

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Méthodes de calcul

Emosson, 1974

Essais statique sur  
modèle (ISMES,  
Bergamo)

$H = 180 \text{ m}$

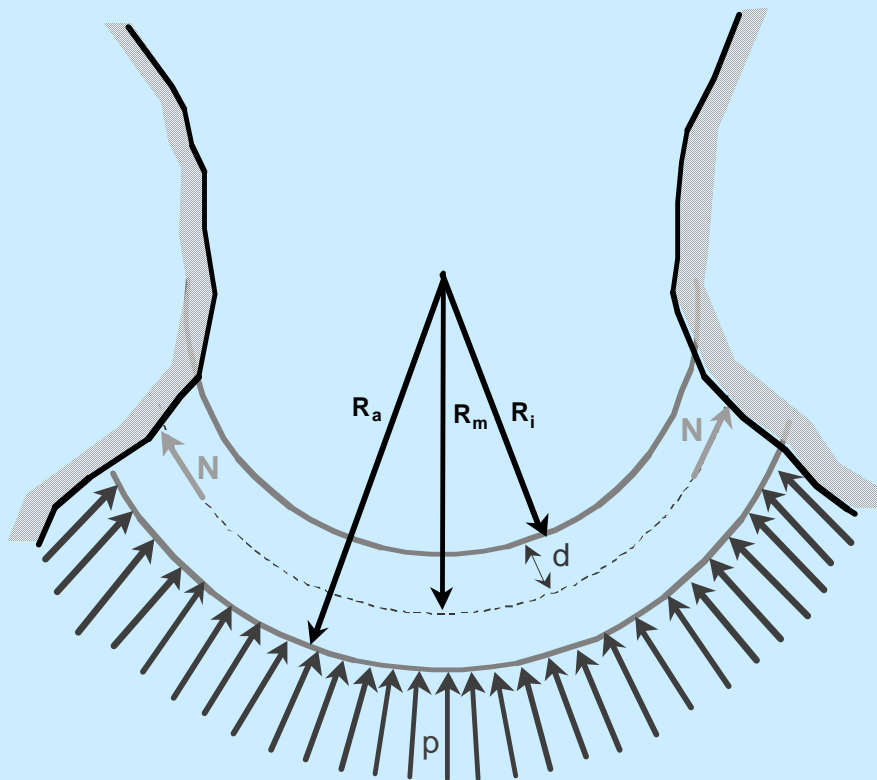
$L_c = 526 \text{ m}$

Volume du béton

$1.1 \text{ Mio m}^3$



### Formule du tube, membrane



$\sigma$  : contrainte uniforme

$p_m$  : pression uniforme de l'eau de l'arc:

$$p_m = p \cdot \frac{R_a}{R_m}$$

$R_a$  : rayon extérieur

$R_i$  : rayon intérieur

$R_m$  : rayon moyen de l'arc (de l'axe)

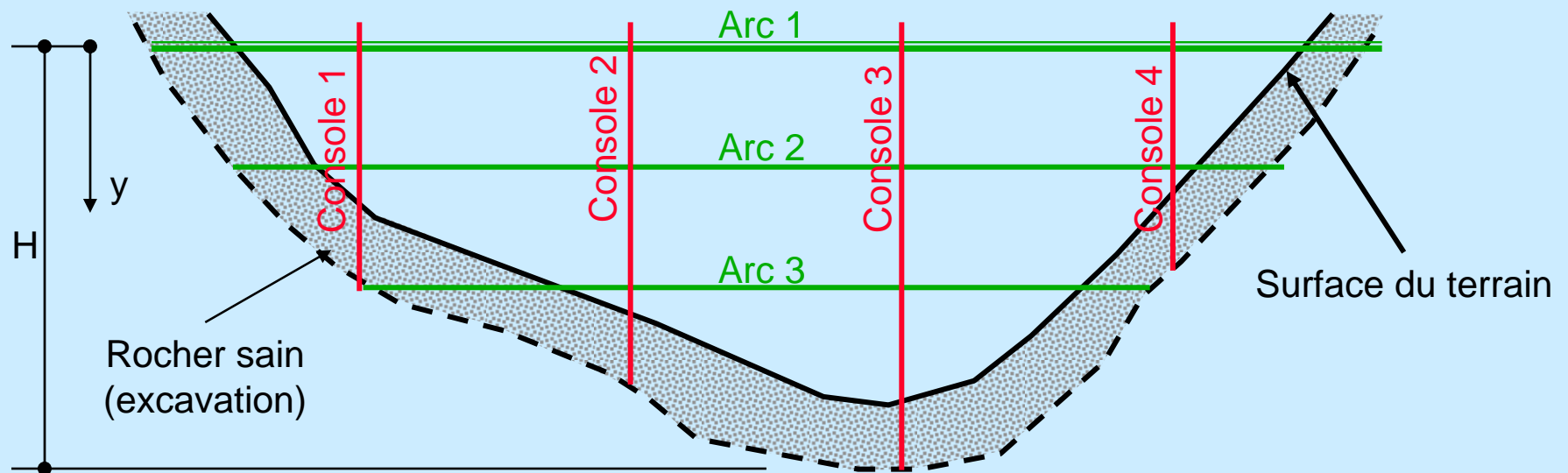
$d$  : épaisseur de l'arc (constante)

$\delta$  : déplacement radial

$E_B$  : module d'élasticité du béton

## Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

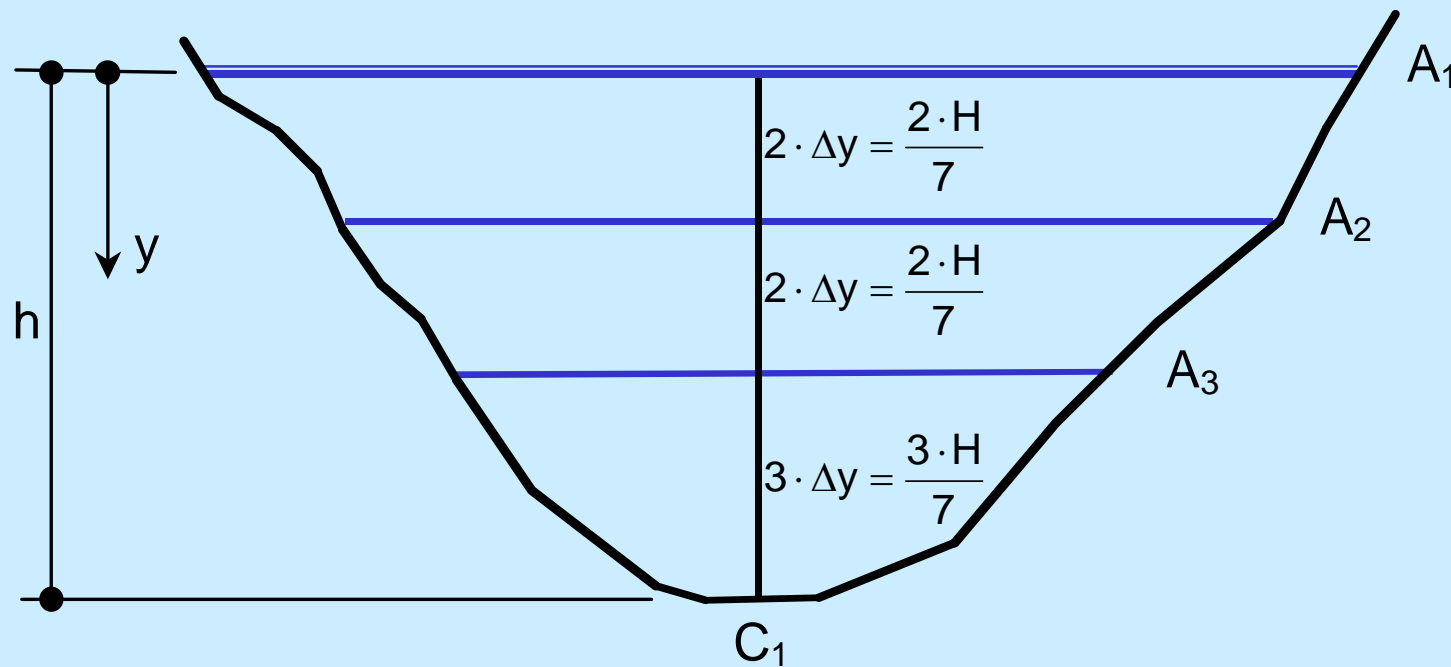
⇒ Remplacement du barrage par un système d'ajustements



Modèle simplifié pour le calcul préliminaire

- ✓ 3 arcs: distance au couronnement:  $\frac{0 \cdot H}{7}$ ,  $\frac{2 \cdot H}{7}$ ,  $\frac{4 \cdot H}{7}$
- ✓ 1 console

## Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

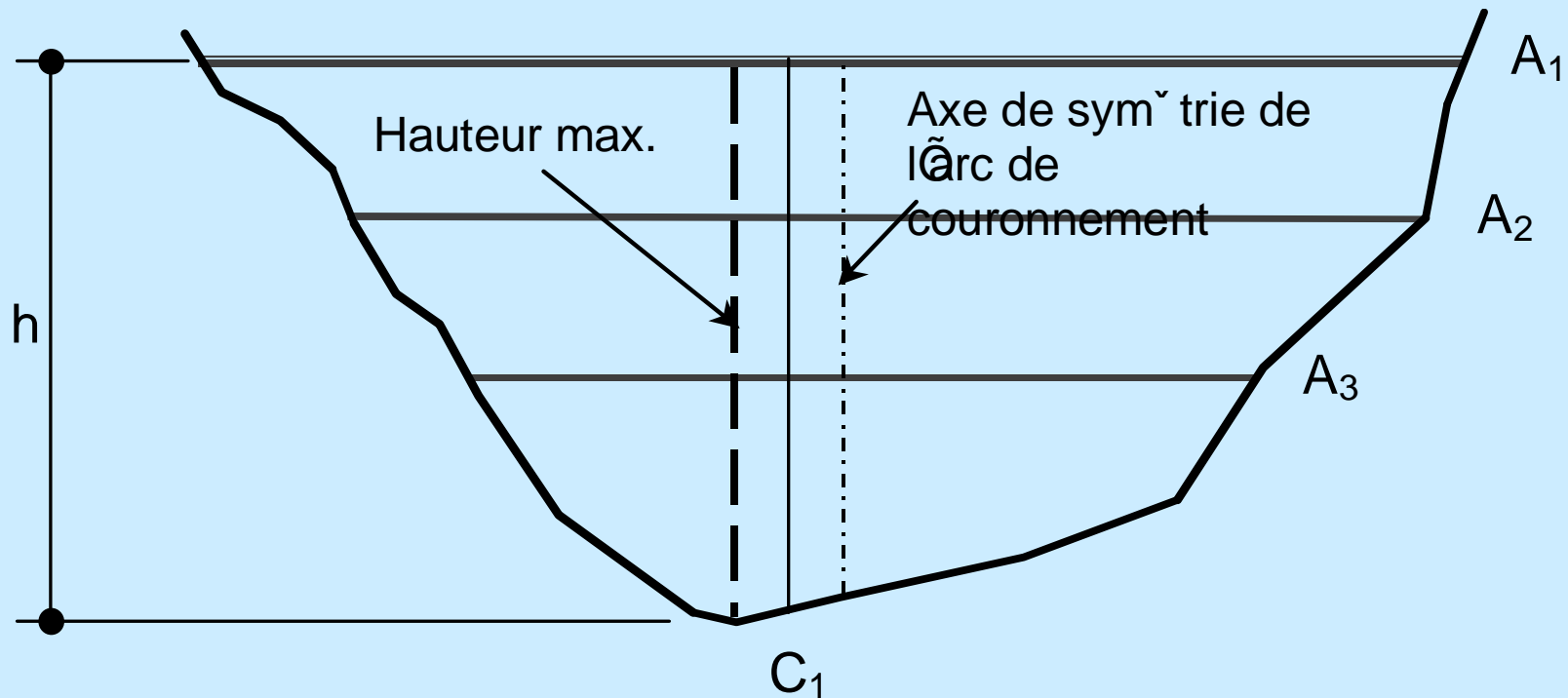


Modèle simplifié pour le calcul préliminaire

- ✓ 3 arcs: distance au couronnement:  $\frac{0 \cdot H}{7}$ ,  $\frac{2 \cdot H}{7}$ ,  $\frac{4 \cdot H}{7}$
- ✓ 1 console

## Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

Emplacement de la console pour une vallée asymétrique

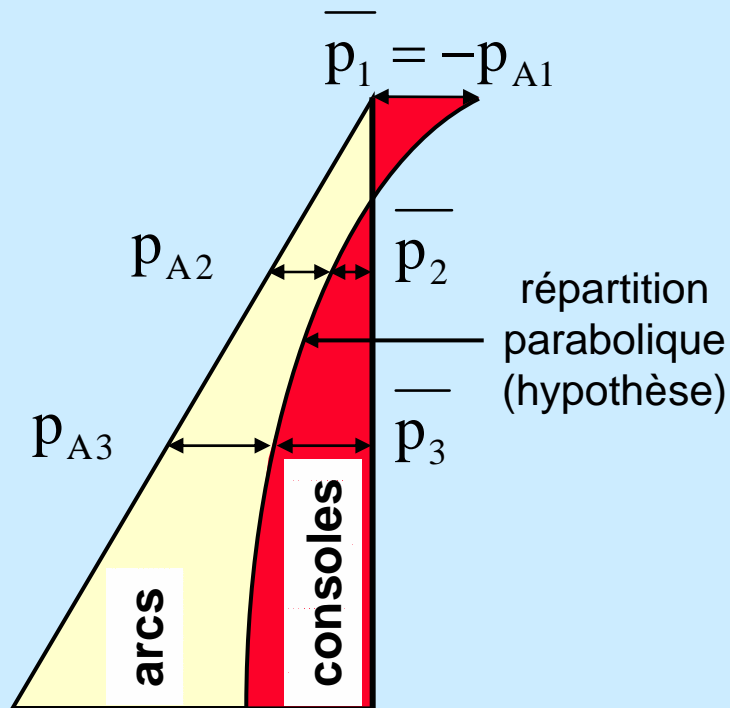


# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

### Répartition de la poussée de l'eau entre arcs et consoles



$$p_A + p_C = p_E = \rho \cdot g \cdot y$$

$$p_E(1) = p_{A1} + \overline{p_1} = 0!$$

$$p_E(2) = p_{A2} + \overline{p_2}$$

$$p_E(3) = p_{A3} + \overline{p_3}$$

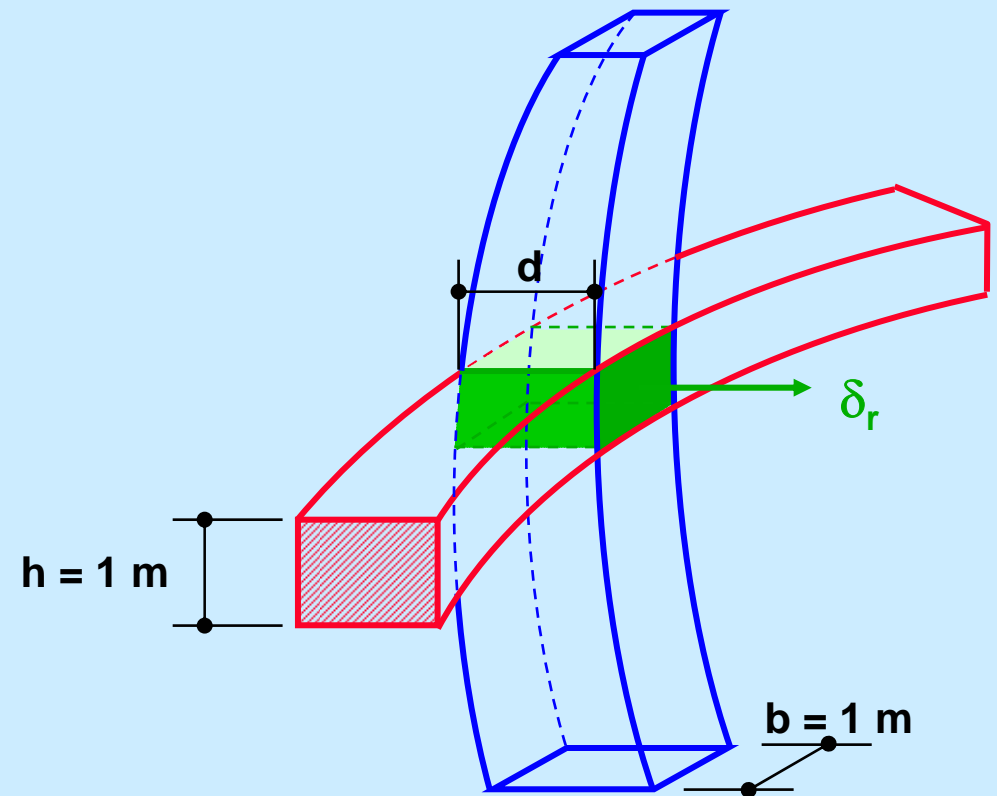
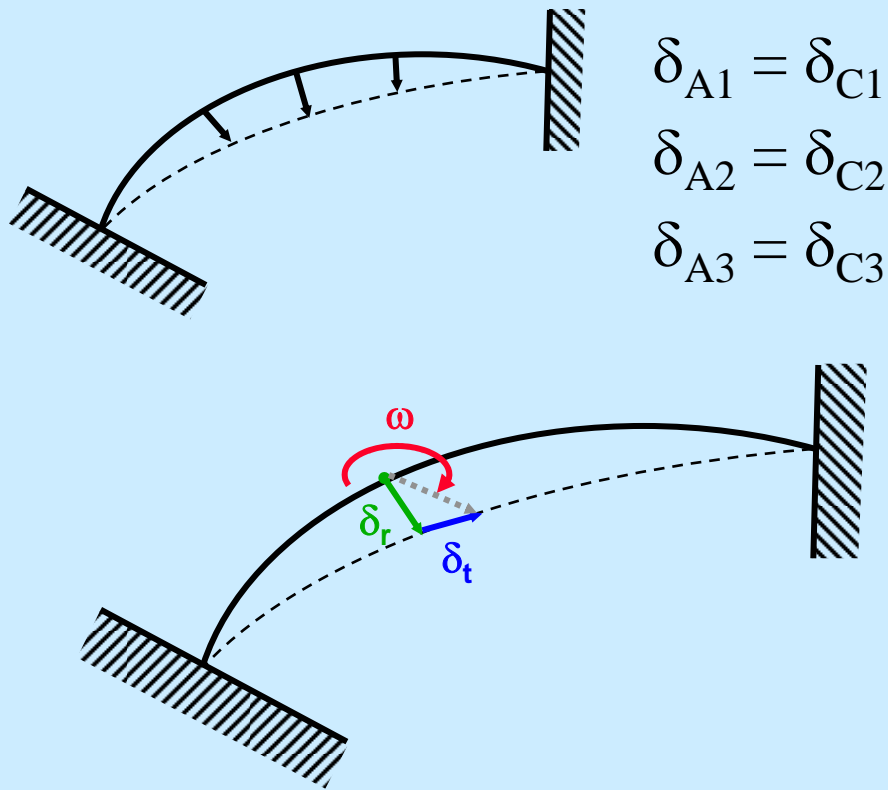
$p_E(i)$  Poussée de l'eau (au niveau  $i$ )

$p_{A_i}$  Charge sur l'arc  $i$

$p_i$  Charge sur la console (inconnue)

Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

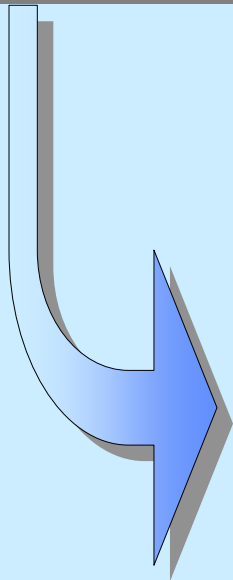
Compatibilité des déformations



Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

Déformation de l'arc

$$\delta_A = \beta \frac{p_A \cdot R^2}{d_A \cdot E_B}$$



R: rayon moyen de l'arc à l'axe

$d_A$ : épaisseur de l'arc

$E_B$ : module d'élasticité du béton

$E_R$ : module d'élasticité du rocher de fondation

$\beta$ : valeur d'encastrement  $\beta = \text{fct} \left( 2\phi, \frac{R}{d_A}, \frac{E_B}{E_R} \right)$

$$y = 0 \quad \rightarrow \quad \delta_{A1} = \beta_1 \frac{p_{A1} \cdot R_1^2}{d_1 \cdot E_{B1}} \quad \text{avec } p_{A1} = -\bar{p}_1$$

$$y = 2 \Delta y \quad \rightarrow \quad \delta_{A2} = \beta_2 \frac{p_{A2} \cdot R_2^2}{d_2 \cdot E_{B2}} \quad \text{avec } p_{A2} = p_E(2) - \bar{p}_2$$

$$y = 4 \Delta y \quad \rightarrow \quad \delta_{A3} = \beta_3 \frac{p_{A3} \cdot R_3^2}{d_3 \cdot E_{B3}} \quad \text{avec } p_{A3} = p_E(3) - \bar{p}_3$$



## Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

Hypothèse d'une répartition parabolique de la charge  $\bar{p} = f(y)$   
>>> approximation par développement Fourier):

$$\bar{p}(y) = \bar{p}_1 + \frac{-3 \cdot \bar{p}_1 + 4 \cdot \bar{p}_2 - \bar{p}_3}{4} \cdot \frac{y}{\Delta y} + \frac{\bar{p}_1 - 2 \cdot \bar{p}_2 + \bar{p}_3}{8} \cdot \frac{y^2}{\Delta y^2}$$

$$Q(y) = \bar{p}(y) \cdot y$$

$$Q(y) = \bar{p}_1 \cdot y + \frac{-3 \cdot \bar{p}_1 + 4 \cdot \bar{p}_2 - \bar{p}_3}{8} \cdot \frac{y^2}{\Delta y} + \frac{\bar{p}_1 - 2 \cdot \bar{p}_2 + \bar{p}_3}{24} \cdot \frac{y^3}{\Delta y^2}$$

$$M(y) = \int Q(y) \cdot dy$$

$$M(y) = \frac{\bar{p}_1 \cdot y^2}{2} + \frac{-3 \cdot \bar{p}_1 + 4 \cdot \bar{p}_2 - \bar{p}_3}{24} \cdot \frac{y^3}{\Delta y} + \frac{\bar{p}_1 - 2 \cdot \bar{p}_2 + \bar{p}_3}{96} \cdot \frac{y^4}{\Delta y^2}$$

Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

Déformation de la console

$$\delta_C = \sum_{y=0}^{y=h} \frac{M \cdot M'}{E \cdot J} \Delta y + \sum_{y=0}^{y=h} \frac{Q \cdot Q'}{G \cdot F'} \Delta y + \delta^*$$

Principe des travaux virtuels

$$\delta^* = \delta_R + \alpha_R (h - y)$$

$$\delta_R = \frac{C_2 \cdot M_R}{E_R \cdot d_R} + \frac{C_3 \cdot Q_R}{E_R}$$

$$\alpha_R = \frac{C_1 \cdot M_R}{E_R \cdot d_R^2} + \frac{C_2 \cdot Q_R}{E_R \cdot d_R}$$

selon Vogt

$$\text{pour } \frac{E_B}{E_R} = 2.0$$

$$C_1 = 5.2$$

$$C_2 = 0.8$$

$$C_3 = 0.4$$

Interaction arcs-murs - Méthode des ajustements

Charge inconnue sur la console  
*Compatibilité des déformations radiales*

⇒ Point d'intersection 1

◆  $y = 0$        $\delta_{A1} = \delta_{C1}$

$$\left( a_{11} + \frac{\beta_1 \cdot R_1^2}{d_1} \right) \cdot \bar{p}_1 + a_{12} \cdot \bar{p}_2 + a_{13} \cdot \bar{p}_3 = 0$$

⇒ Point d'intersection 2

◆  $y = 2 \Delta y$        $\delta_{A2} = \delta_{C2}$

$$a_{21} \cdot \bar{p}_1 + \left( a_{22} + \frac{\beta_2 \cdot R_2^2}{d_2} \right) \cdot \bar{p}_2 + a_{23} \cdot \bar{p}_3 = \beta_2 \cdot \frac{R_2^2}{d_2} \cdot p_E \quad (2)$$

⇒ Point d'intersection 3

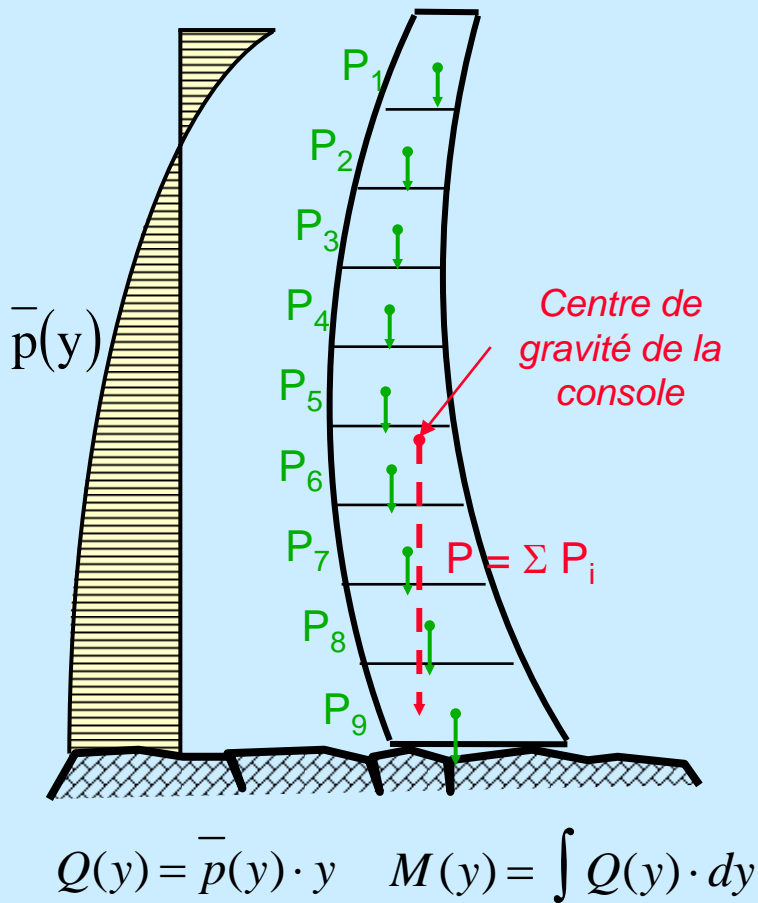
◆  $y = 4 \Delta y$        $\delta_{A3} = \delta_{C3}$

$$a_{31} \cdot \bar{p}_1 + a_{32} \cdot \bar{p}_2 + \left( a_{33} + \frac{\beta_3 \cdot R_3^2}{d_3} \right) \cdot \bar{p}_3 = \beta_3 \cdot \frac{R_3^2}{d_3} \cdot p_E \quad (3)$$

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

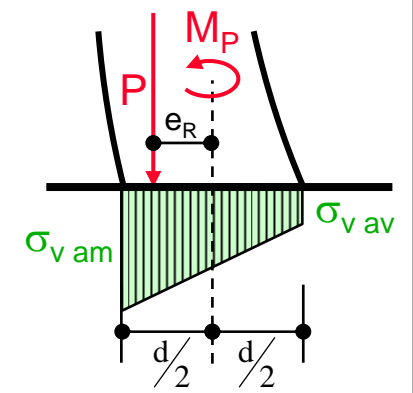
### Contraintes au pied de la console



⇒ Lac vide

$$\sigma_{v.am} = \frac{P}{d} + \frac{6 \cdot M_P}{d^2}$$

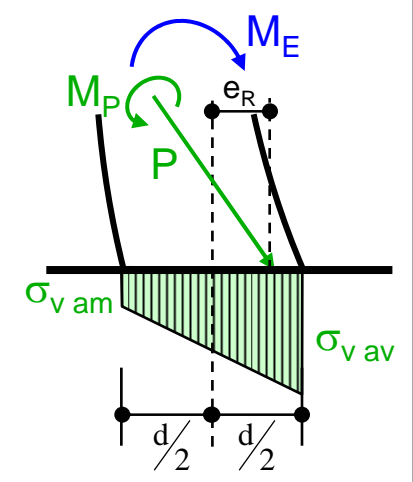
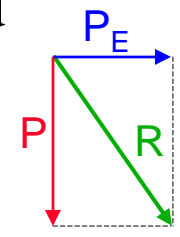
$$\sigma_{v.av} = \frac{P}{d} - \frac{6 \cdot M_P}{d^2}$$



⇒ Lac plein

$$\sigma_{v.am,av} = \frac{P}{d} \pm \frac{6 \cdot P \cdot e_R}{d^2}$$

$$e_R = \frac{M_P - M_E}{P}$$



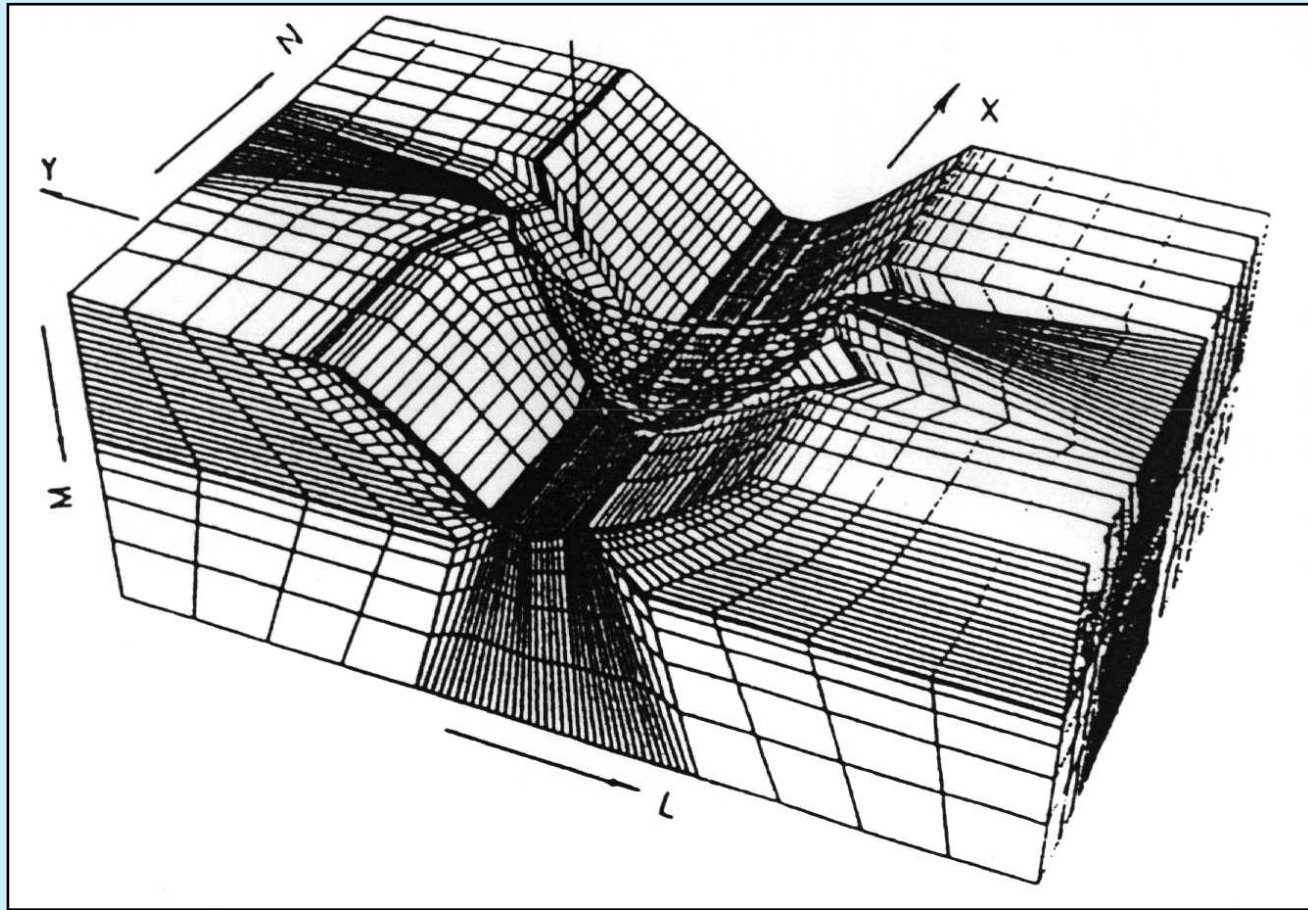
## Comportement réel d'un barrage

- 1 Le comportement de la structure est fortement non-linéaire et non-élastique.
- 2 L'interaction eau-structure doit être considérée du fait de la compressibilité de l'eau.
- 3 L'interaction sol-structure est important du point de vue de la dissipation d'énergie.

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Modélisation d'un barrage-voûte par la méthode des éléments finis

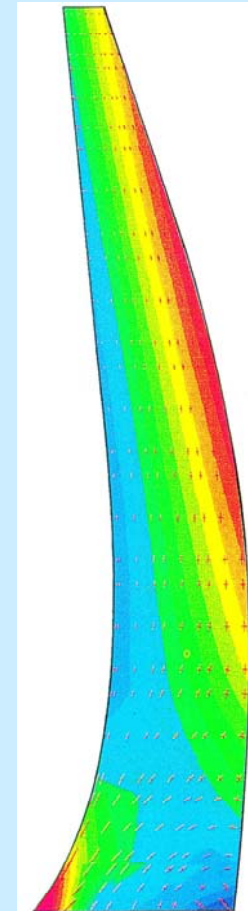
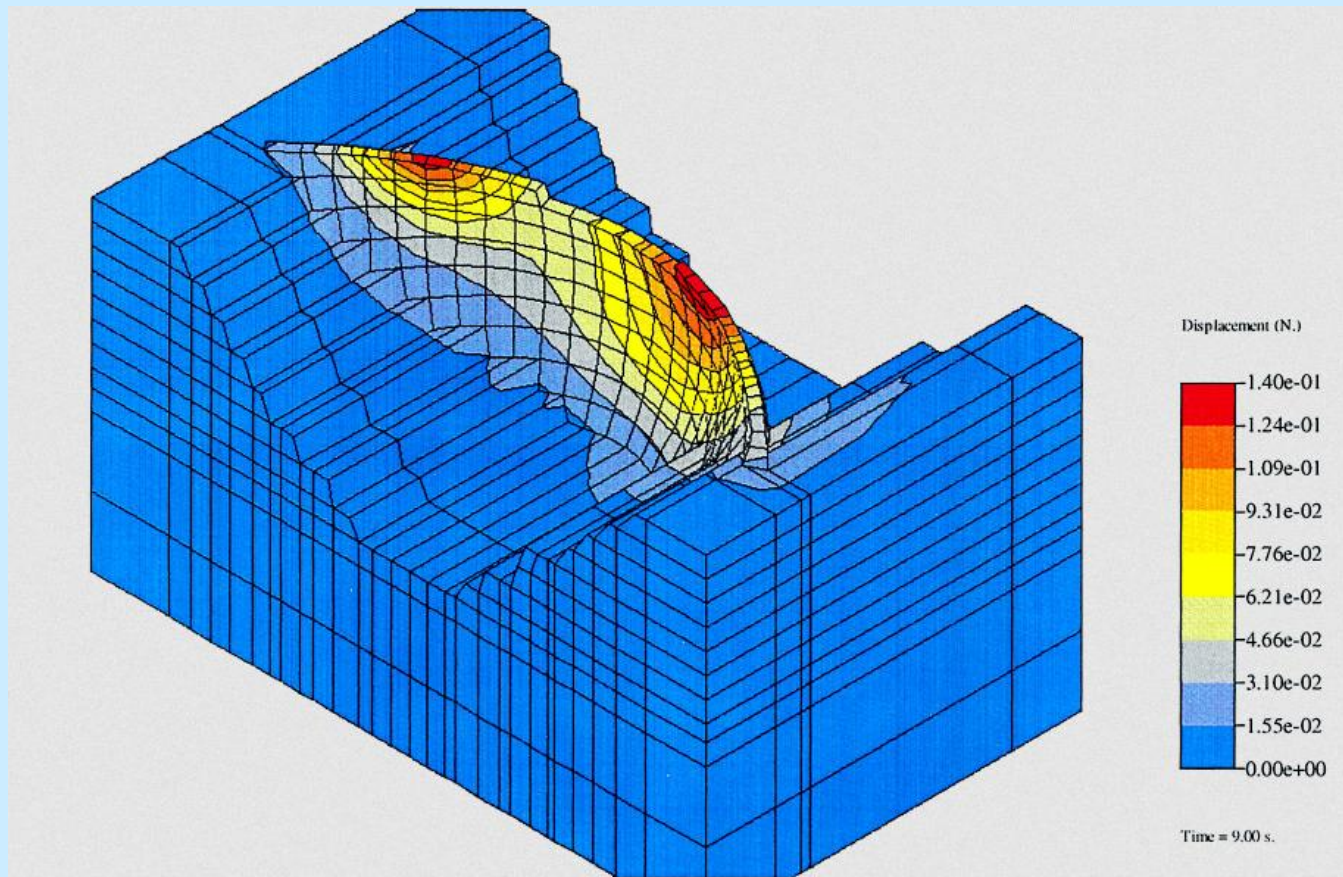




# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

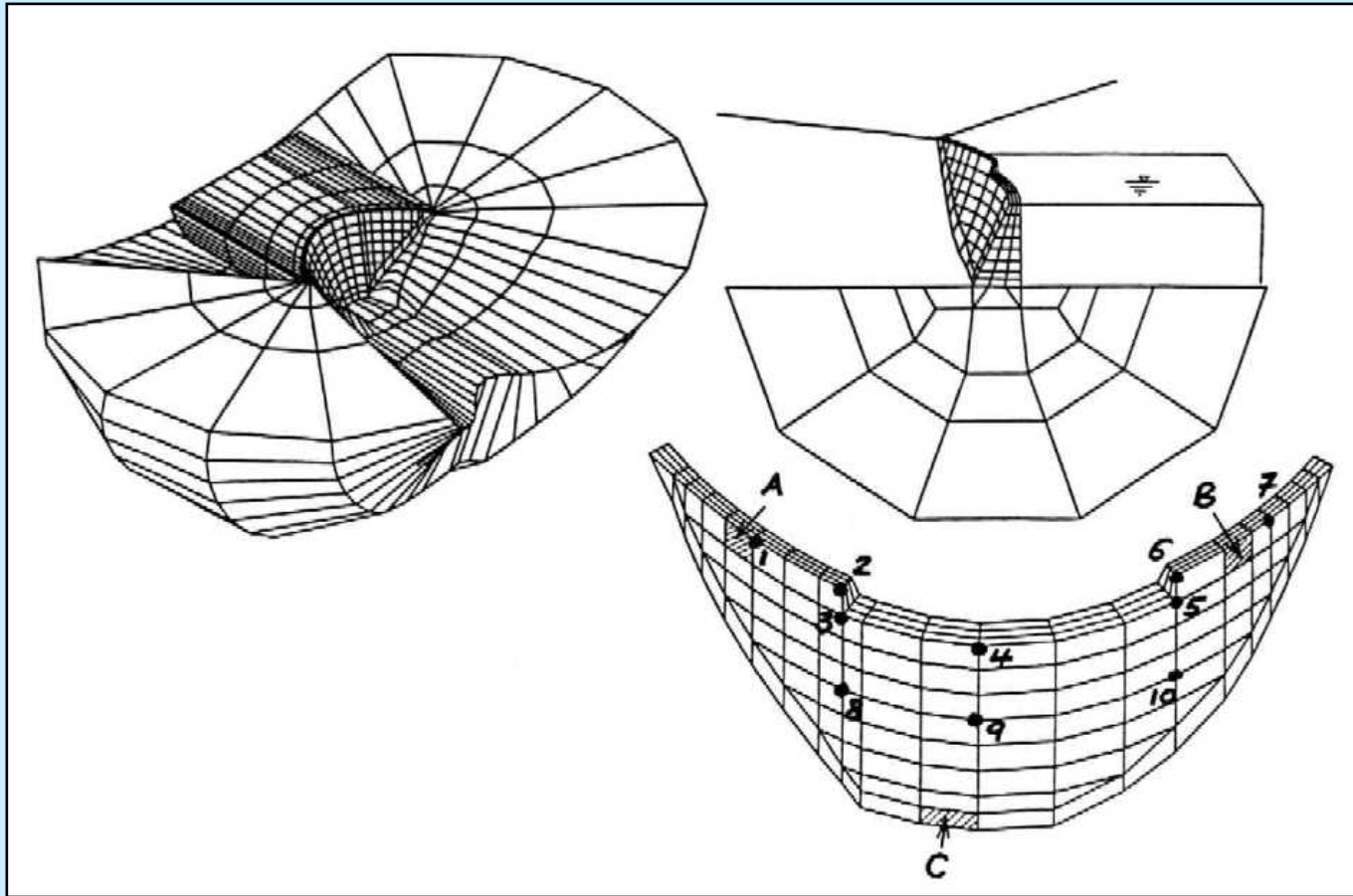
### Modélisation d'un barrage-voûte par la méthode des éléments finis



# Barrages en béton

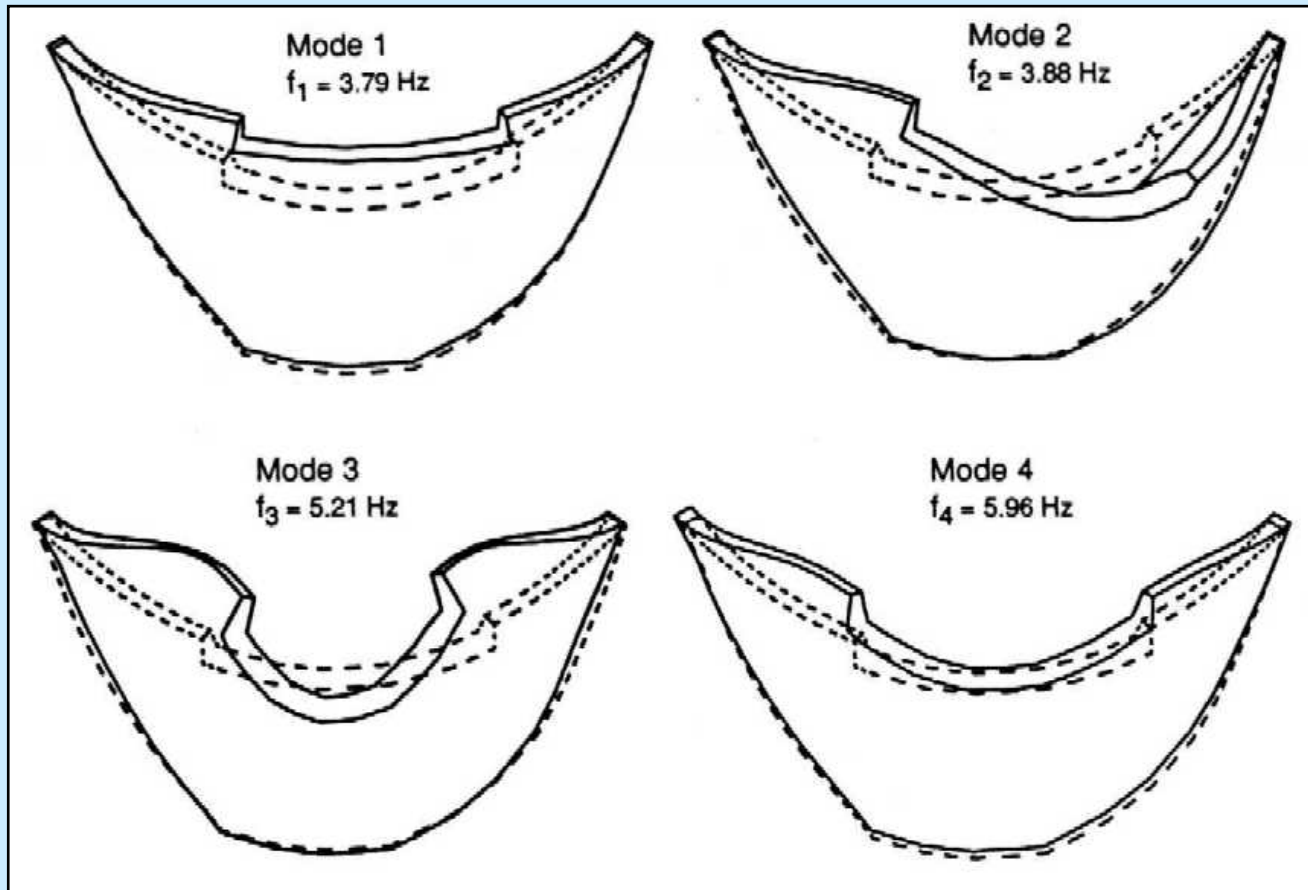
## Barrages - voûtes

Modélisation d'un barrage-voûte pour l'analyse dynamique en considérant l'interaction avec le réservoir





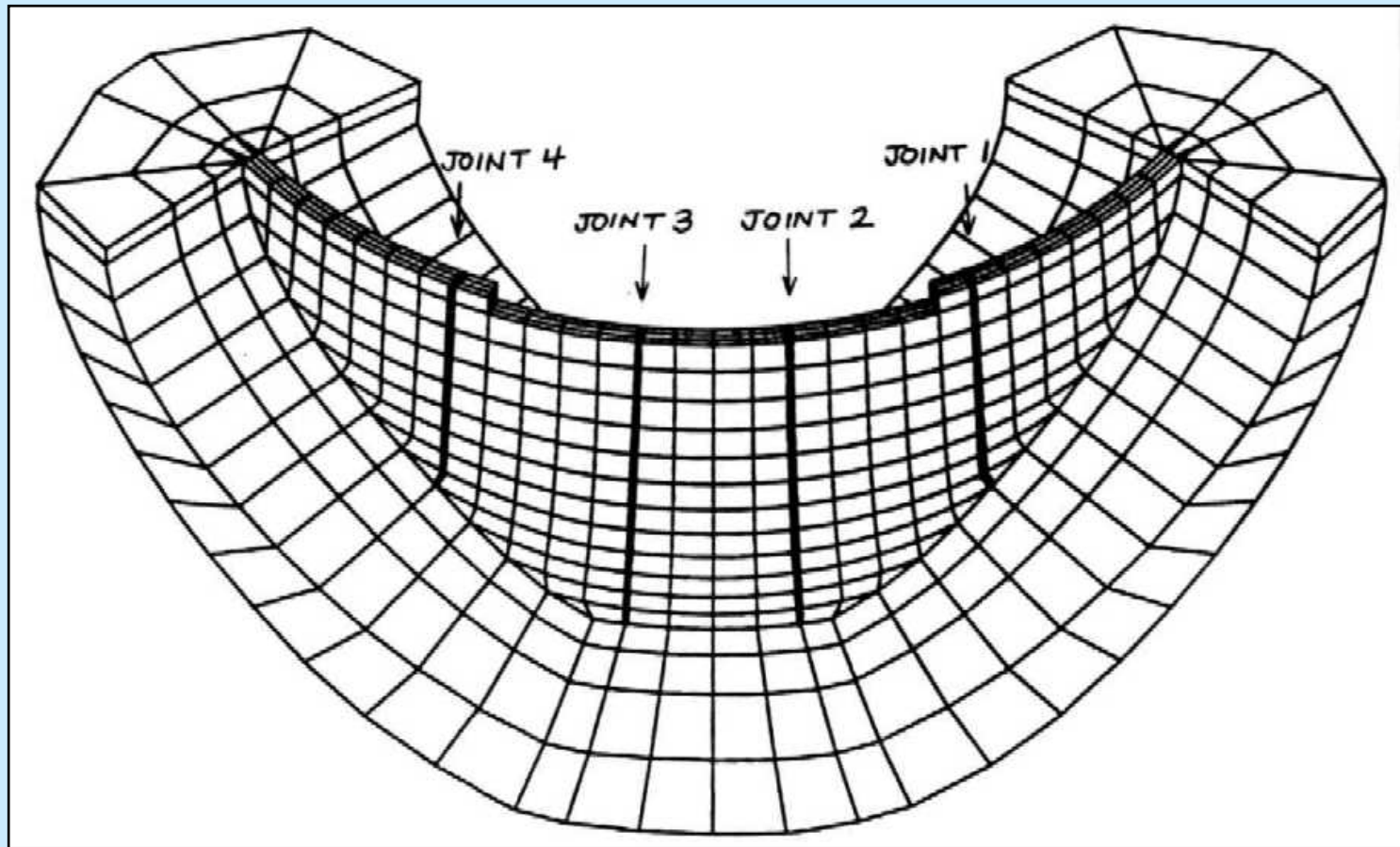
Fréquences propres d'un barrage-voûte  
(à lac vide)



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

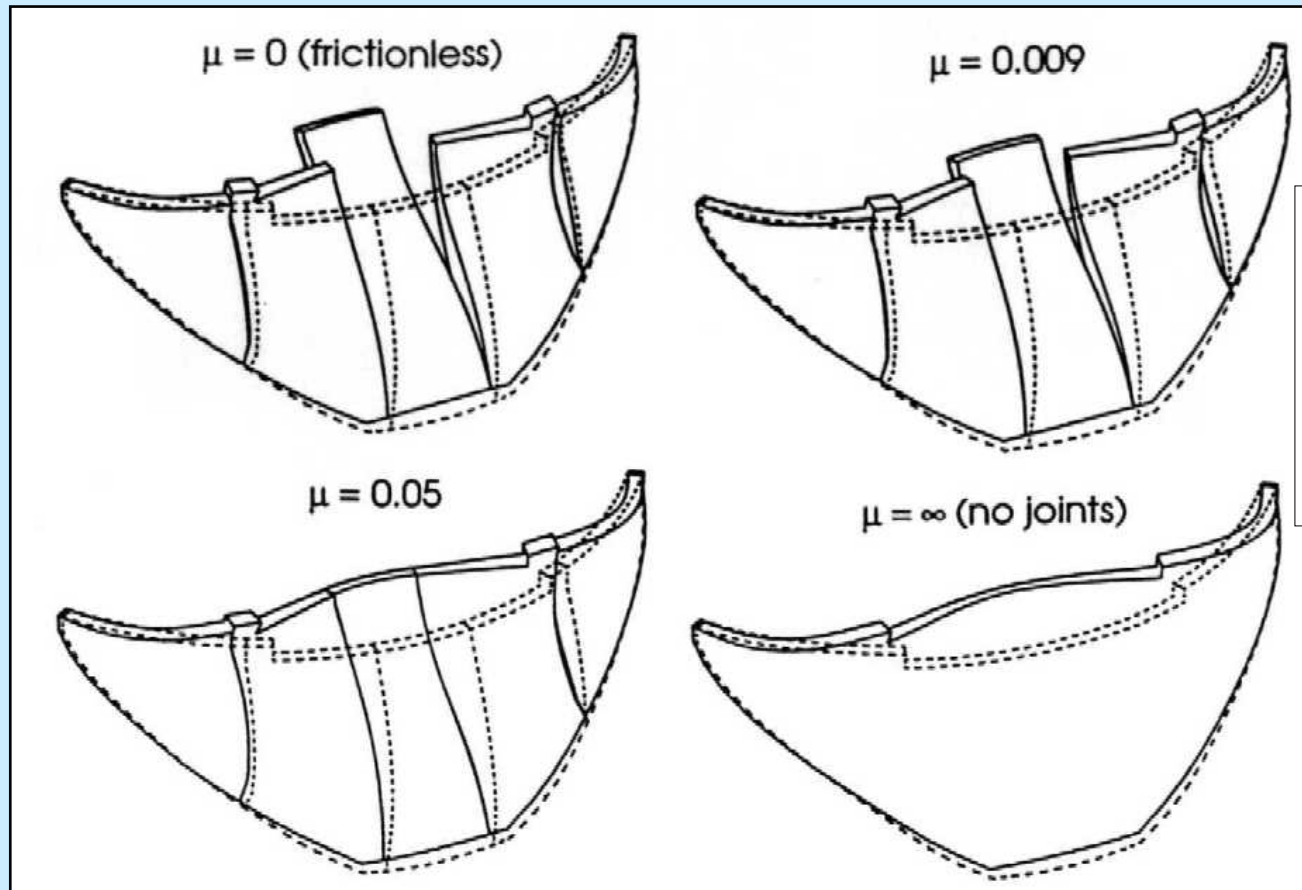
Modélisation non-linéaire d'un barrage-voûte  
par la méthode des éléments finis



# Barrages en béton

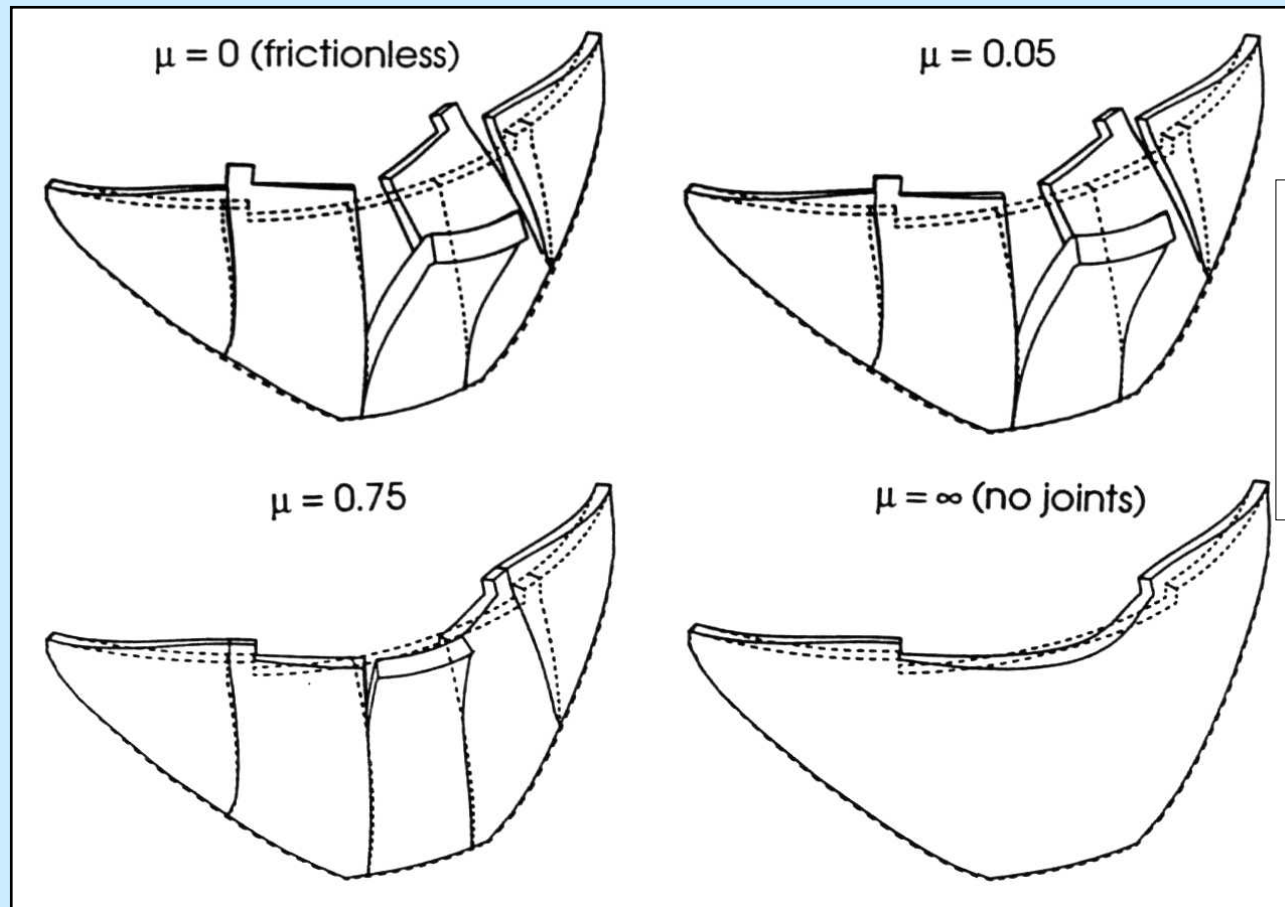
## Barrages - voûtes

### Déformation d'un barrage-voûte en considérant des effets non-linéaires



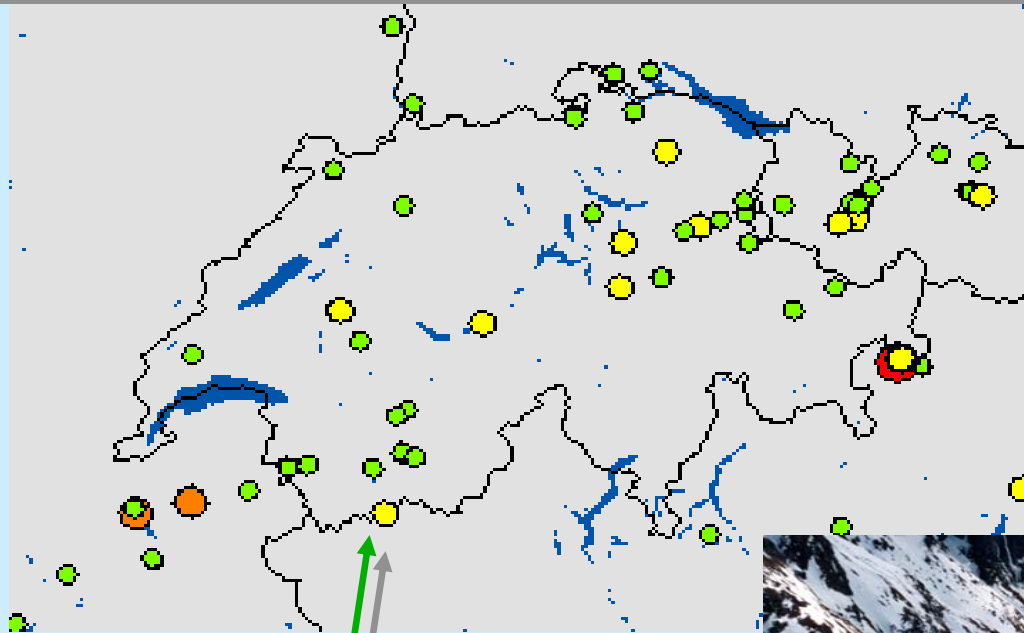
*Présence des  
joints de  
construction et  
accélération  
vers l'aval*

Déformation d'un barrage-voûte  
en considérant des effets non-linéaires



*Présence des  
joints de  
construction et  
accélération  
vers l'amont*

# Déformation d'un barrage-voûte lors d'un tremblement de terre



Magnitude de 3 ou plus

## Legend Earthquakes



Récent:  
1994 - 2002

- Valpelline, 31 mars 1996
- Magnitude: 4.2
- Mauvoisin: à 13 km de l'épicentre





# Séisme de Valpelline, 31 mars 1996

QuickTime™ et un  
décompresseur Cinepak  
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un  
décompresseur Cinepak  
sont requis pour visionner cette image.

- Vidéo des mouvements observés au barrage de Mauvoisin:
  - Enregistrés en 11 points
  - Amplification d'environ 3'000 fois



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

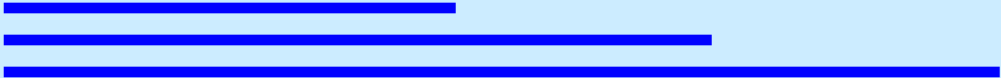
QuickTime™ et un  
décompresseur Cinepak  
sont requis pour visionner cette image.

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes



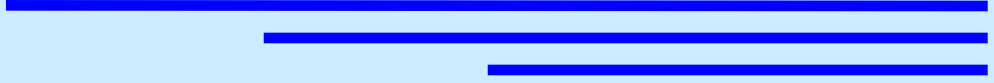
QuickTime™ et un  
décompresseur Cinepak  
sont requis pour visionner cette image.





# Barrages en béton

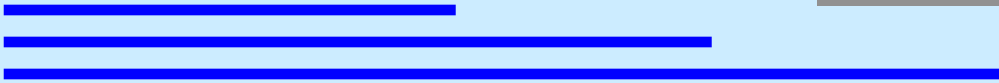
## Barrages - voûtes



### Effet de la température

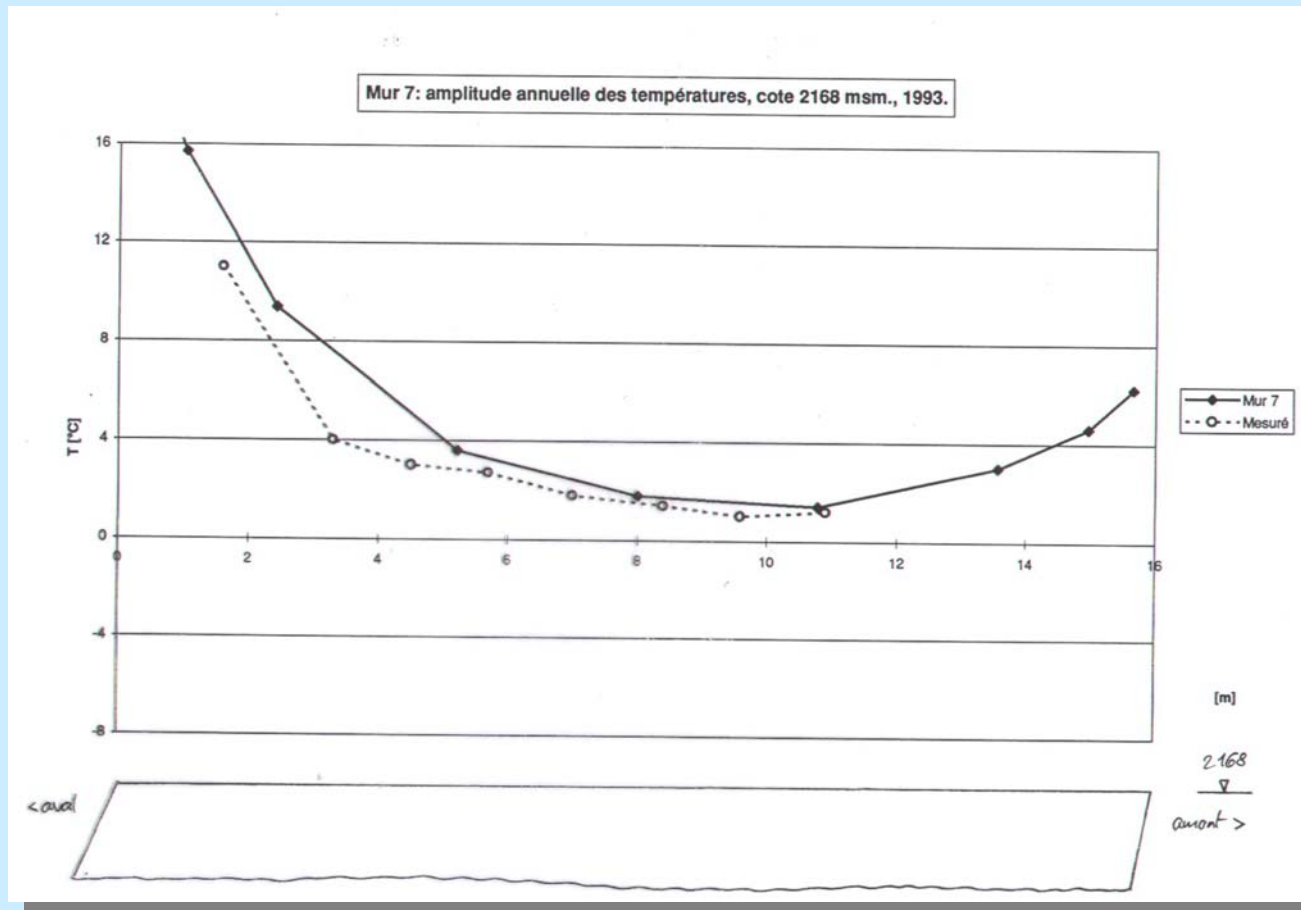
Barrage de Torogh  
(Algérie)

Températures extérieures



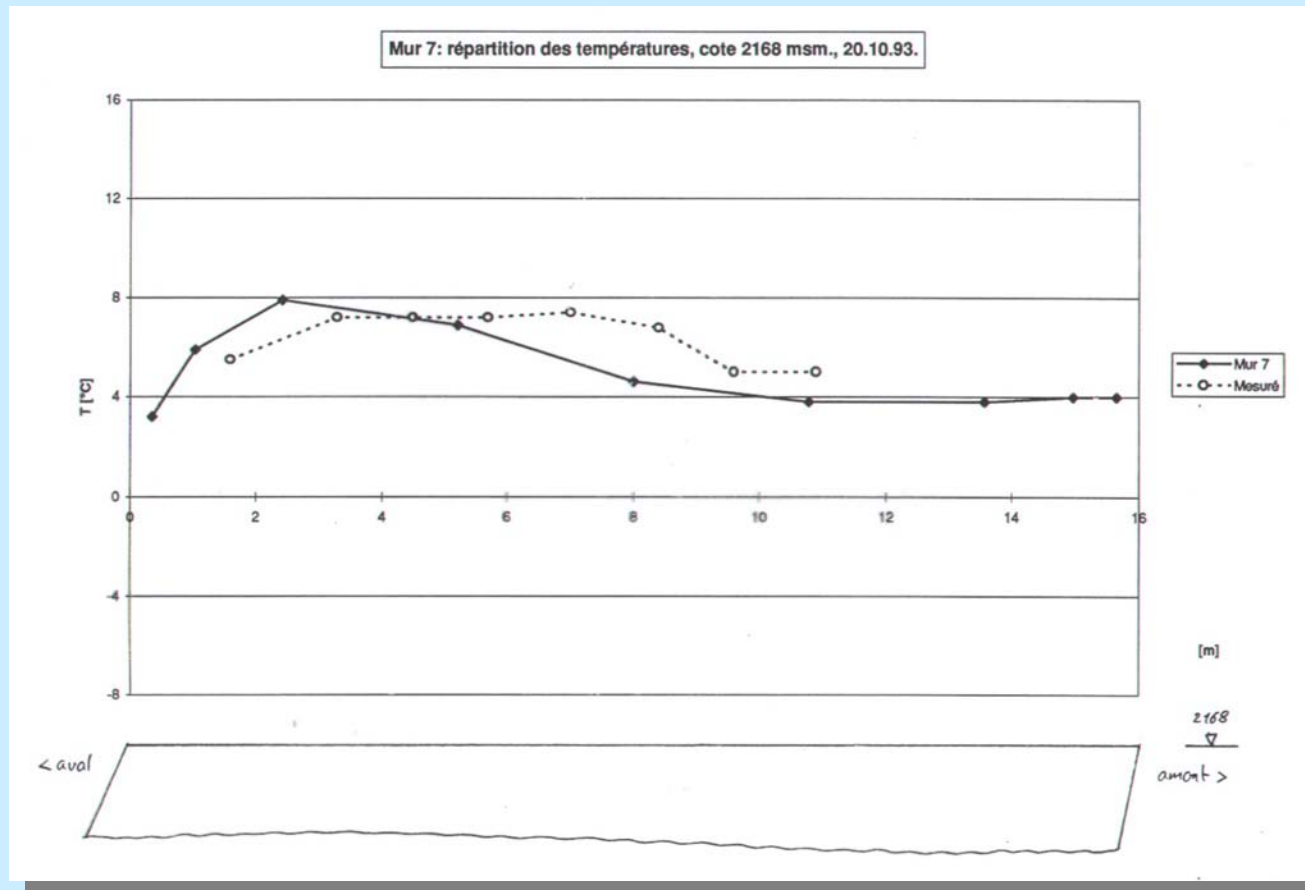
### Effet de la température - Barrage de Mauvoisin

Eté



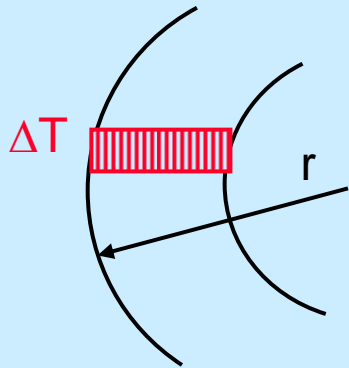
Effet de la température - Barrage de Mauvoisin

Automne



### Effet de la température dans un arc libre

#### Variation uniforme de température



Déformation du rayon

$$\Delta r_T = \pm \Delta T \cdot \beta_T \cdot r$$

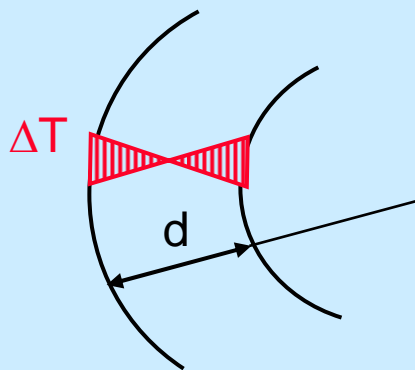
$$\sigma_T = 0$$

$\beta_T$ : coefficient de dilatation thermique du béton ( $\approx 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )

⊕ pour échauffement

⊖ pour refroidissement

#### Variation linéaire de température



Rotation de la section

$$\Delta \omega = \frac{\Delta T \cdot \beta_T}{\frac{1}{2} d} = \frac{M}{EJ}; \quad J = \frac{d^3}{12}$$

$$\Rightarrow M = \frac{\Delta T}{6} \cdot \beta_T \cdot d^2 \cdot E$$

$$\sigma_T = \pm \frac{M}{W} = \pm \beta_T \cdot \Delta T \cdot E$$

$$\Delta r_T = 0$$

### Effet de la température dans un arc encastré

#### Variation uniforme de température

- Arc ne peut pas se déformer aux naissances
- Force hyperstatique  $N_H(\Delta T) = \pm \Delta T \cdot \beta_T \cdot E \cdot d \cdot k$

k: facteur de forme qui dépend de l'encastrement de l'arc

$$k = \frac{1}{C_1 \lambda^2 + C_2}$$

(élancement de l'arc)

$$\lambda = \frac{R_m}{d}$$

$2\phi$ : ouverture de l'arc

encastrement parfait:

$$C_1 = 6 \left( \frac{\theta}{\sin \theta} + \cos \theta - \frac{2 \sin \theta}{\theta} \right)$$

$$C_2 = \frac{2\theta}{\sin \theta} - \cos \theta$$

#### Variation linéaire de température

- variation linéaire ne change pas la longueur de l'arc ( $\Delta r_T = 0$ )
- Comportement comme celui de l'arc libre

$$\sigma_T = \pm \beta_T \cdot \Delta T \cdot E$$

### Contraintes admissibles

#### Barrage-poids

- La répartition des contraintes verticales ne peut pas être influencée par la forme de la section (triangle).
- La contrainte de compression la plus élevée (resp. la plus petite) se présente toujours:
  - au pied amont (resp. aval) à lac vide
  - au pied aval (resp. amont) à lac plein
- Des tractions pour les cas de charge normaux sont inadmissibles parce que les fissures ont la tendance à s'aggraver.

#### Barrage-voûte

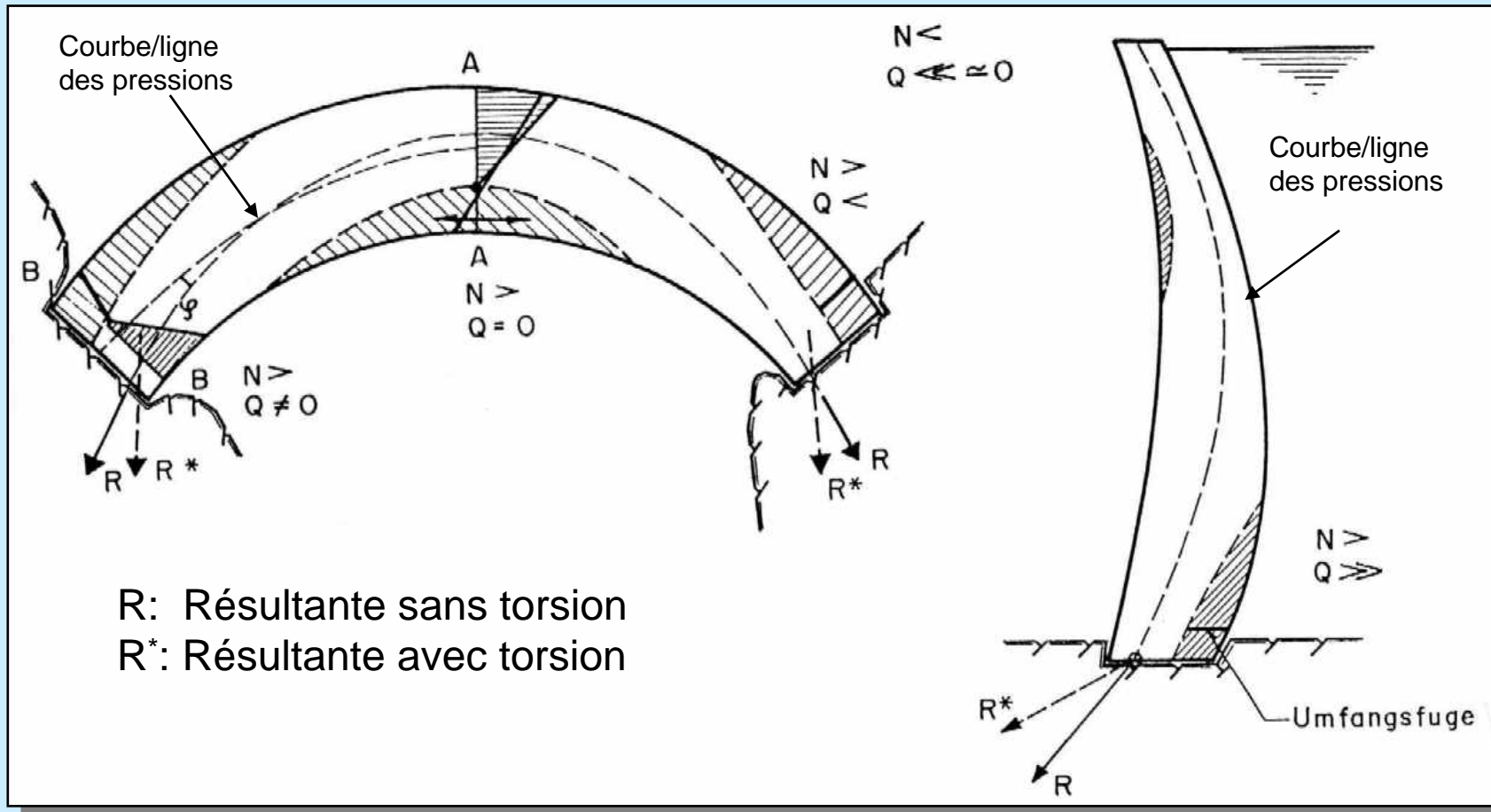
- La répartition des contraintes (dans les consoles et arcs) dépend de la forme de la coque.
- L'optimisation de la géométrie de l'ouvrage vise à obtenir des contraintes de compression sur tout l'ouvrage.
- Les fissures ne sont pas causées par les forces extérieures, mais par les efforts hyperstatiques.
- La fissuration diminue la rigidité de la coque et par conséquent les moments d'encastrement. Les tractions diminuent (mais les compressions augmentent).
- La résistance à la traction des zones tendues n'est pas nécessaire pour équilibrer les forces extérieures.

# Barrages en béton

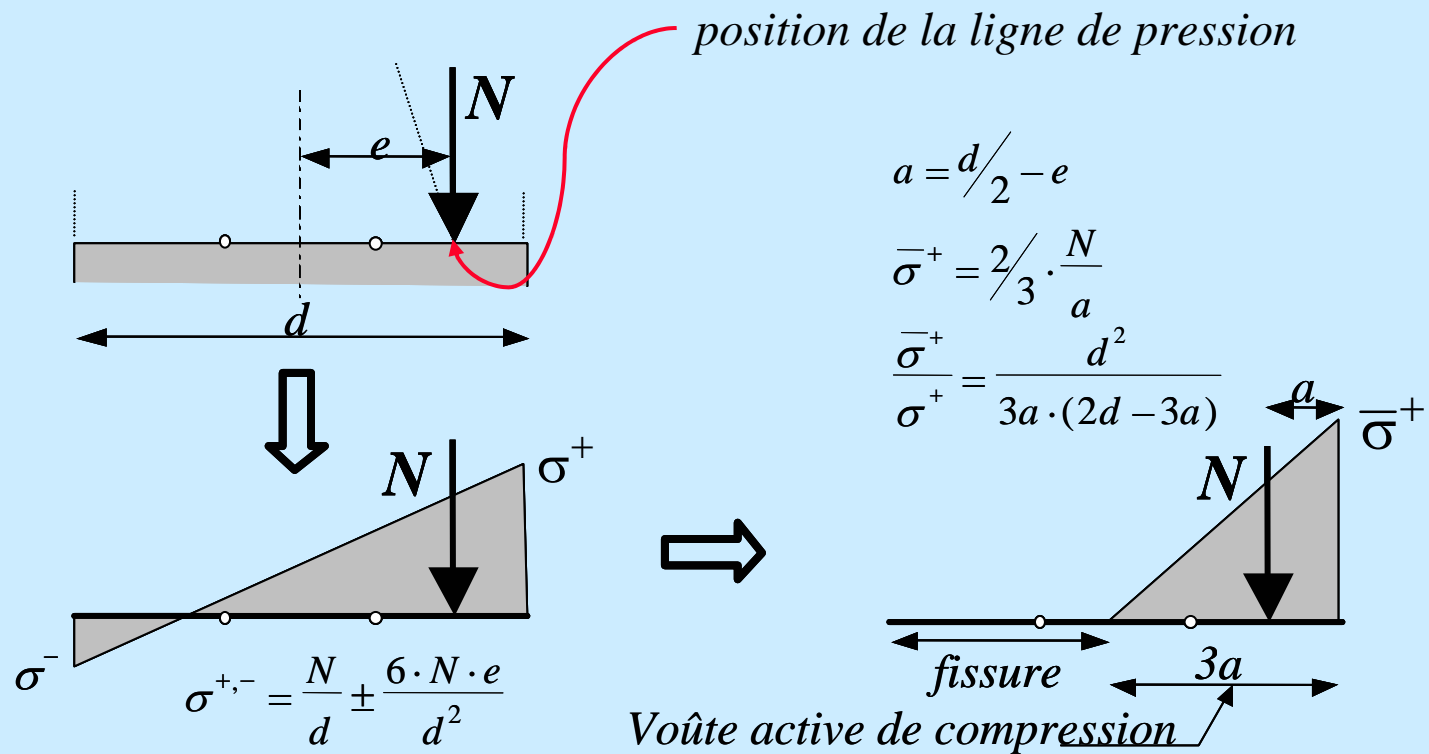
## Barrages - voûtes

### Zones tendues et comprimées dans un barrage-voûte

#### Définition de la voûte et de la console active



Réduction de la voûte active par la fissuration



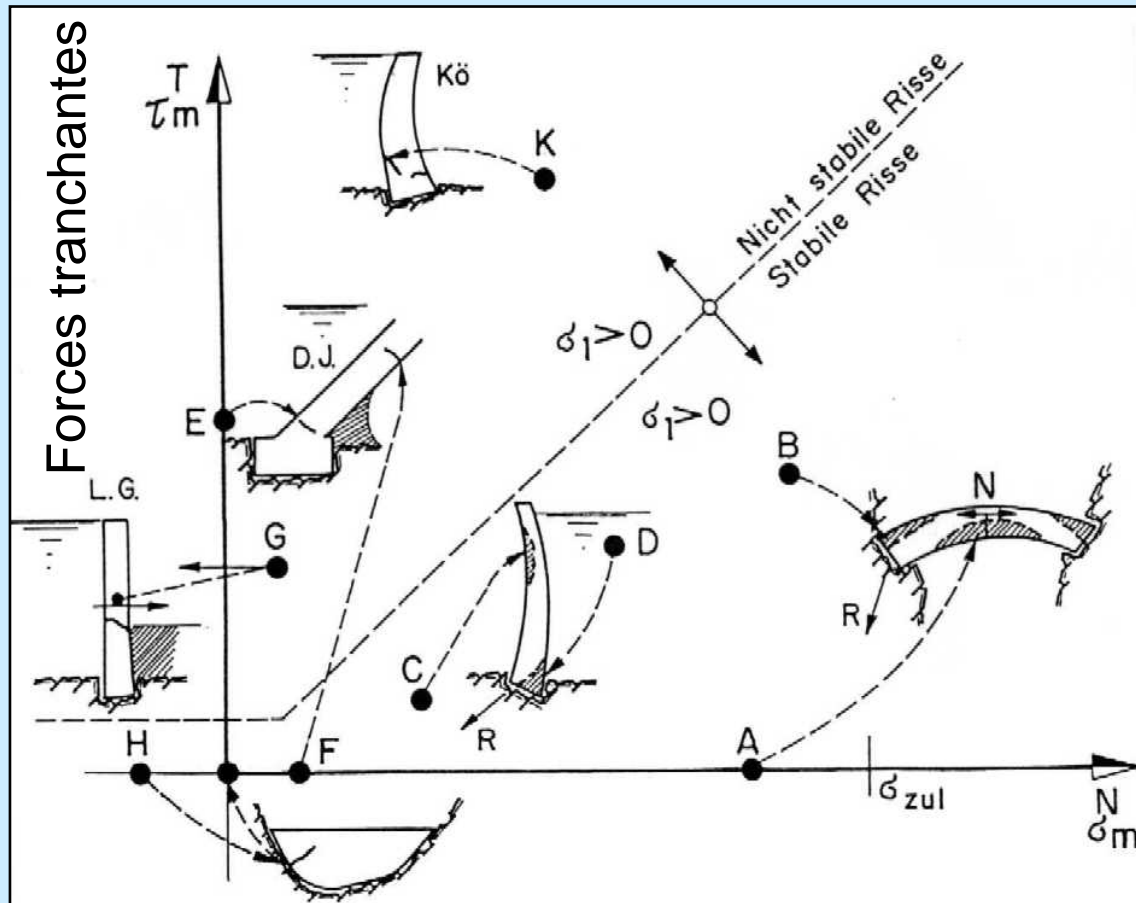
Création d'une fissure et aggravation des contraintes de compression



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### L'influence importante des forces tranchantes

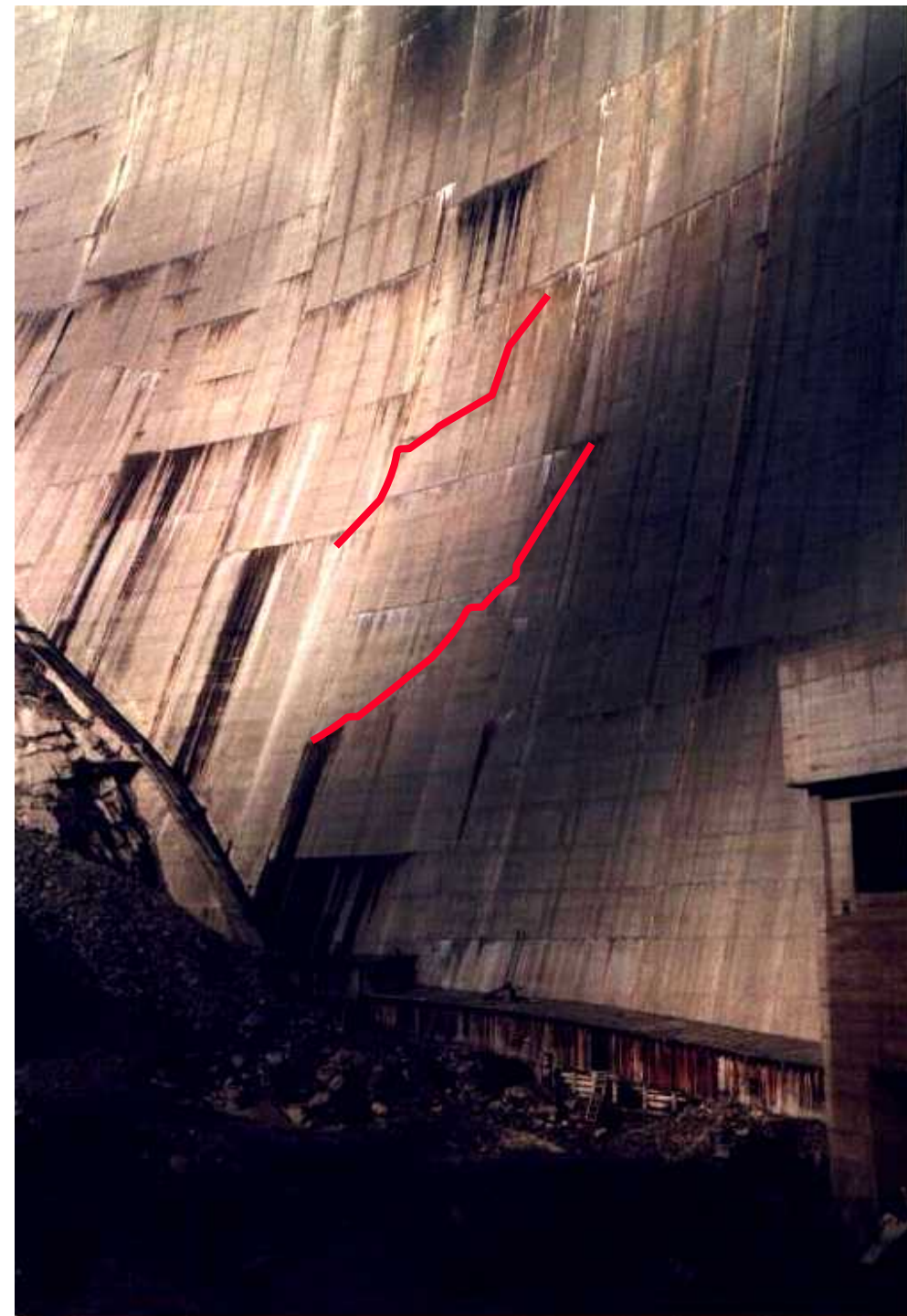


Fissures stables et instables dans un barrage-voûte en fonction des efforts normaux et tranchants

Forces normales



Kölnbrein, Autriche, 200 m, 1977



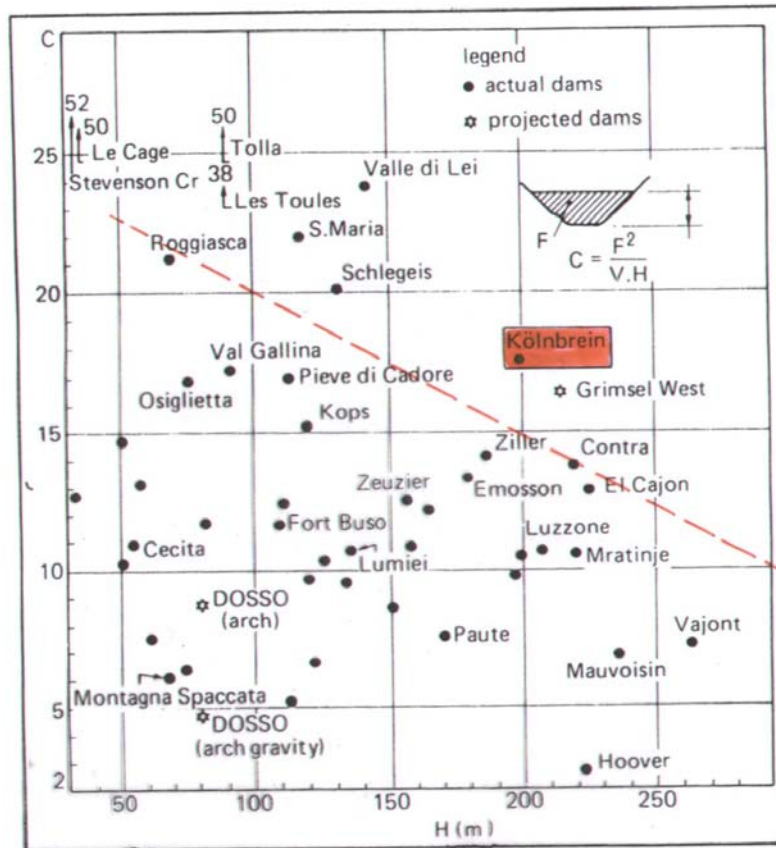
## Barrage de Kölnbrein en Autriche

Laboratoire de Constructions Hydrauliques

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Coefficient d'élançement du barrage de Kölnbrein



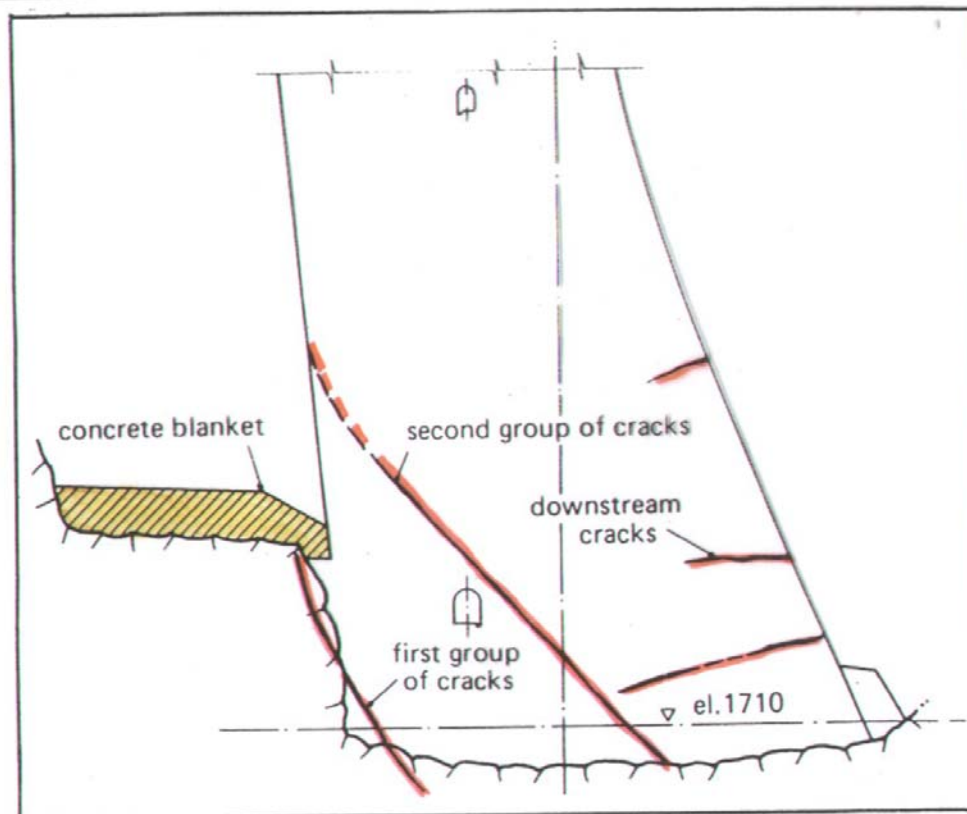
*C : coefficient d'élançement*

## Barrage de Kölnbrein en Autriche

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



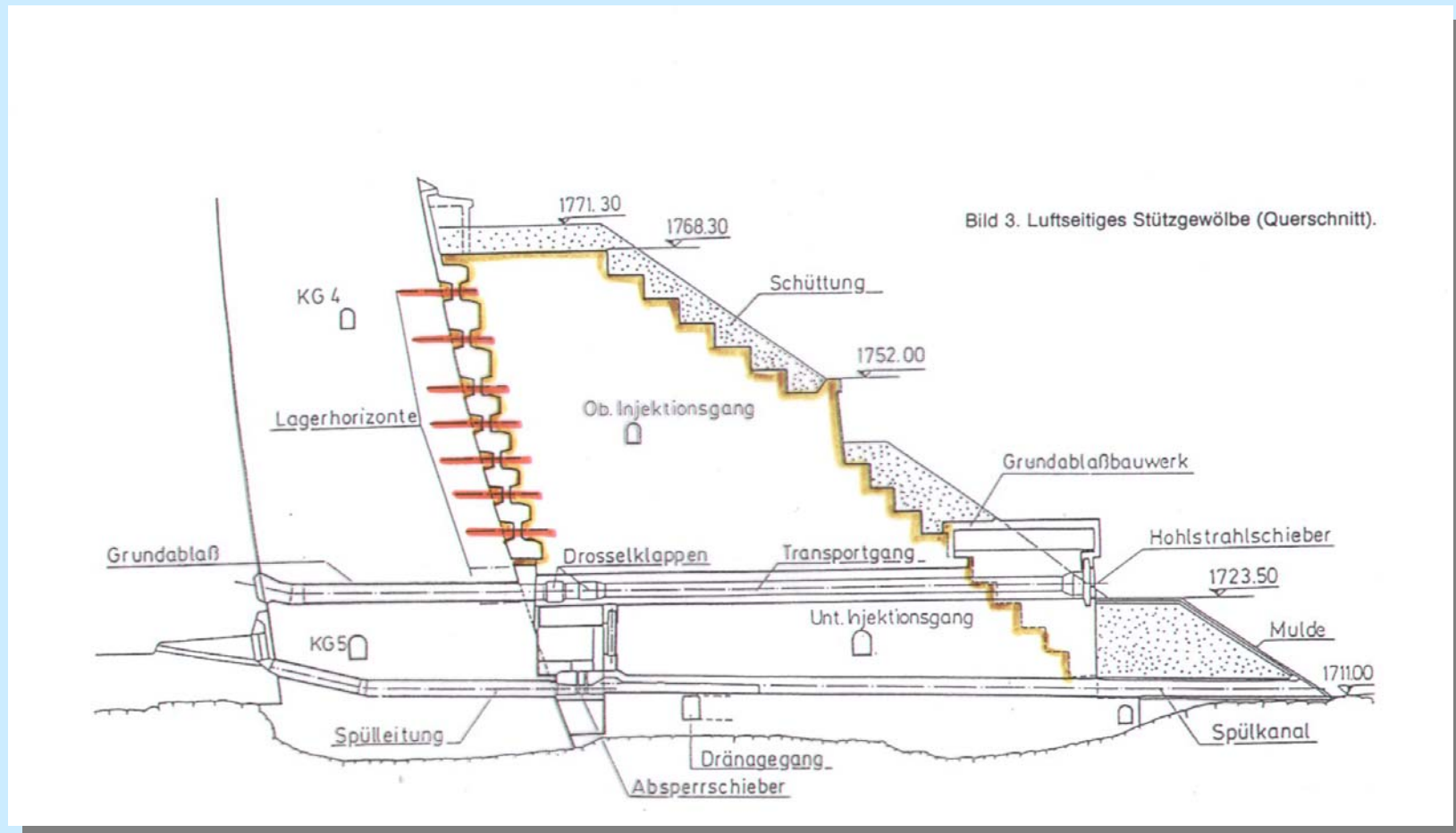
Barrage de Kölnbrein en Autriche



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Barrage de Kölnbrein en Autriche: Assainissement





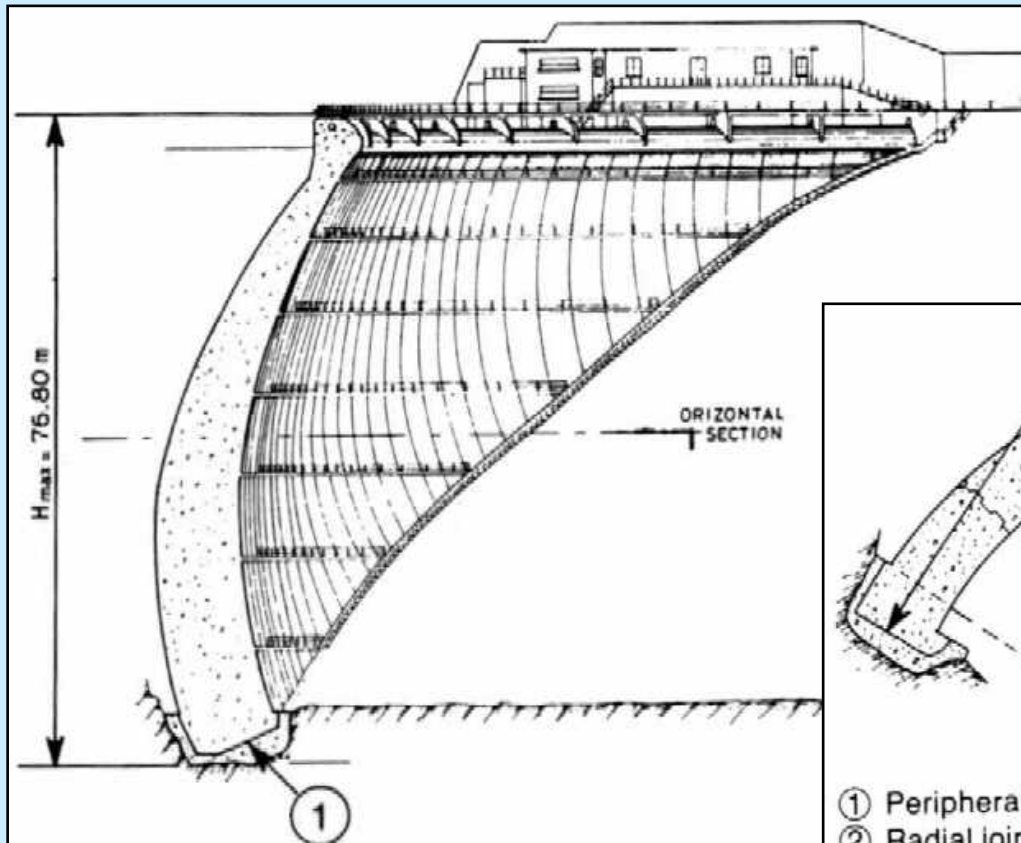
Barrage de Kölnbrein en Autriche: Assainissement



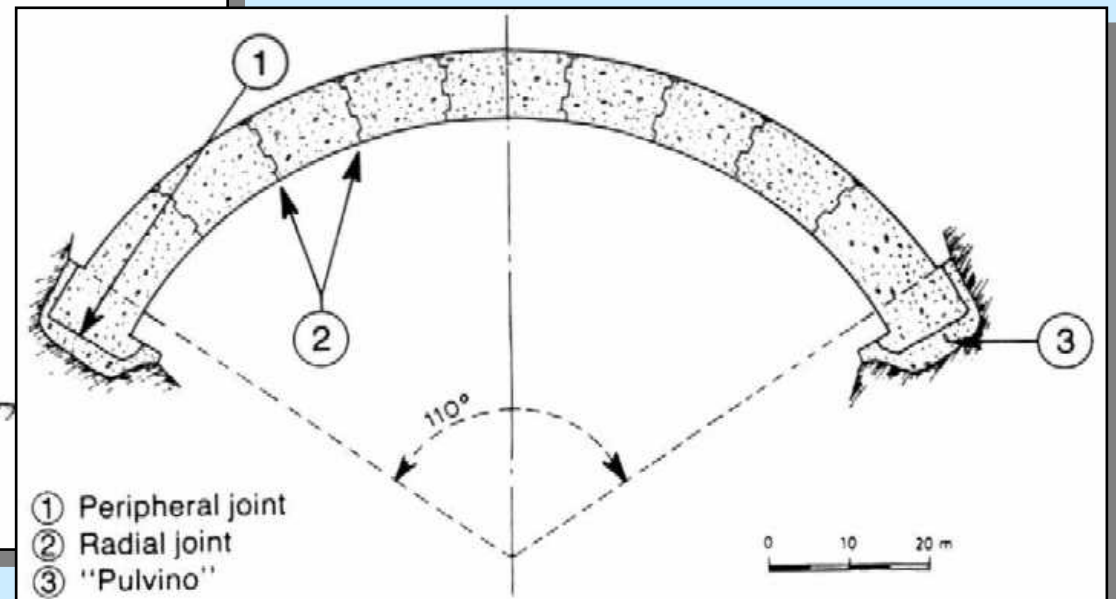
# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

Joint périphérique pour éviter des contraintes de tension près de la fondation (Pulvino)



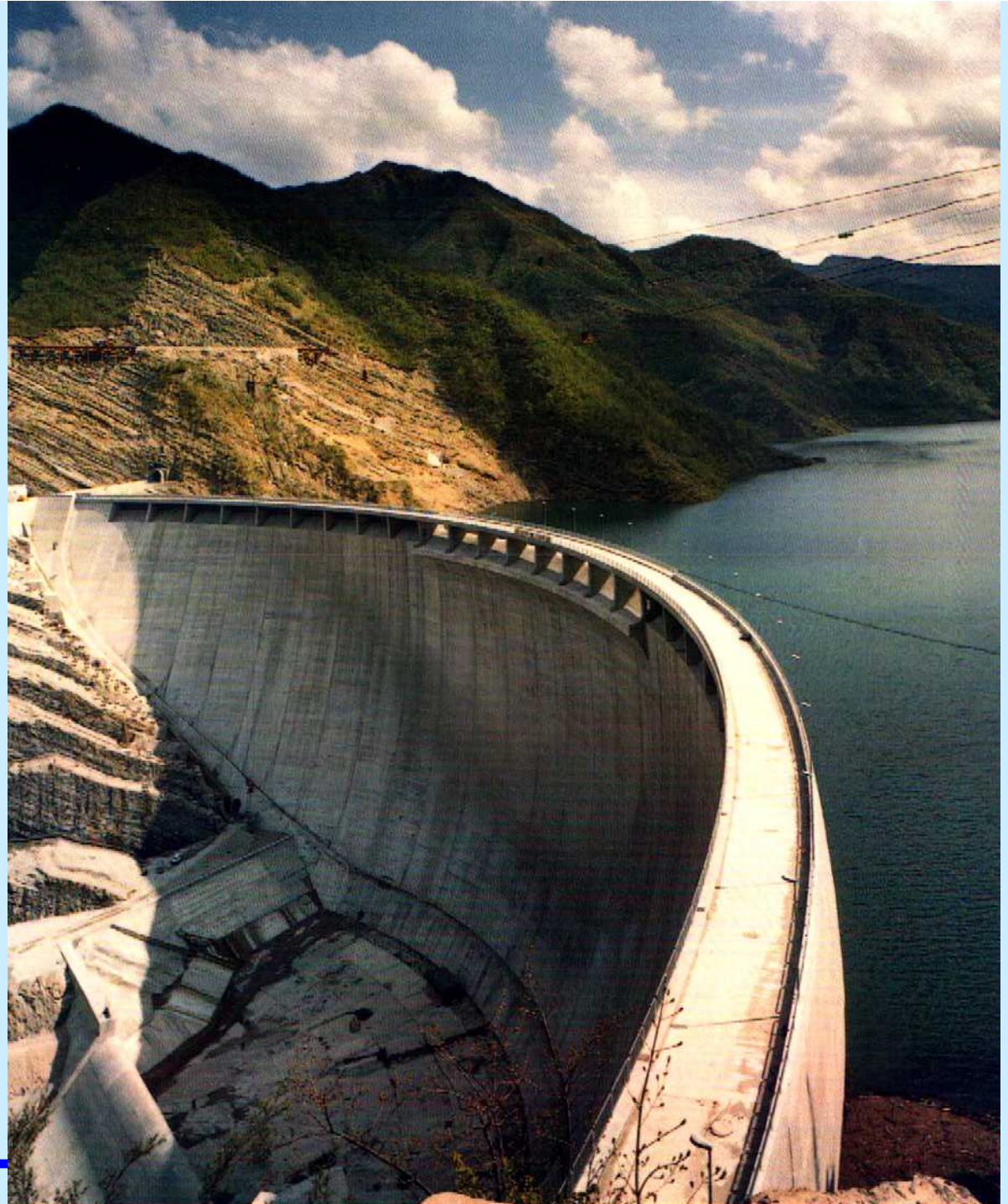
Exemple du barrage  
Osiglietta en Italie



## Barrages en béton Barrages - voûtes

Joint périphérique  
pour éviter des  
contraintes de  
tension  
près de la fondation  
(Pulvino)

Ridracoli, Italie,  
103.5 m, 1982

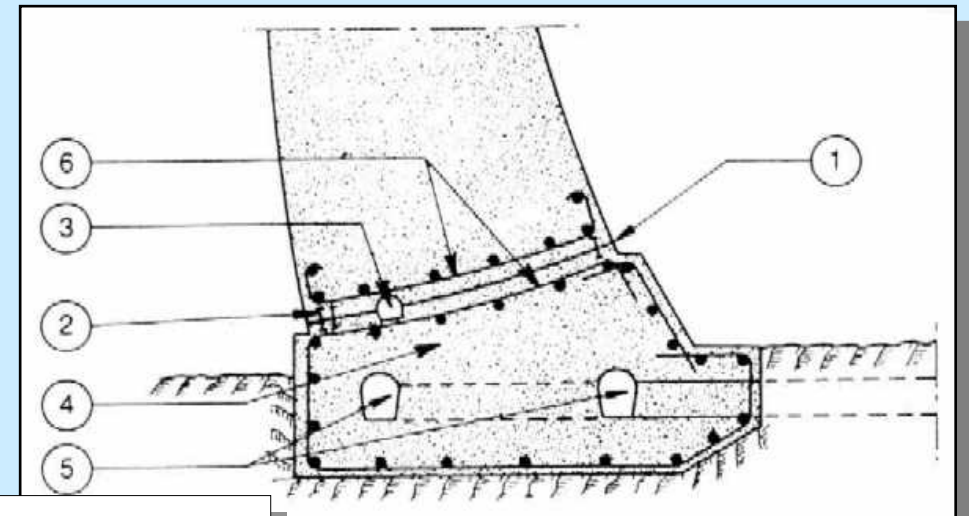
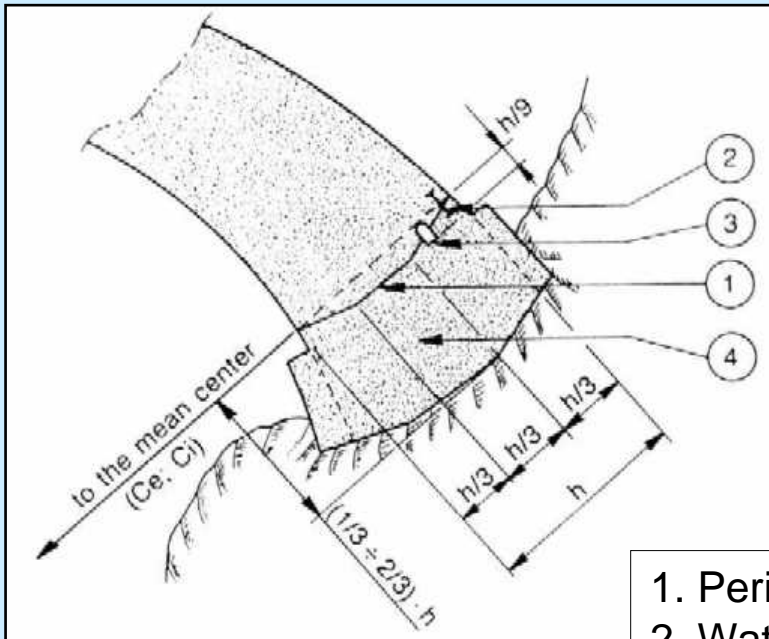




# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### "Pulvino" - Détails constructifs

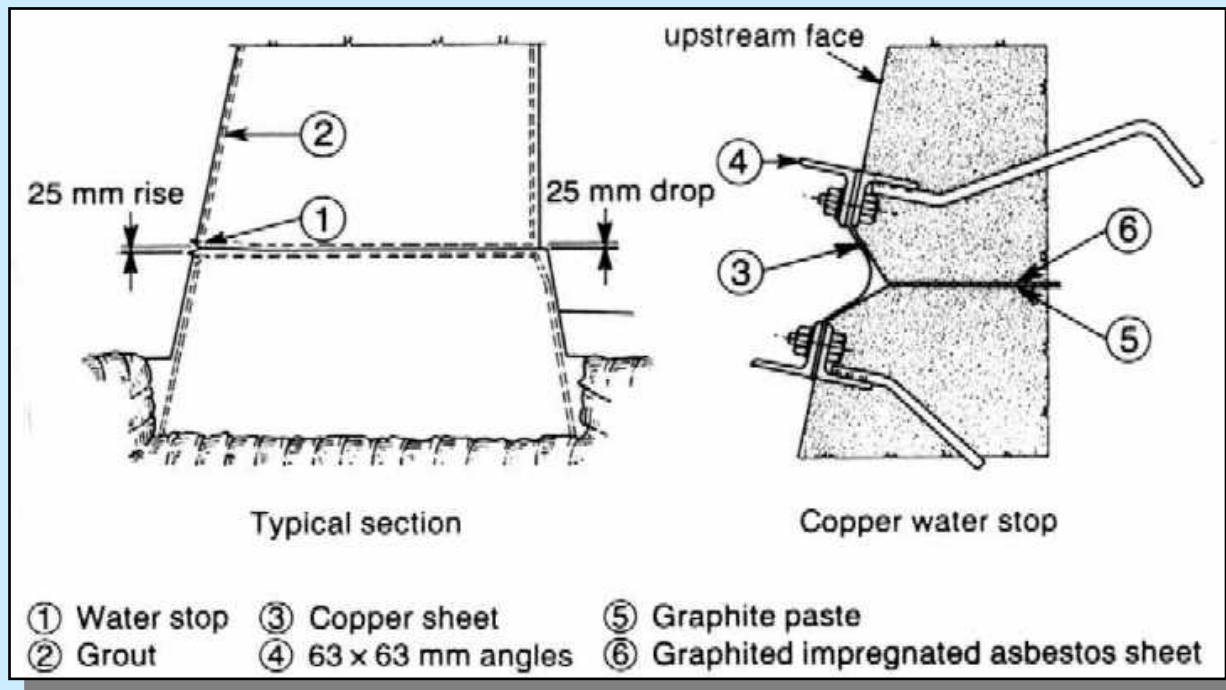


1. Peripheral joint
2. Water stops
3. Peripheral gallery
4. Pulvino
5. Pulvino galleries
6. Steel bars reinforcement

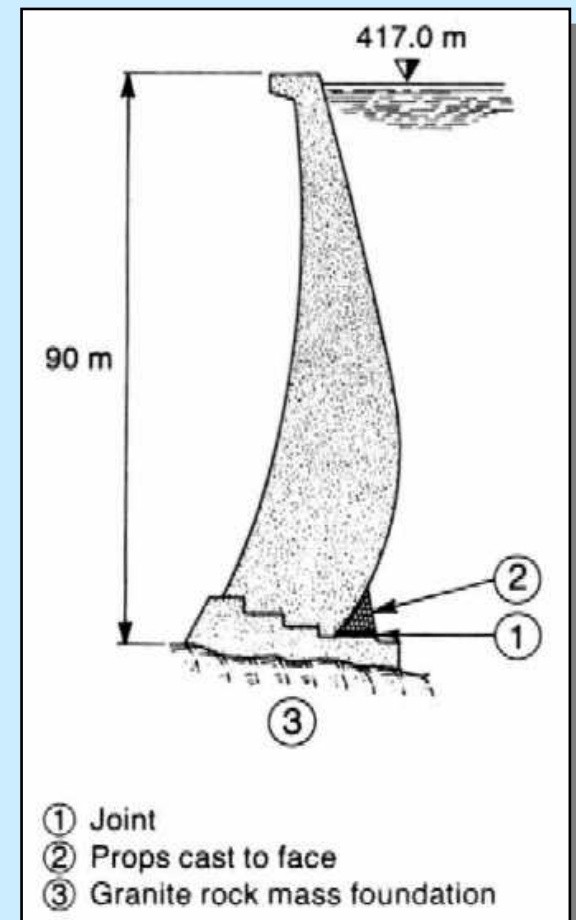
# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Etanchéité du joint périphérique (Pulvino)



### Stabilité pendant la construction



## Galeries et puits

### ⇒ But et utilisation

- ◆ réfrigération du béton pendant la construction
- ◆ injections ultérieures des joints de construction (clavage)
- ◆ mesure des sous-pressions (galerie de pied le long de la fondation)
- ◆ mesure des infiltrations et évacuations des eaux infiltrées
- ◆ accès aux appareils et instruments de surveillance (pendules, cellules de pression, extensomètres, piézomètres, manomètres, nivellement de précision)
- ◆ interventions futures dans le sol (injections et drainages) en cas d'un comportement anormal
- ◆ installation des ascenseurs (puits)

### Galeries et puits

#### ⇒ Ecartements typiques

- ◆ entre les galeries horizontales 20 à 30 m
- ◆ entre les puits verticaux 50 à 80 m
- ◆ puits prolongés 20 à 30 m au minimum dans le rocher
- ◆ galeries également prolongées dans le rocher

#### ⇒ dimensions

- ◆ galeries: largeur minimum de 1.5 m, hauteur minimum de 2.1 m (passage des petites foreuses!)
- ◆ puits:  $\phi$  0.4 m (inaccessible) à  $\phi$  0.8 m (accessible par échelle)

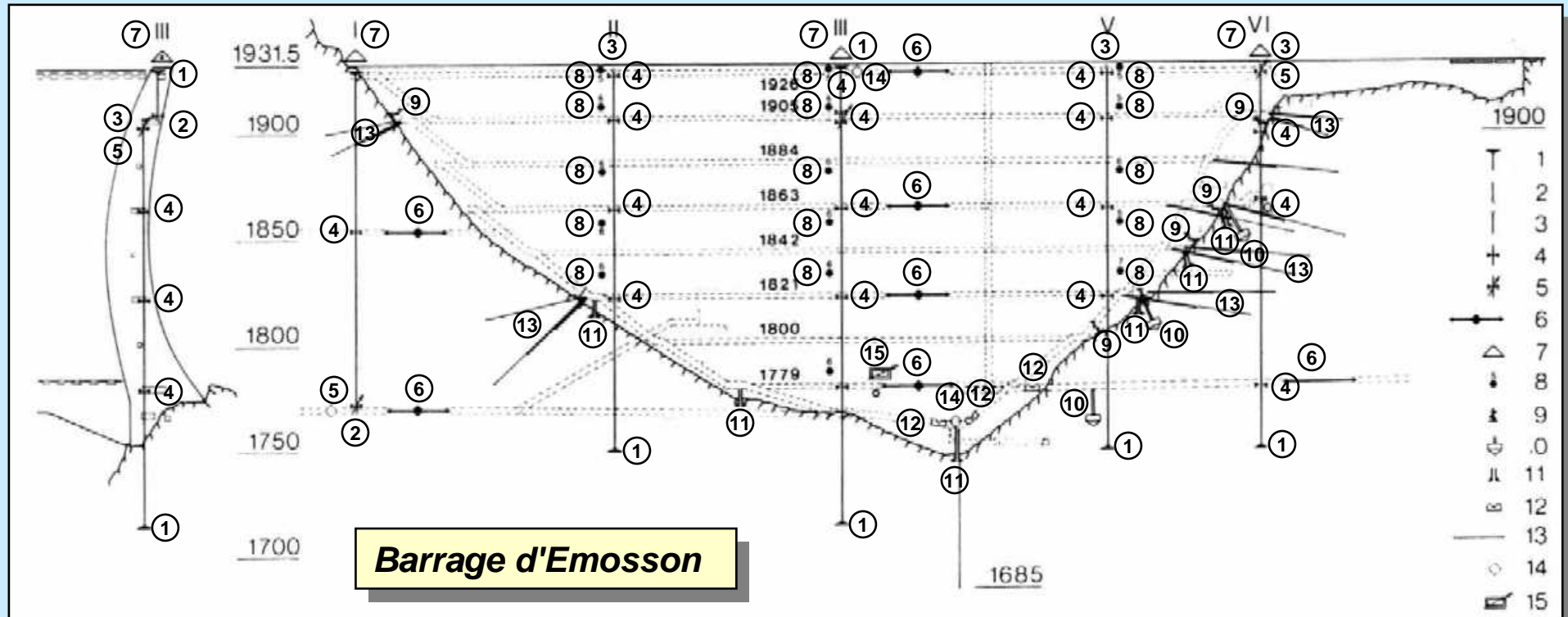
#### ⇒ écartement minimum du parement amont des galeries et puits: profondeur au-dessous du niveau d'eau:

50 m	min.	3.5 m
100 m		4.0 m
150 m		5.0 m
200 m		6.0 m

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Auscultation - Galeries et puits à l'intérieur d'un barrage



- 11. Manomètre
- 12. Venturi (mesures de débit)
- 13. Extensomètre
- 14. Accélérographe à fortes secousses
- 15. Dilatomètre à résistance électrique

- 6. Nivellement de précision
- 7. Station d'observations topographiques
- 8. Groupe de thermomètres
- 9. Cellule de pression
- 10. Piézomètre

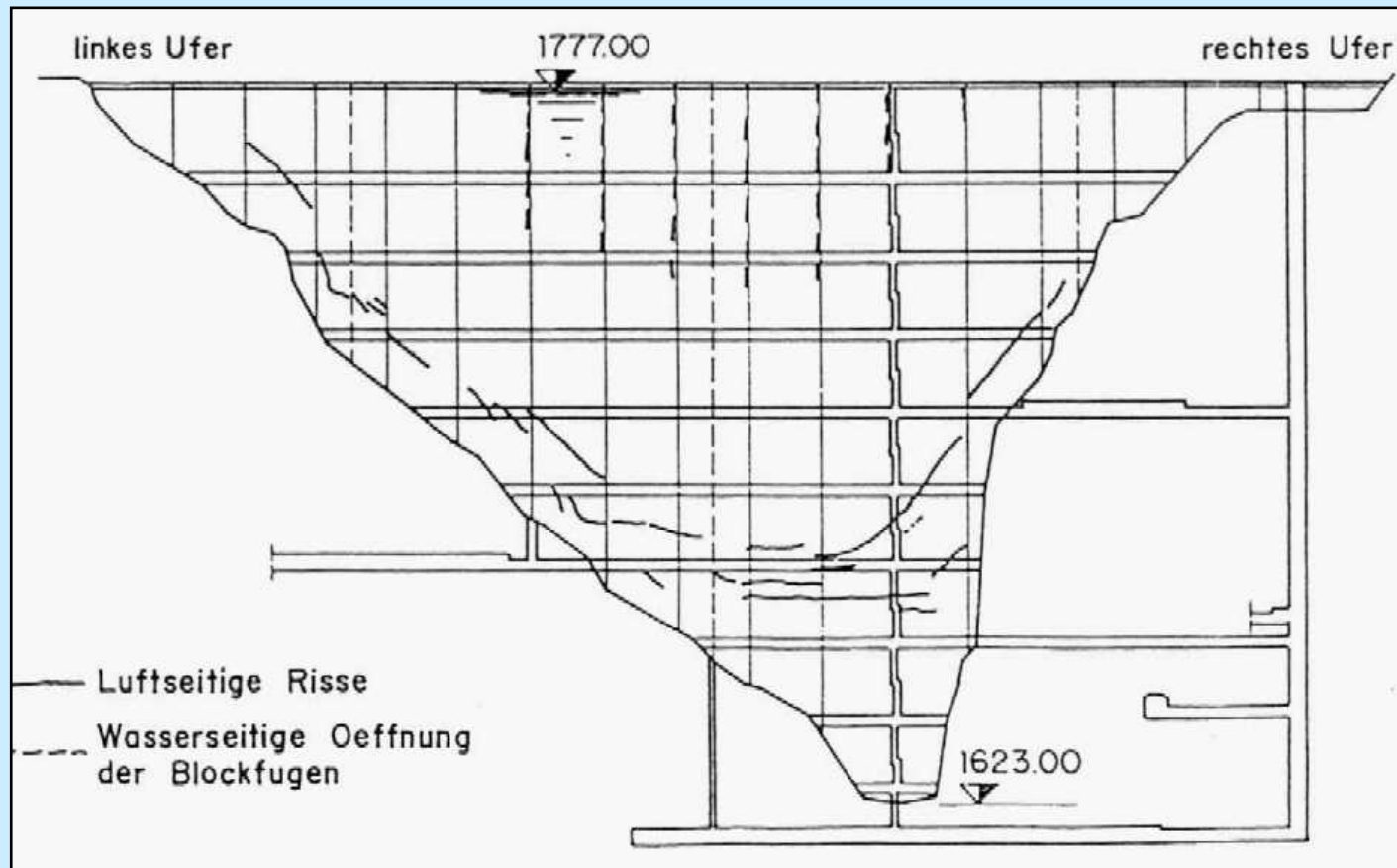
- 1. Appui des pendules
- 2. Poids des pendules
- 3. Flotteur
- 4. Station de lectures optiques
- 5. Station d'enregistrements automatiques



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Fissuration due à l'excavation d'une galerie de sondage *Barrage de Zeuzier*



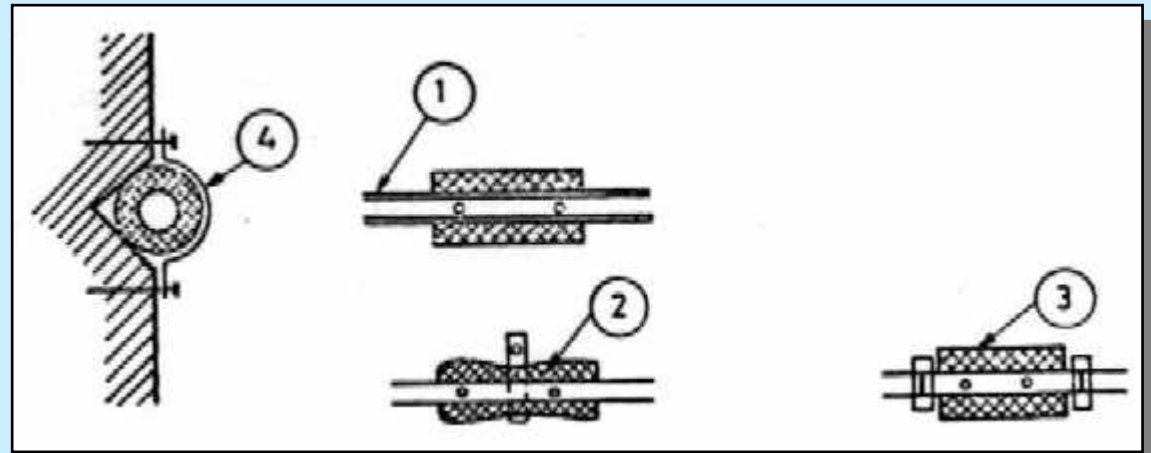
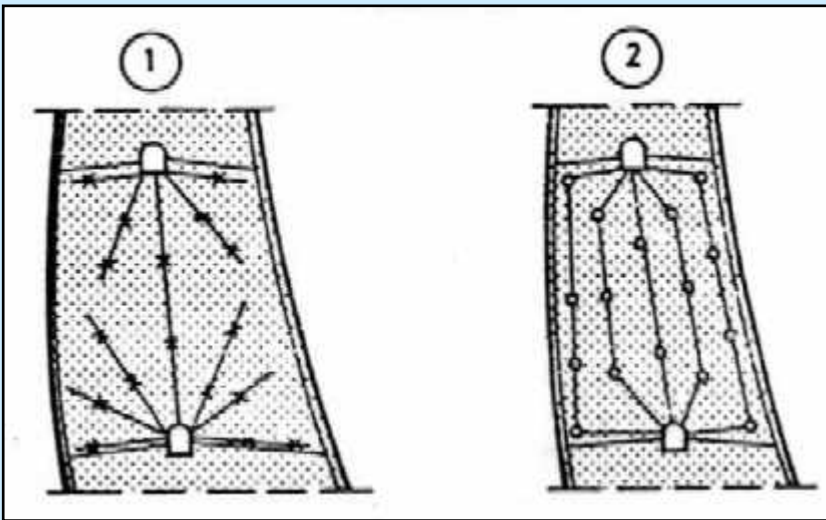
# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Traitement et injection des joints

#### Montage des dispositifs d'injection

1. Tubes à manchettes, montages en étoile
2. Clapets, montage en série



#### Tube à manchettes

1. Tube métallique rectiligne
2. Manchette en caoutchouc, bridée
3. Manchette en caoutchouc, butée par deux manchons vissés au tube
4. Fixation du tube é manchettes dans une rainure ad hoc ménagée dans la face du premier plot bétonné (bride scellée dans le béton au moyen d'un pistolet à clous)

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

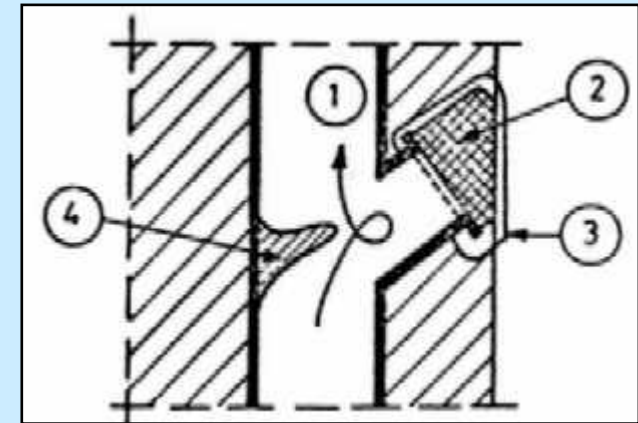
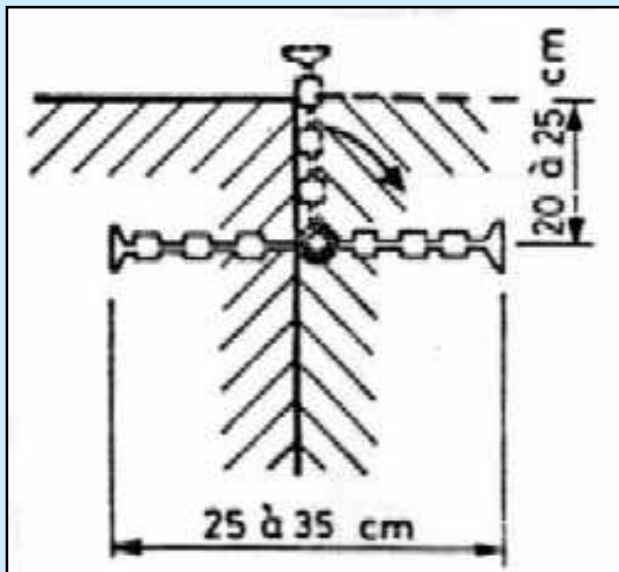
### Traitement et injection des joints

#### Arrêt de joint en caoutchouc synthétique

(Chlorure de polyvinile)

Longueur:

- 30..35 cm: contre la pression de l'eau
- 25..30 cm: autres usages



#### Clapet d'injection

1. Tube métallique  $\varnothing$  1", avec bifurcation
2. Bouchon en caoutchouc
3. Frette en métal flexible
4. Languette destinée à produire un tourbillon lors du lavage du tuyau

## Traitement des fondations

### ⇒ Injection du rocher de fondation

- ◆ **But:** remplir les vides / fissures par du coulis de ciment afin d'étancher et de consolider les roches fissurées
- ◆ **Autres objectifs**
  - ✓ dernière reconnaissance du sous-sol
  - ✓ réduction du débit de percolation à travers la fondation
  - ✓ réduction des sous-pressions  
(seulement possible en combinaison avec des forages de drainage)
  - ✓ réduction de la déformabilité du rocher  
(surtout déformations différentielles)

## Traitement des fondations

### ⇒ Injection du rocher de fondation

- ◆ **Critères:**

  - unité de mesure: Lugeon = 1 l/min./m sous pression d'injection de 10 bar

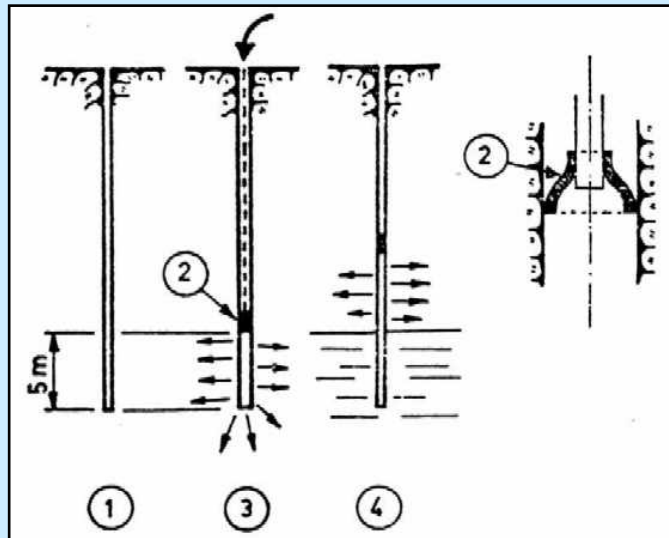
- ◆ **Procédure:** remontant ou descendant

### ⇒ Dimension d'un voile d'étanchéité

- ◆ réduire la perméabilité à 1 - 2 Lugeon jusqu'à une profondeur de 50 m

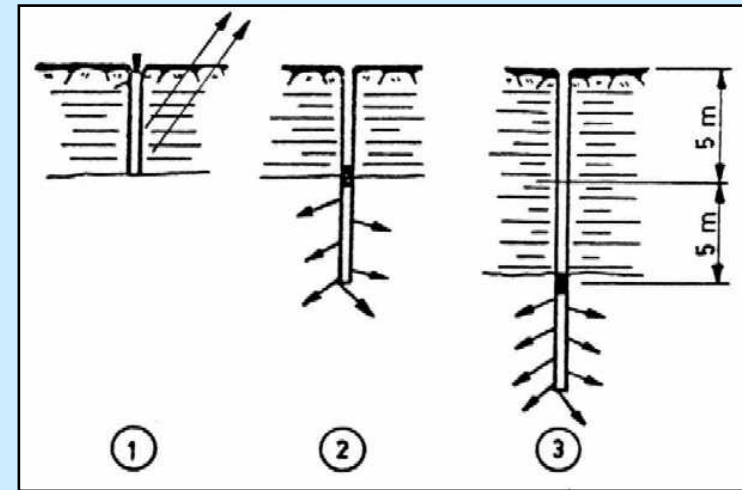
- ◆ profondeur minimum  $\frac{1}{3}$  à 1 fois la hauteur du barrage, au minimum 50 m

### Injection du rocher de fondation



#### Injection du rocher par passes remontantes

1. Forage du trou
2. Obturateur, dont les parois flexibles sont poussées contre celles du forage par la pression intérieure
3. Injection de la 1ère passe inférieure
4. Injection de la passe suivante, etc.



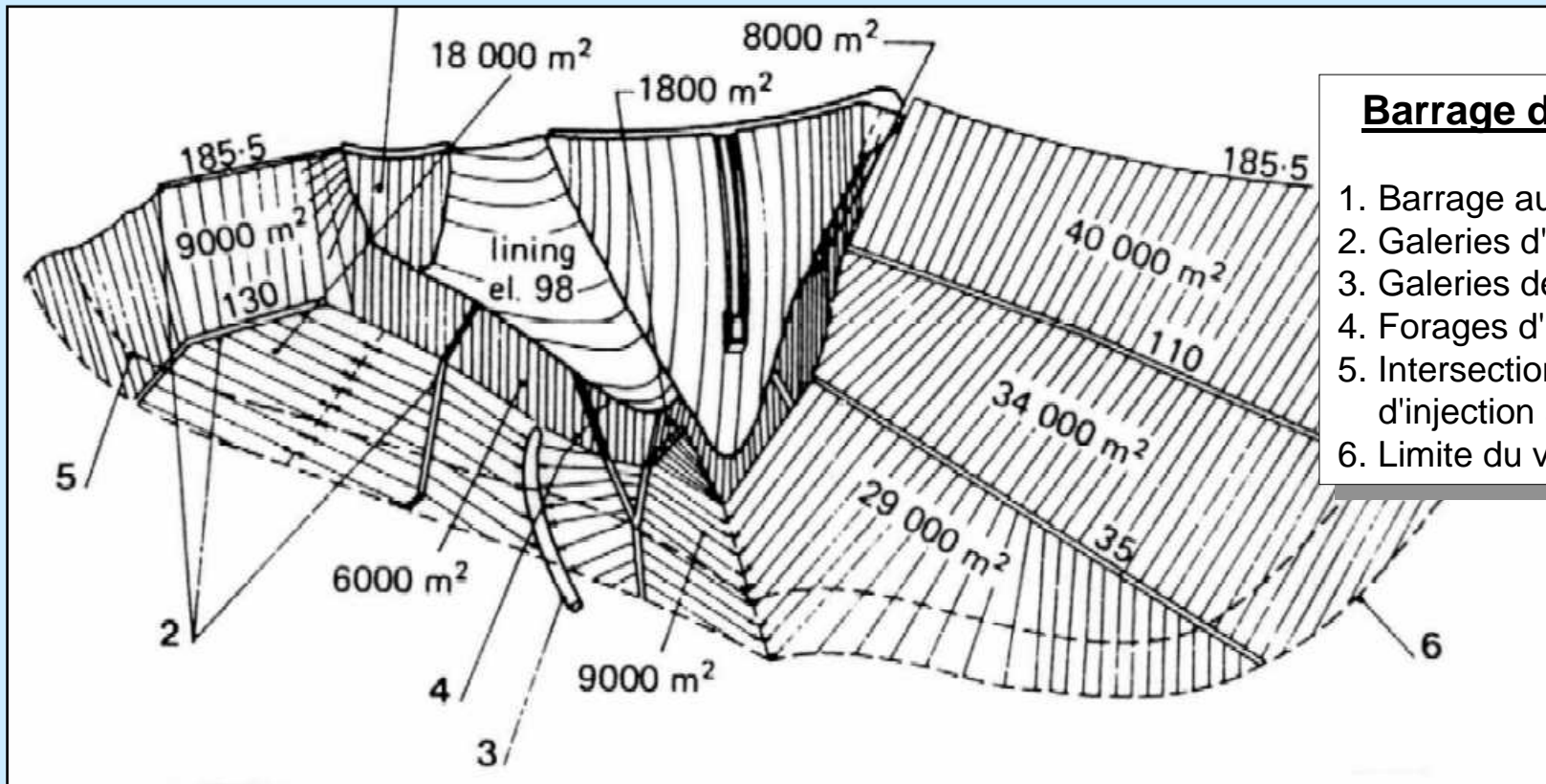
#### Injection du rocher par passes descendantes

1. Forage d'une passe de 5 m
2. On injecte cette 1ère passe (au besoin sous très faible pression) pour former un "chapeau", puis on fore les 5 m suivants
3. On injecte la 2e passe, puis on fore les 5 m suivants

# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Voile d'injection



#### Barrage de Oymapinar

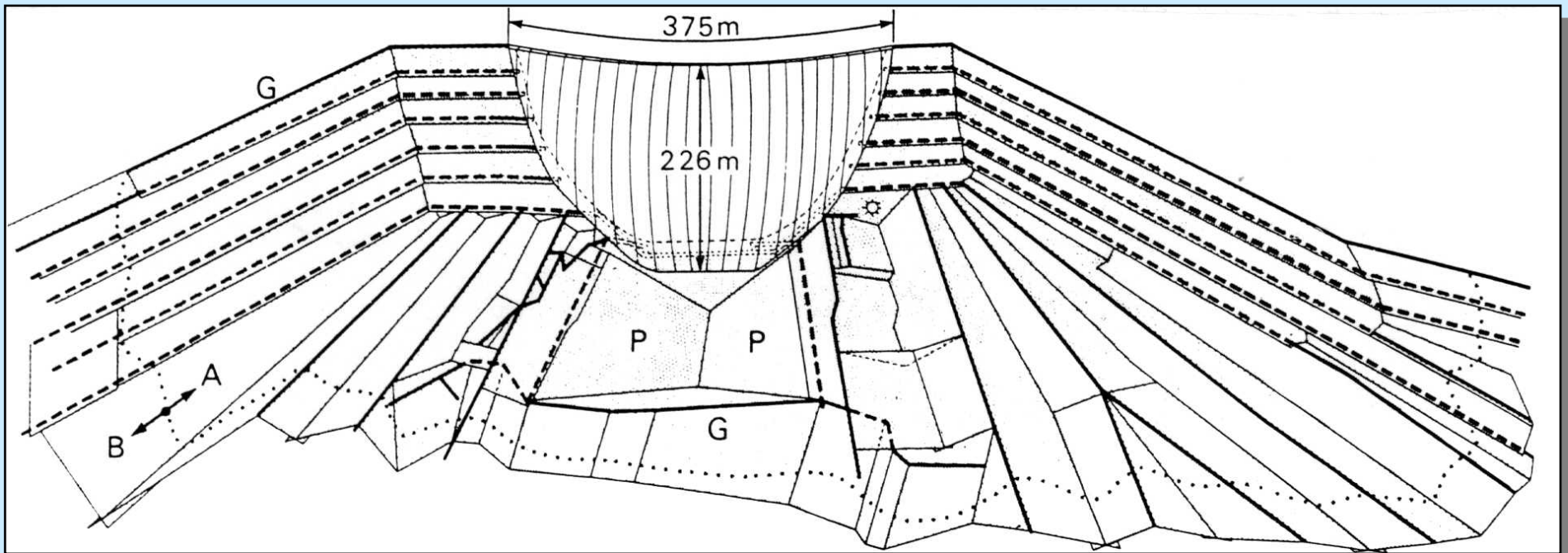
1. Barrage auxiliaire
2. Galeries d'injection
3. Galeries de dérivation
4. Forages d'injection
5. Intersection du voile d'injection avec les schistes
6. Limite du voile d'injection



# Barrages en béton

## Barrages - voûtes

### Voile d'injection



### Barrage d'El Cajón

A. Partie en calcaires  
B. Partie dans les volcanites

G. Galeries d'injection  
P. Plans du voile