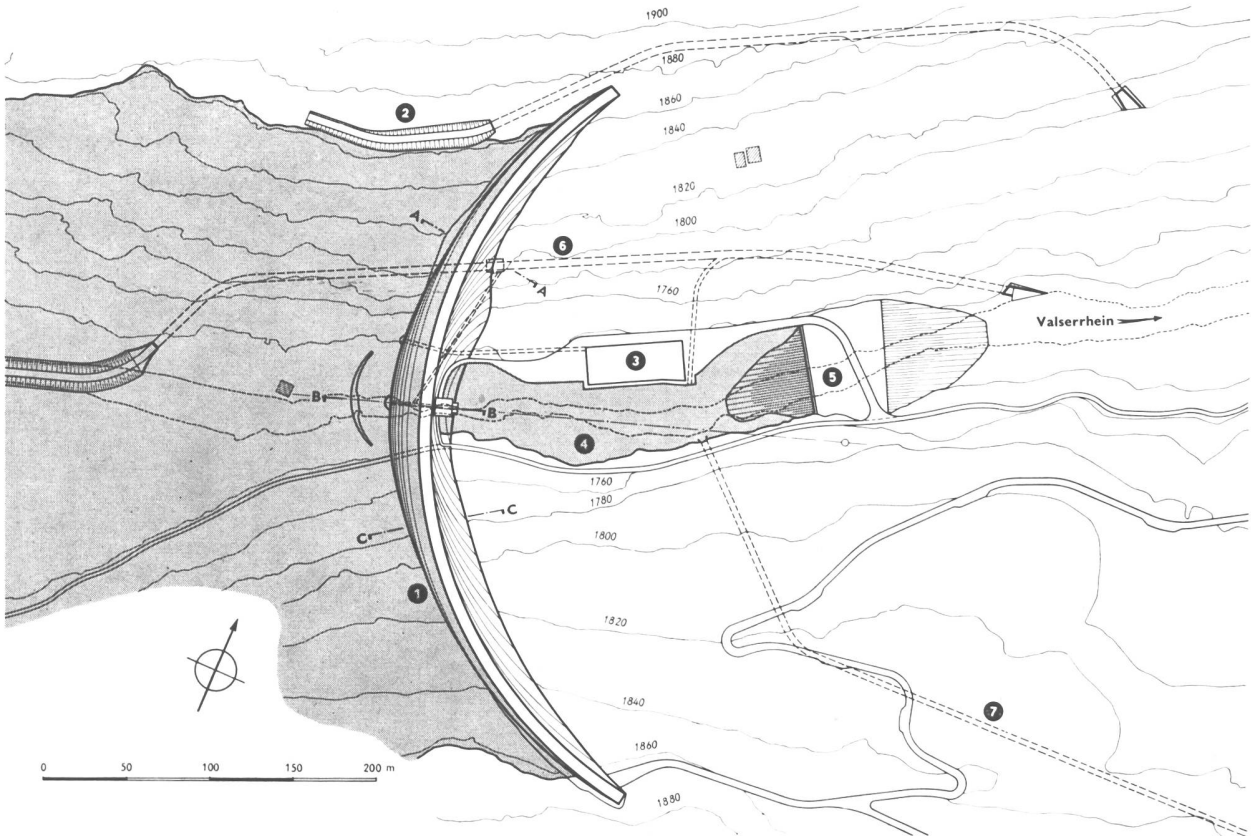


Fig. 7 ZERVREILA

Situation

- ① Arcs circulaires à angle au centre constant
- ② Evacuateur de surface
- ③ Centrale
- ④ Bassin de compensation
- ⑤ Digue en terre
- ⑥ Galerie de dérivation
- ⑦ Galerie d'aménée à écoulement libre

Grundriß

- Gleichwinkelmauer
- Hochwasserentlastung
- Maschinenhaus
- Ausgleichbecken
- Erddamm
- Umleitungsstollen
- Freilaufstollen

Plan

- Constant angle arch-dam
- Spillway
- Powerhouse
- Compensating reservoir
- Earth dam
- Diversion tunnel
- Headwater channel

cuté en blocs de 13,50 m, séparés par des brèches de 1,50 m. Comme les calculs montraient que ce refroidissement naturel ne suffirait pas, l'effet des brèches fut complété par des puits de 1,50 m de diamètre, ménagés au centre de chaque bloc et communiquant avec la galerie de base. Ces puits furent ensuite partiellement bétonnés au Prepakt, dont ce fut la première application en Suisse.

A Rossens fut poussé très loin le souci d'assurer une transmission correcte des efforts entre deux blocs adjacents. Les faces des joints furent pourvues de redans orientés d'après les directions des contraintes principales<sup>1</sup>. Le coffrage était très simple et s'exécutait au moyen de caissons orientables ayant la largeur de la brèche.

Après bétonnage des brèches, les joints de contact ont été injectés au ciment et au silicate de soude, une première fois avant la mise en eau, et une seconde fois après la première année d'exploitation, afin de compenser les effets de la perte du reliquat de chaleur d'hydratation qui subsistait encore à la première mise en eau.

<sup>1</sup> Le principe des redans orientés suivant les trajectoires des contraintes a été appliqué plus tard aux joints longitudinaux du barrage-poids de la Grande-Dixence.

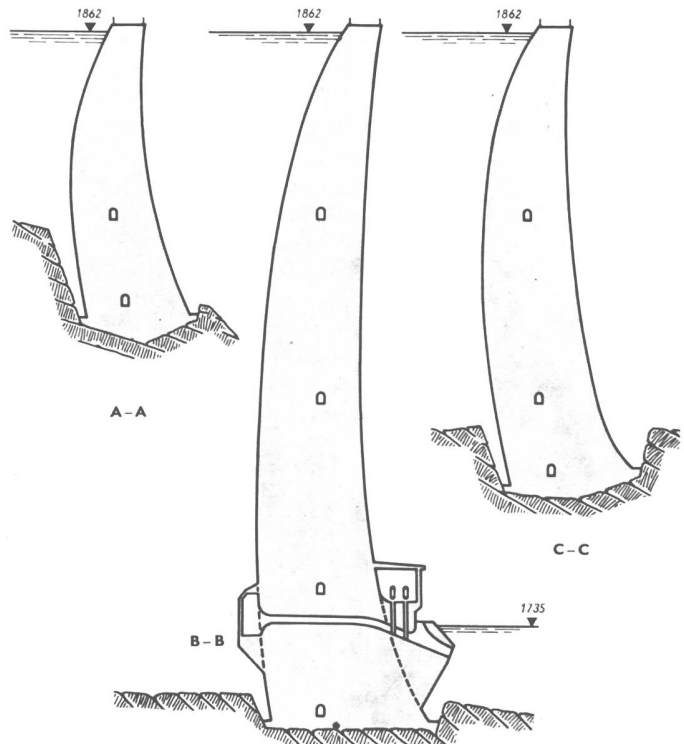


Fig. 8 ZERVREILA

Coupes en travers — Querschnitte — Cross-sections

**Barrage de Vieux-Emosson**

Ce barrage, construit en 1954—1955, est situé à 400 m environ au-dessus du barrage de Barberine, dans une vallée latérale proche de la frontière française. Comme le barrage de Barberine, dont il complète l'accumulation, il appartient aux Chemins de Fer Fédéraux Suisses. Il crée, avec un plan d'eau à la cote d'altitude 2205, une accumulation de 13,5 millions de m<sup>3</sup> d'eau.

L'ouvrage, d'une hauteur maximum de 51 m et long de 180 m, est implanté sur un verrou rocheux qui barre une vallée assez large et fortement dissymétrique. Il a néanmoins été possible d'y créer un ouvrage voûte-poids qui, bien qu'assez massif, a permis de réaliser une économie appréciable sur un barrage-poids. Son volume de béton est de 62 000 m<sup>3</sup>.

L'adoption d'une forme en plan parabolique au lieu de circulaire a procuré une meilleure adaptation à la topographie des lieux. Le profil dissymétrique de la vallée appelait au premier abord la création, sur la rive gauche, d'une culée importante. On lui a substitué la solution d'arcs progressivement élargis à partir d'un axe situé non pas au milieu de la vallée, mais excentriquement.

Le profil en travers est en trapèze avec un couronnement d'une épaisseur minimum, dans l'axe, de 4,00 m, jusqu'à la cote 2200 et un fruit du parement aval de 1:0,4. Le parement amont est vertical au-dessus de la cote 2177, et en surplomb au-dessous de cette cote. Tandis que le profil amont ne change pas, la largeur du couronnement et le fruit aval augmentent progressivement à partir de l'axe par suite de l'élargissement des arcs, le parement aval dessinant une surface réglée qui se termine en profil de barrage-poids.

La roche d'appui est un gneiss de bonne qualité, peu fissuré, qui n'a suscité aucun problème difficile, si ce n'est qu'à l'aile gauche l'assise du pied aval, située sur le dévers du verrou, a demandé une orientation bien étudiée des surfaces de fondation.

Notons encore que le couronnement est arasé à la cote même de la retenue, et qu'en cas de crues le déversement du trop plein s'effectue par-dessus l'aile droite du couronnement, où le parapet amont de béton est remplacé par des balustrades métalliques.

**Barrage de Zervreila**

Ce barrage, achevé en 1957, est situé au-dessus du petit village de Vals (canton des Grisons). C'est une voûte imposante de 151 m de hauteur et de 504 m de longueur en couronnement, dont la construction a exigé 626 000 m<sup>3</sup> de béton. La retenue, à la cote 1862,0 est de 100 millions de mètres cubes. L'épaisseur des arcs varie de 7 m au couronnement à 35 m à la base. L'épaisseur de chaque arc reste constante sur presque toute sa longueur, à l'exception des extrémités qui s'épanouissent du côté aval. Le rayon de l'extrados, qui est de 255 m au sommet, décroît progressivement avec la profondeur suivant le principe Jörgenssen de l'angle au centre constant.

L'ouvrage est assis dans le gneiss, dont la stratification pend sous 20° environ du flanc droit vers le flanc gauche. A ce pendage est imputable une certaine dislocation superficielle des bancs rocheux de la rive droite qui exigea, sur cette rive, des fouilles notablement plus profondes. Pour la même raison, les injections du rocher accusèrent des absorptions spécifiquement 15 fois plus élevées sur la rive droite que sur la rive gauche. Les mesures de déformations effectuées depuis la mise en exploitation révélèrent aussi que les déformations plastiques du début affectaient presque exclusivement le flanc droit.

Dans l'axe, le profil du barrage a reçu une cambrure vers l'aval, afin de réduire latéralement le surplomb amont engendré par la variation des rayons.

Pour l'exécution, le barrage a été subdivisé en blocs de 12 à 18 m de largeur, bétonnés par levées de 3 m de hauteur et séparés par des joints plans, non gauf-

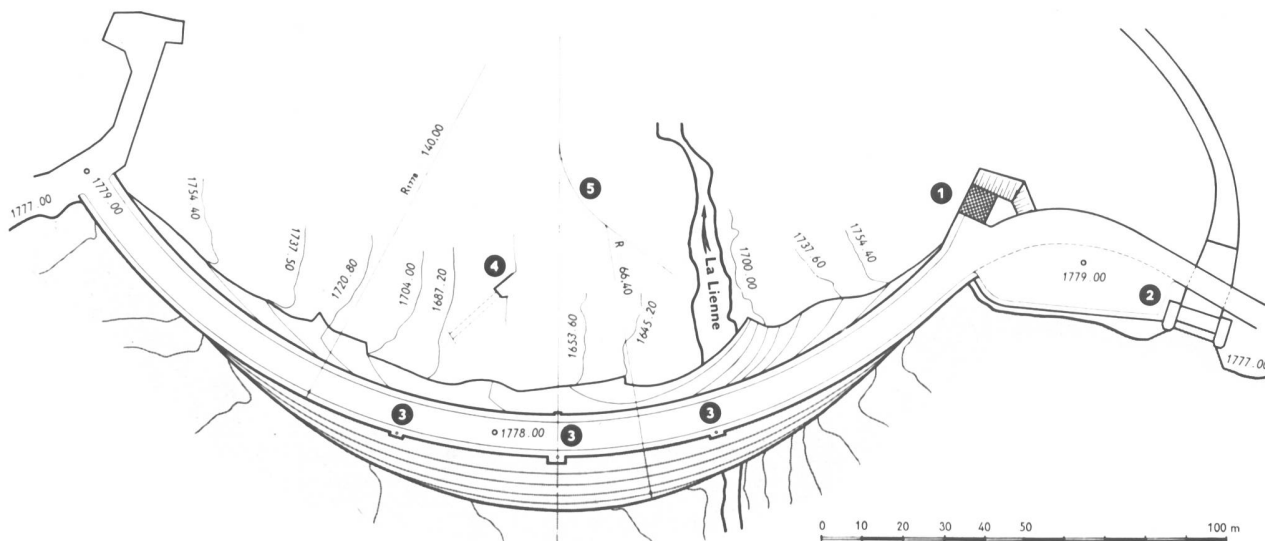


Fig. 9 ZEUIZIER

- Situation
- ① Bâtiment de l'ascenseur
- ② Evacuateur de surface
- ③ Puits des pendules
- ④ Accès à la galerie de base
- ⑤ Ligne des centres du parement amont

- Grundriß
- Aufzug
- Hochwasserentlastung
- Pendelschächte
- Zugang zur untersten Galerie
- Mittelpunktslinie der Wasserseite

- Plan
- Lift
- Spillway
- Pendulum shafts
- Entrance to the lowest gallery
- Arch-centres of the upstream face





ZEUZIER — Electricité de la Lienne S. A., Sion

(Photo: E. Brügger, Zürich)



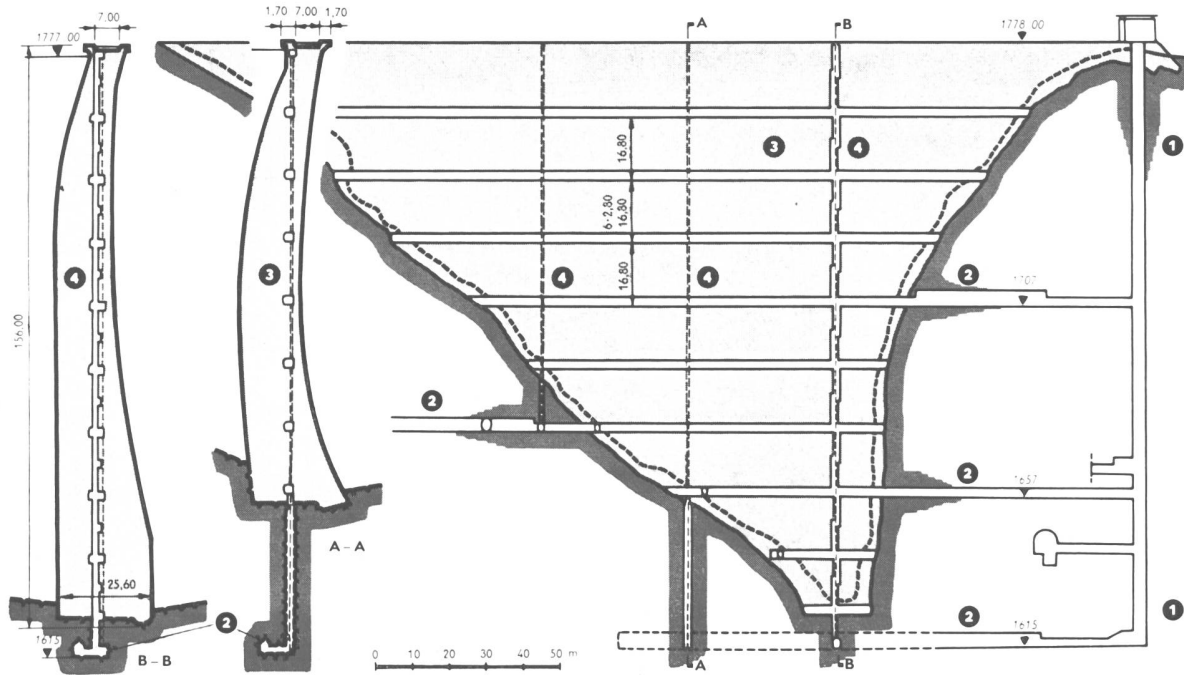


Fig. 10 ZEUZIER

Coupe en long développée et coupes en travers — Entwickelter Längsschnitt und Querschnitte — Developed elevation and cross-sections

- |  |                                       |                                  |
|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| ① Puits d'accès                                | Zugangsschacht                        | Access shaft                     |
| ② Galerie d'injection                          | Injektionsstollen                     | Grouting gallery                 |
| ③ Galeries de travail et de contrôle           | Arbeits- und Kontrollgänge            | Inspection galleries             |
| ④ Puits de communication et puits des pendules | Verbindungsschacht und Pendelschächte | Access shaft and pendulum shafts |

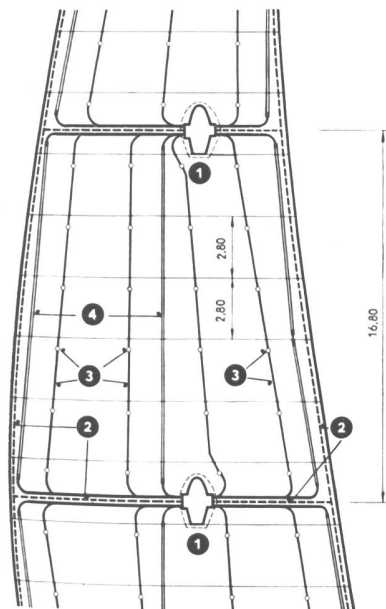


Fig 11 ZEUZIER

Détail d'un joint — Detail einer Baufuge — Detail of a joint

- |   |
|---|
| ① Galeries horizontales — Horizontale Arbeitsgänge — Horizontal inspection galleries          |
| ② Garnitures d'étanchéité — Fugendichtung — Waterstop   |
| ③ Rampes d'injection avec clapets — Injektionsleitungen mit Klappen — Grout pipes with valves |
| ④ Gaines de contrôle — Entwässerung — Vertical drain  |

frés. Les joints furent injectés à l'aide de clapets, disposés à raison d'un clapet pour 16 m<sup>2</sup> de surface de joint.

La réfrigération a exigé 73 km de tubes de 25 mm de diamètre, et a demandé un débit de 200 l/s.

#### Barrage de Zeuzier sur la Lienne.

Ce barrage, construit de 1955 à 1957, est situé au-dessus de Sion (canton du Valais), dans la vallée latérale de la Lienne, sur la rive droite du Rhône. Il ferme une coupure profonde creusée dans un verrou rocheux de calcaire formé de Malm supérieur et d'Argovien. Les proportions de la gorge et la bonne qualité des massifs d'appui se prêtaient à la construction d'un barrage-voûte relativement mince créant, à la cote de retenue 1777,0, un bassin d'accumulation de 50 millions de mètres cubes. Le barrage est complété par une digue latérale fermant une vallée épigénétique peu profonde.

Si l'allure générale du site convenait à un barrage-voûte, sa topographie posait cependant quelques problèmes au point de vue géométrique et statique. La vallée est en effet caractérisée par une dissymétrie singulière. Tandis que la rive gauche offre une déclivité moyenne modérée et assez régulière, le flanc droit est constitué sur près des deux tiers de la hauteur par une falaise presque verticale, tandis que le tiers supérieur s'épanouit suivant une pente semblable à celle de la rive gauche. Le talweg se trouve ainsi fortement excentré par rapport au plan médian général de la vallée.

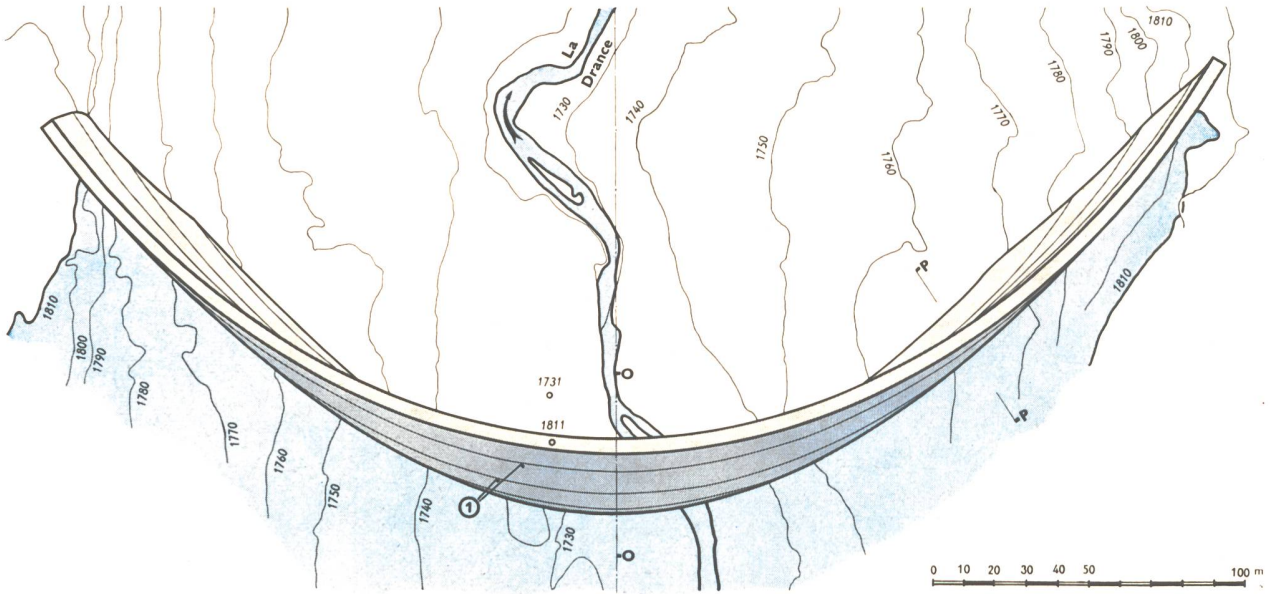
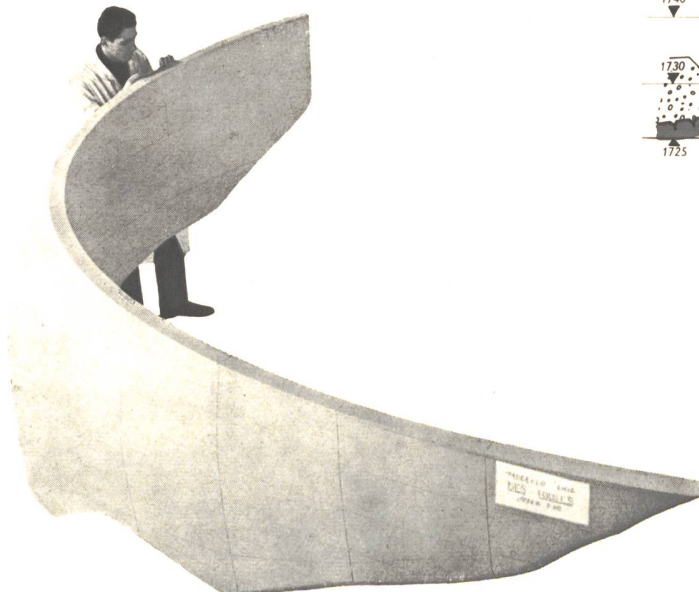


Fig. 12 LES TOULES  
 Situation — Grundriß — Plan  
 ① Arcs elliptiques — Elliptische Bögen — Elliptical arches

Fig. 13 LES TOULES  
 Modèle réduit pour essais statiques  
 Modell für statische Versuche  
 Test model



(Photo: Ismes, Bergamo)

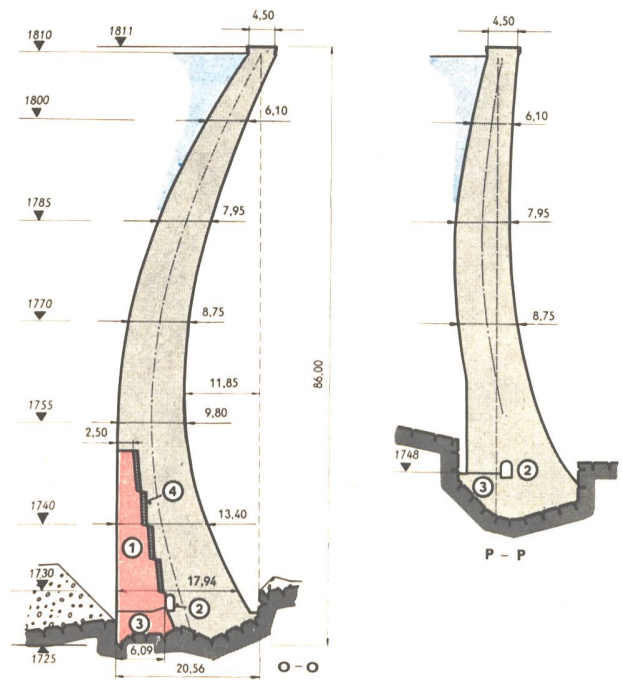


Fig. 14 LES TOULES  
 Coupes en travers — Querschnitte — Cross-sections  
 ① Première étape  
 Erste Etappe  
 First stage  
 ② Galerie de base  
 Basisgalerie  
 Base-gallery  
 ③ Joint de base injectable  
 Injizierbare Basisfuge  
 Groutable base-joint  
 ④ Brèche bétonnée au Prepakt  
 Zwischenraum mit Prepaktverfahren ausbetoniert  
 Space filled with Prepakt

Il fallait d'une part rechercher à chaque niveau la courbure la plus favorable en faisant décroître progressivement le rayon entre le couronnement et la base. Mais d'autre part, cette décroissance des rayons aboutissait, avec des arcs ayant leurs centres dans un même plan vertical, à une impasse géométrique au droit du talweg, où le profil en travers du barrage aurait accusé des surplombs intolérables.

La difficulté a été résolue en «gauchissant» le barrage, c'est-à-dire en déjetant progressivement les centres des arcs inférieurs vers la rive droite, au-dessous de la cote 1714. C'est ainsi que le centre de l'arc cote 1645 se trouve excentré de 14 m par rapport à l'axe principal de l'ouvrage.

Il restait encore à résoudre la question du dimensionnement, non seulement dans le but de limiter les contraintes à des valeurs admissibles, mais encore pour équilibrer les valeurs des contraintes maxima des arcs — qui jouent ici le rôle prépondérant — entre les deux appuis et la clef.

La régularisation des contraintes dans les arcs a été recherchée ici en jouant sur leurs épaisseurs, c'est-à-dire en faisant varier l'épaisseur de chaque arc, de gauche à droite, de telle façon que les contraintes maxima de compression aux deux naissances et à la clef atteignent autant que possible la même valeur.

Après un certain nombre de calculs préliminaires, on est arrivé par approximations successives à obtenir le résultat cherché.

La hauteur de l'ouvrage est de 156 m et sa longueur en couronnement atteint 280 m. Le niveau de la retenue est à la cote 1777,0 et le couronnement est arasé à 1778,0. Au-dessus de 1750,0, l'épaisseur de chaque arc est constante sur toute sa longueur. Entre 1750,0 et 1735,0 les arcs s'élargissent vers les appuis, mais à droite seulement, tandis que leur partie gauche reste d'épaisseur constante. Enfin, au-dessous de 1735,0, l'élargissement des arcs affecte les deux extrémités, mais il est plus important à droite qu'à gauche.

Les épaisseurs à la clef sont de 7 m au couronnement et de 15 m à la cote 1740,0, pour augmenter progressivement jusqu'à 25,60 m au pied extrême de l'ouvrage. Le rayon du parement amont décroît progressivement de 140 m au couronnement à 57,40 m à la base. La forme du parement aval est assez complexe, en raison des variations d'épaisseur dont nous avons dit plus haut le rôle. Le volume total de béton est de 300 000 m<sup>3</sup>.

L'accès aux ouvrages annexes et au barrage est assuré en toutes saisons par un puits de 160 m de profondeur creusé dans le rocher, d'où partent un certain nombre de galeries d'accès, d'injection et de contrôle. Afin d'assurer l'exécution et la surveillance des opérations de réfrigération du béton et d'injection des joints dans les meilleures conditions possibles, et même en hiver, neuf galeries horizontales, distantes de 16 m 80 — soit 6 levées de 2,80 m — ont été ménagées dans le barrage. Ces galeries, qui abritaient aussi les tuyauteries nécessaires à la réfrigération, correspondent aux limites des zones d'injection. Toutes les rampes d'injection y aboutissaient. Ce système s'est révélé très commode. Il est préférable à des puits ou à des échafaudages extérieurs, pour autant que les épaisseurs de l'ouvrage tolèrent encore la présence des galeries.

## Barrage des Toules

Sur la route du Grand St-Bernard (canton du Valais), au lieu dit «Pont des Toules», s'ouvre une cuvette assez large permettant de créer, avec retenue à la cote 1810,0, un bassin de 20 millions de m<sup>3</sup>. Cette cuvette est fermée par un verrou rocheux, dont la surface plonge rapidement vers l'amont et l'aval, tandis que latéralement la vallée s'étire sur les deux rives où elle présente, de part et d'autre, de petits vallons épigénétiques. La roche est formée de schistes de Casanna, massifs en profondeur, mais assez fracturés au voisinage de la surface et demandant des injections de consolidation étendues.

La construction de ce barrage a été subdivisée en deux étapes, dont la première a été exécutée en 1958. La seconde est actuellement en cours d'exécution et son achèvement est prévu pour 1963.

Dans cette vallée très large par rapport à sa profondeur, il s'agissait d'implanter, compte tenu de la faible capacité du lac, un barrage de volume minimum, d'une courbure encore compatible avec une bonne orientation des poussées par rapport aux flancs de la vallée, tout en limitant les contraintes de l'ouvrage à des valeurs admissibles. A ces conditions assez draconiennes s'ajoutait l'obligation de pouvoir construire le barrage en deux étapes, dont la première, arasée à la cote 1750,0 devait s'inscrire dans le profil définitif.

La solution choisie est un barrage-coupe assez mince fortement renversé vers l'aval. La hauteur totale est de 86 m, et la longueur développée du couronnement atteint 460 m. L'épaisseur, de 4,50 m au couronnement arasé à la cote 1811,0, atteint 20 m à la base (cote 1726,0). L'ouvrage demandera 235 000 m<sup>3</sup> de béton, dont 15 000 m<sup>3</sup> déjà exécutés en première étape. La forme en plan des arcs n'est pas circulaire, mais elliptique dans la seconde étape, et parabolique dans la première, avec une zone de transition intermédiaire. L'épaisseur de chaque arc est constante jusqu'au voisinage des appuis où la voûte s'épanouit, non seulement dans le but d'obtenir une meilleure répartition des pressions sur la fondation, mais aussi de corriger partiellement, grâce à l'accroissement rapide de la rigidité, l'effet des irrégularités du sol.

Le profil de la première étape, haut de 25 m environ, a été découpé dans le barrage définitif, du côté amont. Le parement aval provisoire a été profilé en escaliers, pour servir d'appui au béton de la seconde étape.

Le barrage de première étape constituait une voûte extrêmement tendue et très longue (180 m) par rapport à sa hauteur. Afin d'améliorer ces proportions défavorables, on a exécuté à chaque extrémité un bloc formant culée, avec l'épaisseur définitive de l'ouvrage.

Le problème délicat de la liaison entre les deux étapes est résolu comme suit: entre les deux étapes sera ménagée une brèche provisoire remplie de gravier qui, combinée avec d'autres précautions, permettra au béton de la seconde étape d'effectuer librement sa contraction, horizontalement et verticalement. On procédera ensuite à l'injection des joints transversaux, puis à celle du gravier de la brèche, suivant le procédé Prepakt.

La question des contraintes de traction inévitables dans le pied amont a été résolue, tant pour la première que pour la seconde étape, par l'artifice du joint de base injectable déjà décrit plus haut. L'adoption de ce joint oblige naturellement à tenir compte dans les calculs de

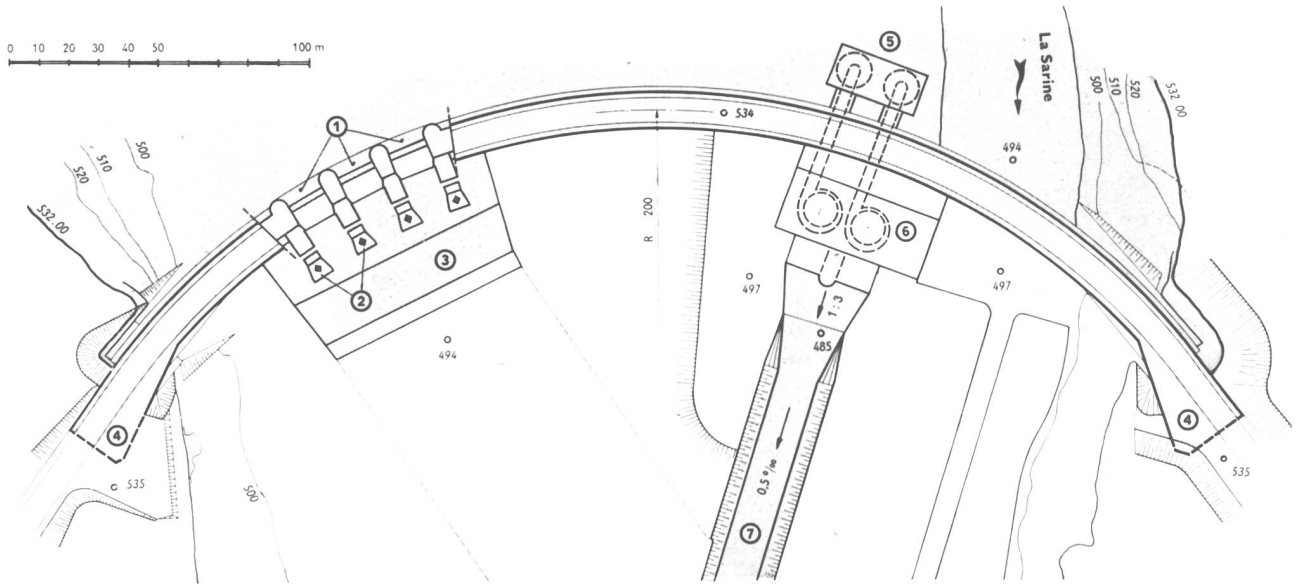


Fig. 15 SCHIFFENEN

Situation — Grundriß — Plan

- |                                     |                                |  |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| ① Déversoir                         | Hochwasserüberfall             | Spillway   |
| ② Diffuseur des vidanges de fond    | Strahlbrecher der Grundablässe | Energy dispersion baffles of the unwatering conduits |
| ③ Bassin amortisseur                | Tosbecken                      | Stilling pool  |
| ④ Culées des extrémités supérieures | Widerlager der oberen Bögen    | Abutment of the upper arches                         |
| ⑤ Prise d'eau                       | Wasserfassung                  | Intake tower   |
| ⑥ Centrale                          | Maschinenhaus                  | Powerhouse   |
| ⑦ Canal de fuite                    | Unterwasserkanal               | Tailwater channel                                    |

diverses hypothèses de déformabilité du pied aval, en relation avec les contraintes de compression dans ce pied où la loi de Navier n'est plus applicable.

Barrage de Schiffenen

Ce barrage, actuellement en construction à quelques kilomètres à l'aval de la ville de Fribourg, fait partie de l'aménagement du palier inférieur de la Sarine et fait suite à l'aménagement de Rossens-Hauterive. Il barre une vallée très large, à fond plat, bordée par des falaises verticales. Sa hauteur de 47 m est modeste, mais il offre quelques aspects assez exceptionnels.

Il est implanté, comme celui de Rossens, dans le grès tendre, la molasse. Mais tandis qu'à Rossens l'ouvrage repose entièrement dans la molasse marine, à Schiffenen seuls les massifs latéraux sont constitués par cette même molasse marine, très homogène, sans failles ni fractures, tandis que le fond de la vallée est formé de molasse d'eau douce, très hétérogène, présentant des alternances de grès et de marnes, parfois durs, parfois tendres, avec même l'une ou l'autre intercalation de gravier.

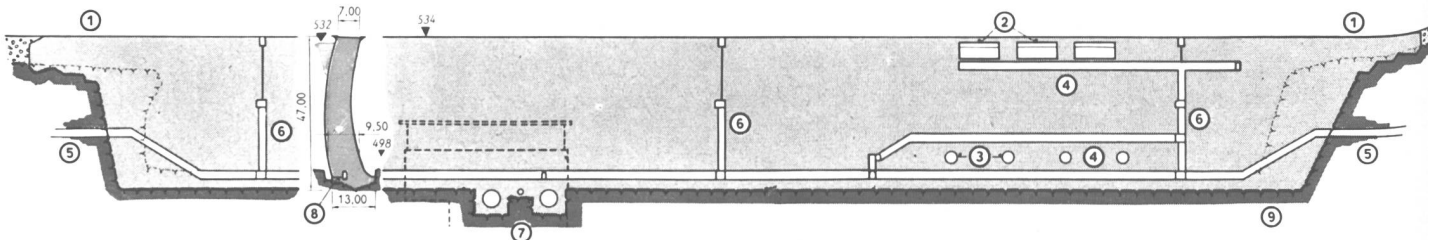


Fig. 16 SCHIFFENEN

Coupe en long développée et coupe en travers type — Entwickelter Längsschnitt und Querprofil — Developed elevation and cross-section

- |                                      |                                    |                                 |
|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| ① Culées                             | Widerlager                         | Thrust blocks                   |
| ② Evacuateur de surface              | Hochwasserüberfall                 | Spillway                        |
| ③ Ouvertures de vidange              | Grundablaßöffnungen                | Outlet etrances                 |
| ④ Galeries de base et d'accès        | Basis- und Zutritts-galerien       | Base and access galleries       |
| ⑤ Galerie de contrôle et de drainage | Kontroll- und Entwässerungsstollen | Inspection and drainage gallery |
| ⑥ Puits des pendules                 | Pendelschächte                     | Pendulum shafts                 |
| ⑦ Conduites de prise d'eau           | Wasserzuleitung                    | Intake conduit                  |
| ⑧ Joint de base injectable           | Injizierbare Basisfuge             | Groutable base-joint            |
| ⑨ Grès tendre (molasse)              | Weicher Sandstein (Molasse)        | Soft sandstone (molasse)        |

Le barrage est du type voûte-poids. Ce type a été adopté non seulement en raison de l'économie encore intéressante qu'il permet de réaliser, mais encore pour des raisons de sécurité, car il permet d'utiliser la résistance des massifs latéraux et de pallier ainsi les défauts et les incertitudes que peut recéler la roche de l'infrastructure. Malgré le grand développement du barrage, 370 m, et le rapport défavorable entre longueur et hauteur de l'ouvrage, il a été possible d'obtenir une action de voûte appréciable, précisément grâce au module de déformation très bas du rocher — admis au dixième de celui du béton — qui donne aux consoles une mobilité suffisante pour s'adapter aux déformations des arcs.

Il n'y avait pas d'intérêt, ici, à recourir à la forme elliptique des arcs. Le profil en U très marqué de la vallée ne permettait pas non plus de faire varier utilement le rayon entre le couronnement et la base. Le barrage est donc un corps de révolution, d'un rayon de 200 m mesuré à l'axe du couronnement. Le profil est légèrement cintré dans le sens vertical. L'épaisseur est de 7 m en couronnement, sous la chaussée, et de 14 m à la base.

Bien que les calculs n'aient pas accusé de tractions excessives dans le pied amont, on a néanmoins prévu ici un joint de base injectable, en raison des variations probables de déformabilité de la mollasse d'eau douce et de la présence des «points durs» constitués par la centrale établie au pied du barrage, et par le bassin amortisseur situé au-dessous et à l'aval du déversoir de surface (400 m<sup>3</sup>/s) et des vidanges de fond (600 m<sup>3</sup>/s).

Le barrage, d'un volume de 150 000 m<sup>3</sup>, s'exécute en blocs de 17 m de largeur, dont trois, au centre, ne seront bétonnés qu'en dernier lieu, pour laisser une brèche de 51 m donnant passage à la Sarine pendant les travaux.

Notons encore que sur les deux rives, à la hauteur du couronnement, la mollasse se dérobe sous un matelas de moraine et se trouve à un niveau inférieur de plusieurs mètres à celui de la retenue, ce qui exige la construction d'une petite culée à chaque extrémité du barrage.

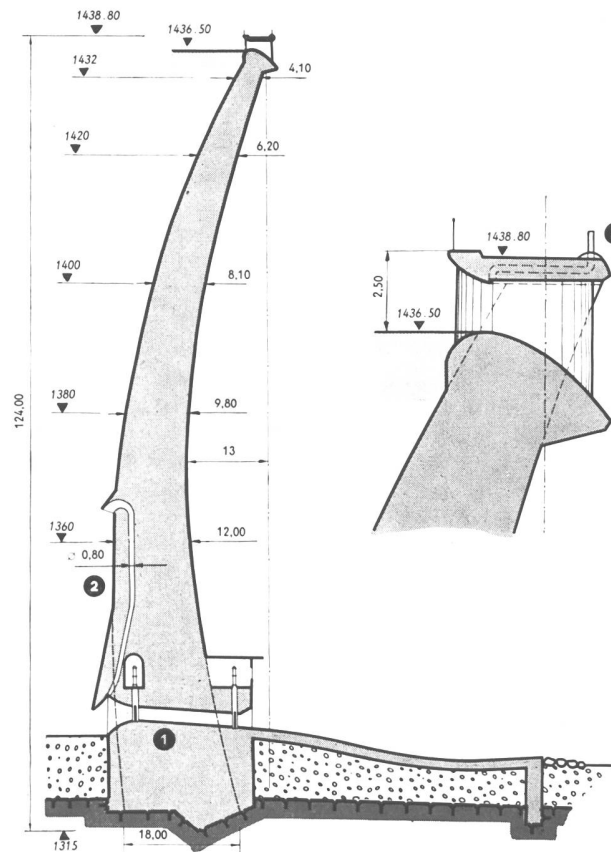


Fig. 18 GEBIDEM / MASSA

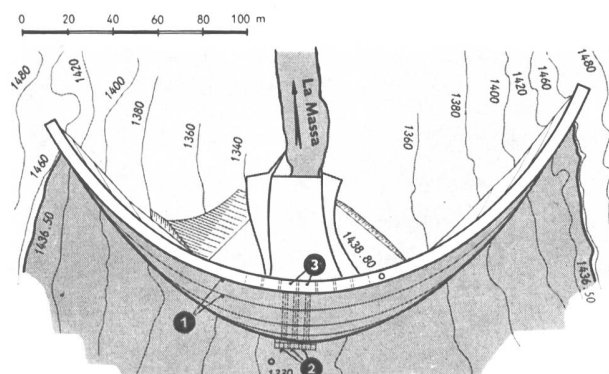
Coupe en travers — Querschnitt — Cross-section

- 1 Conduite de vidange — Entleerungsleitung — Unwatering conduit
- 2 Tuyau de décolmage — Spülrohr — Scour pipe
- 3 Aération — Belüftungsrohr — Vent pipe

Fig. 17 GEBIDEM / MASSA

Situation — Grundriß — Plan

- 1 Arcs elliptiques — Elliptische Bögen — Elliptical arches
- 2 Vidanges de fond — Grundablässe — Outlet etranches
- 3 Déversoir — Hochwasserüberfall — Spillway



### Barrage de Gebidem

Ce barrage est encore à l'état de projet, et seuls les travaux préliminaires, sondages, routes d'accès etc. ont été exécutés jusqu'ici. Nous nous bornons donc à en donner les caractéristiques principales. Ce barrage est situé dans la vallée de la Massa, au nord de Brigue (canton du Valais) et créera, à la cote 1436,5, un bassin de compensation de 9 millions de mètres cubes.

La forme et les proportions de la vallée, comme aussi la bonne qualité des appuis constitués par le gneiss, en général massif, se prêtent à la réalisation d'un barrage-coupole mince et pratiquement symétrique, d'une hauteur totale de 120 m et d'un développement de 300 m.

L'épaisseur sera de 3,00 m au couronnement et augmentera jusqu'à 17,50 m à la base (cote 1320,0). L'ouvrage exigera 200 000 m<sup>3</sup> de béton. Ici aussi, les arcs seront elliptiques et non pas circulaires.

La partie centrale du couronnement sera aménagée, sur 54 m de longueur, en déversoir fixe. Notons encore que le pied du barrage sera percé de trois pertuis de 2,00 x 2,30 m destinés à l'évacuation, sous niveau abaissé, des débits solides. Le problème de l'engravement et de l'évacuation des alluvions a fait l'objet d'études et d'essais de laboratoires très intéressants, sur lesquels nous ne pouvons toutefois pas nous étendre ici.