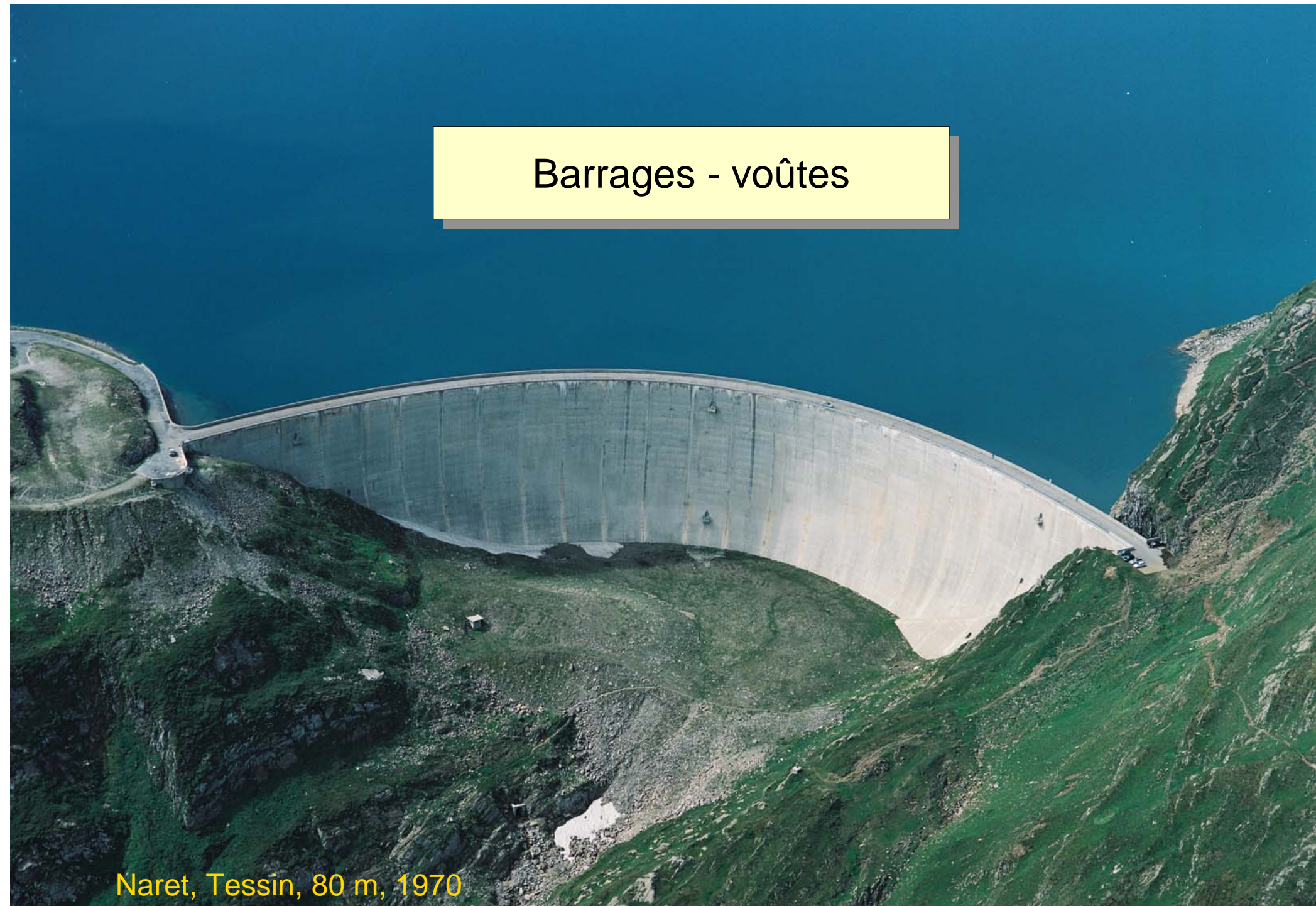
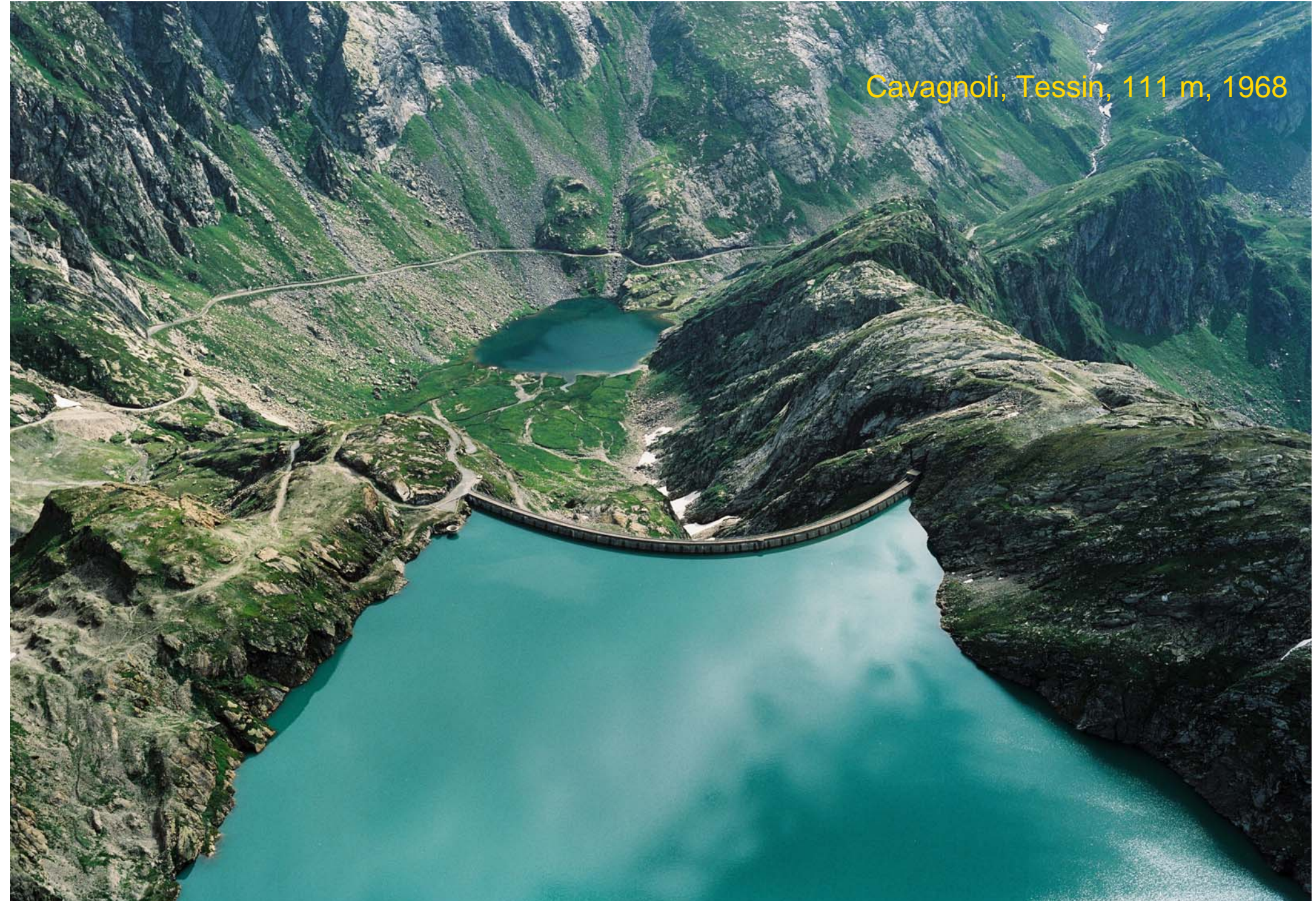


Barrages - voûtes

Naret, Tessin, 80 m, 1970



Cavagnoli, Tessin, 111 m, 1968

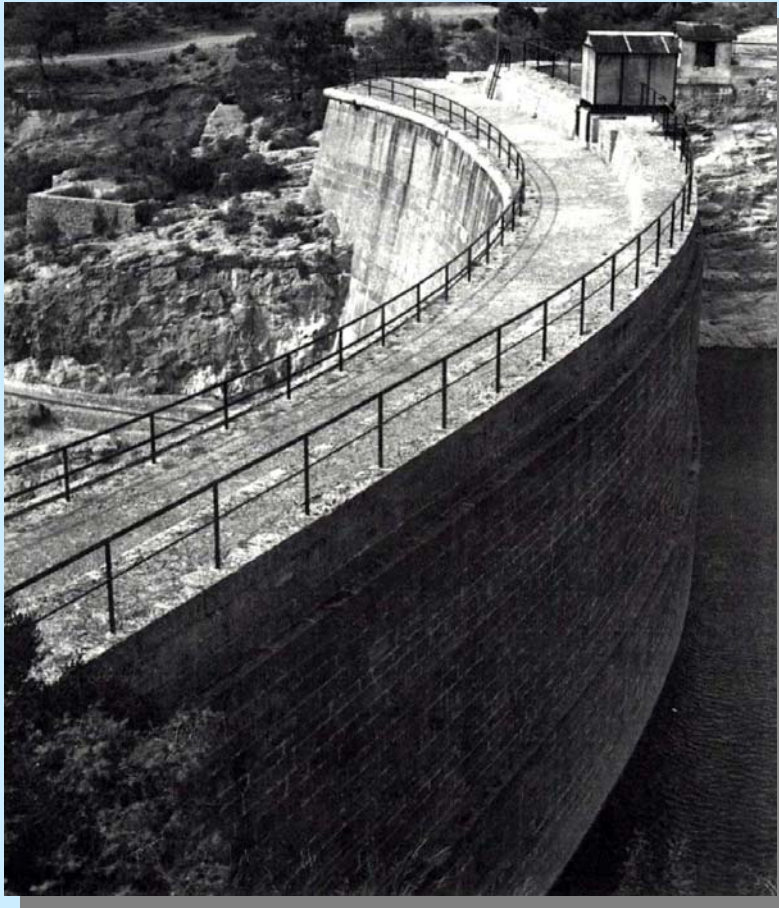


L'importance des barrages-voûtes

- ⇒ Les barrages voûtes représentent 4.4 % de tous les barrages
- ⇒ Les barrages voûtes représentent 25 % des barrages en béton
- ⇒ Surtout bien représentés pour les hauteurs importants:
 - 100 - 150 m: 30 %
 - 150 - 200m: 45%
 - > 200m : 55%

Premiers barrages-voûtes

⇒ François Zola (1795-1847)



: premier barrage-voûte dimensionné sur la base des contraintes: barrage de Zola près d'Aix-en-Provence
hauteur: 33 m; achèvement: 1854)

- ⇒ Edmé Mariotte (1620-1684)
formule du cylindre
- ⇒ Louis M.H. Navier (1785-1838)
théorie des arcs élastiques
- ⇒ G. Albert Pelletreau (1843-1900)
diminution des rayons des arcs de haut en bas
- ⇒ Percy Simpson (1787-1877)
premier barrage-voûte en Australie (forme cylindrique)
- ⇒ James D. Schuyler (1848-1912)
parement amont incliné

Premiers barrages-voûtes

- ⇒ Barrages de Pathfinder et Buffalo (Etats Unis): premiers barrages-voûtes (cylindriques) dimensionnés selon la méthode des ajustements (arcs- consoles)
- ⇒ Hubert Vischer / Luther Wagoner (1847-1922) développement de la méthode des ajustements
- ⇒ Lars R. Jorgensen (1876-1938) premier barrage-voûte avec arcs à rayons variables: barrage de Salmon Creek (1914)
- ⇒ Heinrich E. Gruner (1873-1947) premier barrage-voûte à rayons variables: barrage de Montsalvens (1920)
- ⇒ Hugo F.L. Ritter (1883-1956) analyse des barrages-voûtes
- ⇒ Henri Gicot (1897-1982), Alfred Stucky (1892-1969) amélioration des méthodes d'analyse des barrages-voûtes

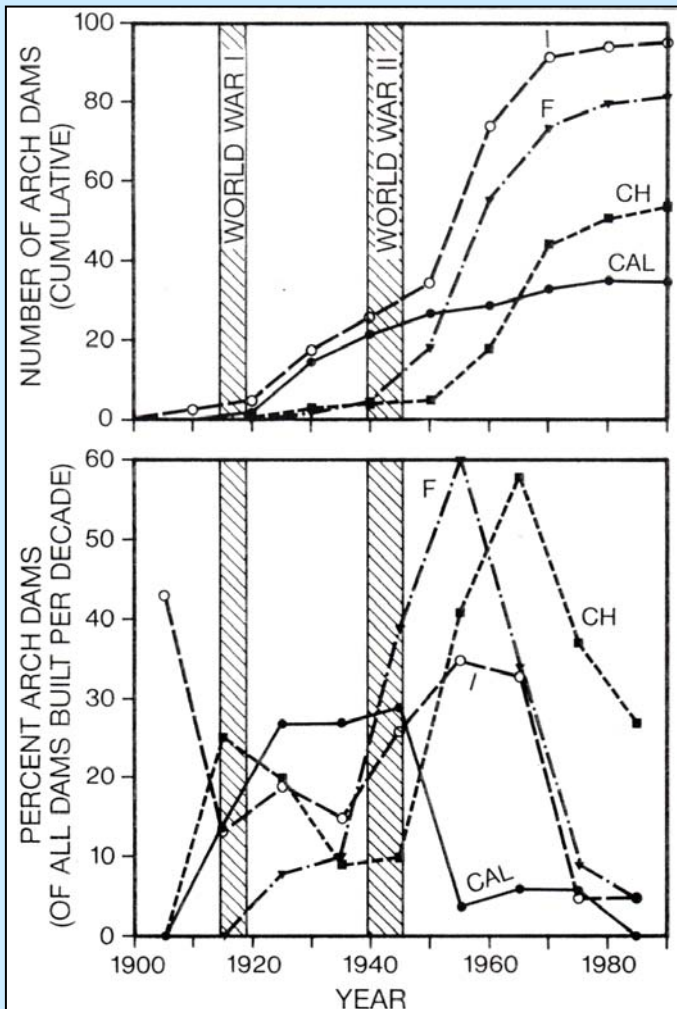
Barrages-voûtes modernes

- ⇒ Grande popularité des barrages-voûtes en Californie jusqu'à la 2^{ème} guerre mondiale.
- ⇒ Partiellement en Italie, premier barrage-voûte à double courbure: barrage d'Osiglietta (1939), joint périmétrique; beaucoup de barrages conçus par Carlo Semenza (1893-1961).
- ⇒ Développement des barrages-voûtes en France par André Coyne (1891-1960). Après la rupture du barrage de Malpasset (58 m) en 1959, la construction des barrages-voûtes a fortement diminuée.
- ⇒ Après la 2^{ème} guerre mondiale, la construction de nombreux barrages-voûtes en Suisse, avec le barrage le plus haut de Mauvoisin (237 m, surélevé en 1990 à 250 m), achevé en 1957 et conçu par Alfred Stucky.

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Développement de la construction des barrages-voûtes entre 1900 et 1990

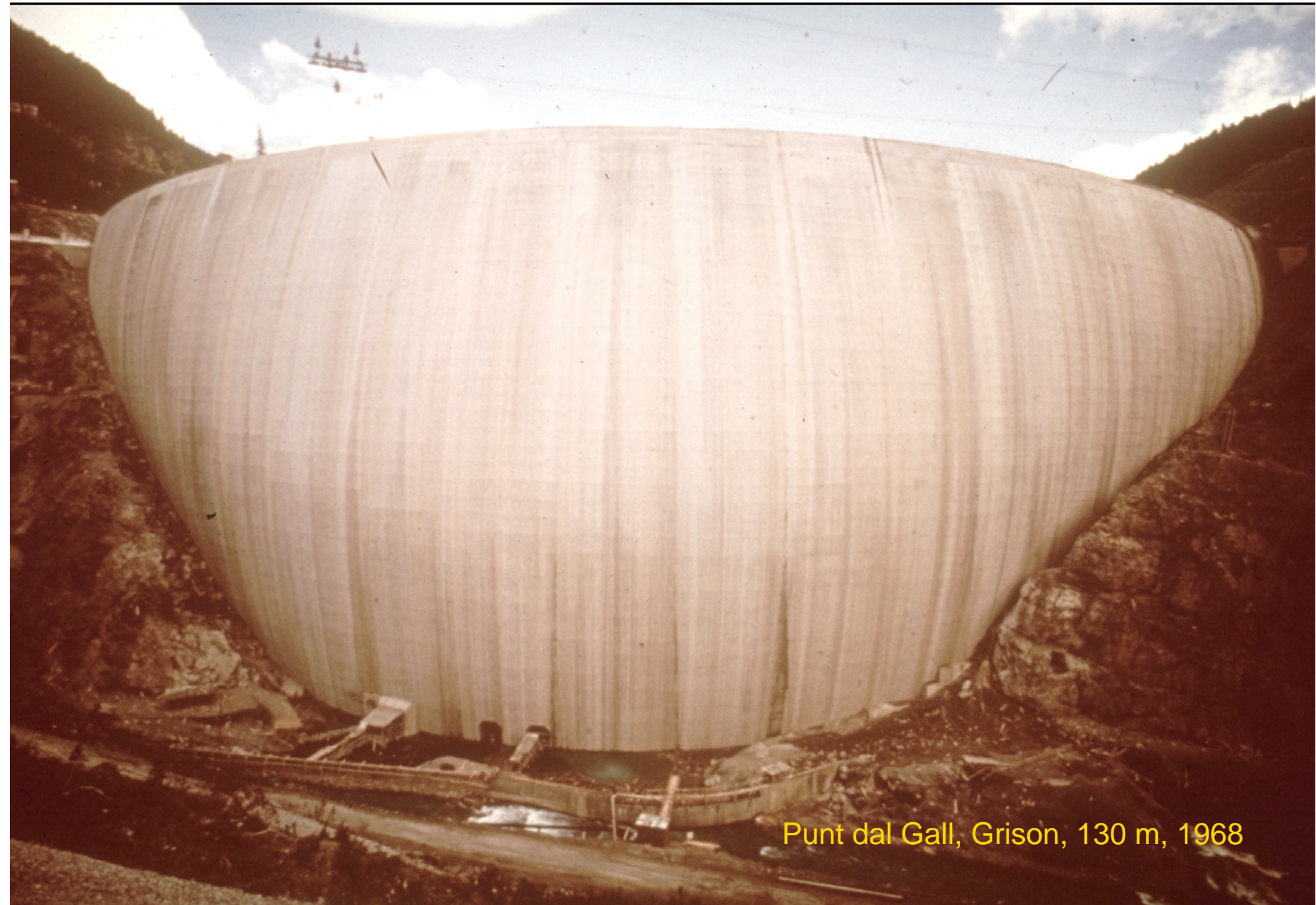


Year of completion	Maximum height of dams (m)				Industrialized countries ¹
	100-149	150-199	200-249	250-300	
1920-1929	2				2
1930-1939					
1940-1949	5	1			6
1950-1959	21	6	1		28
1960-1969	33	13	4	1	51
1970-1979	17	6	5		28
1980-1989	10	5	1	1	17
Totals	88	31	11	2	132

¹Industrialized countries: Australia, Canada, CIS, Europe, Japan, New Zealand and USA.

Cavagnoli, Tessin, 111 m, 1968





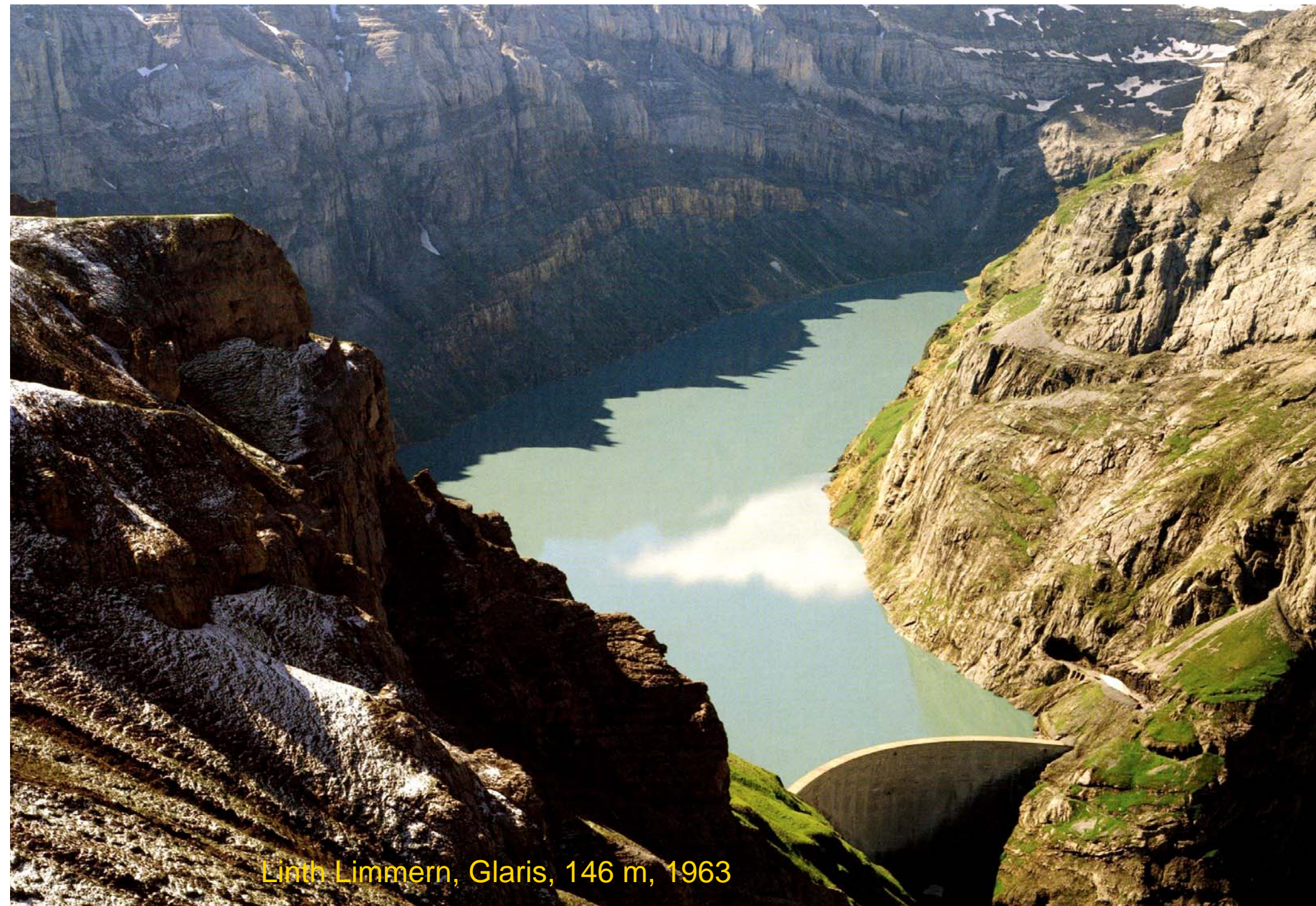
Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



Karun III, Iran, 205 m

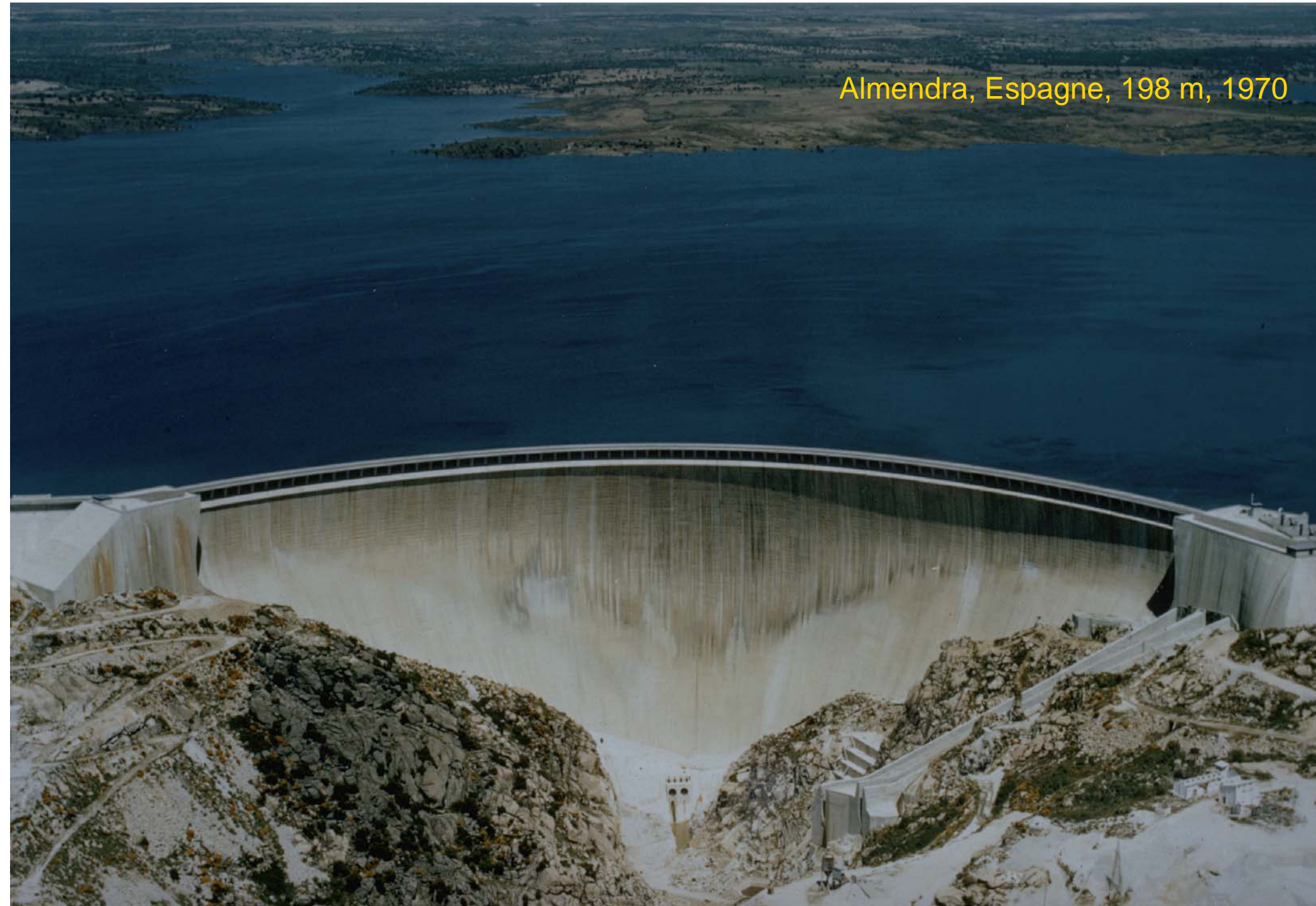


Emosson, Valais 180 m

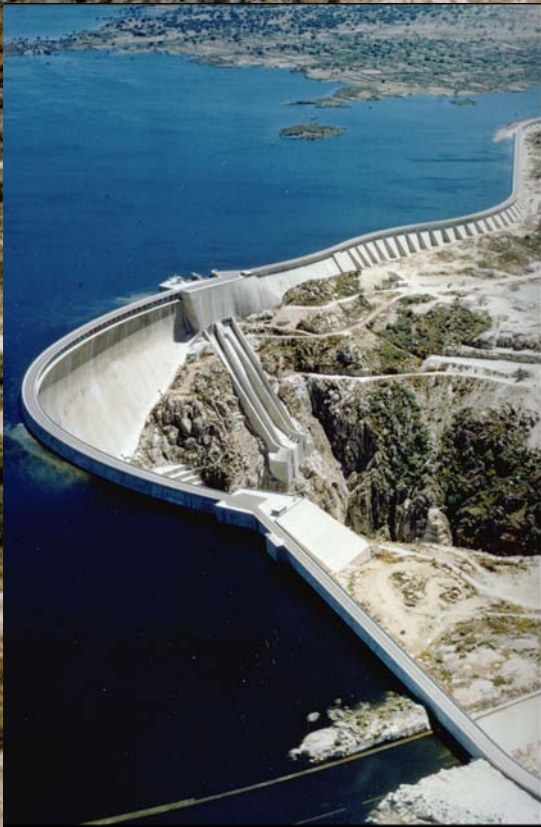


Linth Limmern, Glaris, 146 m, 1963

Almendra, Espagne, 198 m, 1970

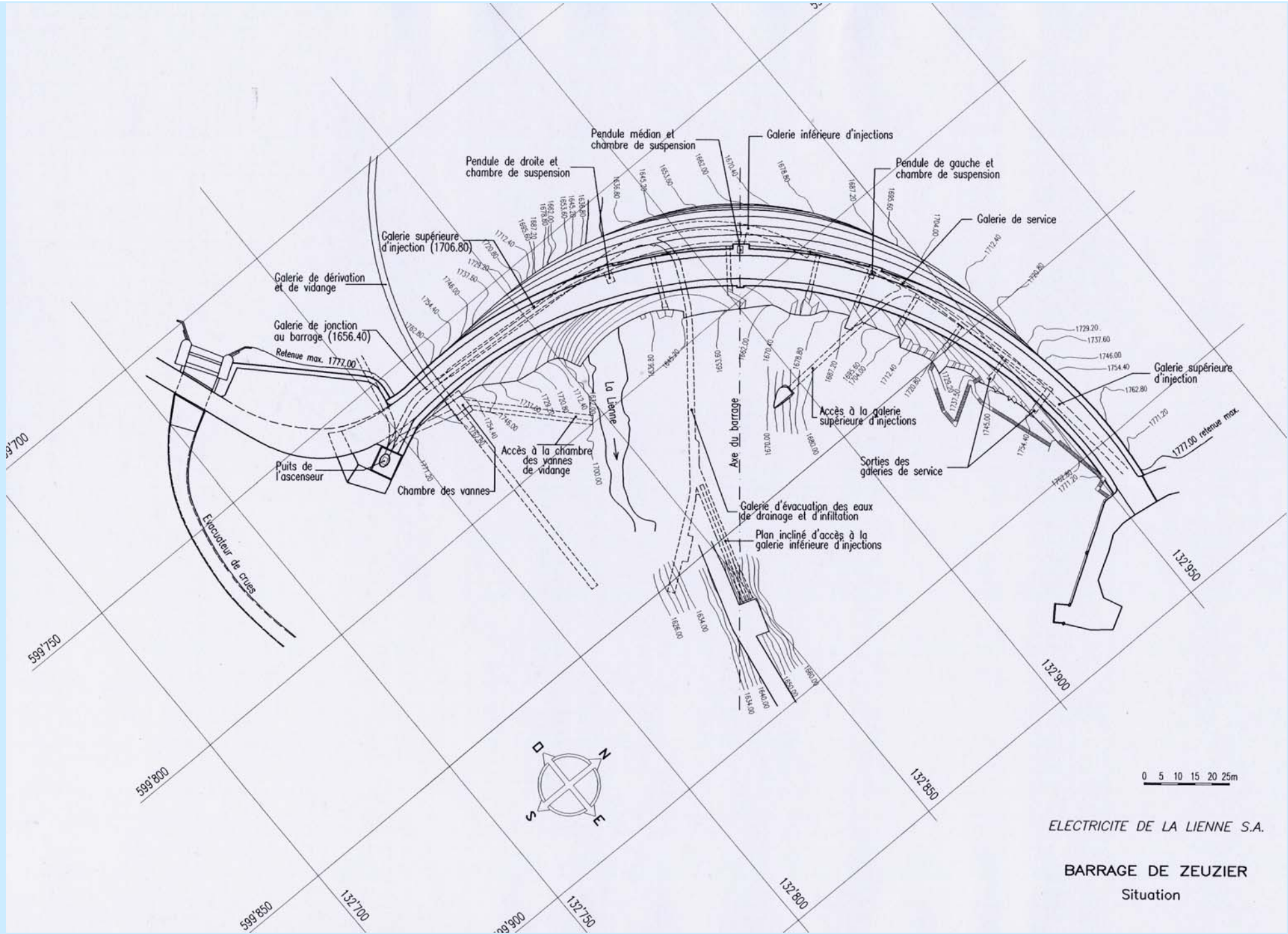


Almendra, Espagne, 198 m



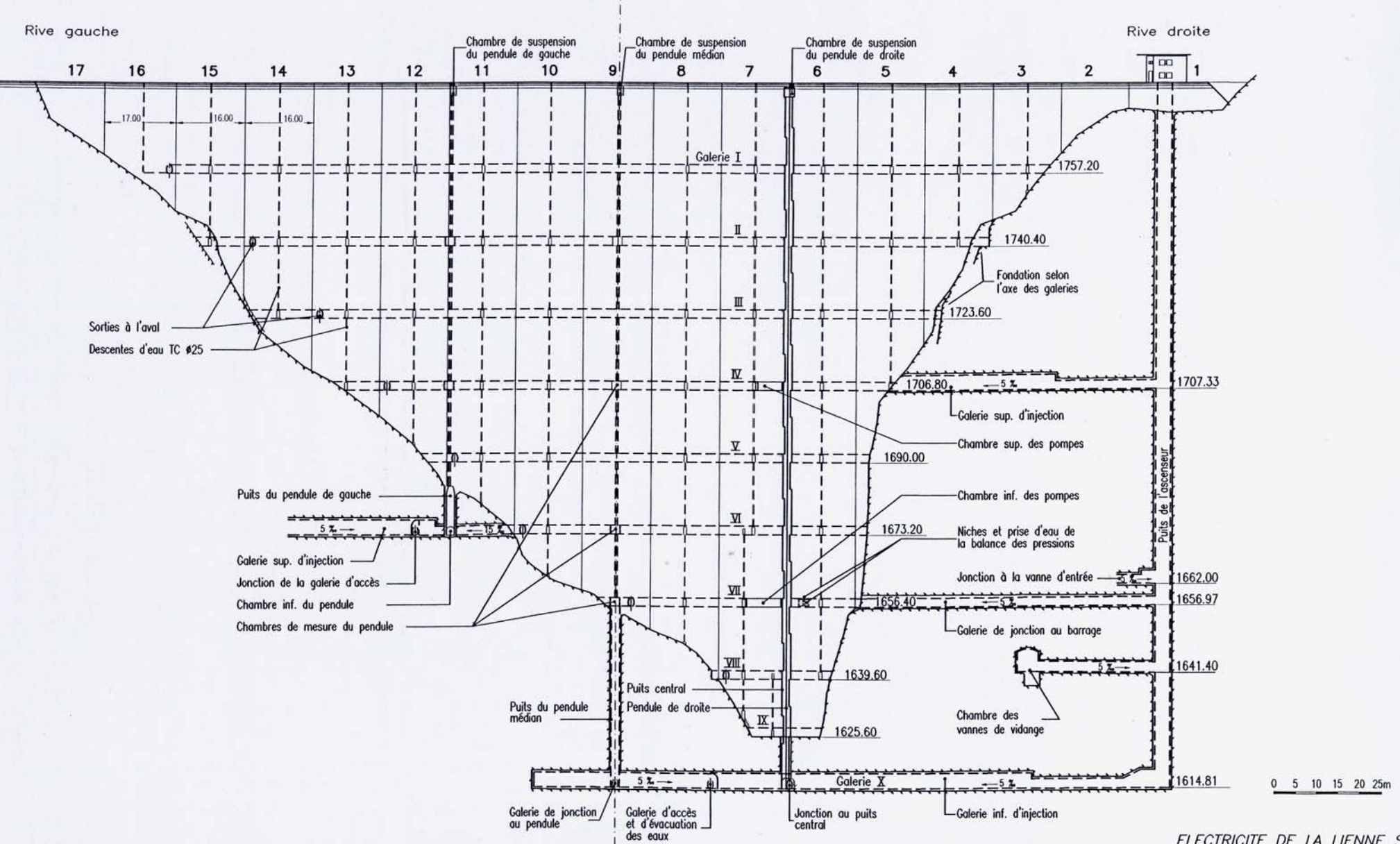


Zeuzier, Valais, 156 m, 1957



ELECTRICITE DE LA LIENNE S.A.

BARRAGE DE ZEUZIER
Situation

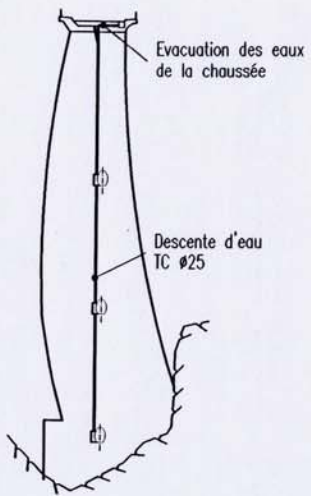


ELECTRICITE DE LA LIENNE S.A.

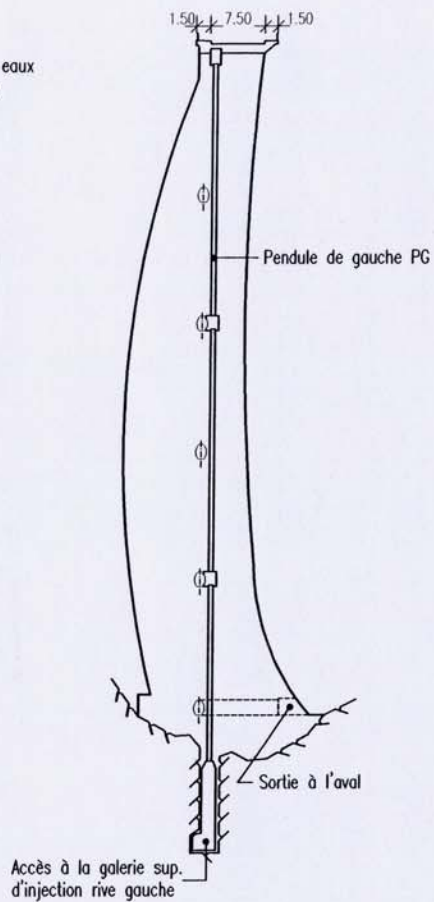
BARRAGE DE ZEUZIER

Coupe longitudinale
(vue de l'amont)

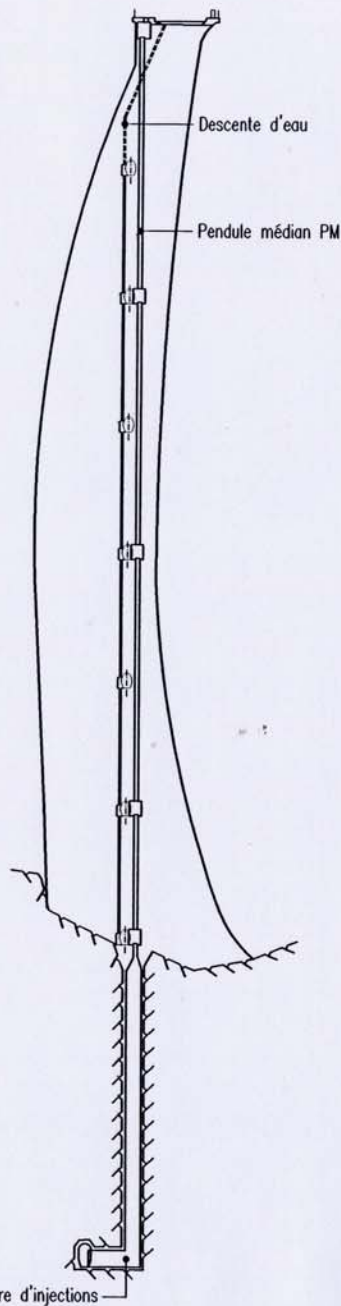
15-14



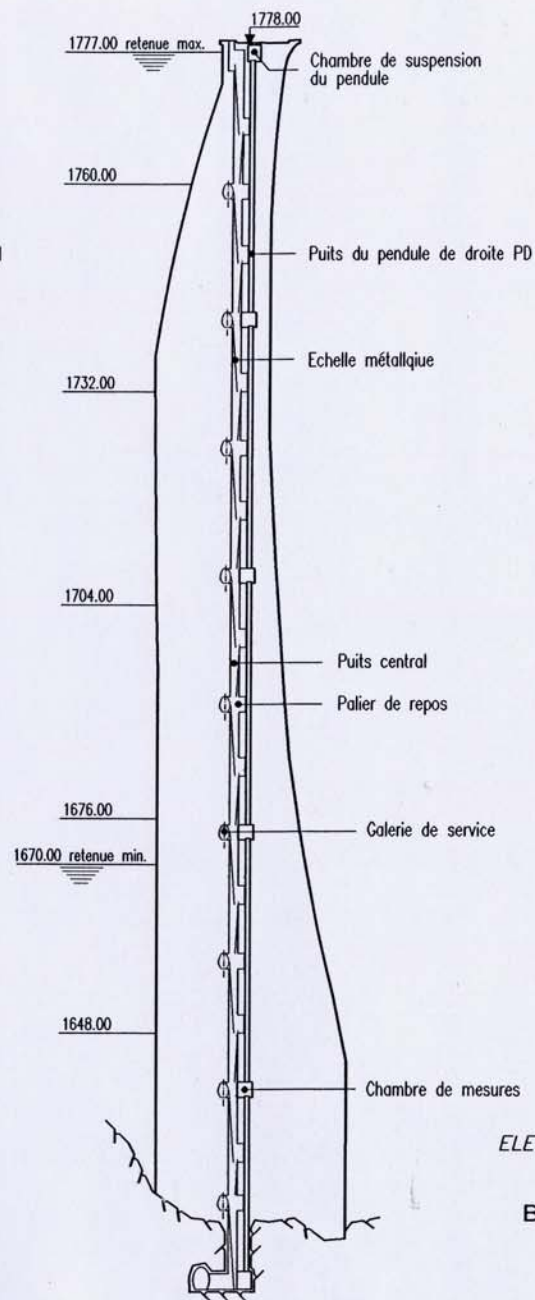
12-11



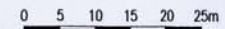
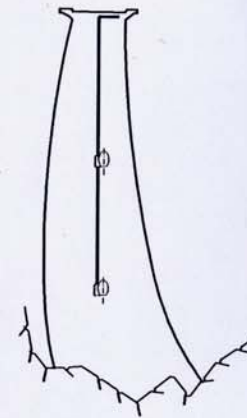
9



7-6



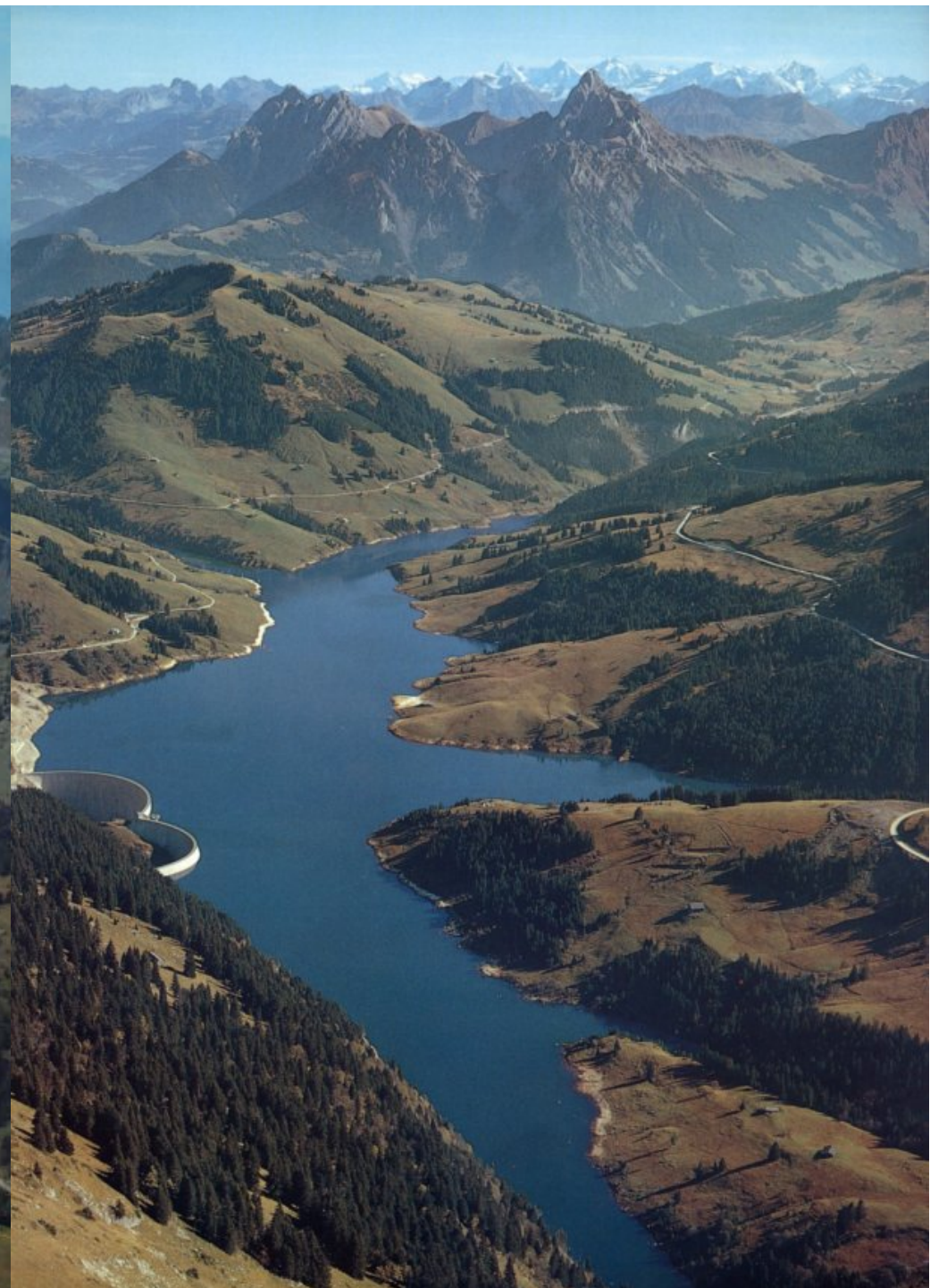
4-3



ELECTRICITE DE LA LIENNE S.A.

BARRAGE DE ZEUZIER

Coupes en travers



Hongrin, Vaud, 125 m / 90 m, 1969

Zayandehrood, Iran, 100 m, 1970





Roselend, France, 150 m, 1960

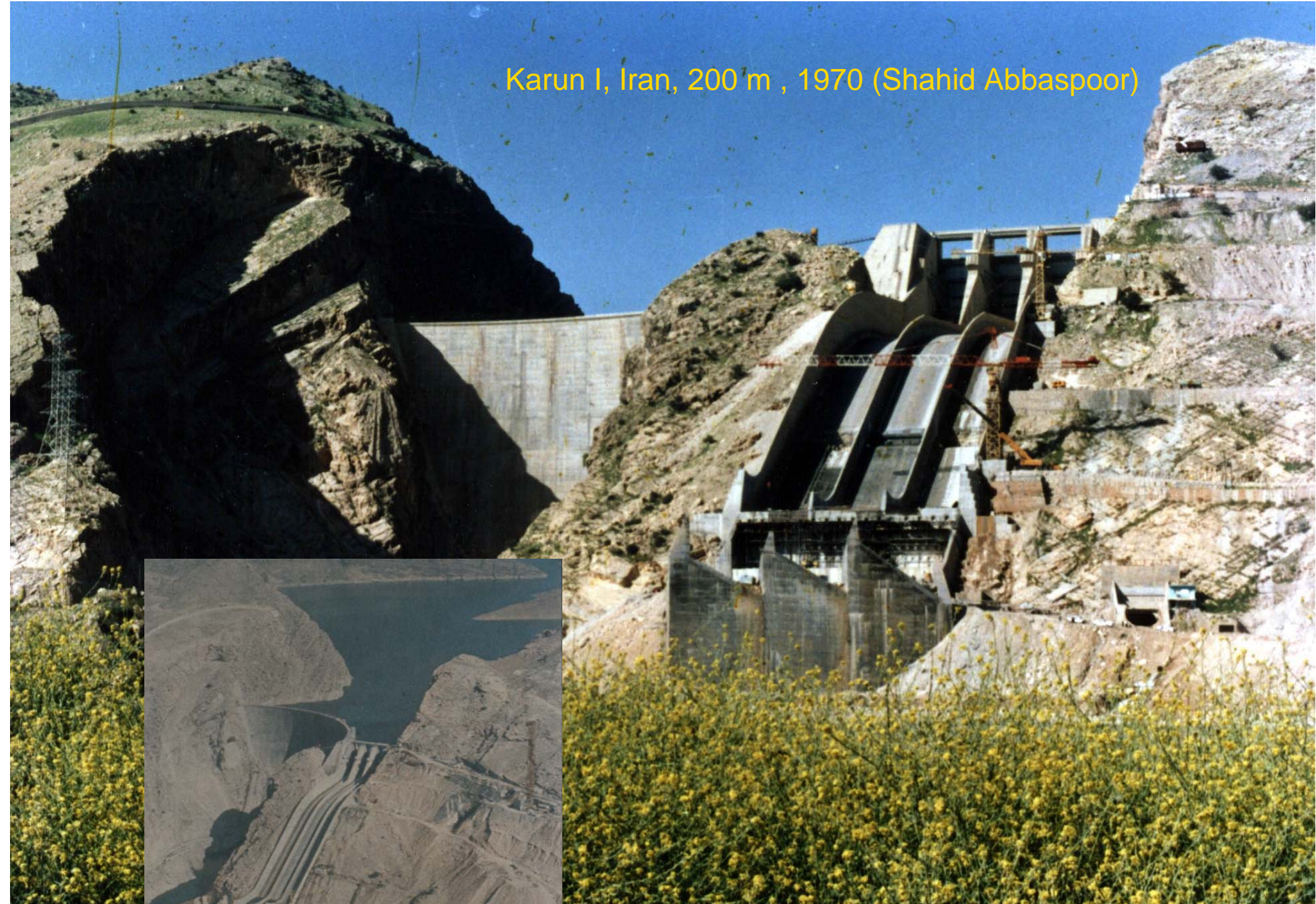


Roselend, France, 150 m, 1960



Santo Domingo, Venezuela, 75 m, 1972

Karun I, Iran, 200 m , 1970 (Shahid Abbaspour)





Karun I, Iran, 200 m , 1970 (Shahid Abbaspoor)

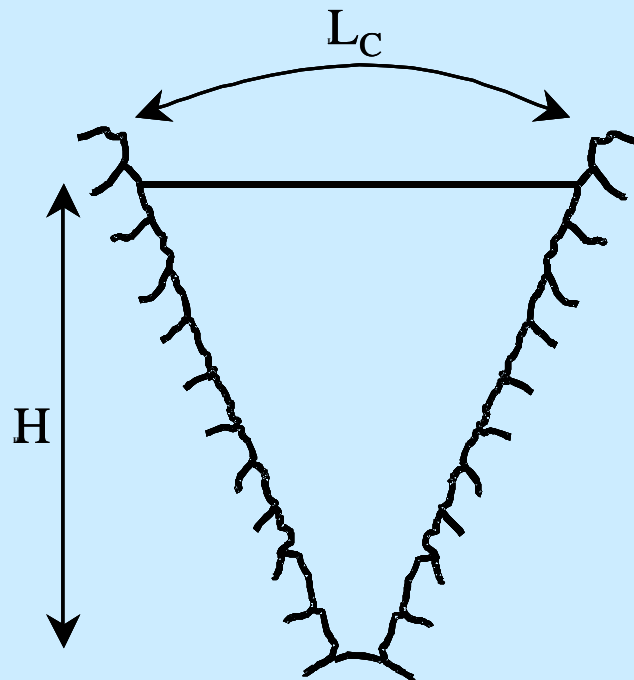
Choix de l'emplacement

⇒ Conditions pour la réalisation d'un barrage-voûte :

- ◆ la vallée est relativement étroite
- ◆ les appuis latéraux sont topographiquement favorables (si possible symétriques)
- ◆ les conditions géologiques sont bonnes
 - ✓ stabilité du rocher aux rives pendant la construction et l'exploitation du barrage (percolation de l'eau à travers les appuis)
 - ✓ comportement homogène et isotrope de la fondation (éviter des failles et discontinuités)
 - ✓ rocher sain, peu perméable et déformable

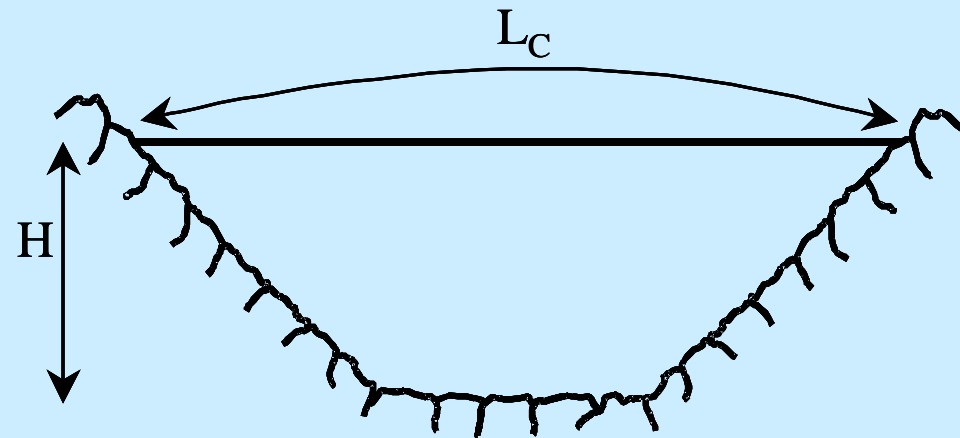
Choix de l'emplacement - Critères topographiques

Vallée en V



$$L_C/H \leq 5 \quad (6)$$

Vallée en U

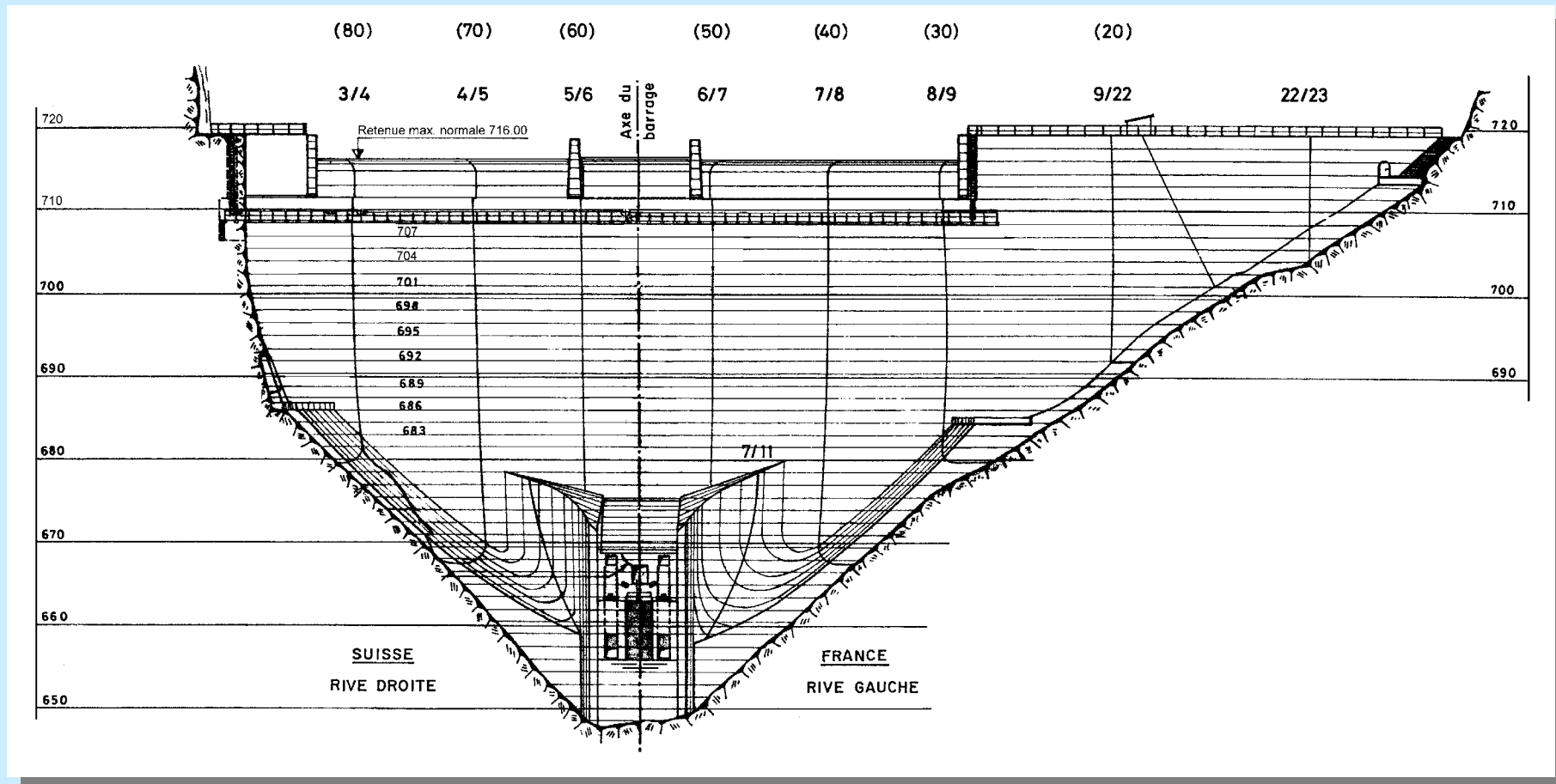


$$L_C/H \leq 4 \quad (4.5)$$

Barrages en béton

Barrages - voûtes

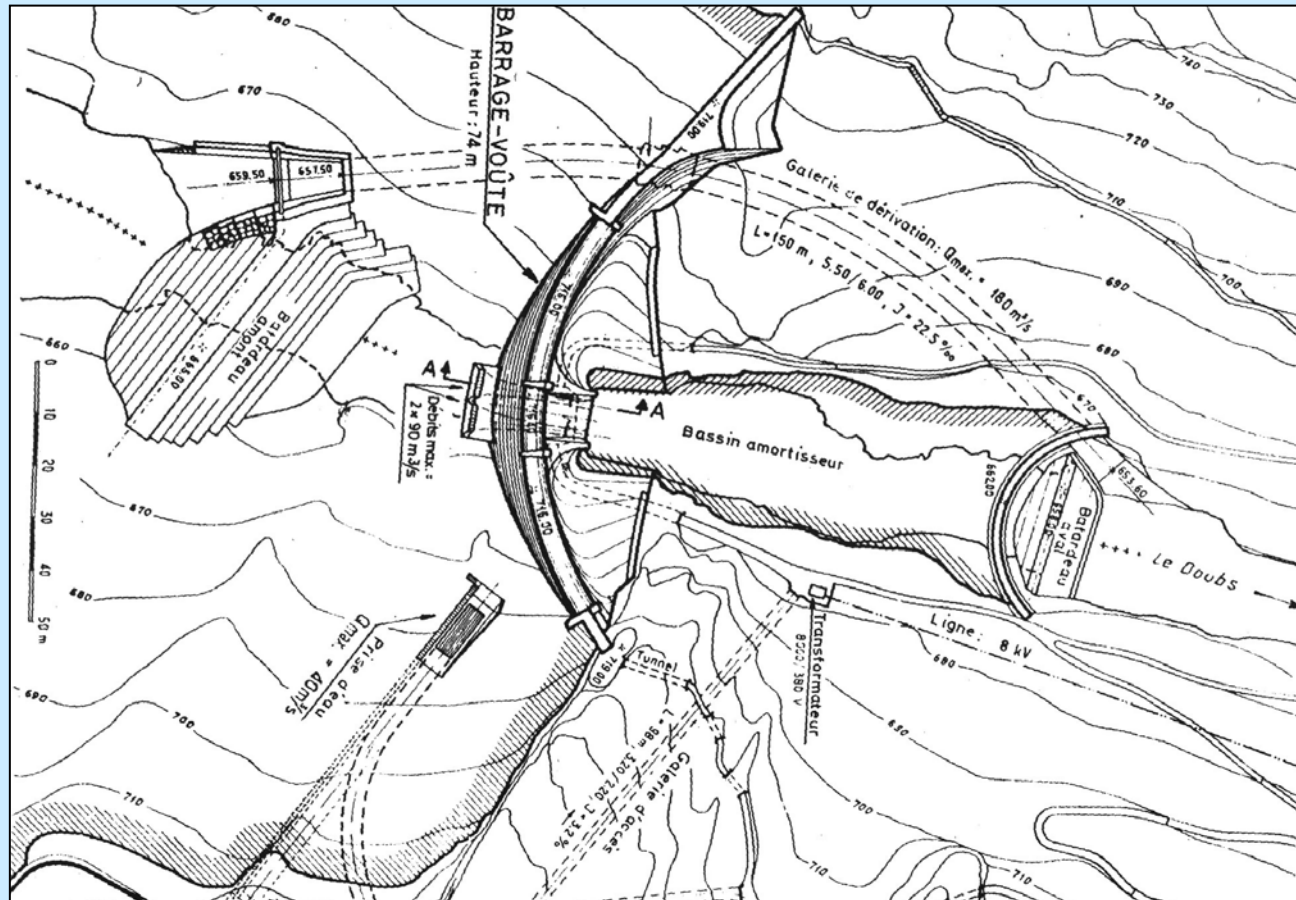
Barrage du Châtelot, France - Suisse Exemple de culée



Barrages en béton

Barrages - voûtes

Barrage du Châtelot, France - Suisse Exemple de culée





Châtelot, Neuchâtel, 74 m, 1953



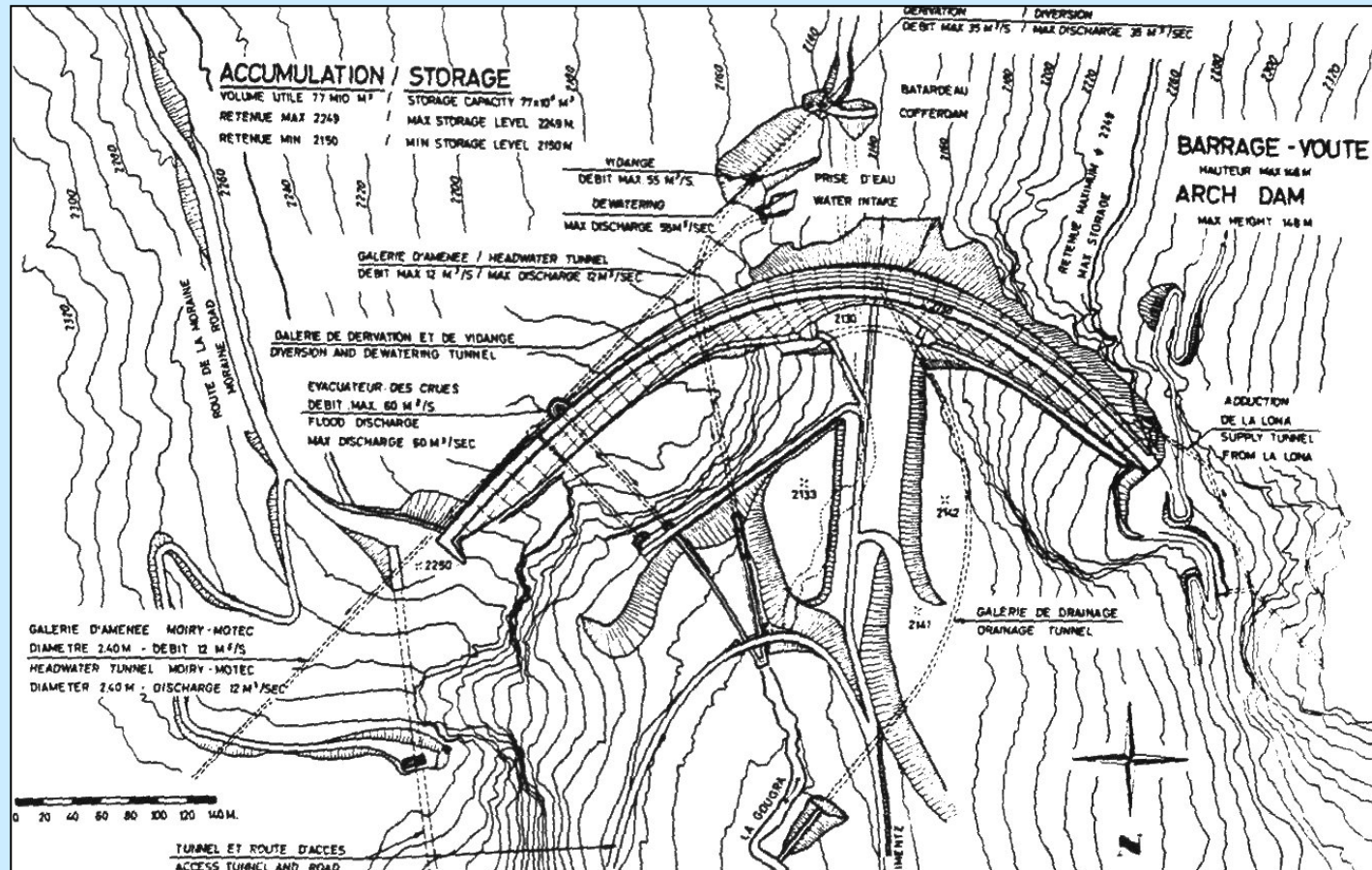
Châtelot, Neuchâtel, 74 m, 1953

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Barrage du Moiry, Suisse

Exemple de culée





Moiry, Valais, 148 m, 1958

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Barrages au Valais avec une hauteur plus grande que 60 m

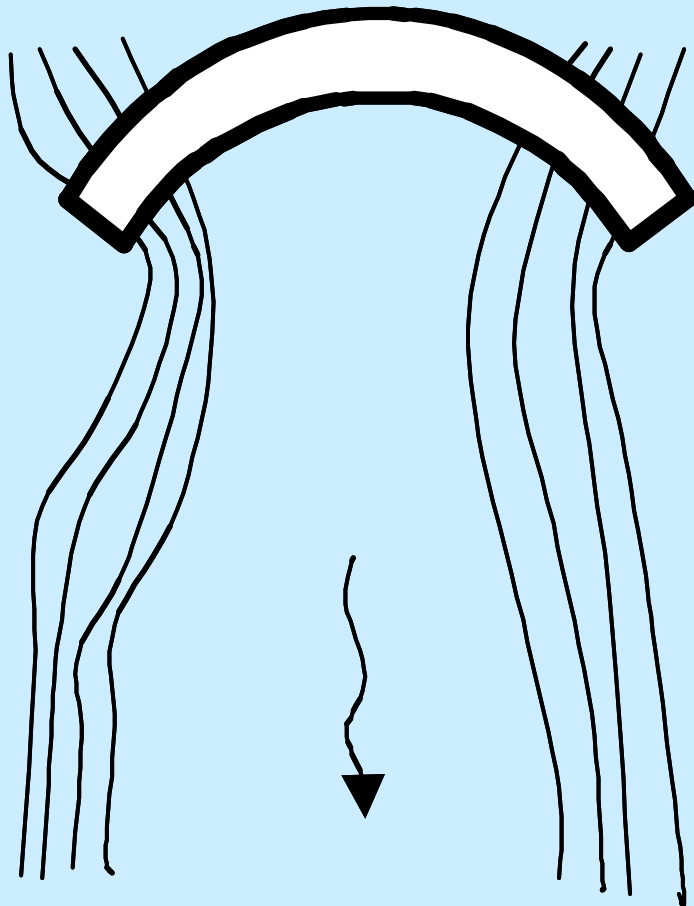
Barrage de Moiry: (barrage-voûte)

- Hauteur 148 m
- Volume de la retenue:
77 Mio m³
- Mise en service 1958

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.



Choix de l'emplacement - Critères géologiques



En règle générale, au passage d'une zone géologiquement favorable, l'érosion par le cours d'eau forme un verrou favorable à l'implantation d'un barrage-voûte.

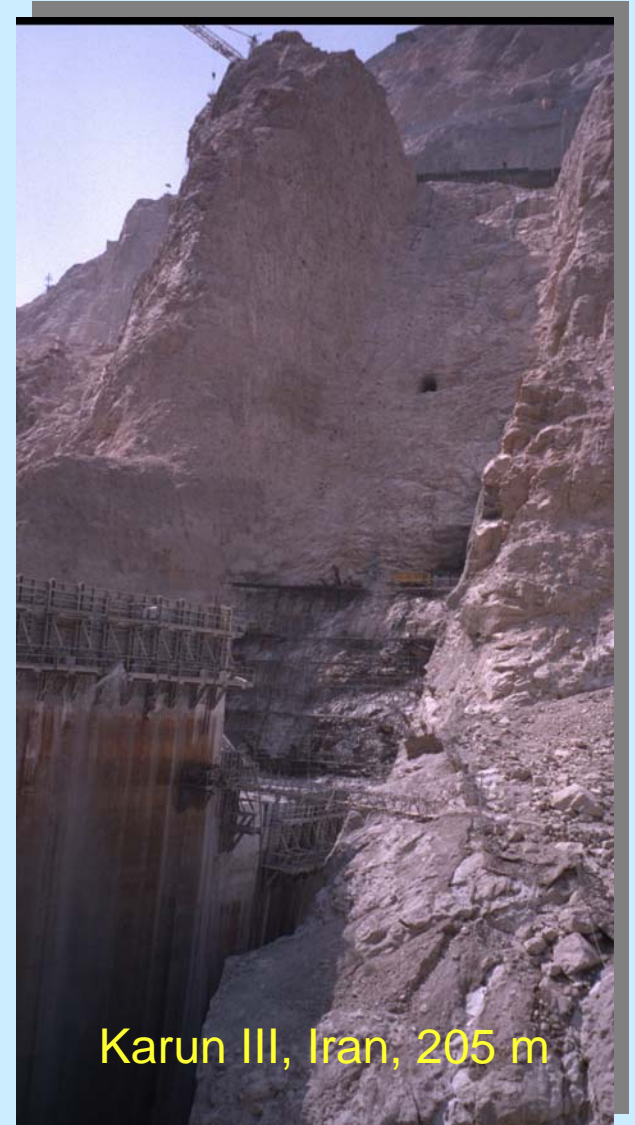
Le barrage sera implanté à l'amont du resserrement ou du verrou, de sorte que les efforts soient transmis à la fondation dans la zone de la meilleure qualité géomécanique

Barrages en béton

Barrages - voûtes



Zillergründl, Autriche

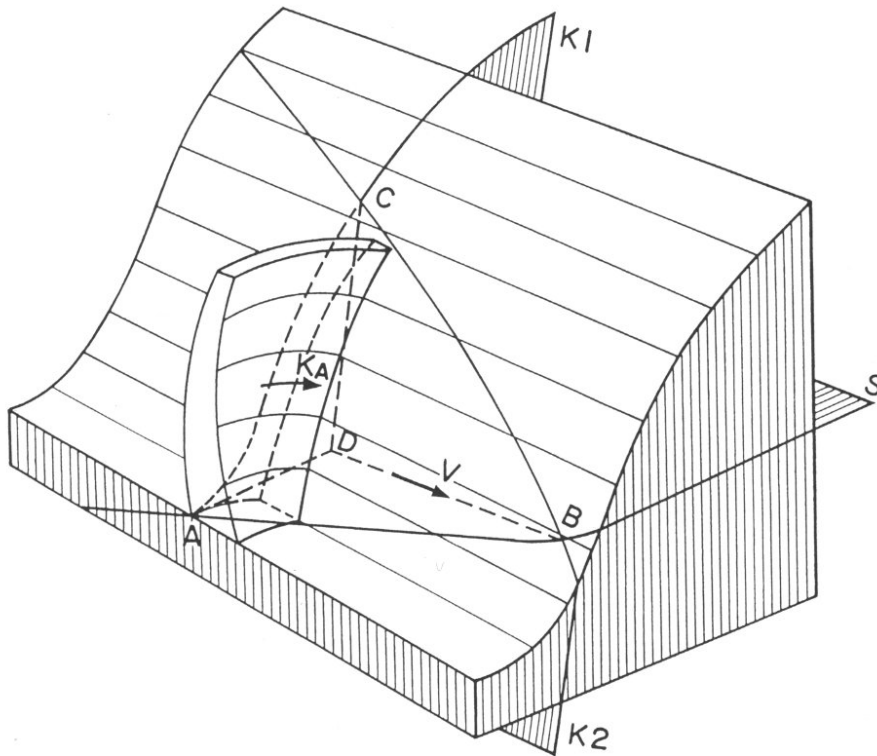


Karun III, Iran, 205 m

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Analyse de stabilité des appuis et de la fondation (calcul des dièdres)



K_1, K_2 : joints, diaclases

S : schistosité, stratification

K_A : force transmise par le barrage aux appuis

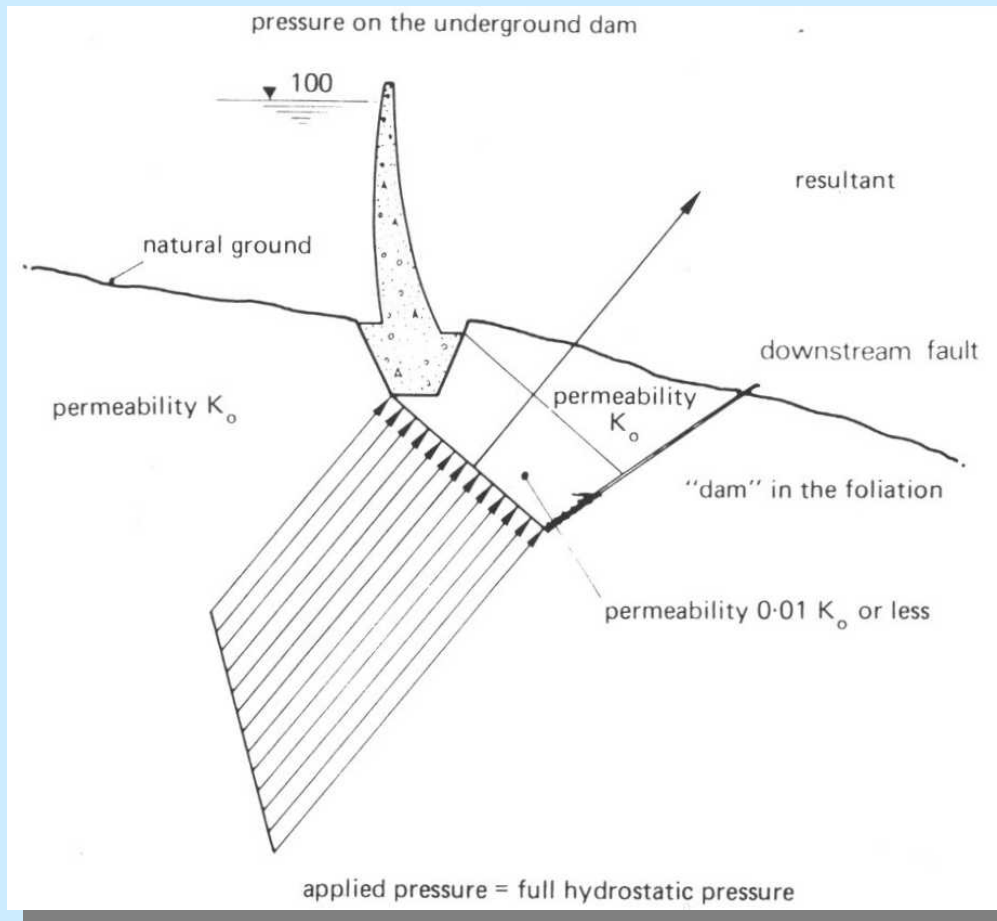
A-B-C-D : schéma de ruine possible (dièdre)

V : direction du glissement

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Stabilité des appuis et de la fondation



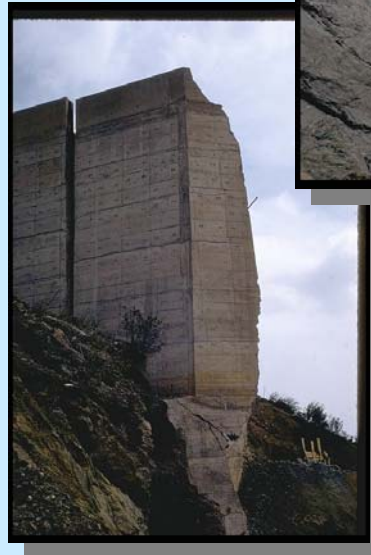
Instabilité des appuis et fondations des barrages-voûtes, pendant l'exploitation de la retenue, due à l'hétérogénéité de la perméabilité de la fondation

Exemple: Malpasset, $H = 66$
(France, près de Fréjus)
(2.12.1959)

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Stabilité des appuis et de la fondation



Malpasset, H = 66
(France, près de
Fréjus)
(2.12.1959)

Avantages et inconvénients des barrages-voûtes

- ⇒ Le volume de béton est réduit (l'épaisseur à la base est de l'ordre de 15 - 20 % de la hauteur, contre 75 - 80 % pour un barrage poids);
Le prix du m³ de béton, plus dosé en liant, n'est qu'un peu plus élevé, tout comme le prix du m² de coffrage.
- ⇒ Le système statique tridimensionnel hyperstatique induit une grande réserve de portance.
- ⇒ L'effet des sous-pressions est réduit du fait de l'épaisseur limitée de la fondation. Par contre, les gradients hydrauliques sous la fondation sont importants.

Avantages des barrages - voûtes

⇒ Volume en béton réduit

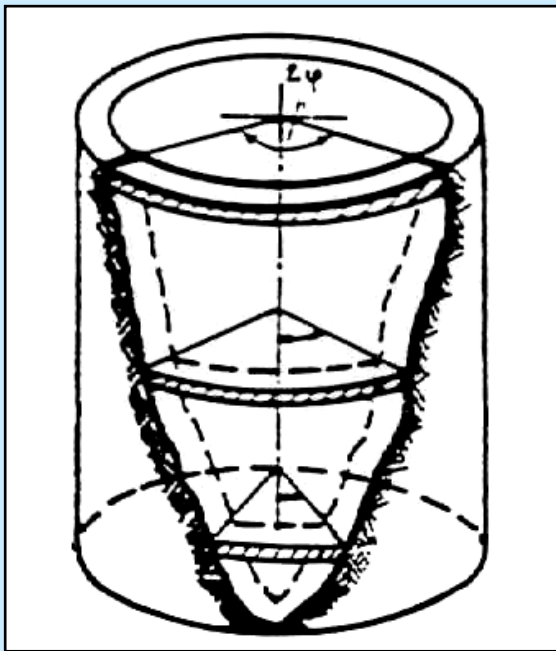
- ◆ épaisseur de la base 15 à 25 % de la hauteur (75 - 80 % pour un barrage poids)

⇒ Grande réserve de la portance

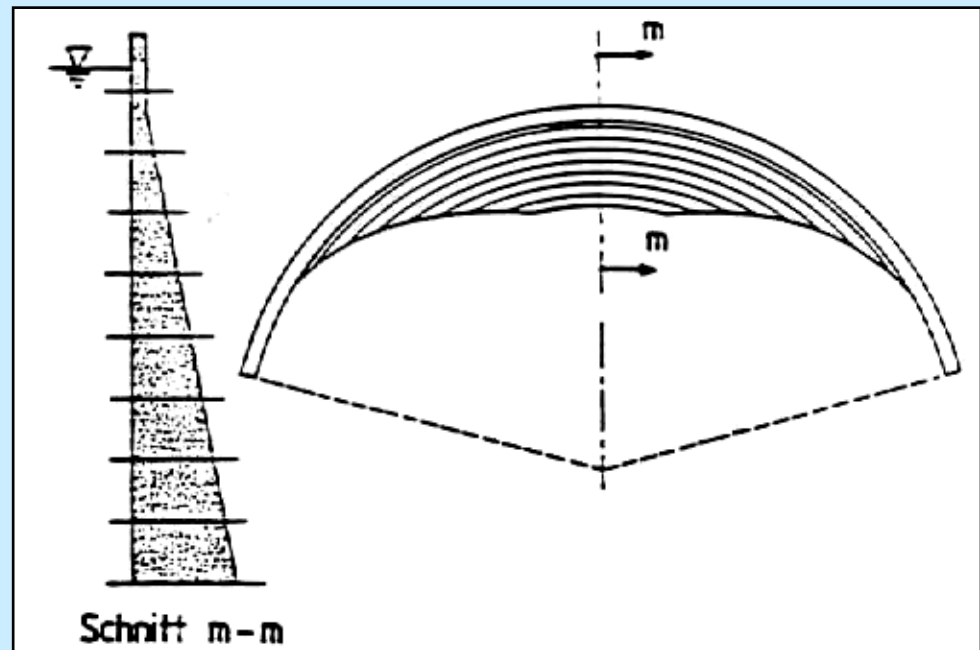
- ◆ hyperstaticité du système

⇒ Petites sous-pressions

Barrage voûte - cylindrique
(simple courbure)

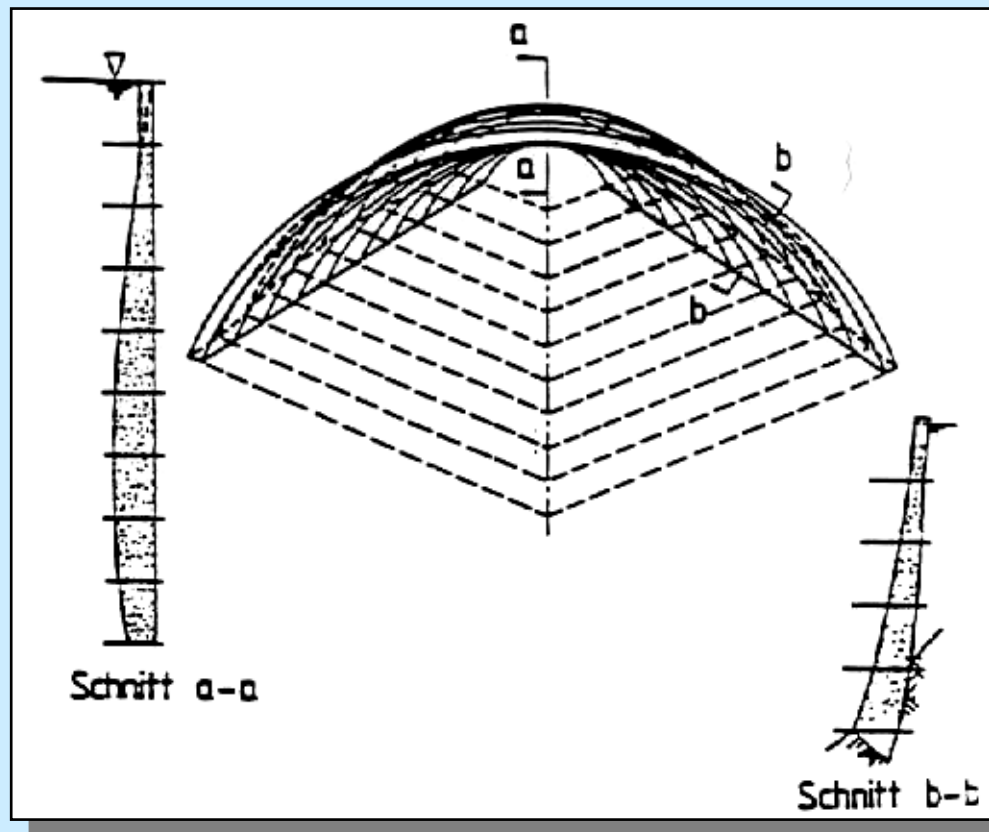


Principe



Voûte à rayon constant et épaisseur variable

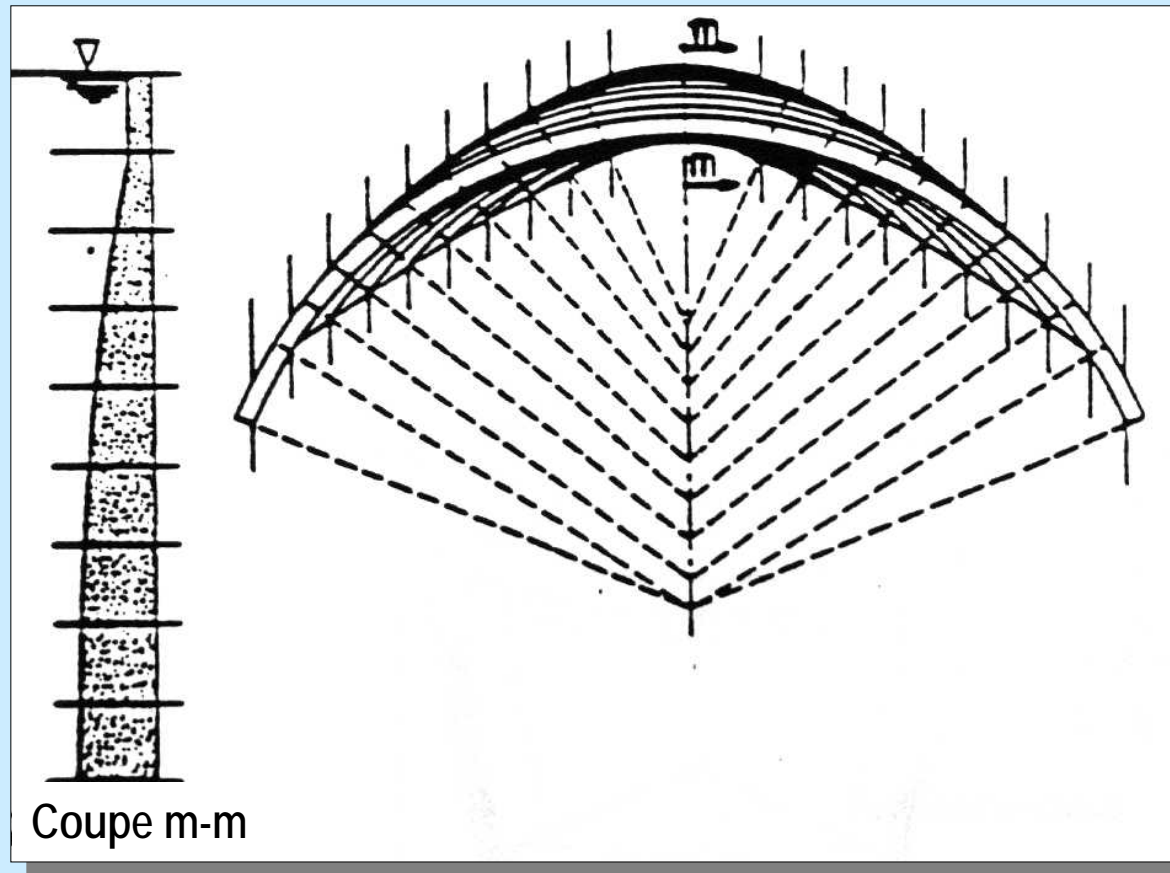
Barrage voûte à angle constant et rayon variable
(simple courbure)



Barrages en béton

Barrages - voûtes

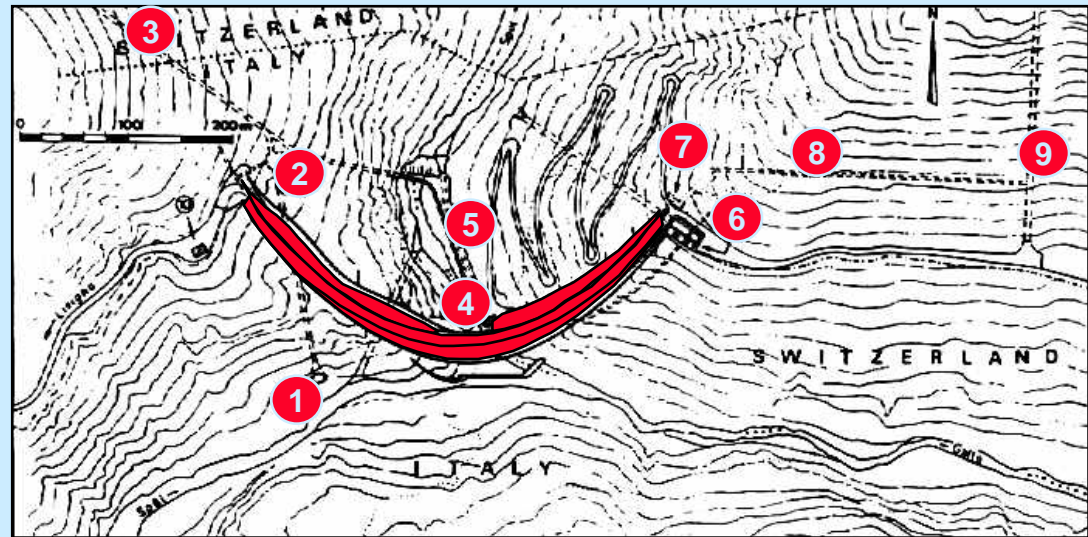
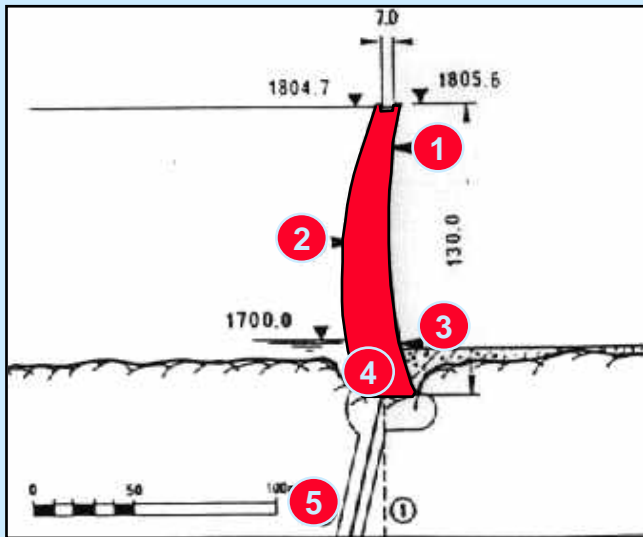
Barrage voûte à angle et rayon variable (simple courbure)



Barrages en béton

Barrages - voûtes

Barrage voûte à double courbure (Punt dal Gall, Suisse)



- 1 Puits de pendule
- 2 Galerie de contrôle
- 3 Galerie d'injections
- 4 Galerie de drainage
- 5 Ecran d'étanchéité

- 1 Prise d'eau
- 2 Chambre de vannes
- 3 Galerie en charge
- 4 Contrôle de dotation

- 5 Vidange de fond
- 6 Evacuateur de crues
- 7 Caverne de commande
- 8 Galerie de liaison
- 9 Galerie d'accès

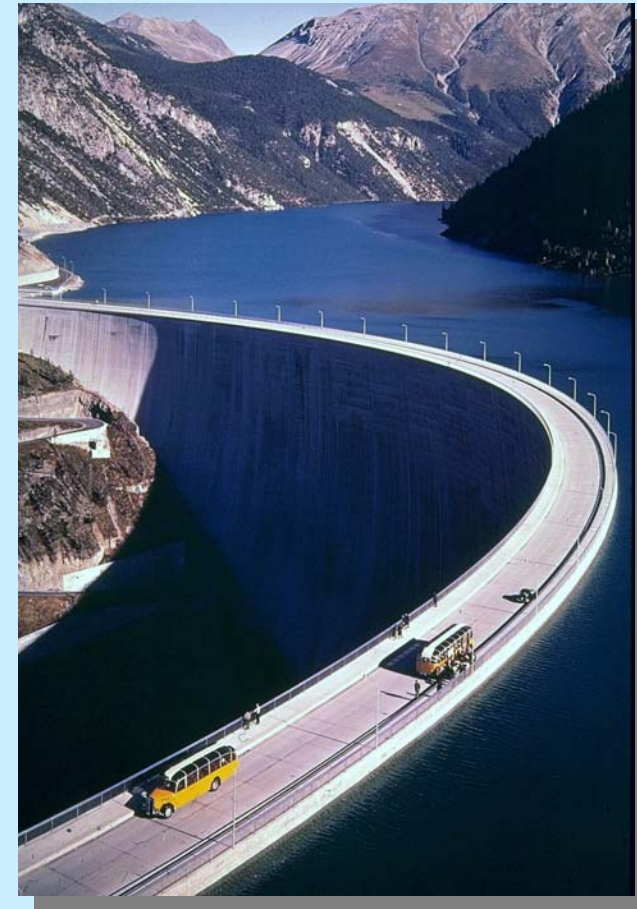


Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968

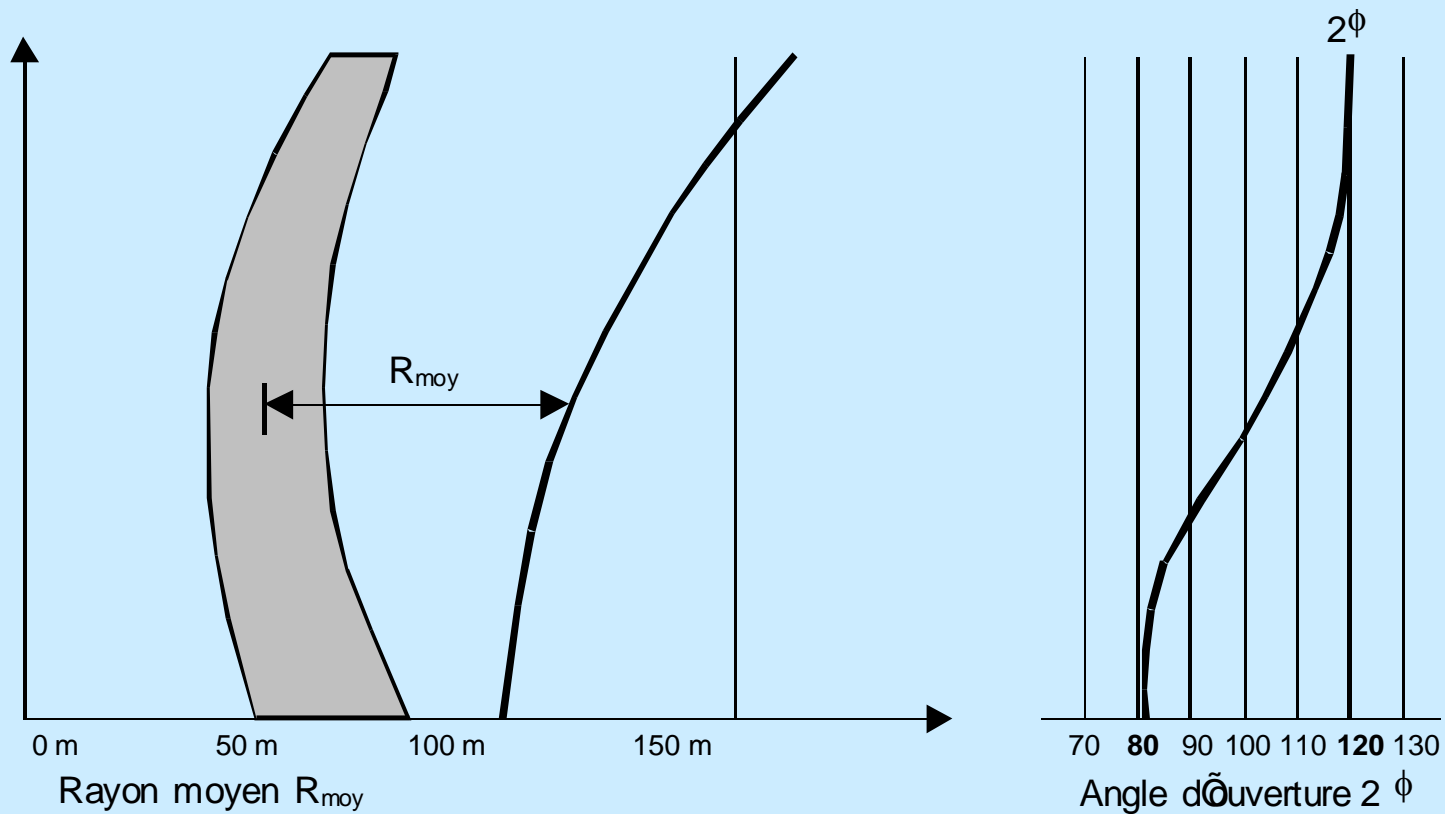
Barrages en béton

Barrages - voûtes

Barrage voûte à double courbure (Punt dal Gall, Suisse, 130 m, 1968)



Barrages-voûtes à double courbure
Rayon et angles d'ouverture des arc



Choix de la forme initiale - hauteur du barrage

⇒ Critères influençant la hauteur du barrage

- ◆ topographie
- ◆ géologie
- ◆ hydrologie
- ◆ sécurité
- ◆ économie

⇒ hauteur optimale = la hauteur la plus économique est obtenue par une analyse des charges et rendements annuels

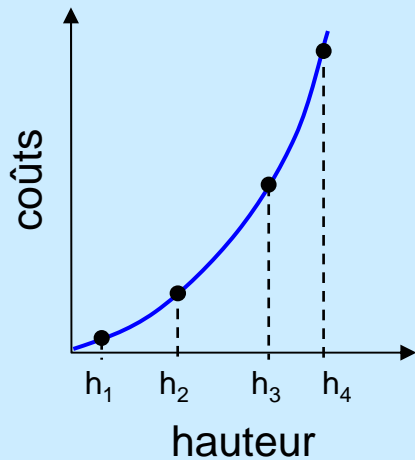
- ◆ charges annuelles :
 - ✓ amortissement annuels des coûts de construction
 - ✓ intérêts pour le capital investi
 - ✓ frais d'exploitation et d'entretien
- ◆ rendements annuels :
 - ✓ production d'énergie
 - ✓ production alimentaire due à l'irrigation
 - ✓ protection contre les crues etc.

Barrages en béton

Barrages - voûtes

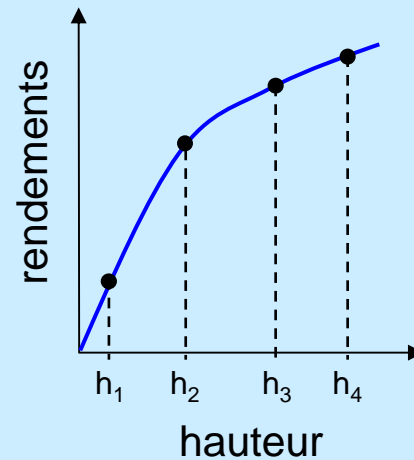
Choix de la forme initiale - hauteur du barrage

Coûts (charges) annuels



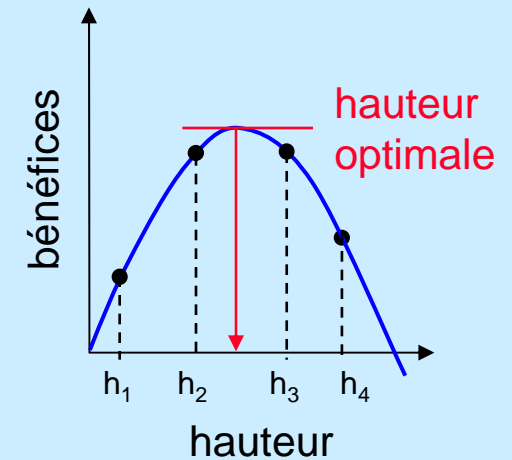
- ✓ amortissements annuels des coûts de construction
- ✓ intérêts pour le capital investi
- ✓ frais d'exploitation et d'entretien

Rendements annuels

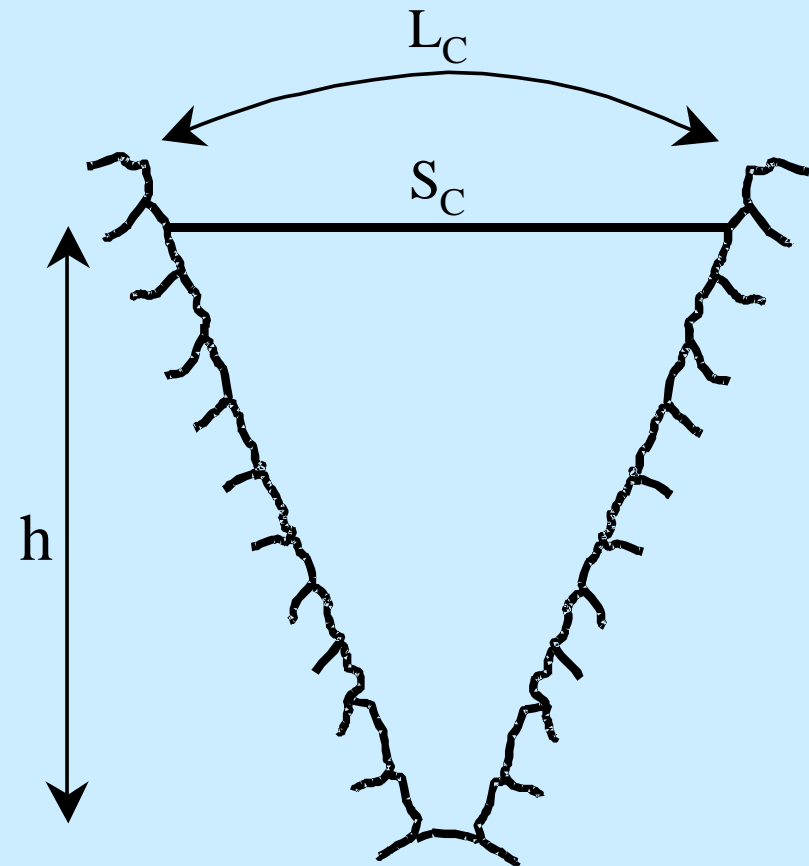
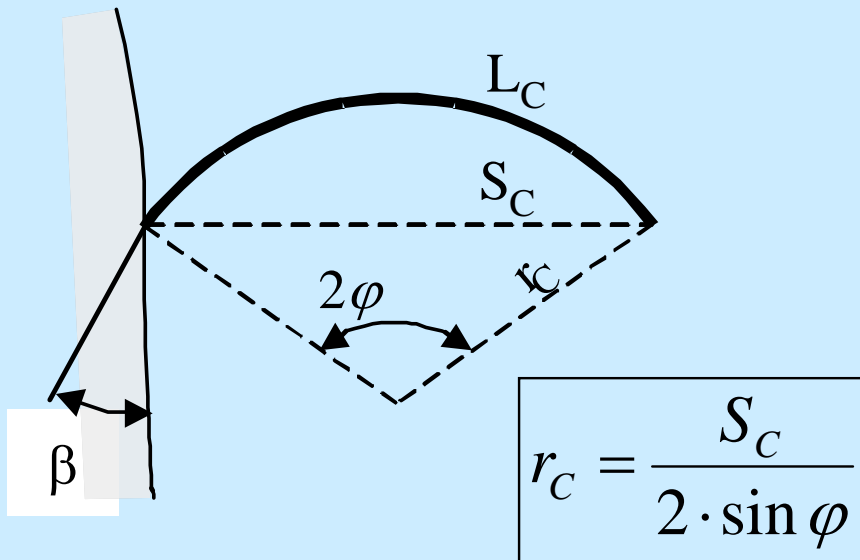


- ✓ production d'énergie
- ✓ production alimentaire due à l'irrigation
- ✓ protection contre les crues etc.

Bénéfices annuels



Forme des sections horizontales (arcs) - Définitions



Forme des sections horizontales (arcs)

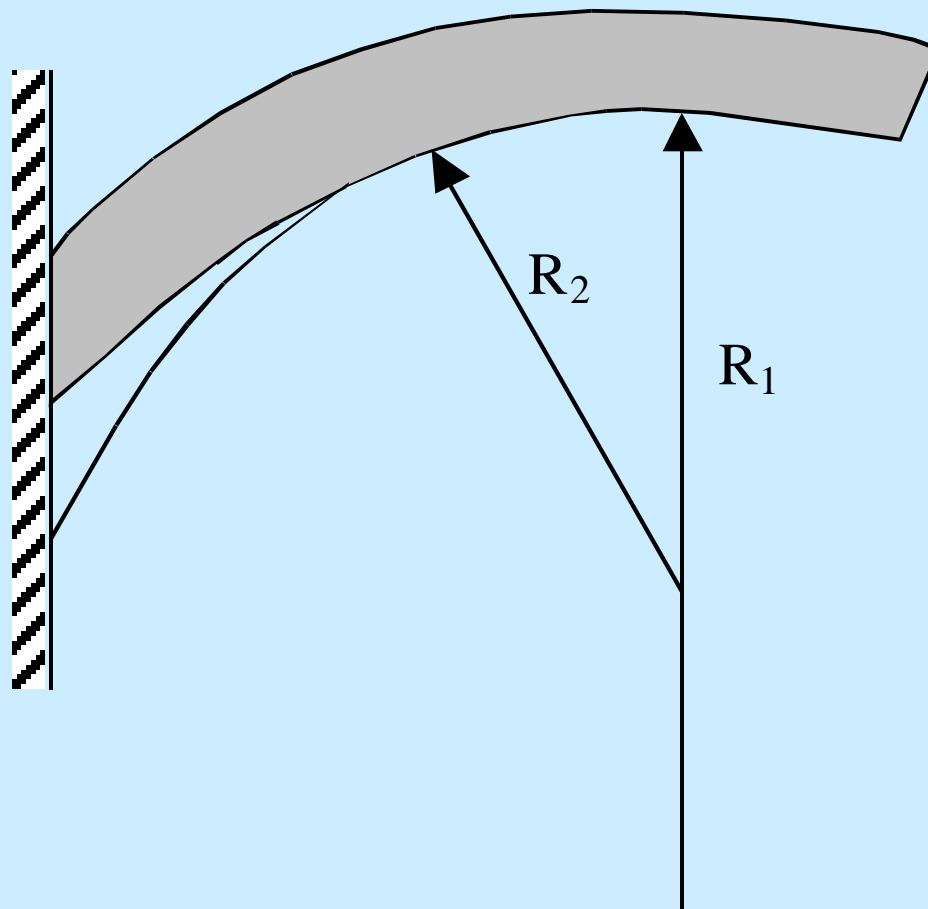
⇒ Ouverture de l'arc (arcs circulaires)

- ◆ couronnement 120° à 130°
- ◆ à mi-hauteur 85°
- ◆ à la base 80°

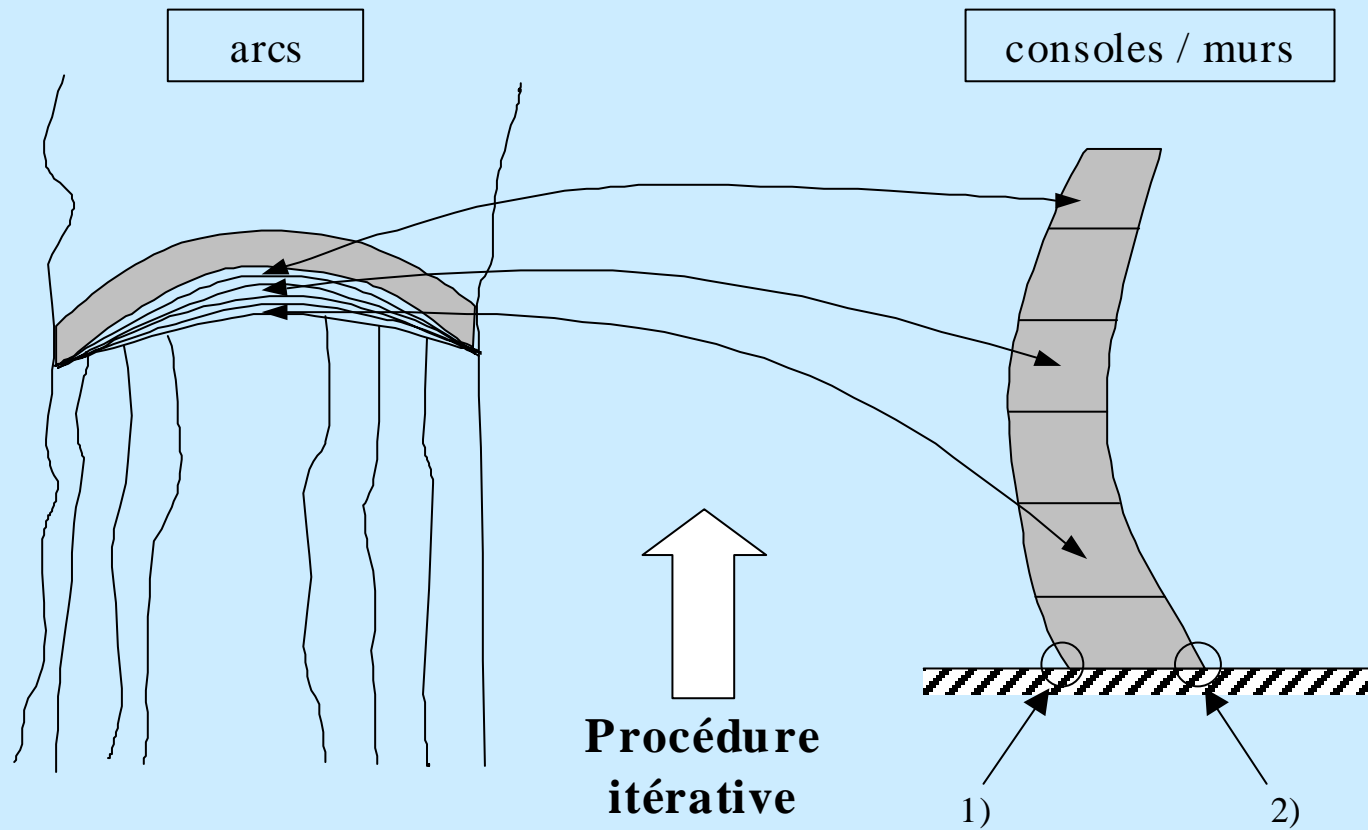
⇒ Géométrie des arcs

- ◆ arcs circulaires (l'angle de l'arc avec le rocher sain doit être au minimum 30°)
- ◆ Arcs circulaires combinés (arc de rive)
- ◆ arcs de parabole
- ◆ arcs d'ellipse
- ◆ arcs de spirale logarithmique

Arcs circulaires



Forme des sections verticales

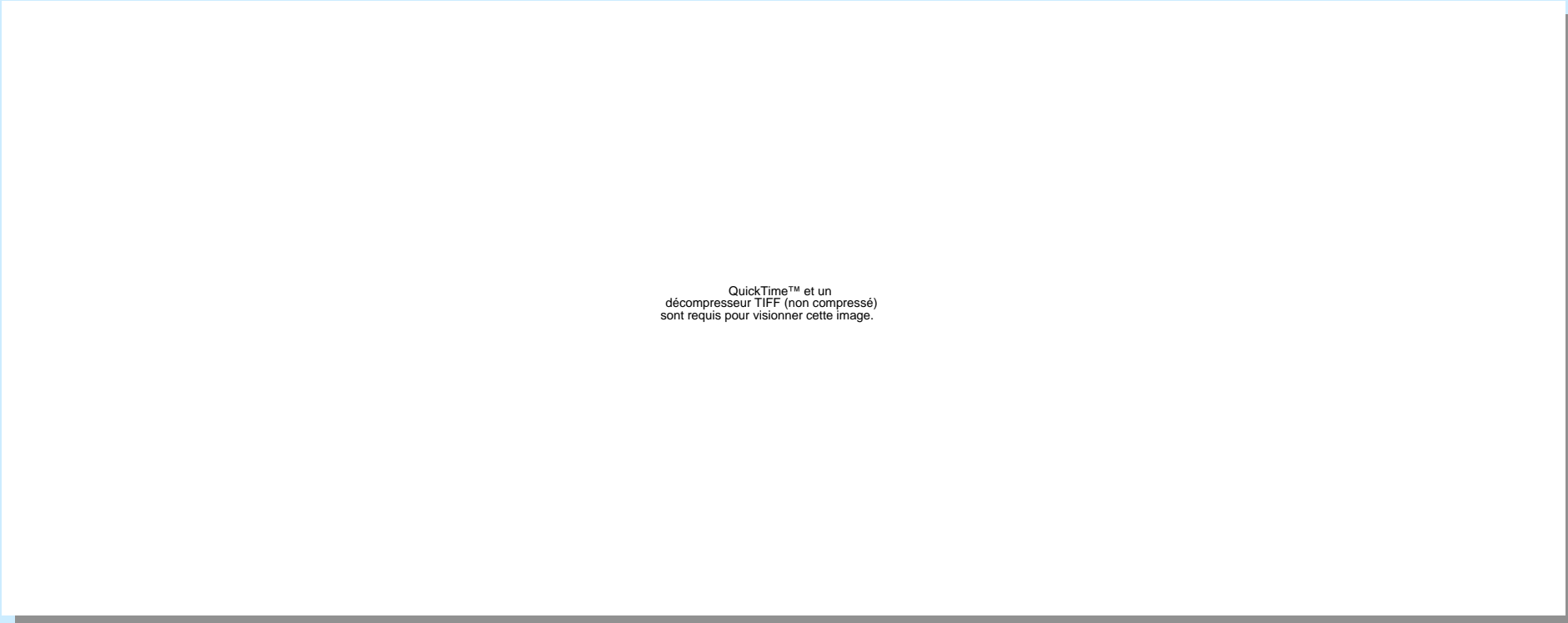


Choix de la forme initiale

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.



Choix de la forme initiale



QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.



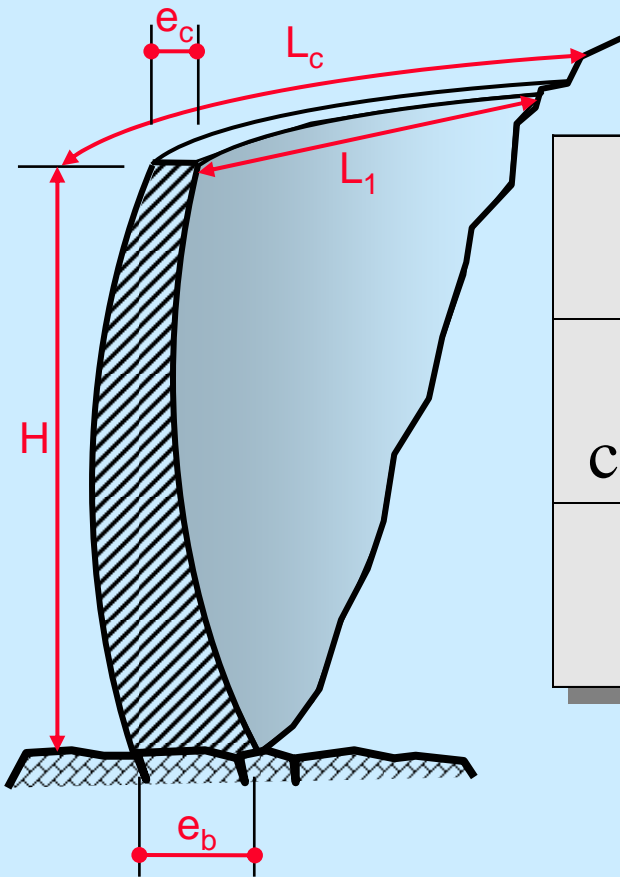
Choix de la forme initiale

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Epaisseur de la console à la section principale

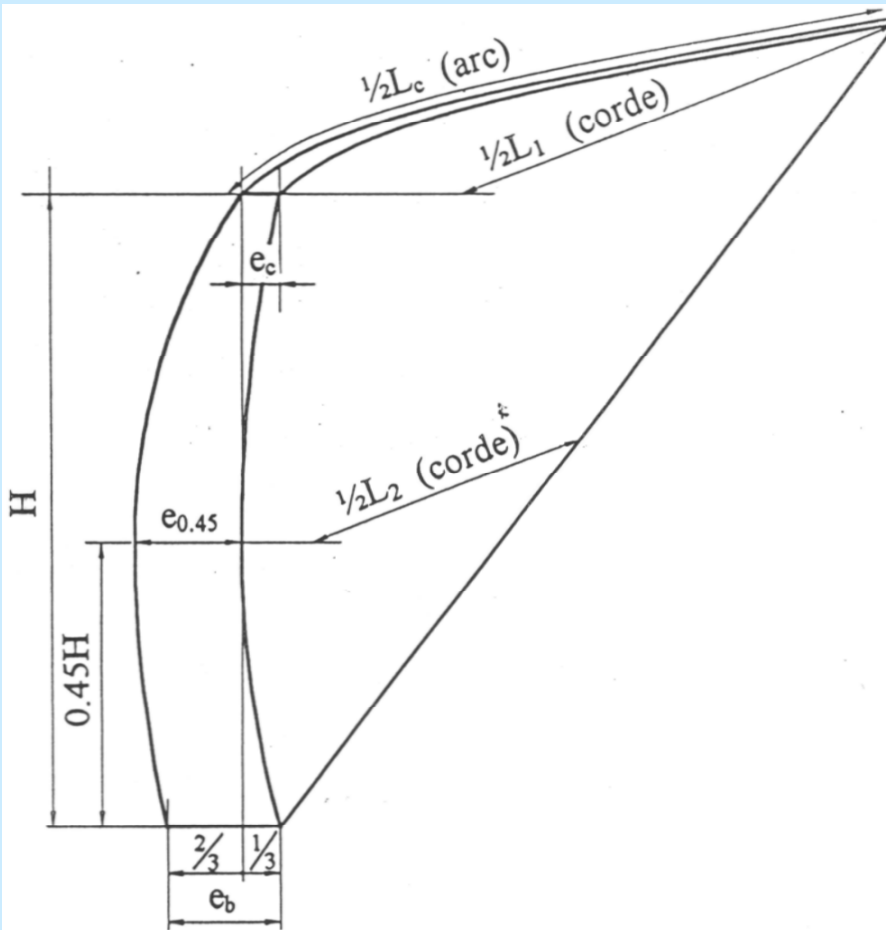


Epaisseur	Vallée large en U	Vallée étroite en V
au couronnement	$e_c = \frac{H}{15}$	$e_c = \frac{H}{20}$
la base	$e_b = \frac{L_c}{20}$	$e_b = \frac{L_c}{15}$

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Epaisseur de la console à la section principale



US Bureau of Reclamation

$$e_c = 0.01 * (H + 1.2 * L_1)$$

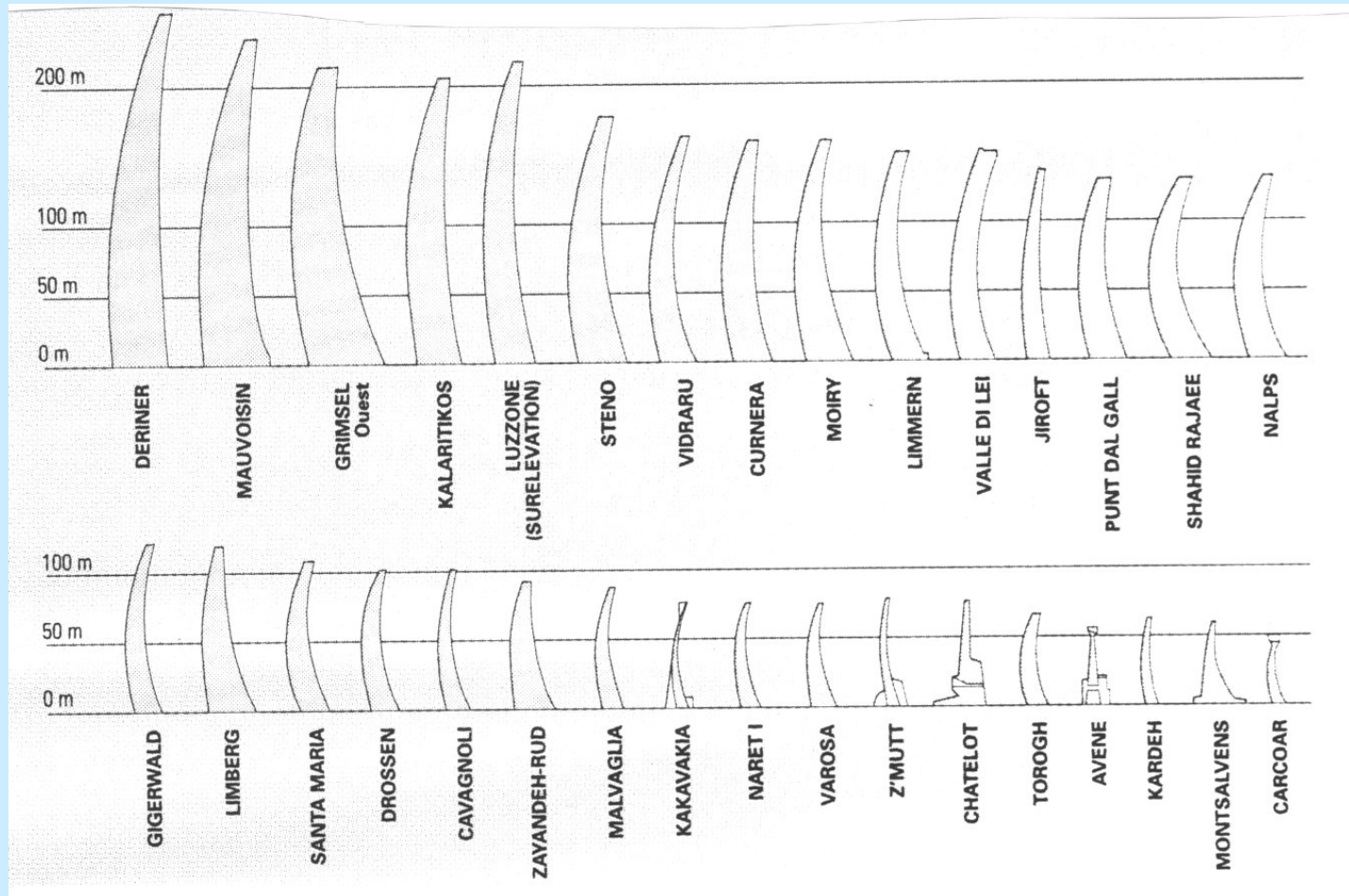
$$e_{0.45} = 0.95 * e_b$$

$$e_b = \left[0.012 * H * L_1 * L_2 * \left(\frac{H}{122} \right)^{\left(\frac{H}{122} \right)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Barrages en béton

Barrages - voûtes

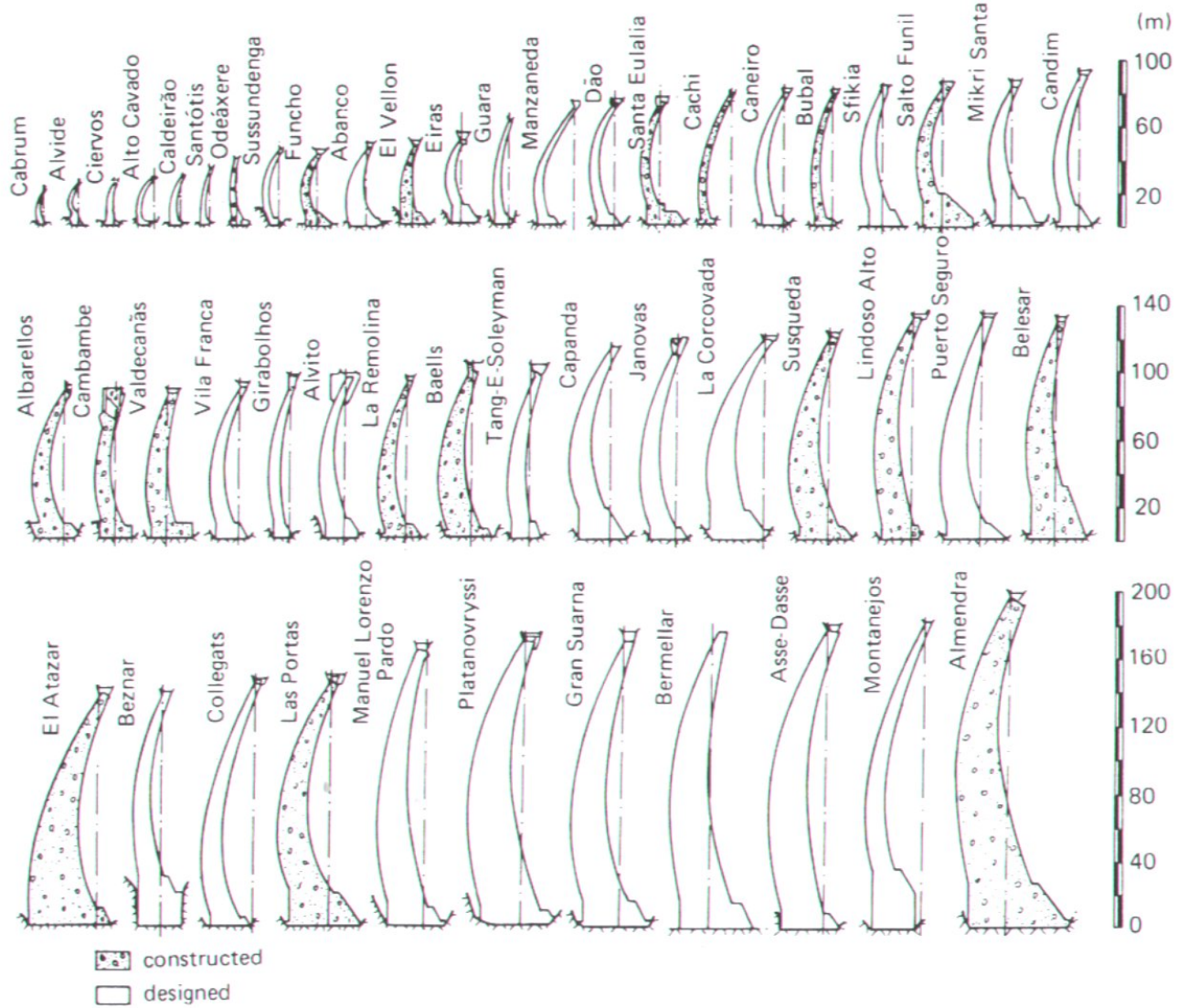
Exemples de formes des consoles à clé pour des barrages conçus par des ingénieurs suisses



Brochure Stucky
Ingénieurs-Conseils SA

Barrages en béton

Barrages - voûtes



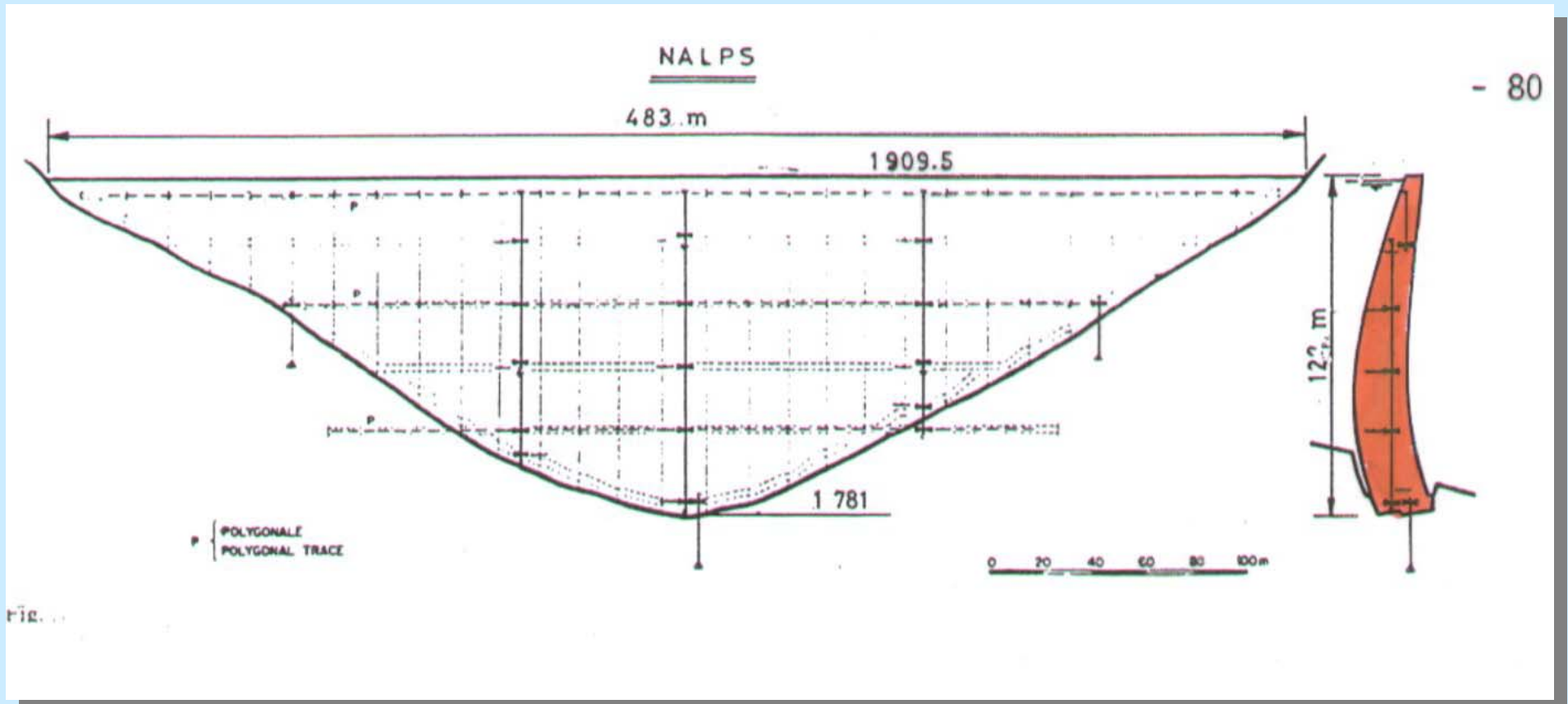
Exemples de formes des consoles à clé « école » espagnole

Fig. 2. Various profiles of arch dams designed and constructed.

Barrages en béton

Barrages - voûtes

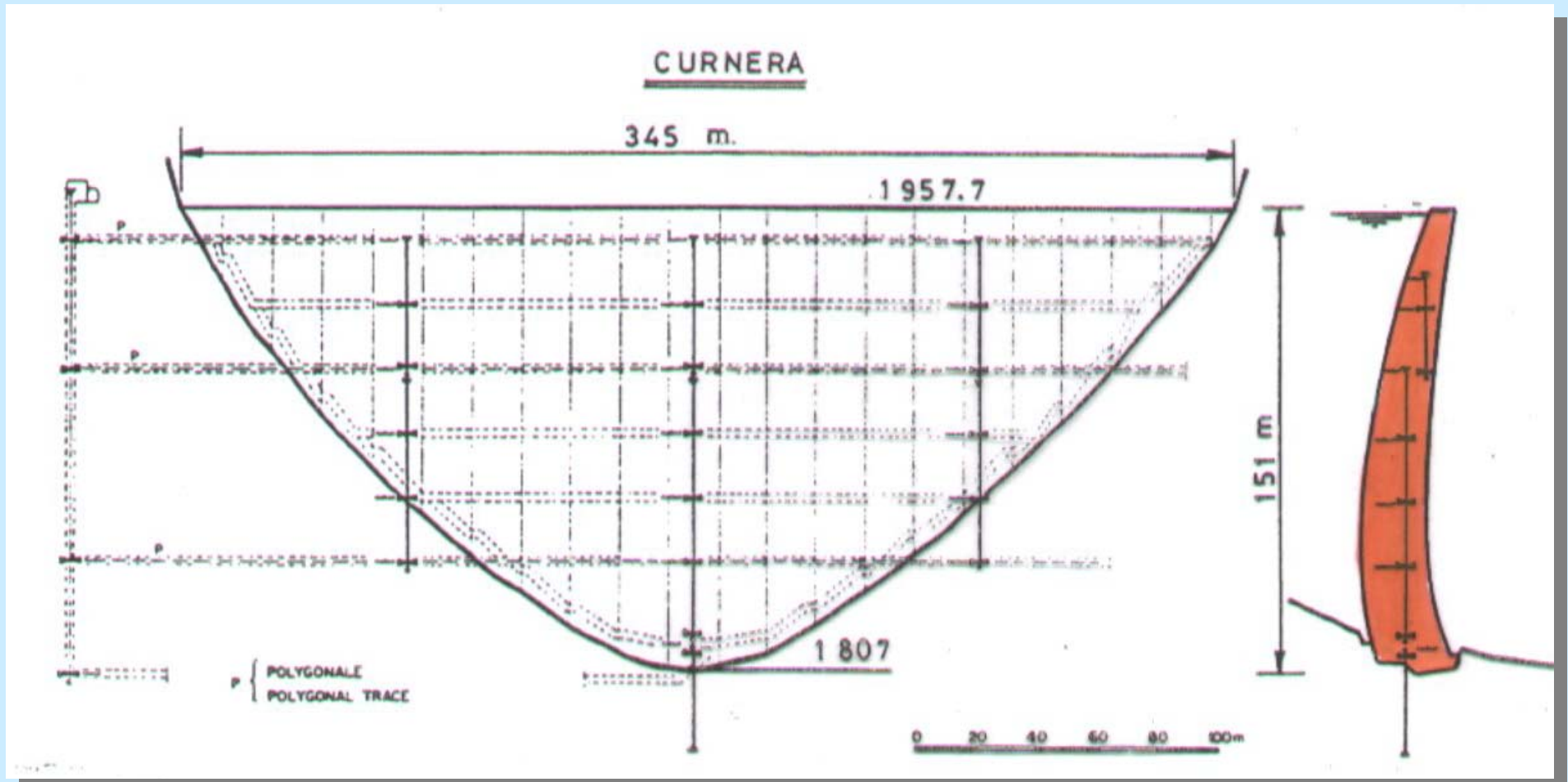
Barrage de Nalps, Grison, 127 m, 1963



Barrages en béton

Barrages - voûtes

Curnera, Grison, 153 m, 1966



Exemple d'un barrage-voûte à double courbure: Emosson

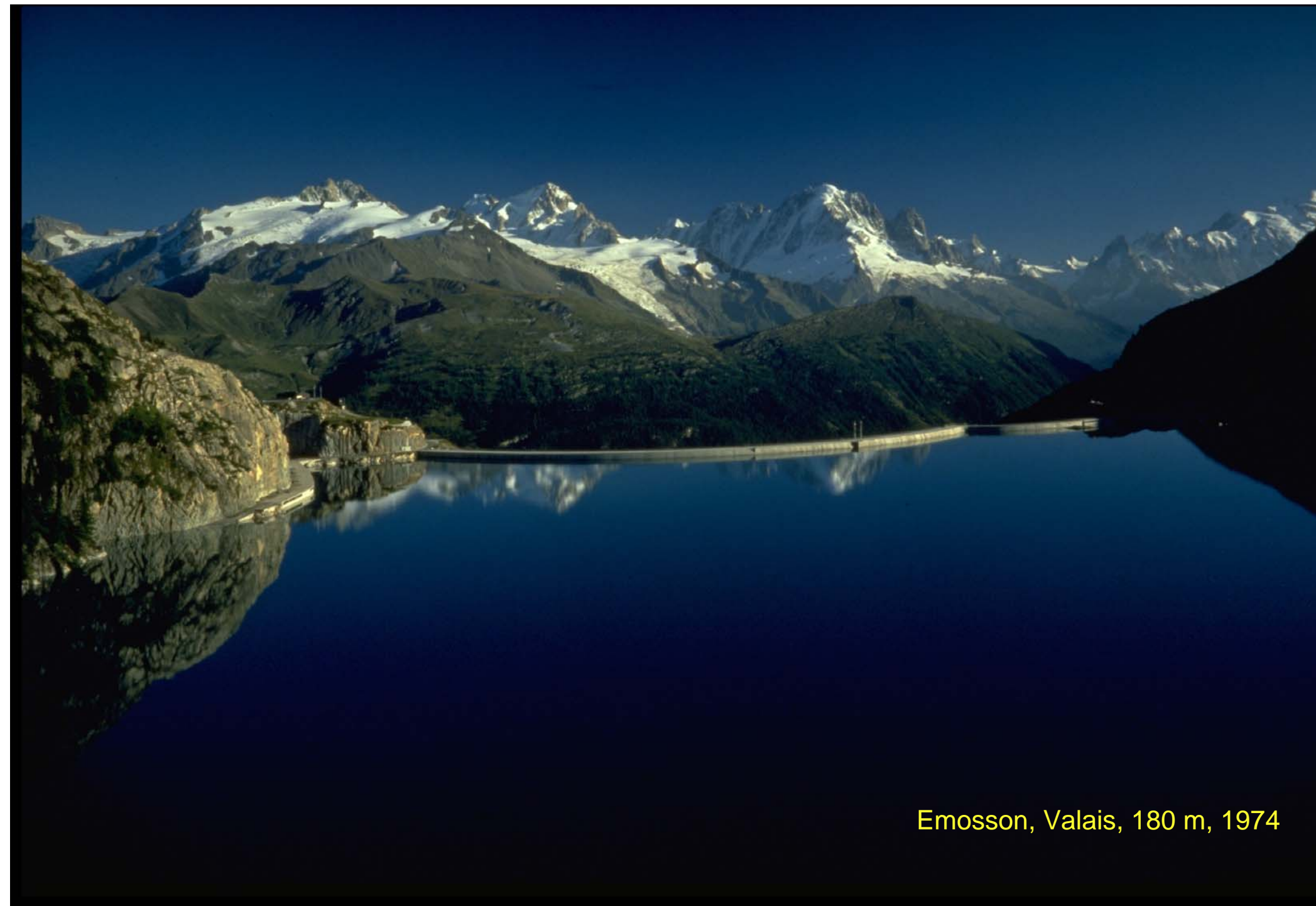
Barrage de Emosson: (barrage-voûte)

- Hauteur 180 m
- Volume de la retenue:
225 Mio m³
- Mise en service 1974

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.



Emosson, Valais, 180 m, 1974



Eposson, Valais, 180 m, 1974



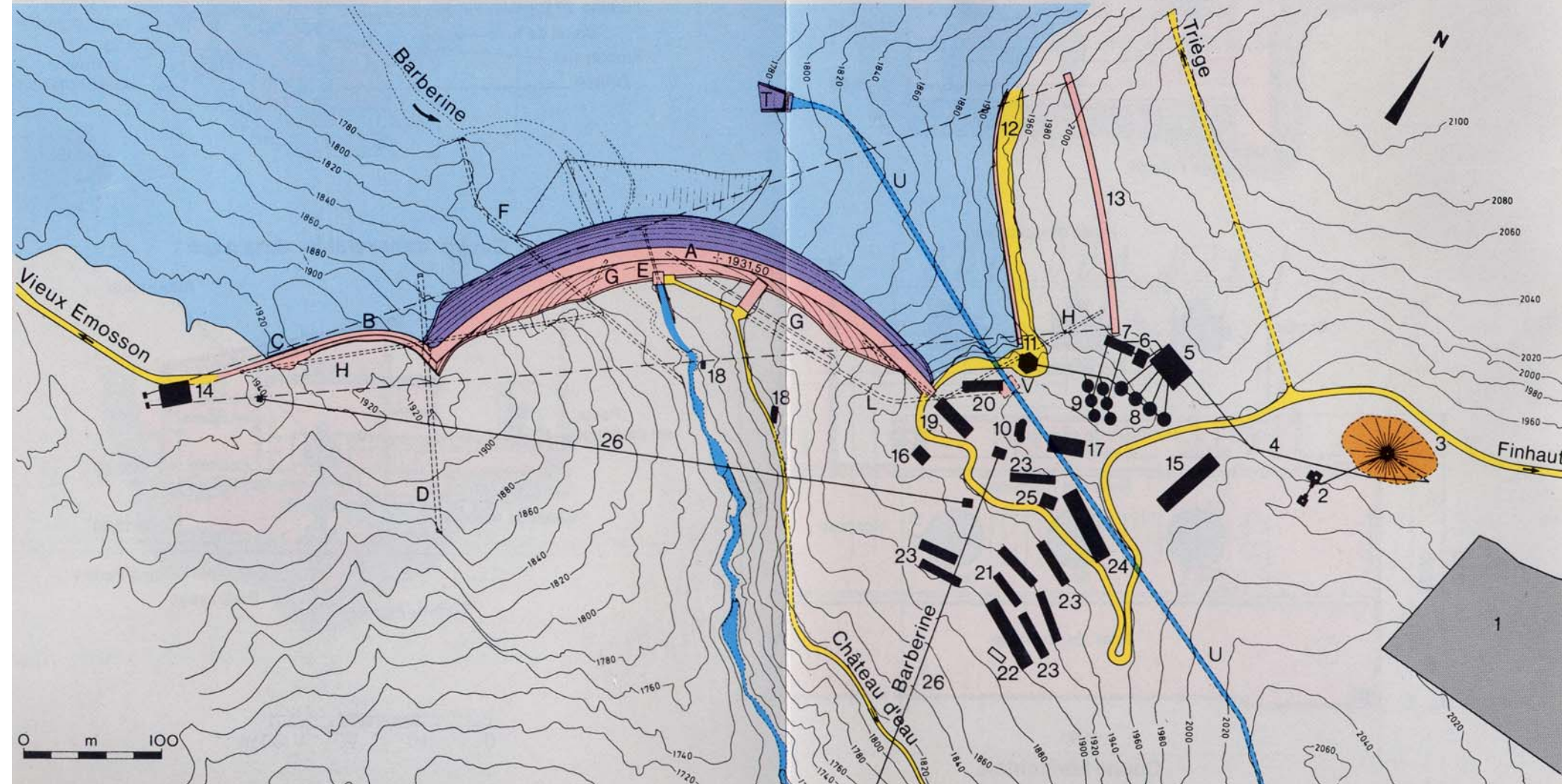
Emosson, Valais, 180 m, 1974

Barrages en béton

Barrages - voûtes

Exemple d'un barrage-voûte à double courbure: Emosson

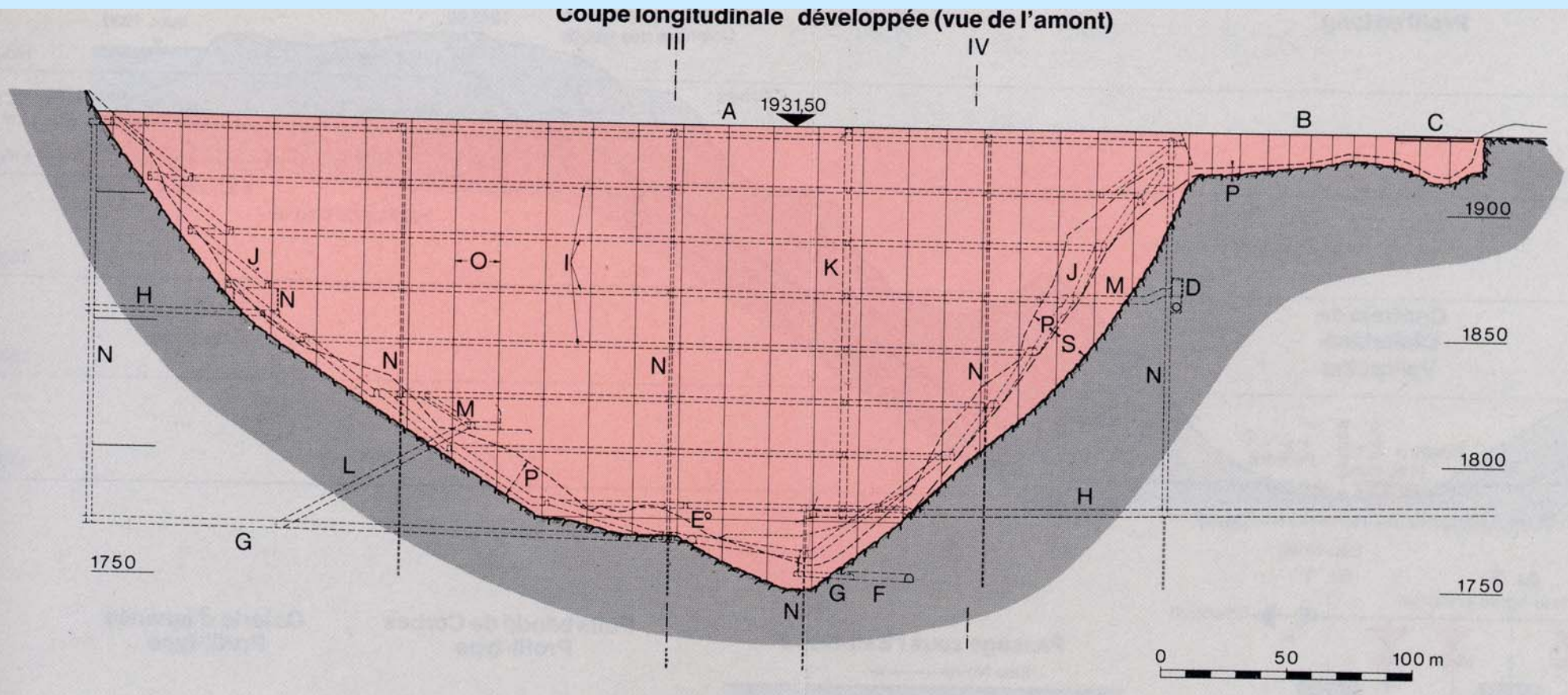
Situation du barrage et installations de chantier.



Barrages en béton

Barrages - voûtes

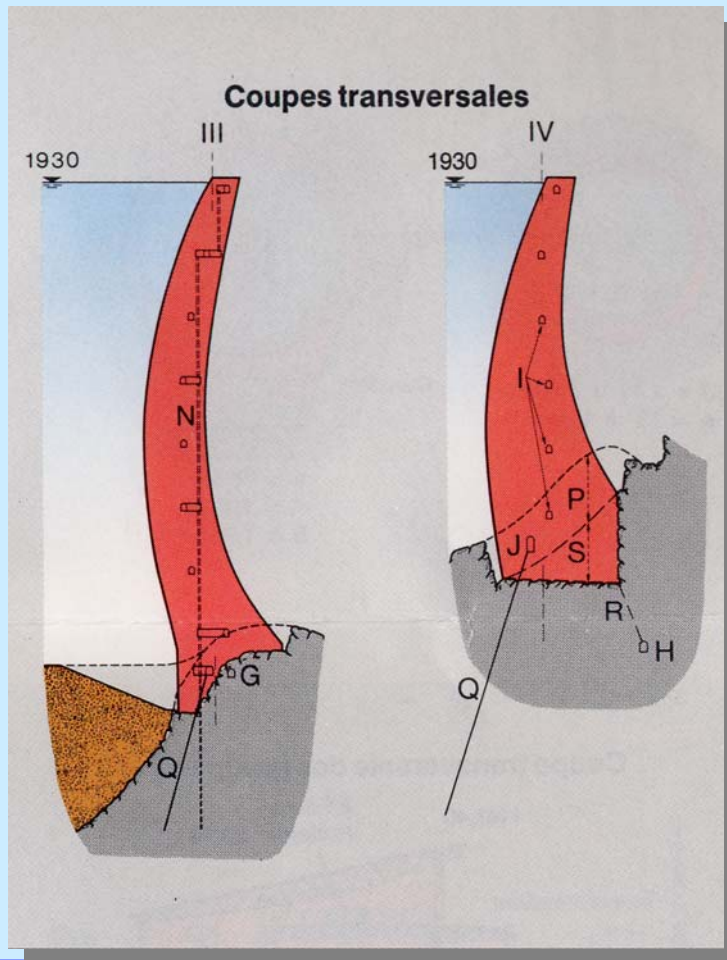
Exemple d'un barrage-voûte à double courbure: Emosson



Barrages en béton

Barrages - voûtes

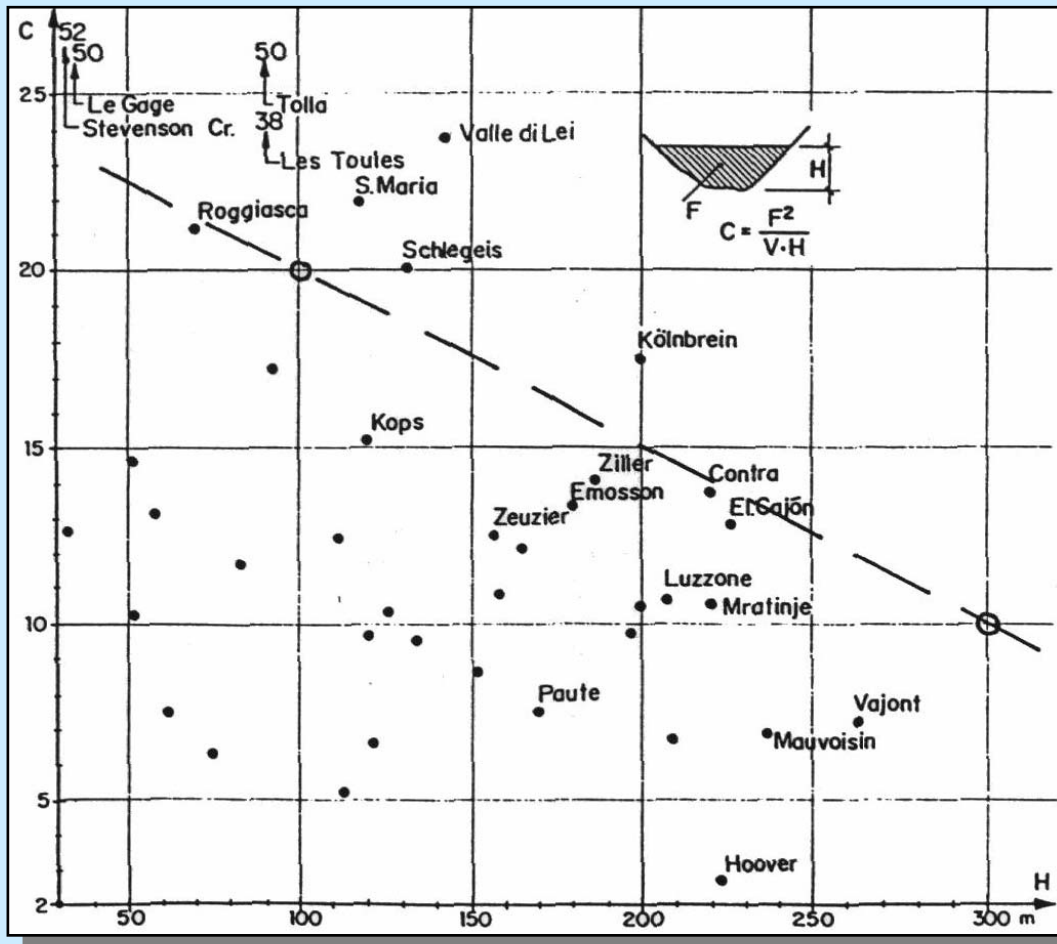
Exemple d'un barrage-voûte à double courbure: Emosson



Barrages en béton

Barrages - voûtes

Coefficient d'élançement (Lombardi)



$$C = F^2 / V \cdot H$$

F:
Surface moyenne
du barrage

V:
Volume du béton

H:
Hauteur sur
fondation (console
à la clé)

Barrages en béton

Barrages - voûtes



Les Toules, Valais, 86 m,
1963, $L_c = 460$ m



Valle di Lei, Grison, 141 m, 1961

Valle di Lei, Grison, 141 m, 1961



Barrages en béton

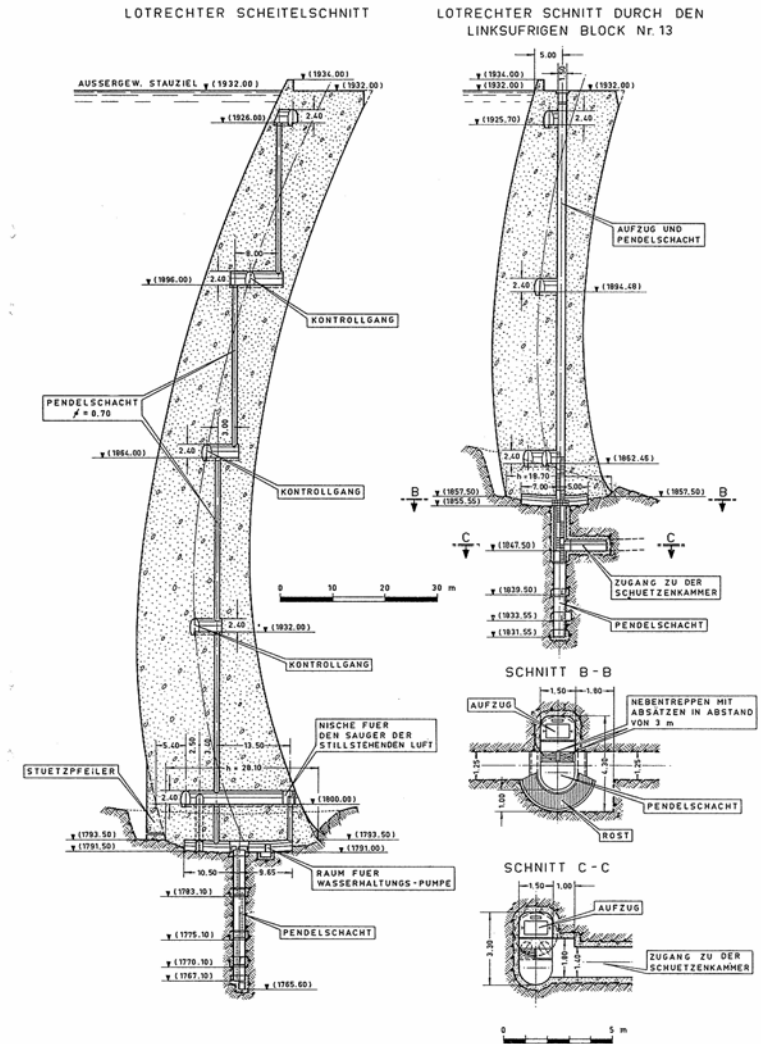
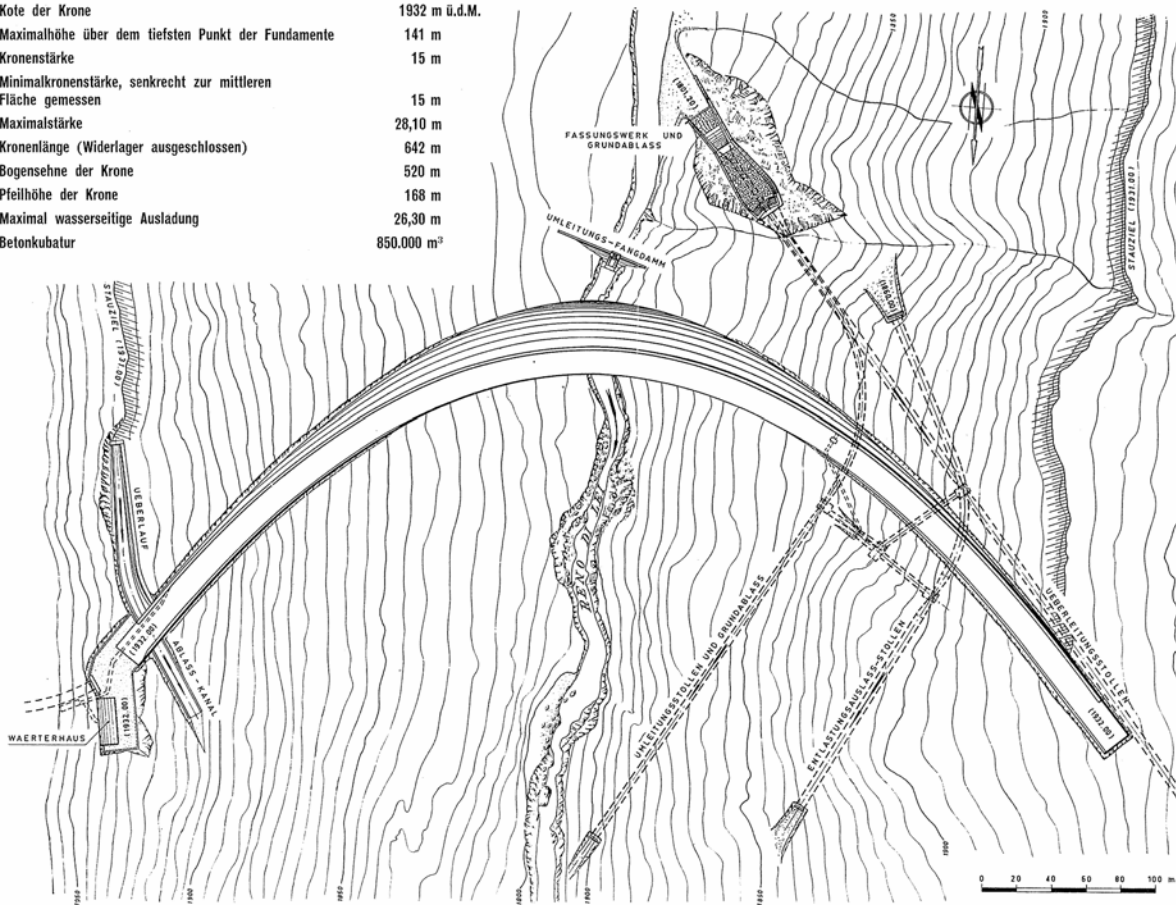
Barrages - voûtes

Valle di Lei, Grison, 141 m, 1961

STAUMAUER - LAGEPLAN

MERKMALE

Kote der Krone	1932 m ü.d.M.
Maximalhöhe über dem tiefsten Punkt der Fundamente	141 m
Kronenstärke	15 m
Minimalkronenstärke, senkrecht zur mittleren Fläche gemessen	15 m
Maximalstärke	28,10 m
Kronenlänge (Widerlager ausgeschlossen)	642 m
Bogensenne der Krone	520 m
Pfeilhöhe der Krone	168 m
Maximal wasserseitige Ausladung	26,30 m
Betonkubatur	850.000 m ³





Santa Maria, Grison, 117 m, 1968

Schiffenen, Fribourg, 47 m, 1963



An aerial photograph of the Gigerwald Dam in St. Gall, Switzerland. The dam is a large concrete structure with water cascading over its spillways. Behind the dam is a large reservoir. The surrounding landscape is rugged, with steep, rocky mountainsides and dense evergreen forests. In the background, snow-capped mountain peaks are visible under a clear blue sky. A road or railway line is visible on the right side of the image, winding through the valley.

Gigerwald, St. Gall, 147 m, 1976

Gigerwald, St. Gall, 147 m, 1976



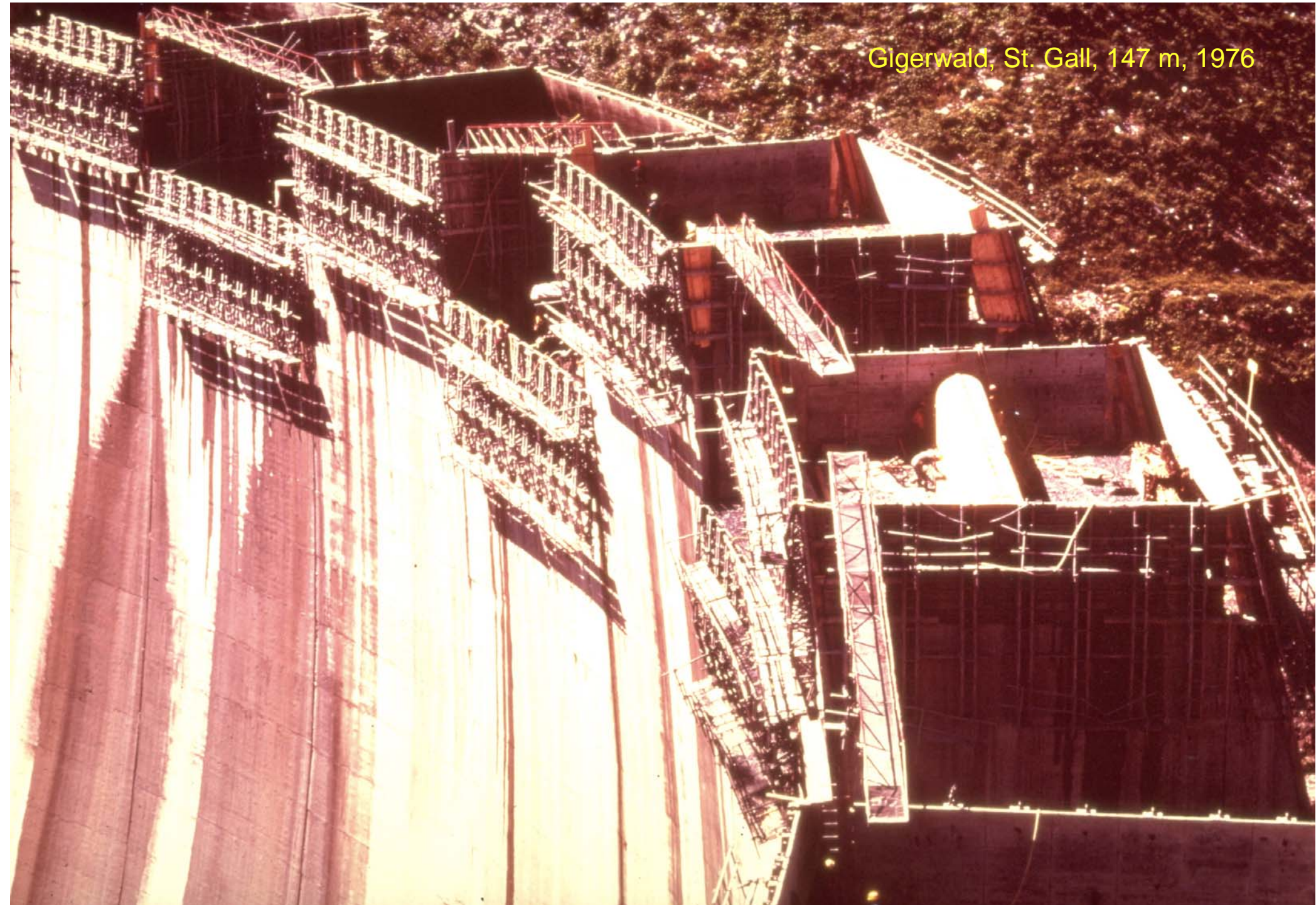
Gigerwald, St. Gall, 147 m, 1976





Gigerwald, St. Gall, 147-m, 1976

Gigerwald, St. Gall, 147 m, 1976



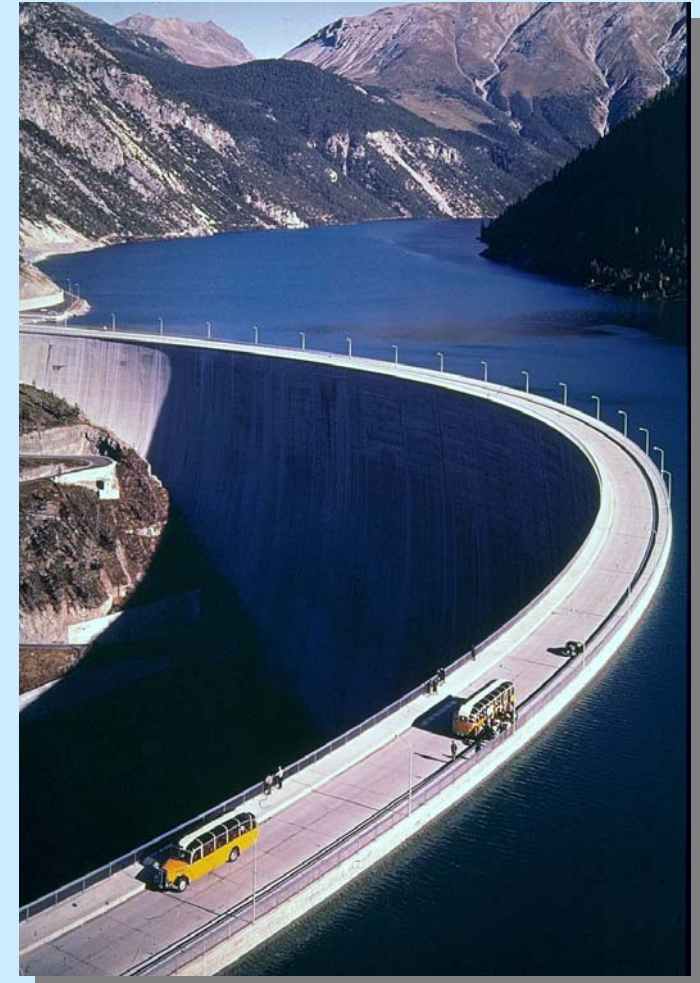
Gigerwald, St. Gall. 147 m, 1976



Barrages en béton

Barrages - voûtes

Construction du barrage de Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



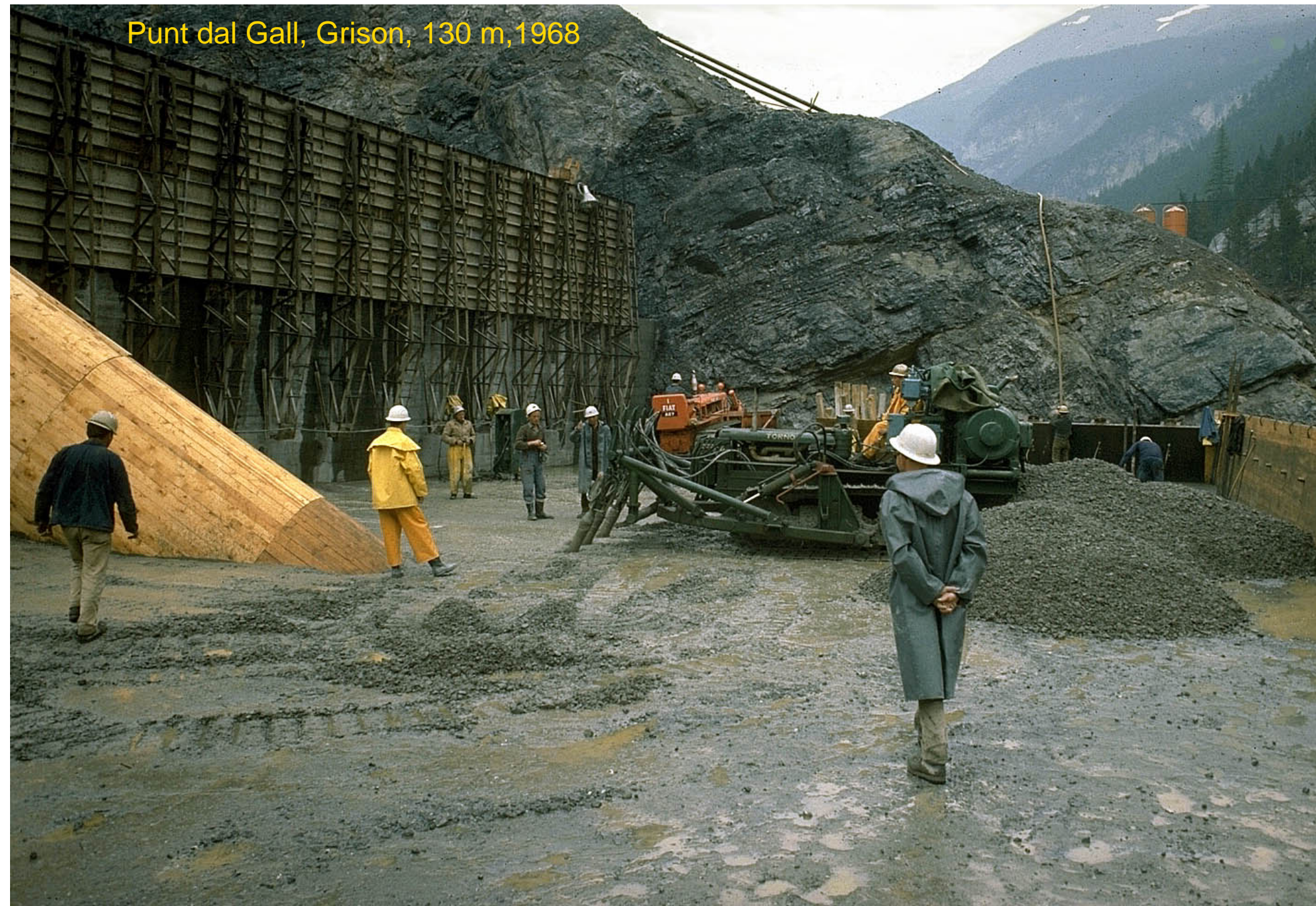
Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968

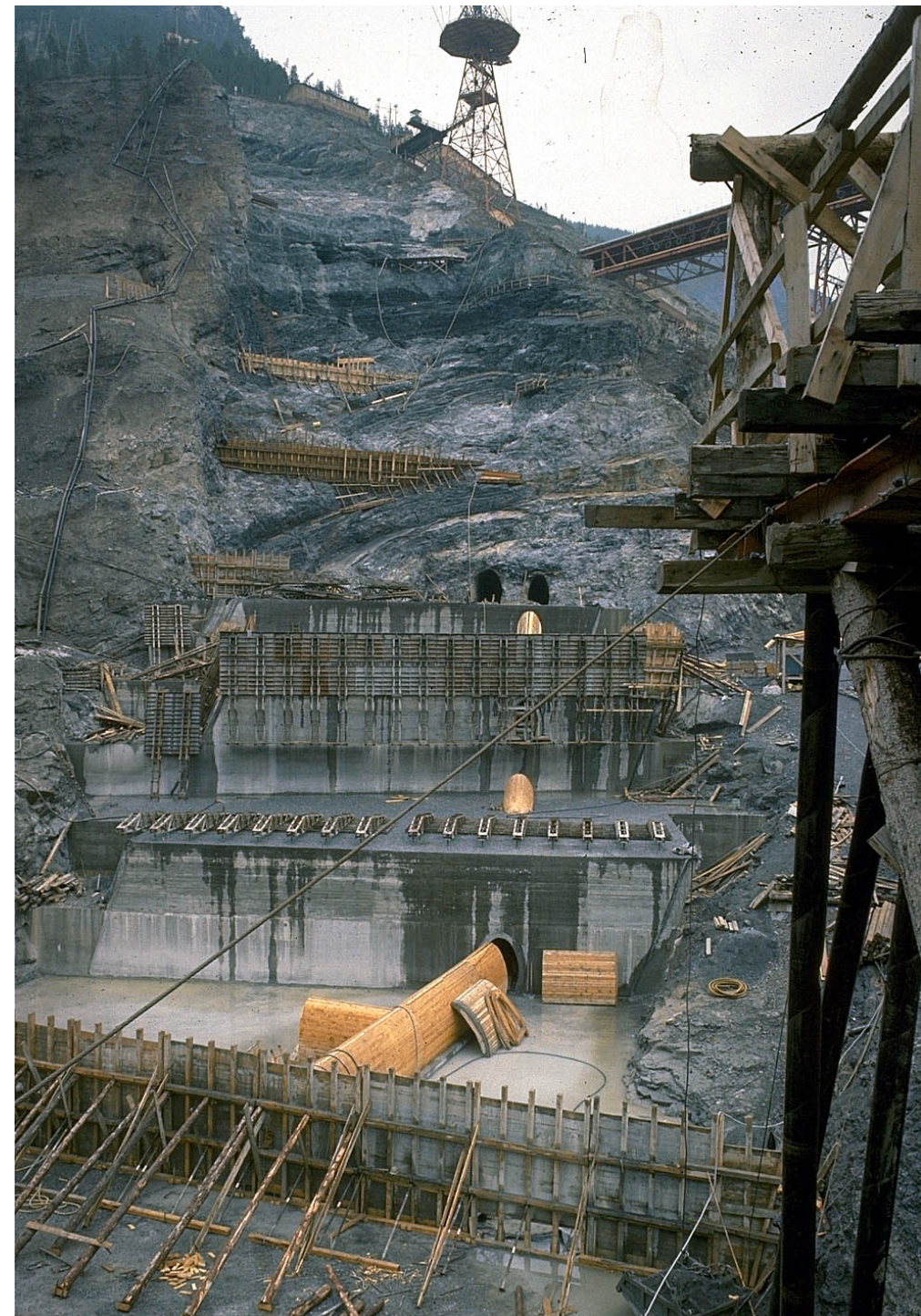


Runt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968





Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968





Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968



Punt dal Gall, Grison, 130 m, 1968