

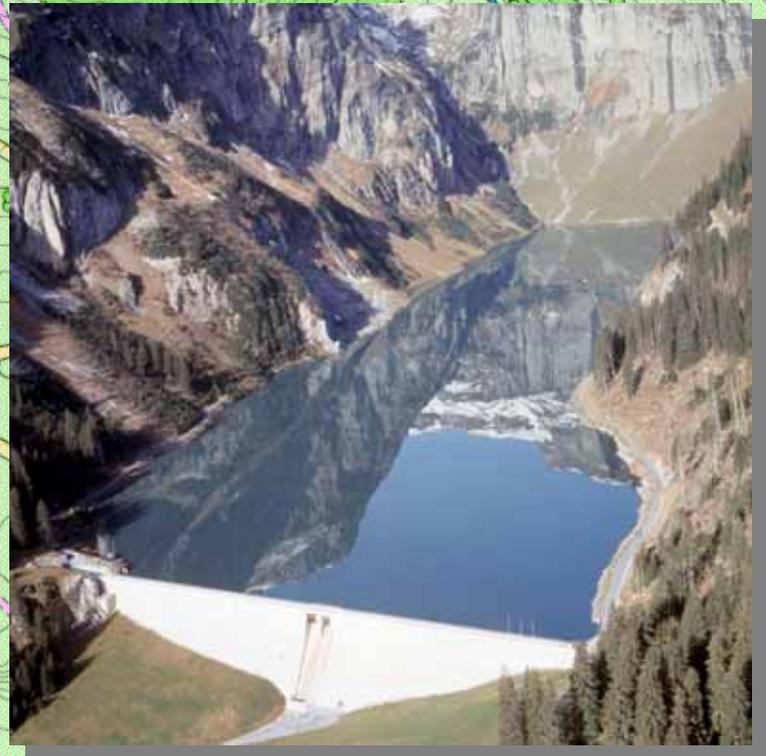
# Barrages-poids

Panix, Grison, 53 m, 1989

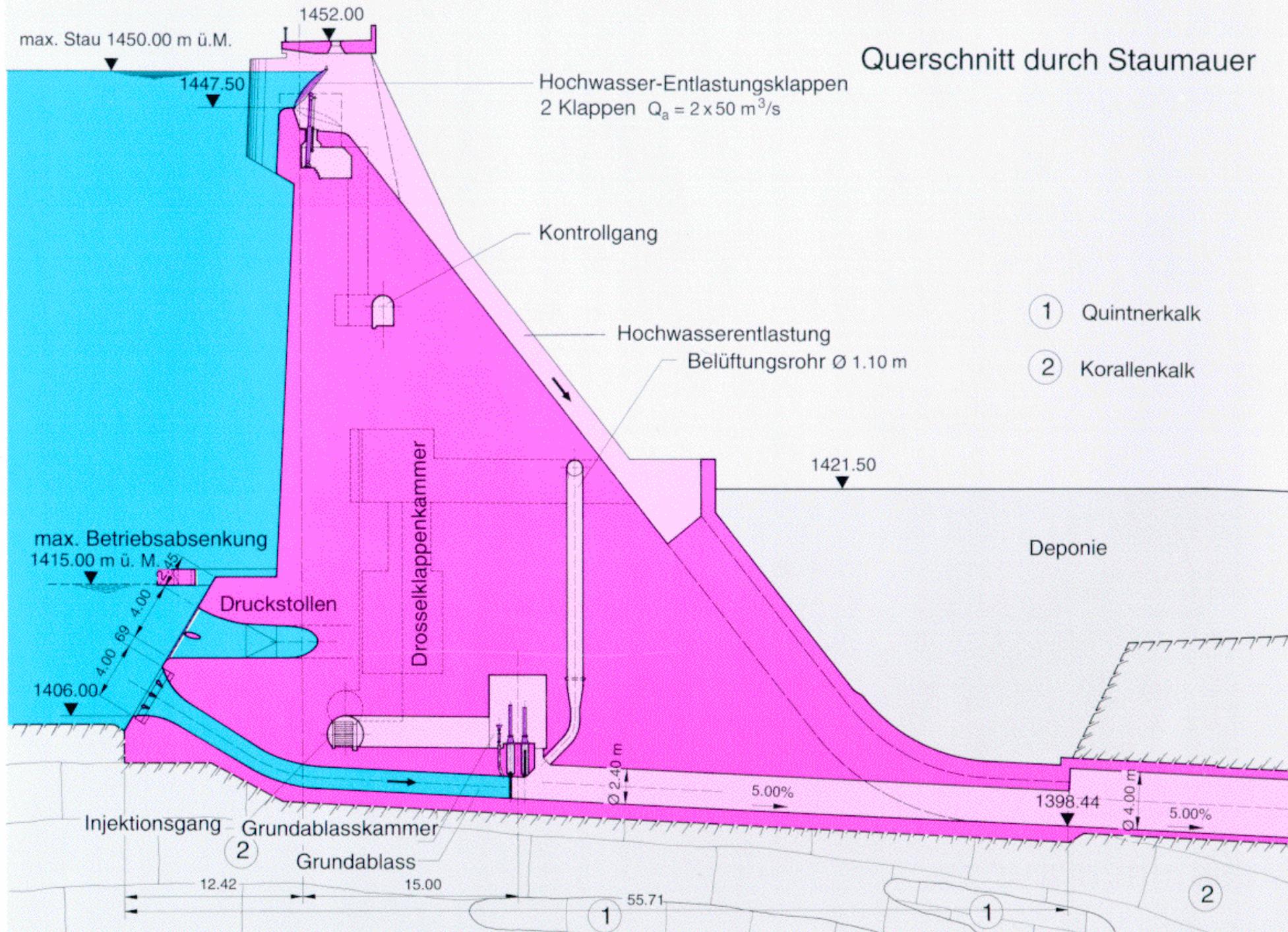


Panix, Grison, 53 m, 1989

'99 9 7



# Querschnitt durch Staumauer



## Principe d'un barrage-poids

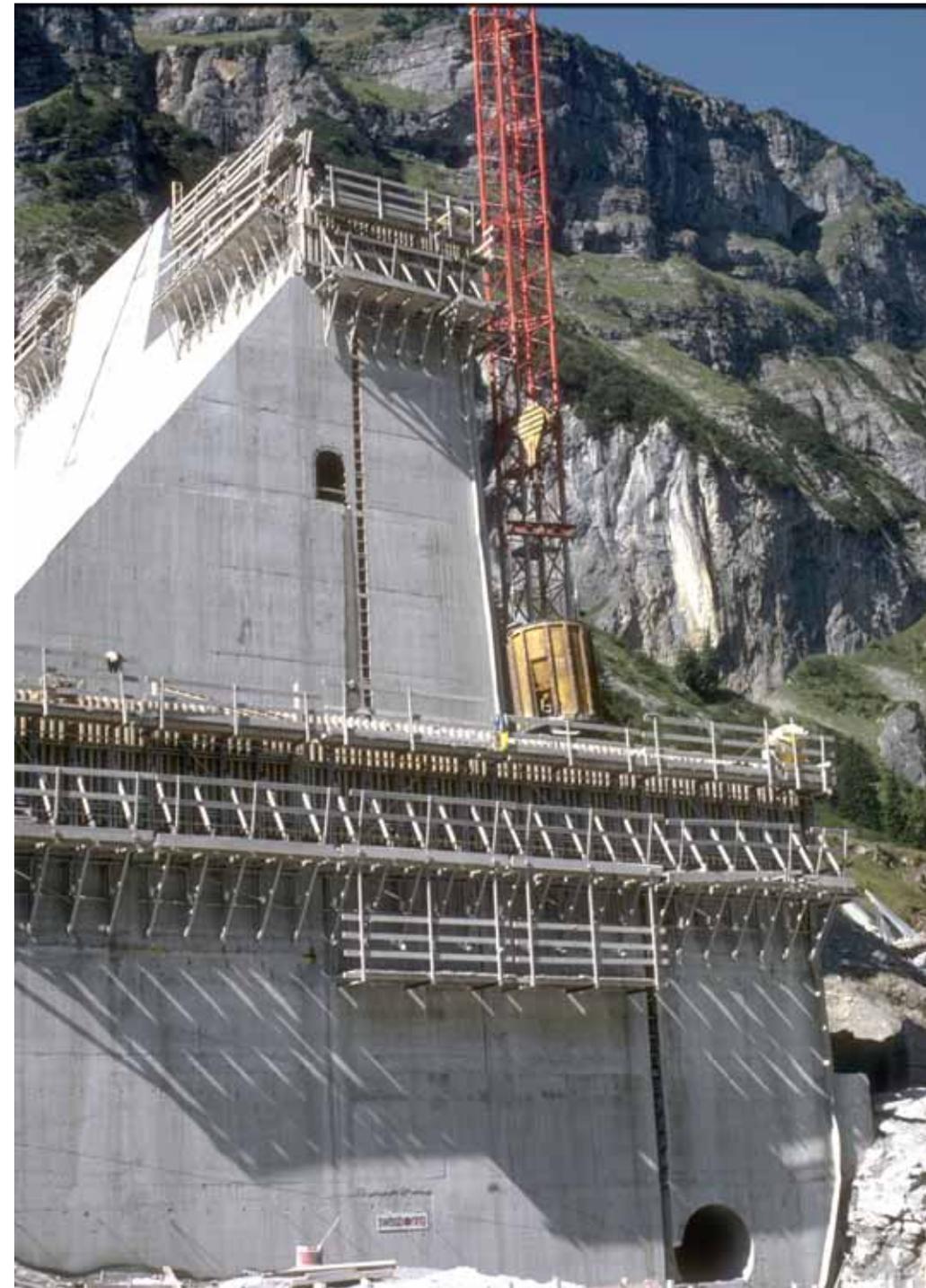
- ➔ Le poids propre s'oppose à la poussée de l'eau par le frottement résultant.
- ➔ Chaque élément (bloc, plot) est stable, on ne considère aucun effet de voûte ou bi-directionnel.
- ➔ Pour le cas de charge normal, l'état de contraintes doit être partout en compression (donc aucune armature).
- ➔ Exigences à l'interface barrage sol.
  - fondation sur rocher
  - déformation limitées
  - étanchéité



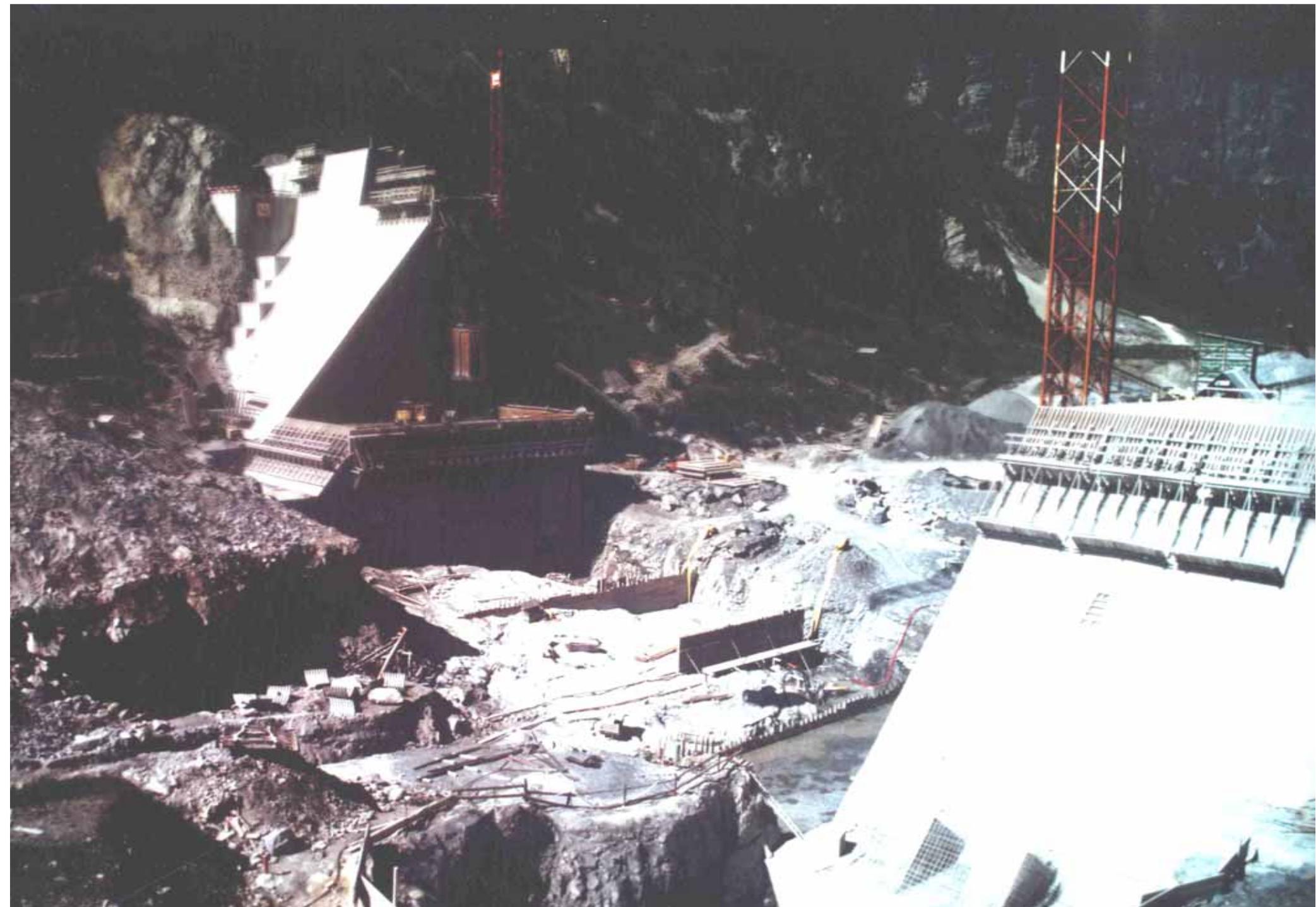
# Barrages en béton

## Barrages-poids

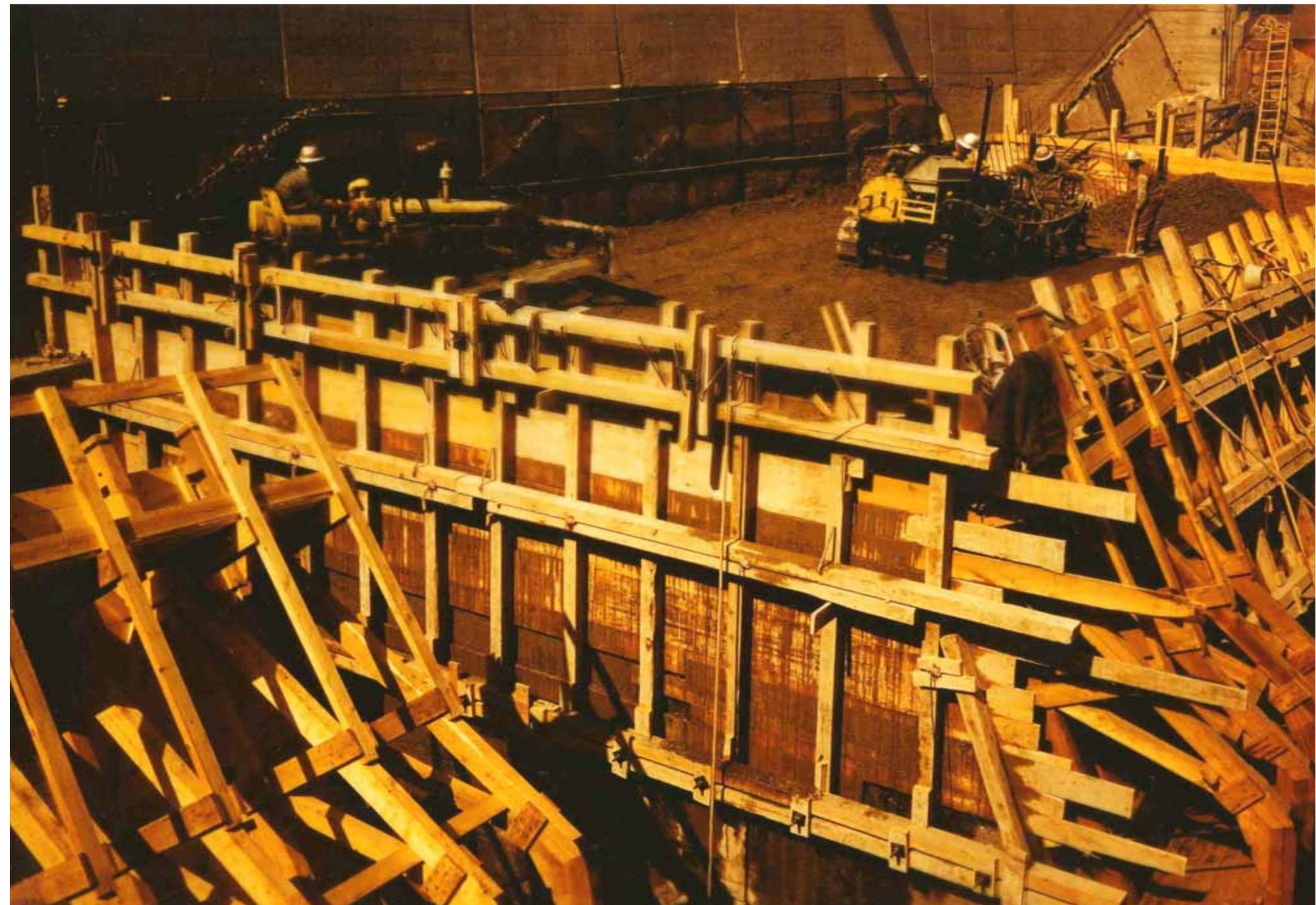








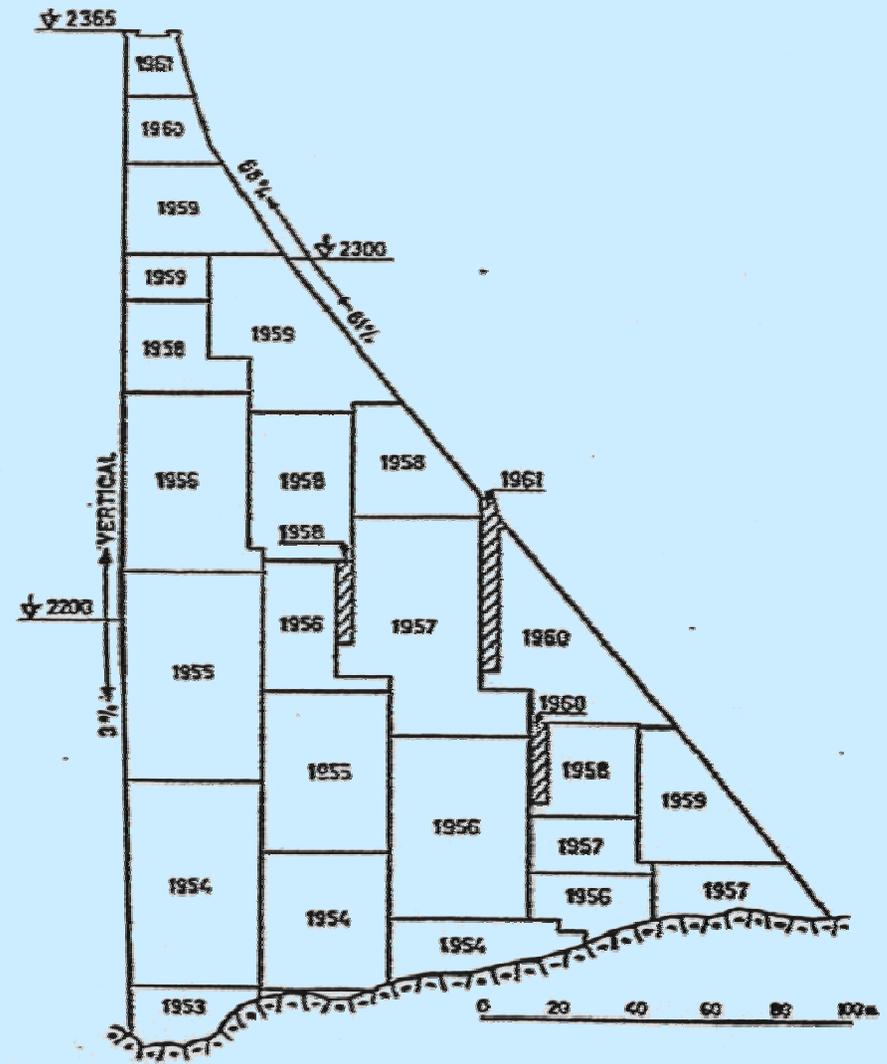




# Barrages en béton

## Barrages-poids

Barrage poids  
(Grande Dixence, Suisse)

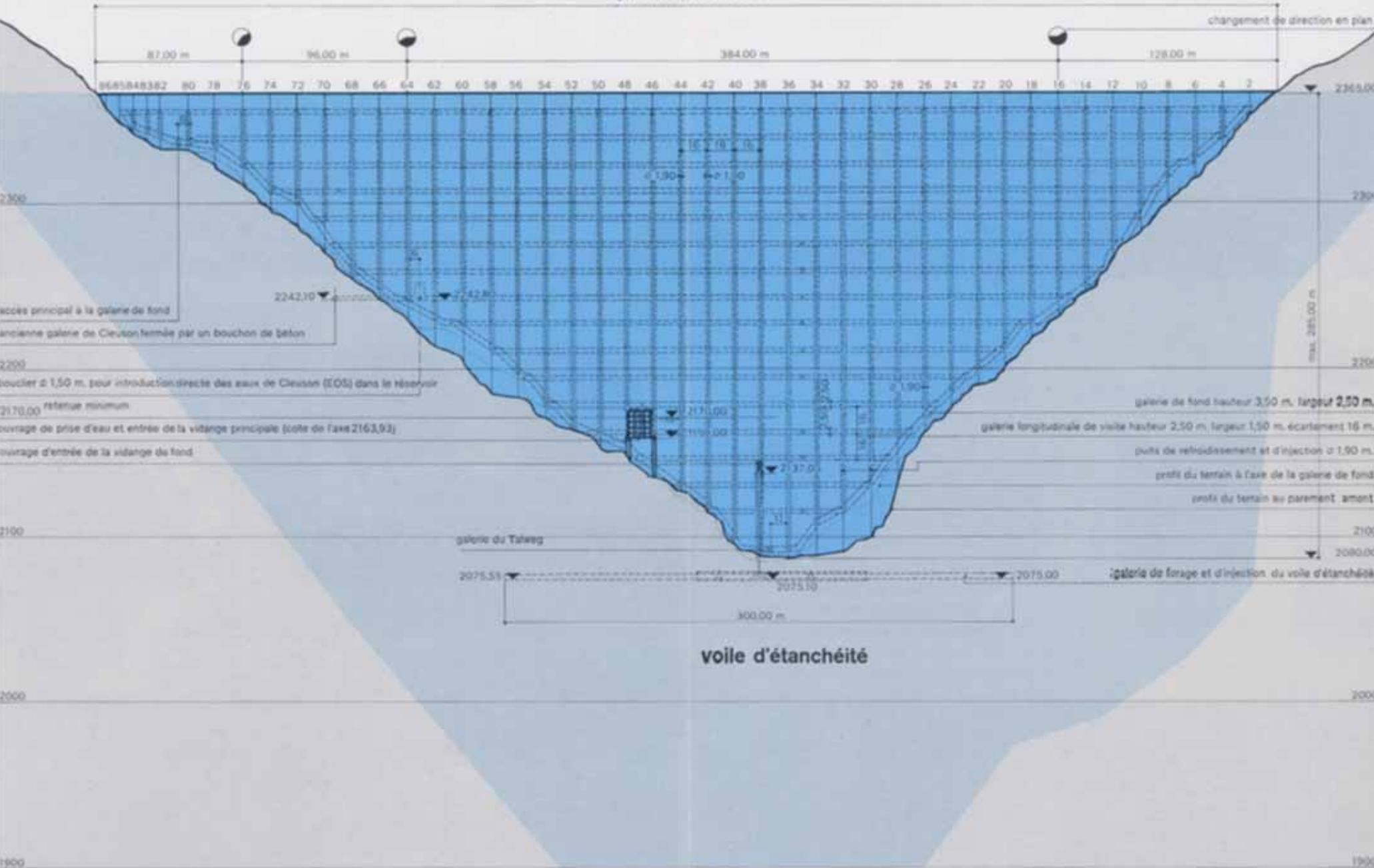


Rive gauche

Rive droite

longueur développée env. 695 m

changement de direction en plan



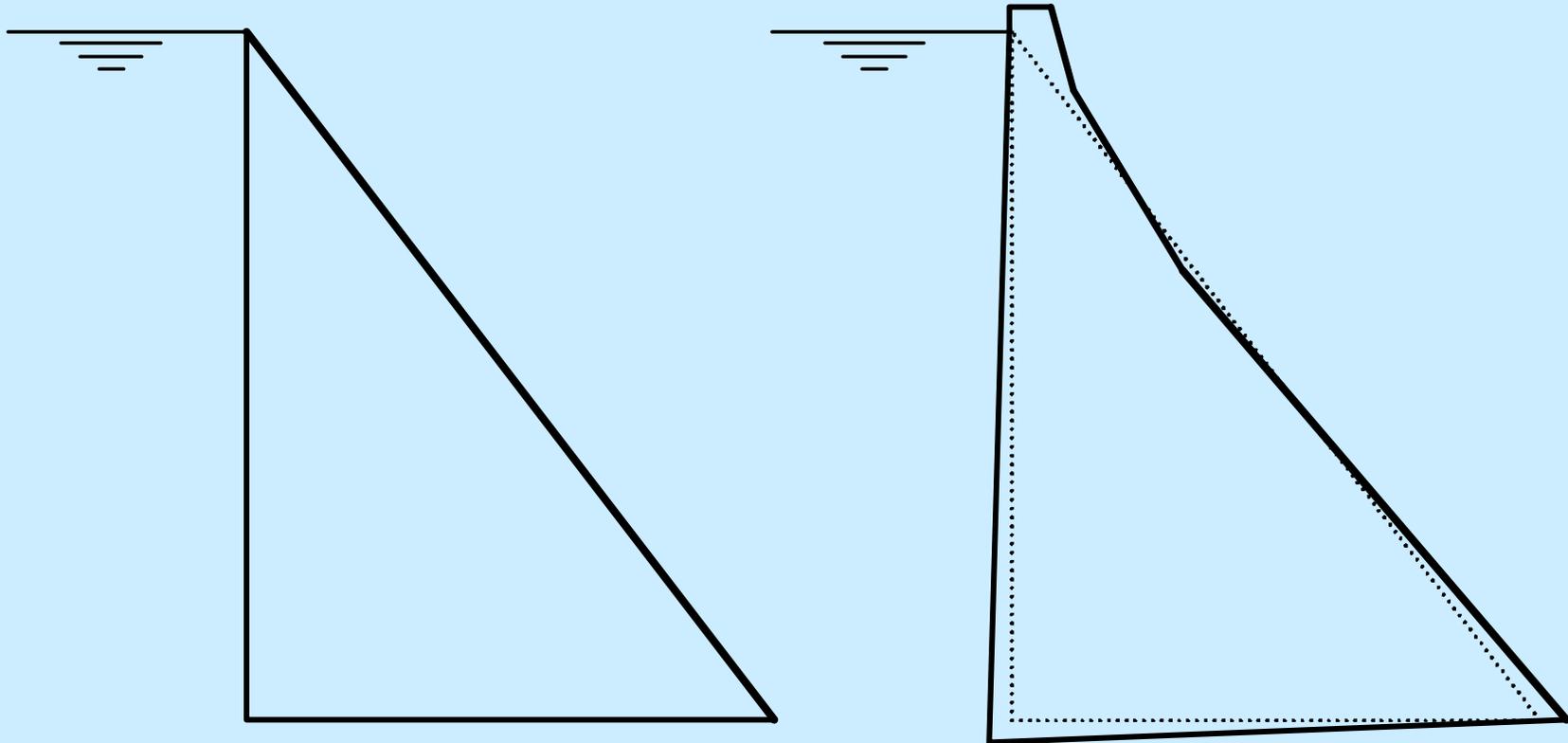


- et introduction des eaux de Cleuson (EOS)
- 8 Galerie d'aménée des eaux de Cleuson  $Q = 2,7 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 9 Dessableur - Dégraveur des eaux de Cleuson
- 10 Bouclier pour introduction directe des eaux de Cleuson dans le réservoir (lac au-dessous de 2240,50)
- 11 Ouvrage d'entrée de la vidange de fond
- 12 Chambre des vannes et galerie de la vidange de fond  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 13 Galerie d'aménée des eaux du Chennaz  $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 14 Galerie d'aménée des eaux de Vouasson  $Q = 1,6 \text{ m}^3/\text{sec}$
- 15 Ouvertures pratiquées dans l'ancien barrage
- 16 Joints de contraction transversaux du barrage  $e = 16 \text{ m}$
- 17 Bâtiment d'exploitation (Ritz)
- 18 Héliport
- 19 Galerie d'accès aux vannes et réducteurs de pression
- 20 Atelier souterrain
- 21 Téléphérique Chargeur-Blava
- 22 Plate-forme des visiteurs
- 23 Route Motôt-Chargeur-Blava
- 24 Anciennes galeries EOS désaffectées
- 25 Anciens funiculaires de service désaffectés
- 26 Mirador
- 27 Chemin des alpages jusqu'à Cheilon
- 28 Station de jaugeage des eaux de Vouasson
- 29 Station de jaugeage des eaux de Cleuson
- 30 Station de jaugeage des eaux de Chennaz

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Forme générale d'un barrage-poids

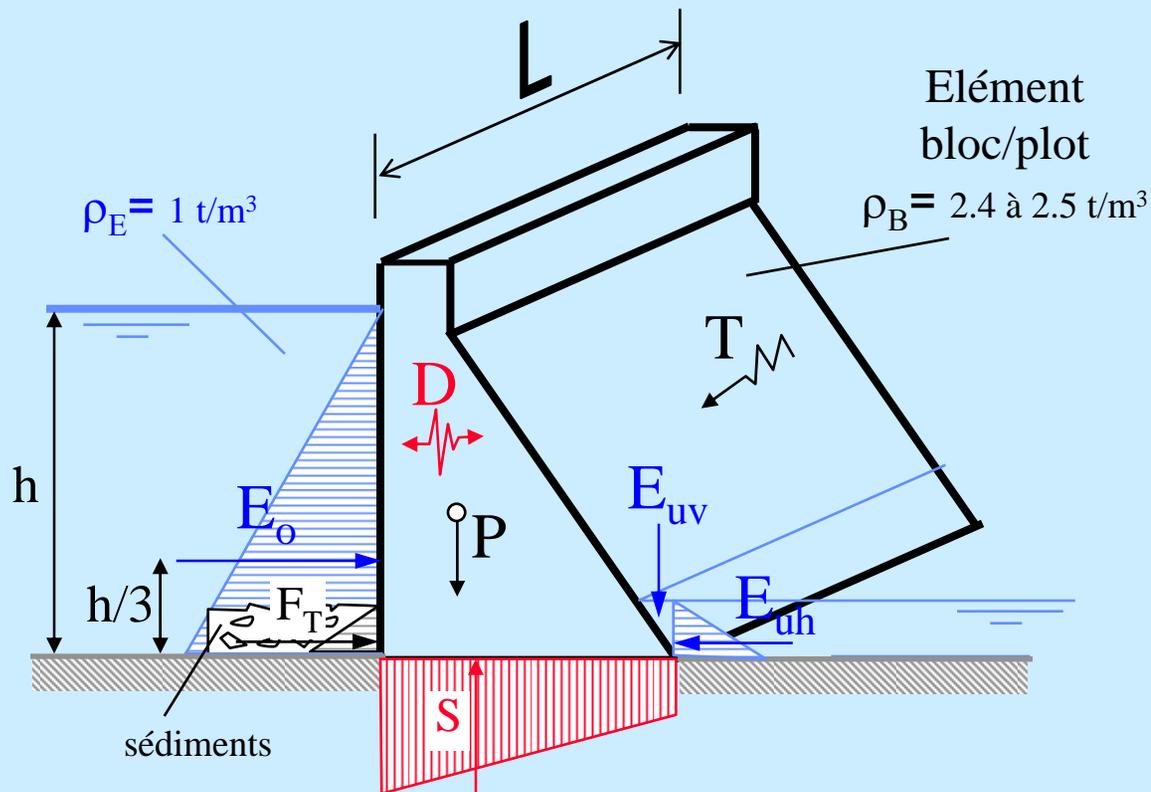


Parement aval incliné avec un fruit de 75 % à 80 %

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Sollicitations - Forces et actions



E: poussée de l'eau.

$E_0$ : amont  $E_u$ : aval

h et v composantes et horizontales  
verticales.

P: poids propre.

$F_T$ : poussée des terres (sédiments  
accumulés au fond du lac).

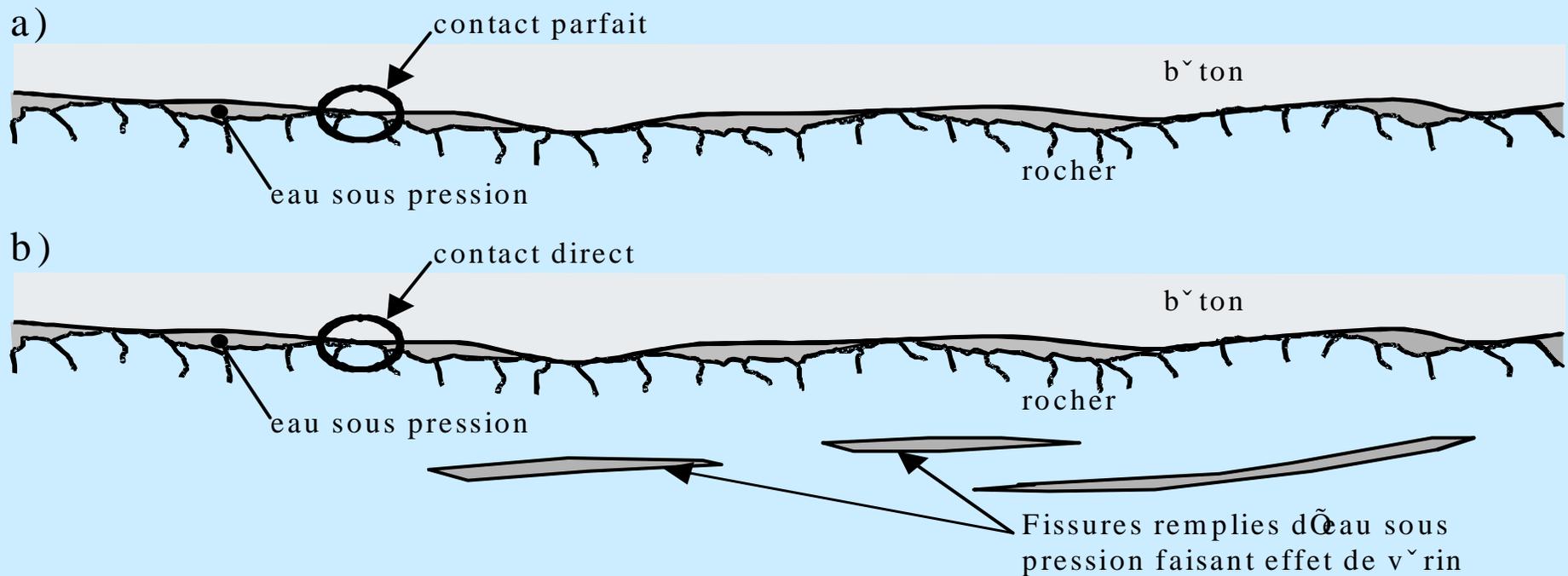
S: sous-pression.

D: actions dynamiques dues aux  
tremblements de terre.

T: actions à cause de température.

Sollicitations - les sous-pressions

*Le coefficient de sous-pression: surface d'application*



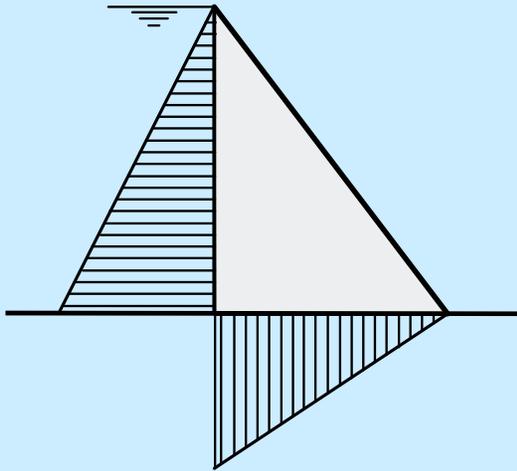
*a) Ancienne hypothèse*

*b) Etat actuel des connaissances*

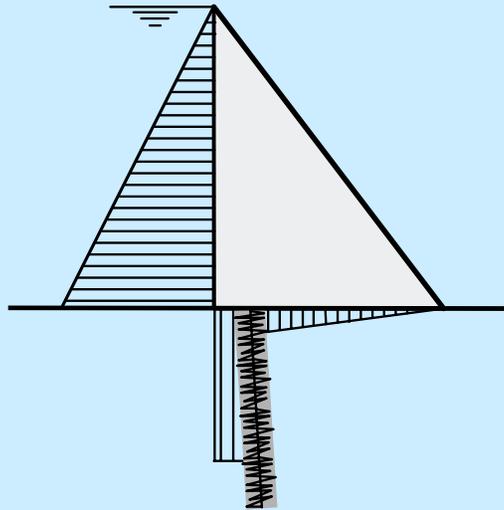
# Barrages en béton

## Barrages-poids

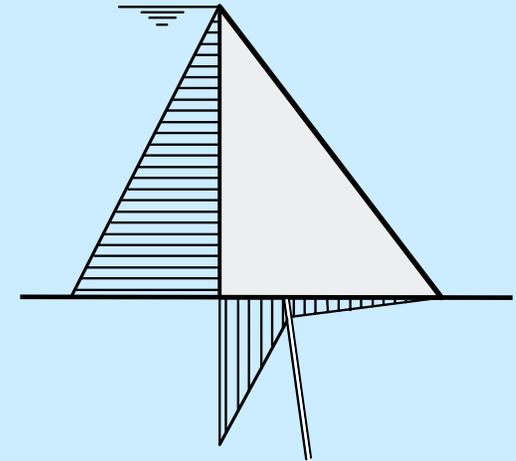
### La répartition des sous-pressions



a) perméabilité homogène et isotrope



b) écran de faible perméabilité (injections)



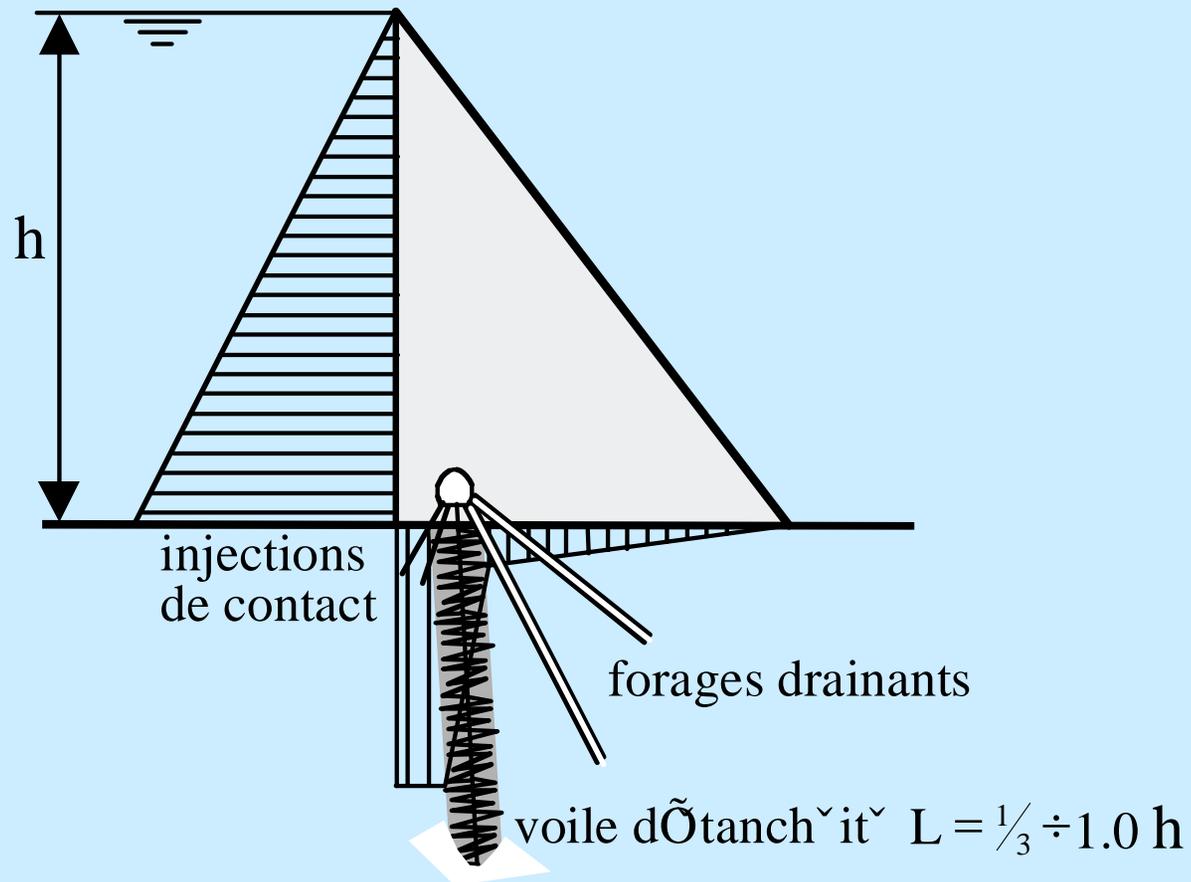
c) zone drainée

$k$  : coefficient de sous-pression (facteur de forme)

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Mesures de réduction des sous-pressions

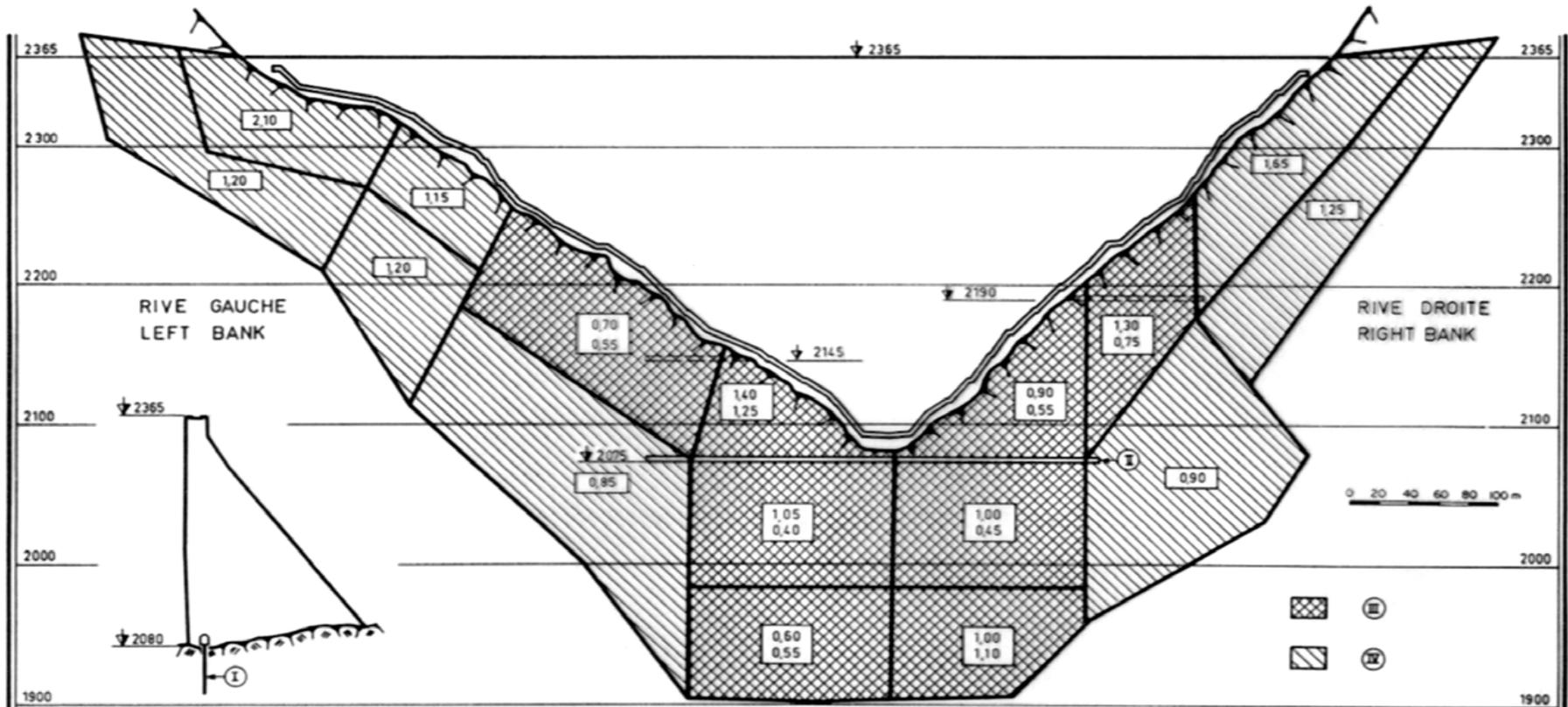


# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Mesures de réduction des sous-pressions

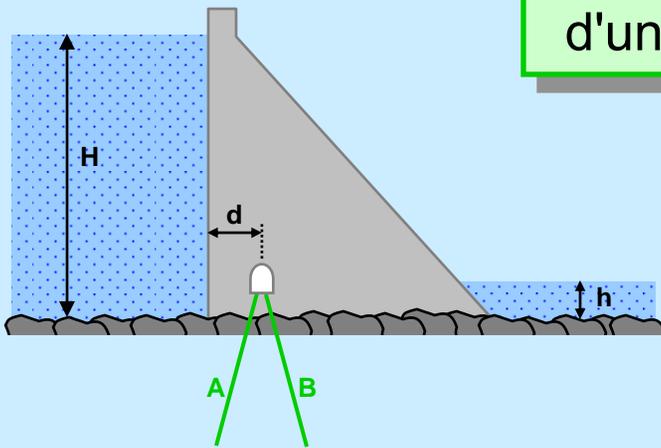
### Voile d'étanchéité



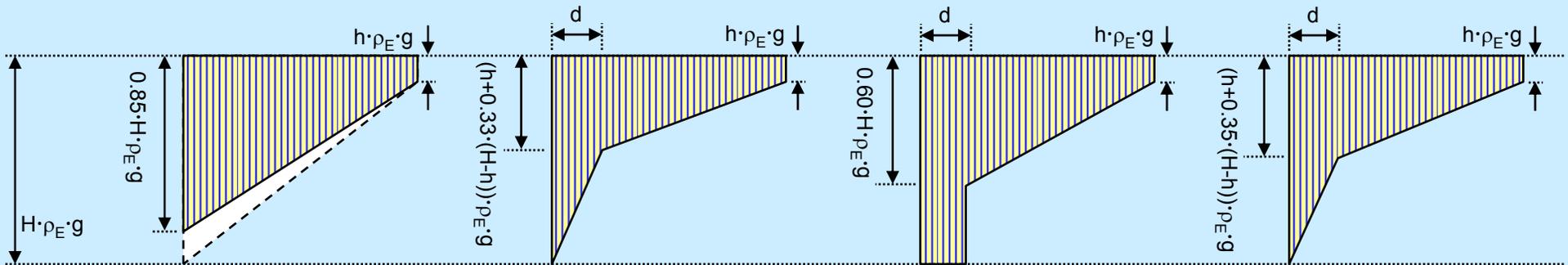
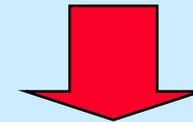
# Barrages en béton

## Barrages-poids

Hypothèses pour la répartition des sous-pressions en cas d'un écran d'étanchéité combiné avec forages drainants



A: Ecran d'étanchéité  
B: Forages drainants



Suisse, Autriche  
France

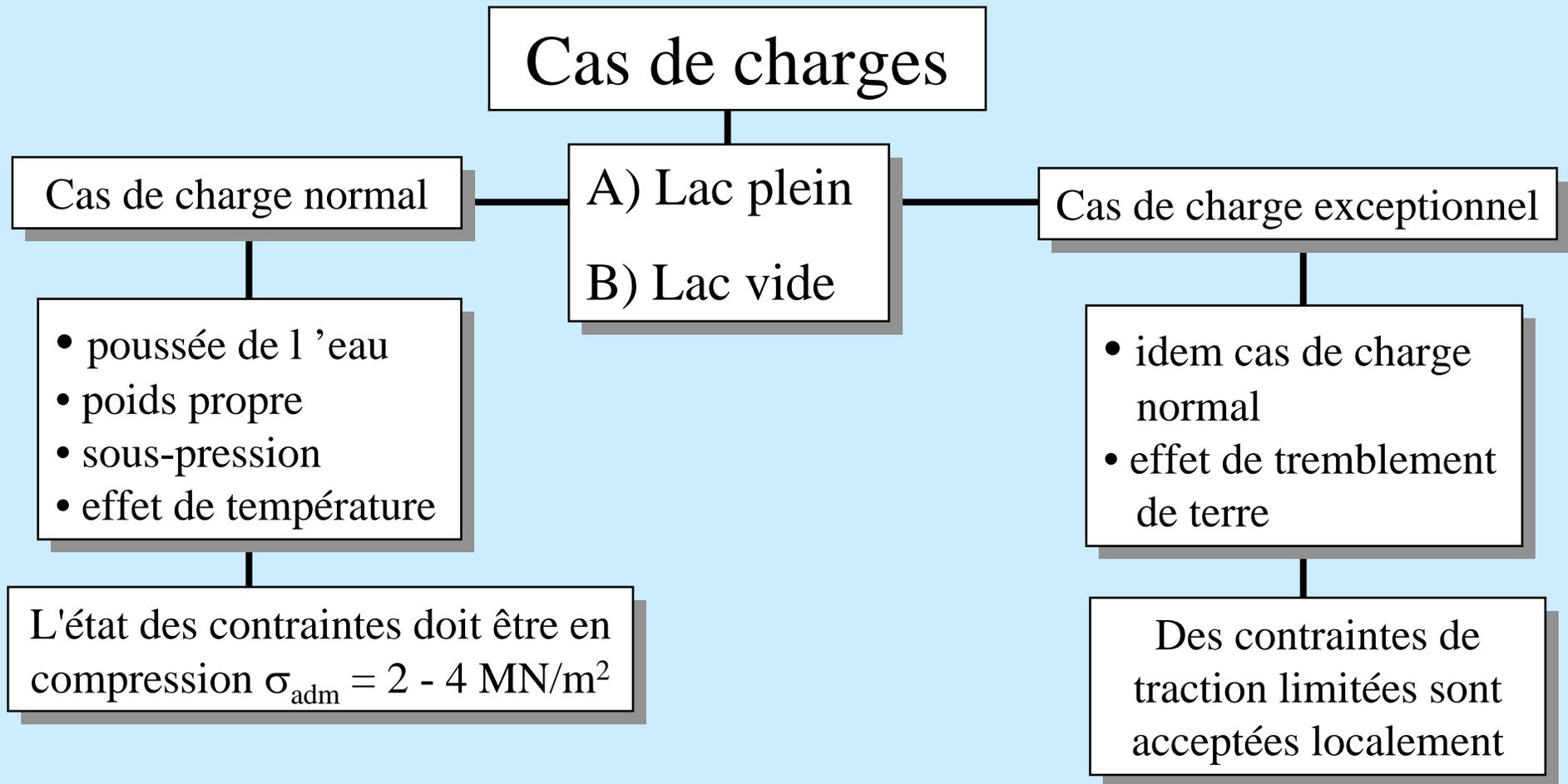
USA, Canada  
Australie

Allemagne  
(DIN 19 '700)

Italie  
(Decreto legge 1982)

# Barrages en béton

## Barrages-poids



### Contrôles essentiels

- |                            |   |                      |
|----------------------------|---|----------------------|
| ① Sécurité au renversement | ↑ | stabilité du barrage |
| ② Sécurité au glissement   | ↑ | stabilité du barrage |
| ③ Sécurité à la rupture    | ↑ | résistance du béton  |

①

$$S_R = \frac{\sum M \text{ stabilisants}}{\sum M \text{ renversements}}$$

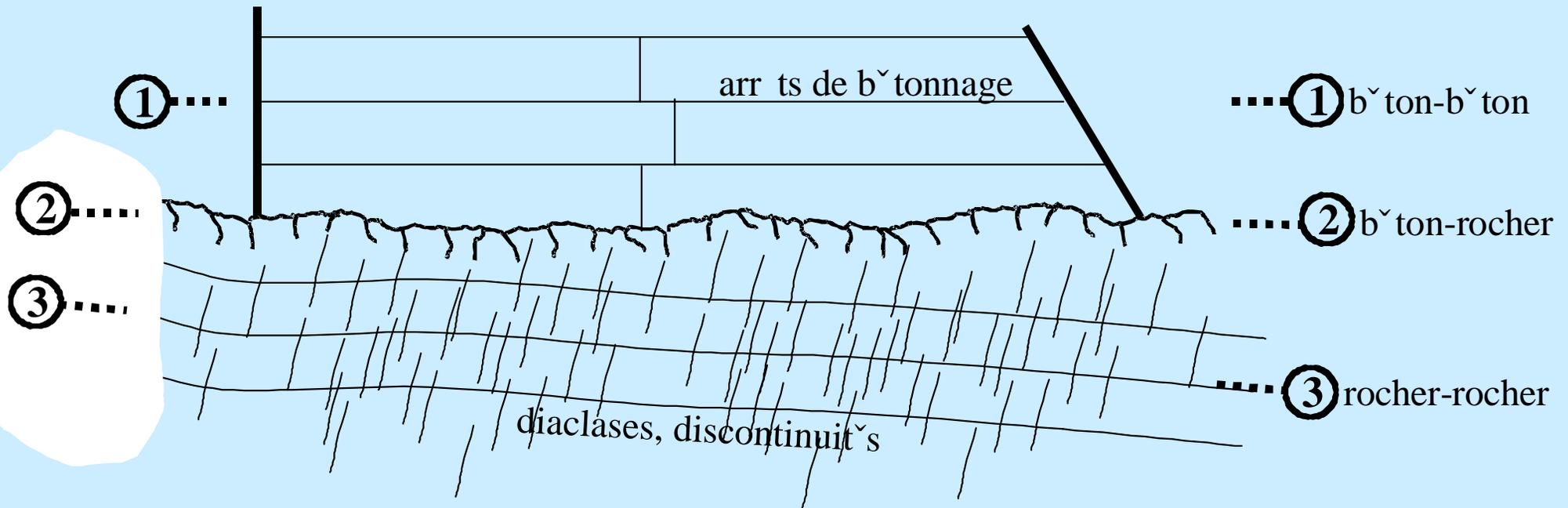
$M_P, \dots$

$M_E, M_S, \dots$

②

$$S_G = \frac{\text{Résistance de la fondation}}{\text{Forces de poussées}}$$

Surfaces de glissement



### Surfaces de glissement et leurs résistances

#### ↑ Surfaces de glissement

possibles:

- les arrêts de bétonnage (béton-béton).
- la fondation (béton-rocher).
- les discontinuités dans le rocher (rocher-rocher).

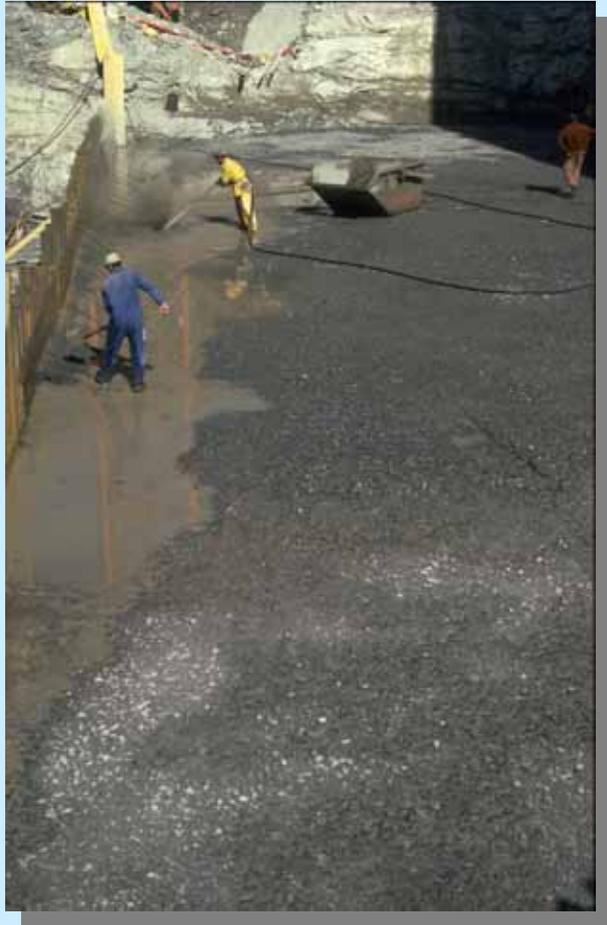
#### ↑ Valeurs de l'angle de frottement (tan

		$\phi'$	$\tan \phi'$
1	Béton-béton	< Cassure en pleine masse, fissure	: 2.0 à 3.0
		< Reprise de bétonnage, soignée	: 1.5 à 2.1
2	Béton-rocher	< Rocher de bonne qualité	: 1.5 à 1.9
		< Rocher de mauvaise à moyenne qualité	: 0.5 à 1.5
3	Rocher-rocher	< Bonne qualité et faiblement diaclasé	: 1.0 à 1.9
		< Moyenne qualité et fortement diaclasé	: 0.5 à 1.0

## Amélioration de la sécurité au glissement

- Ⓐ Augmenter les forces verticales
  - réduction de l'angle du parement aval.
  - incliner le parement amont.
  - réduire les sous-pressions.
- Ⓑ Réduire les forces poussantes (horizontales)
  - incliner la fondation vers l'amont.
- Ⓒ Augmenter la valeur de l'angle de frottement
  - traitement des arrêts de bétonnage (béton).
  - redans coffrés (béton).
  - injections (rocher).

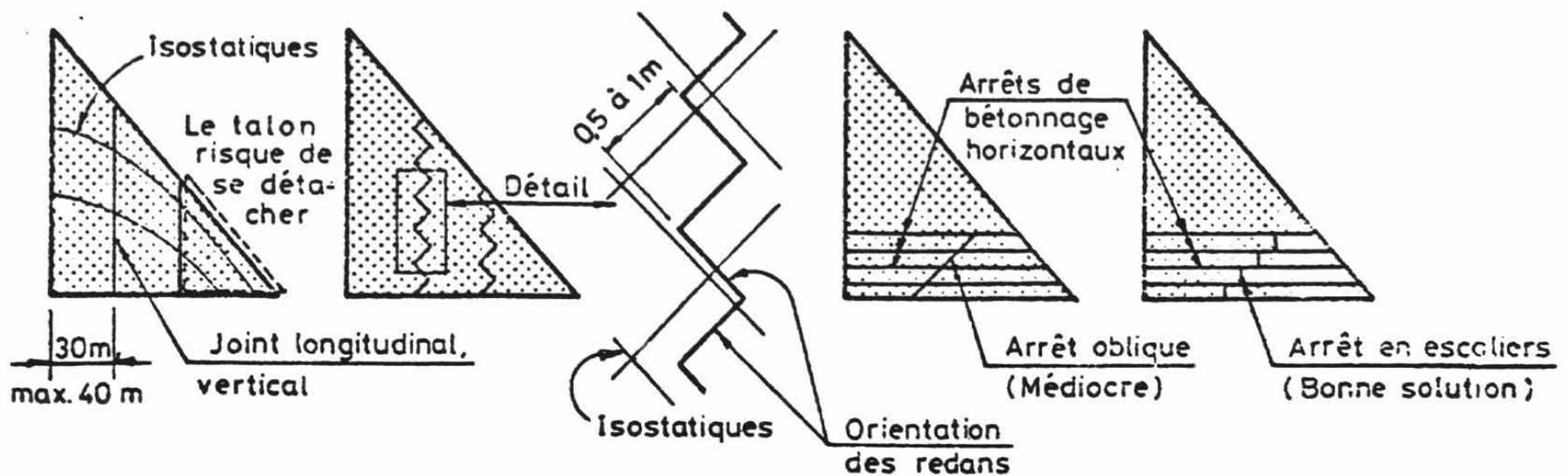
Amélioration de la sécurité au glissement



Augmenter la valeur de  
l'angle de frottement des  
reprises de bétonnage

traitement des arrêts de bétonnage (béton).

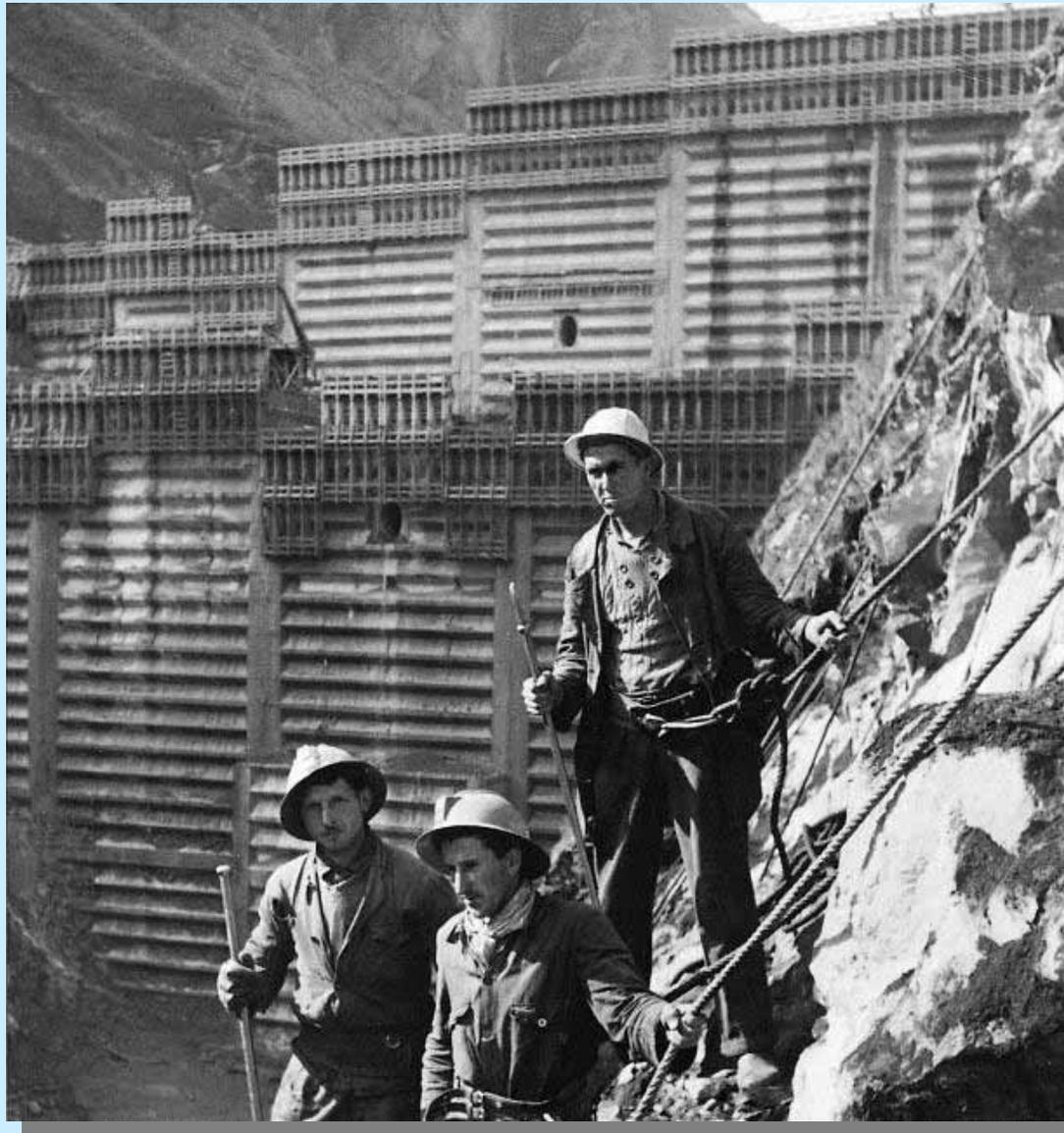
### Forme des arrêts de bétonnage verticaux coffrés





# Barrages en béton

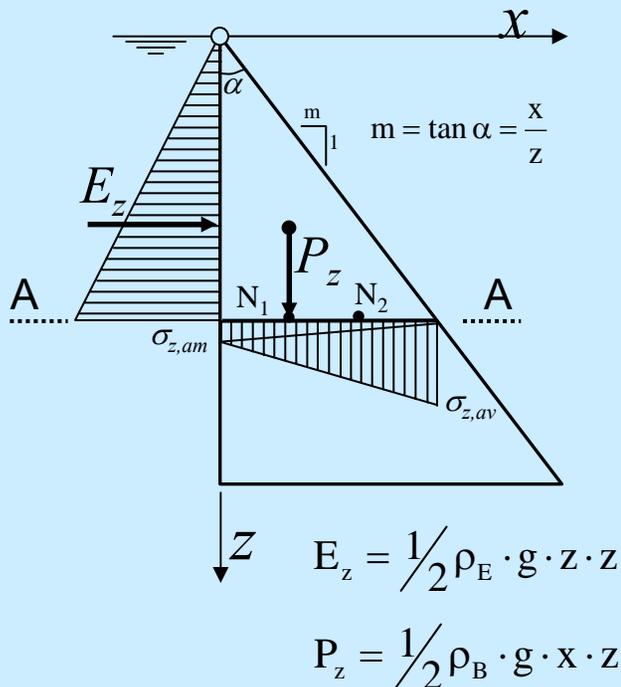
## Barrages-poids



# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Contraintes: Lac plein sans pressions interstitielles



#### Contraintes horizontales

$$\sigma_{x,am} = \sigma_{x,av} = \rho_E \cdot g \cdot z$$

#### Contraintes verticales

$$\Rightarrow \Sigma V = 0 \qquad \Rightarrow \Sigma M(N_1) = 0$$

$$\sigma_{z,am} + \sigma_{z,av} = \rho_B \cdot g \cdot z \qquad E_z \cdot \frac{1}{3} z - \sigma_{z,av} \cdot \frac{1}{2} x \cdot \frac{1}{3} x = 0$$

$$\sigma_{z,av} = \rho_E \cdot g \cdot \frac{z^3}{x^2} = \rho_E \cdot g \cdot \frac{z}{\tan^2 \alpha} = \rho_E \cdot g \cdot \frac{z}{m^2}$$

$$\Rightarrow \Sigma M(N_2) = 0$$

$$E_z \cdot \frac{1}{3} z - P_z \cdot \frac{1}{3} x + \sigma_{z,am} \cdot \frac{1}{2} x \cdot \frac{1}{3} x = 0$$

$$\sigma_{z,am} = z \left( \rho_B \cdot g - \rho_E \cdot g \cdot \frac{1}{\tan^2 \alpha} \right) = z \left( \rho_B \cdot g - \rho_E \cdot g \cdot \frac{1}{m^2} \right)$$

#### Contraintes tangentielles

$$\tau_{xz,av} \cdot \frac{1}{2} x = E_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_E \cdot g \cdot z^2 \quad (\text{répartition triangulaire})$$

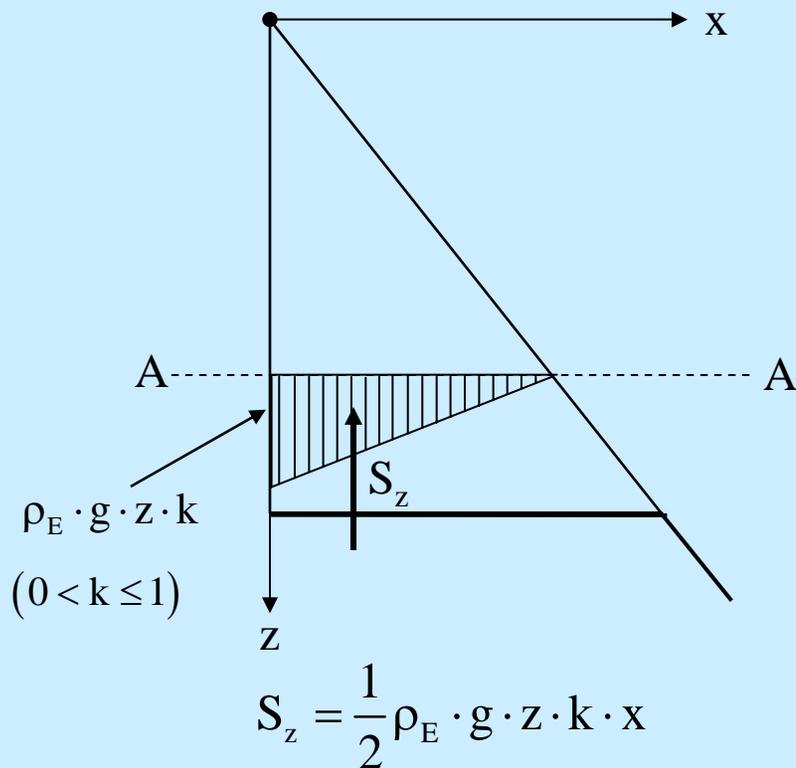
$$\tau_{xz,av} = \rho_E \cdot g \cdot \frac{z}{m}; \quad \tau_{xz,am} = 0$$

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Contraintes: Lac plein avec pressions interstitielles

Répartition des pressions interstitielles (sous-pressions) dans la section A-A:



$$\sigma'_{z,am} = z \left( \rho_B \cdot g - \rho_E \cdot g \left( \frac{1}{m^2} + k \right) \right)$$

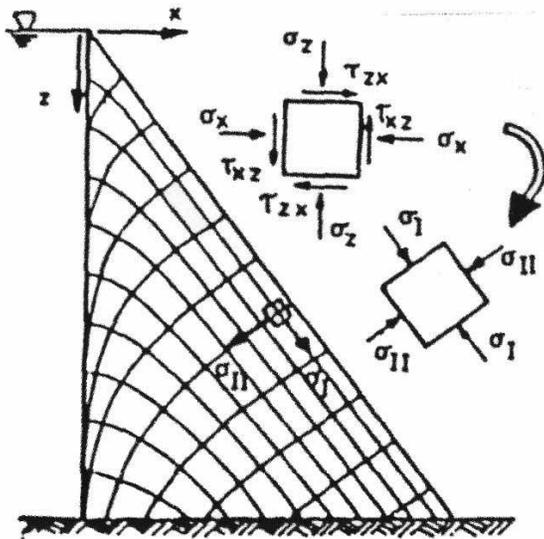
$$\sigma'_{z,av} = \rho_E \cdot g \cdot \frac{z}{m^2}$$

$$\sigma'_{z,am} \geq 0 \quad \text{R\`egle de Levy}$$

$$\Rightarrow m_{\min} = \sqrt{\frac{\rho_E}{\rho_B - k \cdot \rho_E}}$$

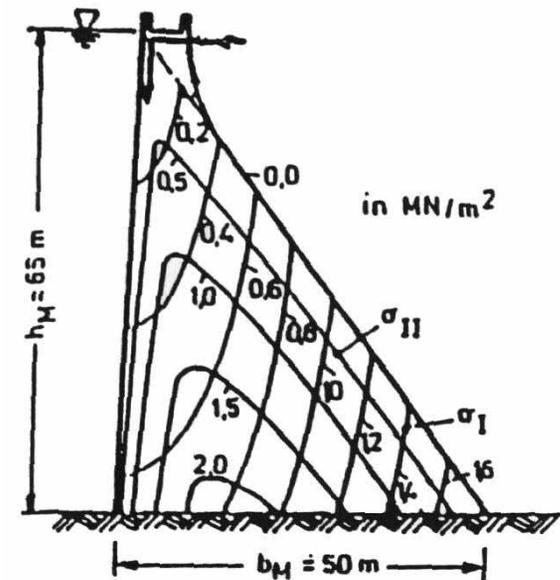
## Contraintes principales

### Profil triangulaire

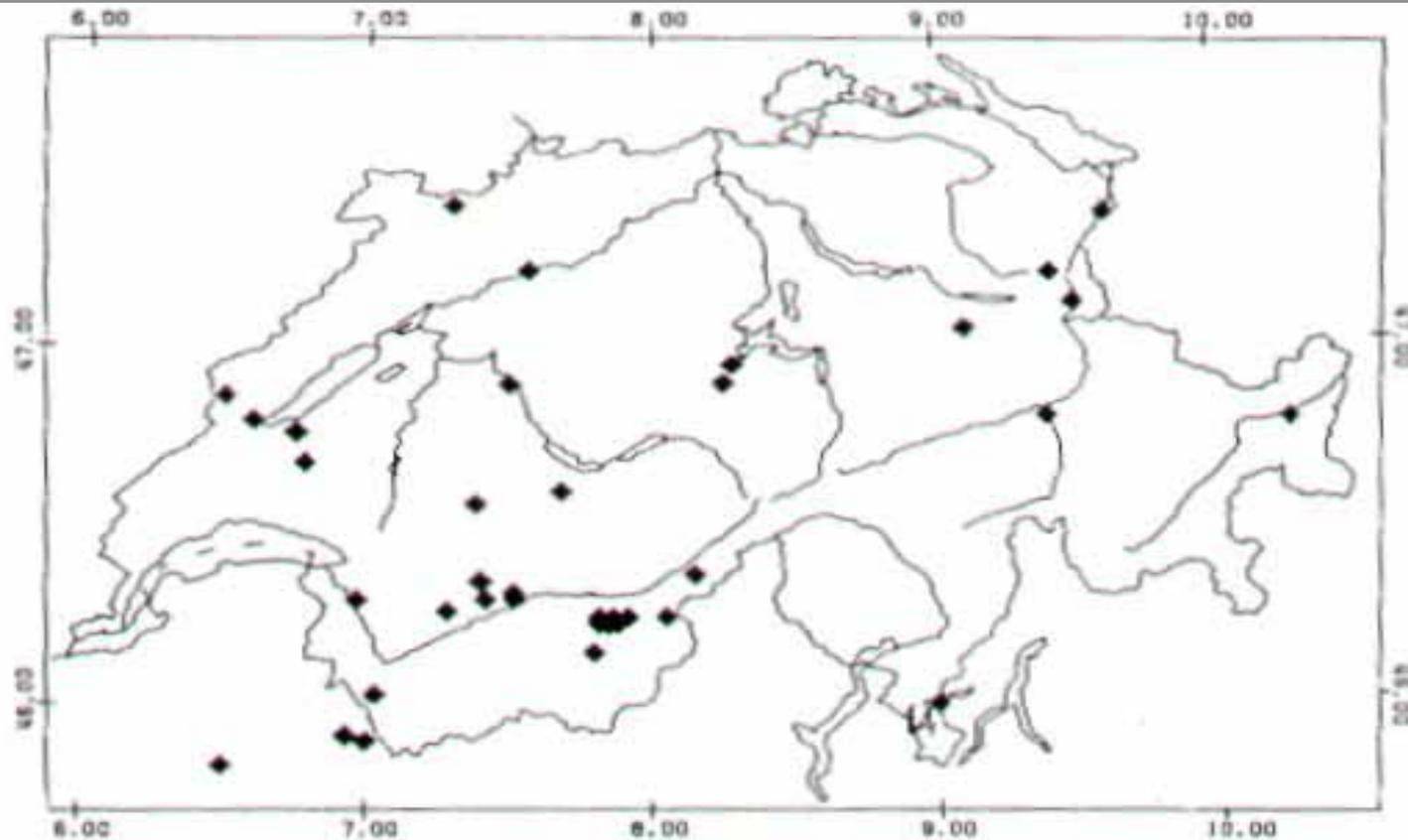


$$\sigma_{I,II} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_z) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (\sigma_x + \sigma_z)^2 + \tau_{xz}^2}$$

### Profil réel



Tremblements de terre en Suisse 1850 - 1990  
(Intensité  $\geq$  VII)

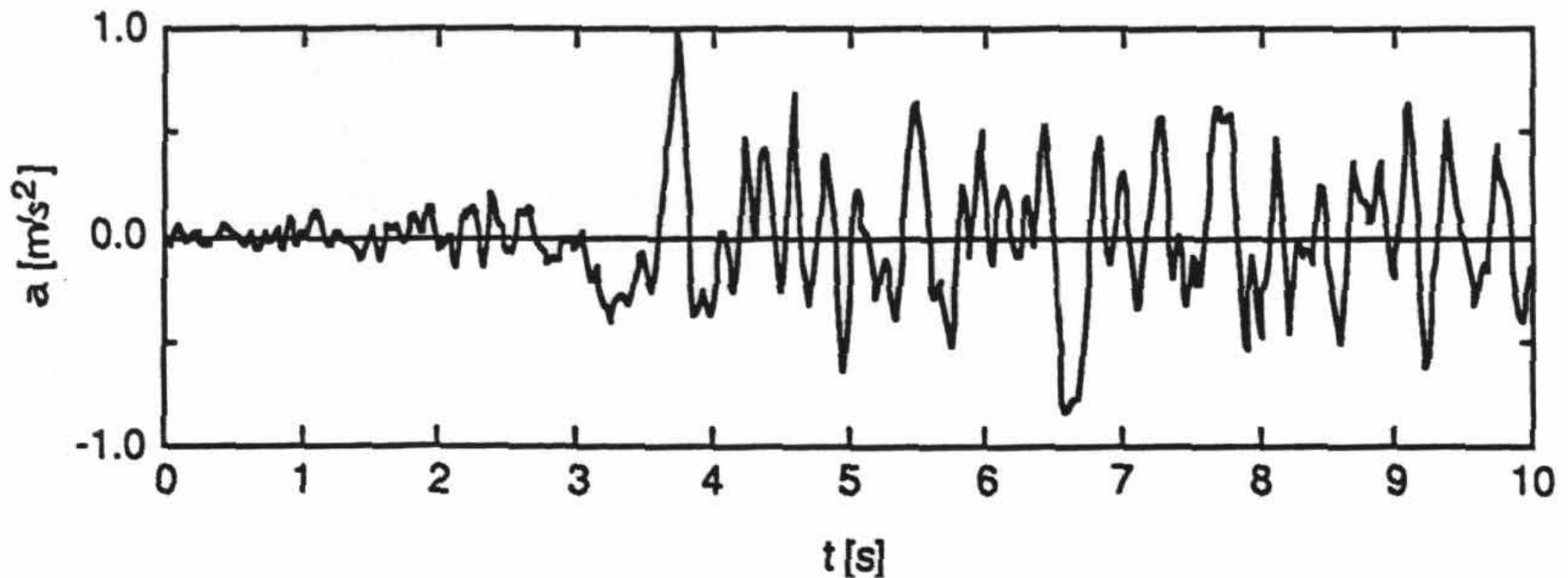


*Starke Beben (1850 - 1990) mit Intensität VII und grösser*

# Barrages en béton

## Sollicitation en cas de séisme

Exemple d'un accélérogramme  
(tremblement de terre de Taft en 1952,  $M = 7.7$ )



Relation entre l'amplitude d'un tremblement de terre  
et l'accélération

Hypothèse d'un ébranlement sinusoïdal:

$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot A}{T^2}$$

A: amplitude

a: accélération

T: période, 0.1 seconde à quelques secondes.

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Echelle d'intensité selon Medvedev-Sponnheuer-Karnik (MKS 1964)

Degré MKS	Description	Accélération, exprimée en g
I	Seulement enregistré par les sismographes	
II	A peine ressentie (personnes au repos dans les étages élevés)	
III	Ressenti par peu de monde (analogue au passage d'un camion)	
IV	Ressenti par beaucoup. Craquements, léger balancement des objets suspendus	
V	Beaucoup de dormeurs s'éveillent, fort balancement des objets suspendus	0.012-0.025
VI	Frayeur. Petites fissures dans les murs d'adobe et les plâtres	0.025-0.05

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Echelle d'intensité selon Medvedev-Sponnheuer-Karnik (MKS 1964)

Degré MKS	Description	Accélération, exprimée en g
VII	Larges fissures dans les constructions A, faibles dans les constructions B, chutes de cheminées, variation du niveau d'eau dans les puits, eaux des lacs boueuse	0.05-0.1
VIII	Ecroulement partiel des constructions B, fissures dans les constructions C, fissures dans le sol, statues et monuments déplacés	0.1-0.2
IX	Destruction d'une partie des constructions B, gros dégâts dans les constructions C. Glissements de terrains	0.2-0.4
X	Ecroulement partiel des constructions C, larges fissures dans le sol (ouvertes jusqu'à 1m), dommages aux routes, voies ferrées, canalisations enterrées	0.4-0.8
XI	Dommages importants aux constructions les plus résistantes: ponts, barrages	0.8-1.6
XII	Bouleversement total de la surface du sol, toute construction humaine est détruite	> 1.6

### Caractérisation des tremblements de terre

Magnitude (Richter)	Energie (Joule)	Beschleunigung (% g)	Geschwindigkeit (cm/s)	Verschiebung (cm)	Epizentral-Intensität
2	$10^7$	0.1	0.01		I nicht gespürt
3	$10^9$	0.1	0.1	0.1	II leichtes Zittern
					III deutlich spürbar
4	$10^{11}$	1	1		IV Geräusche erzeugend
				1	V Gegenstände bewegend
5	$10^{13}$	10	10		VI einzelne leichte Schäden
				10	VII leichte Schäden
6	$10^{15}$	100	100		VIII Schäden
				10	IX starke Schäden
7	$10^{17}$	100	100		X Zerstörungen
				100	XI weitläufige Zerstörungen
8	$10^{17}$			100	XII Verwüstungen

Magnitude selon Richter

$$M = \log_{10} A/A_0$$

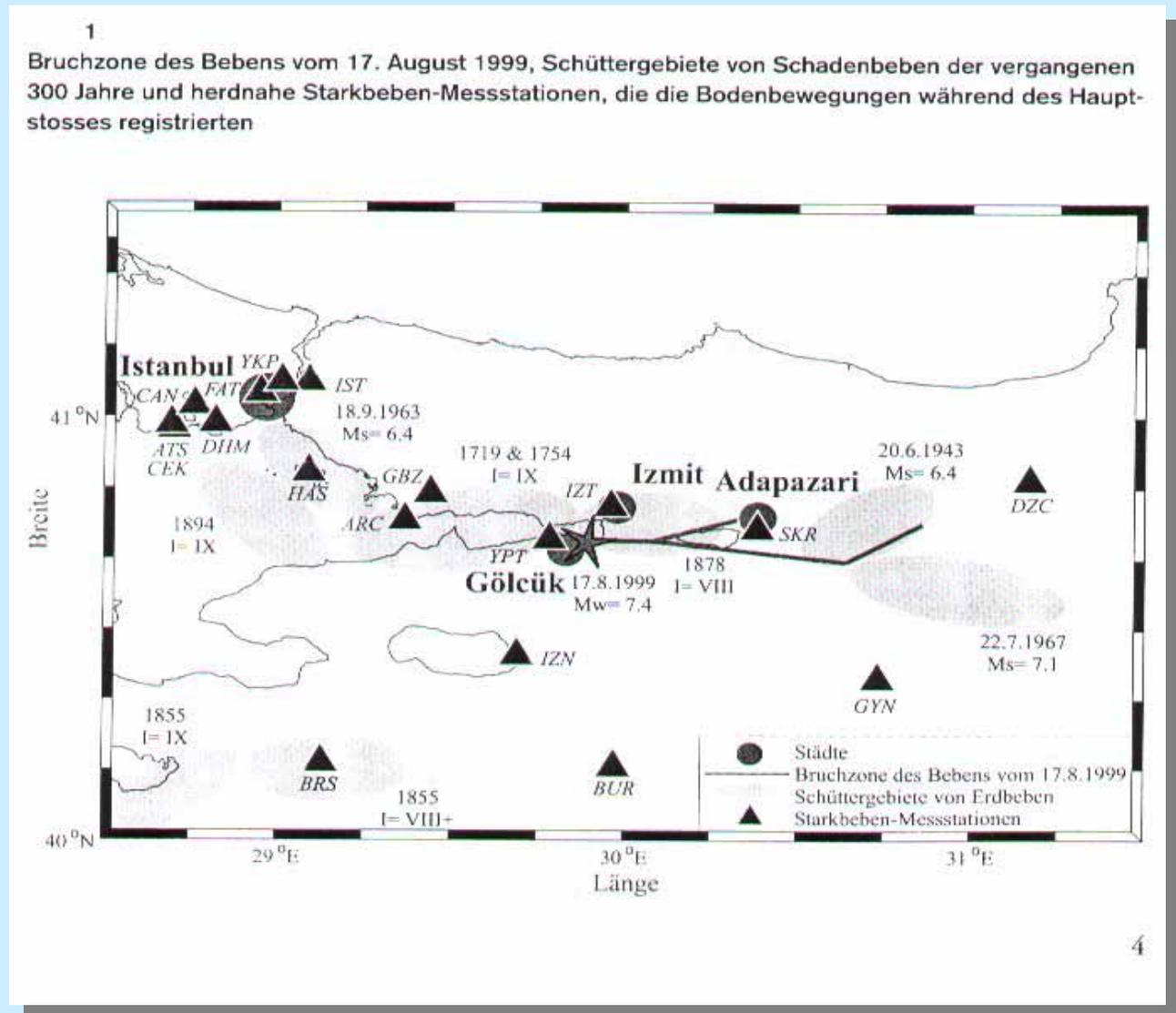
A: amplitude mesurée avec un sismographe standard à une distance de 100 km de l'épicentre.

$A_0$ : amplitude de référence.

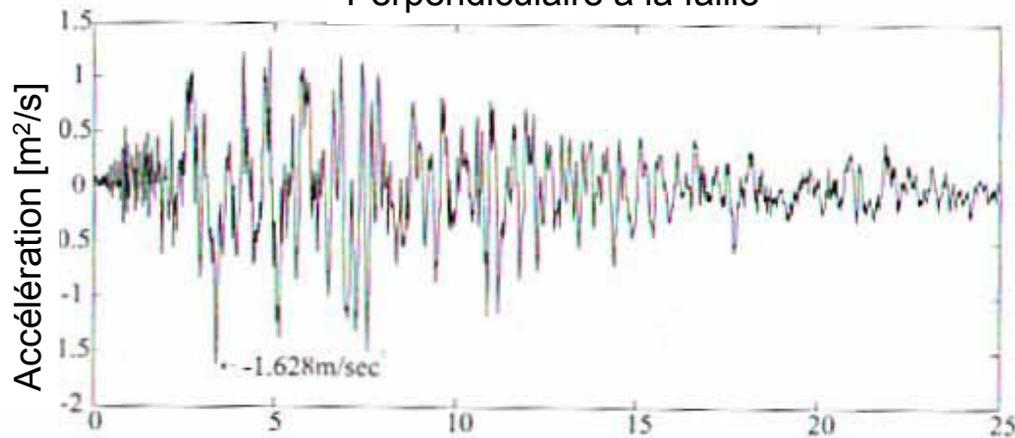
# Barrages en béton

## Barrages-poids

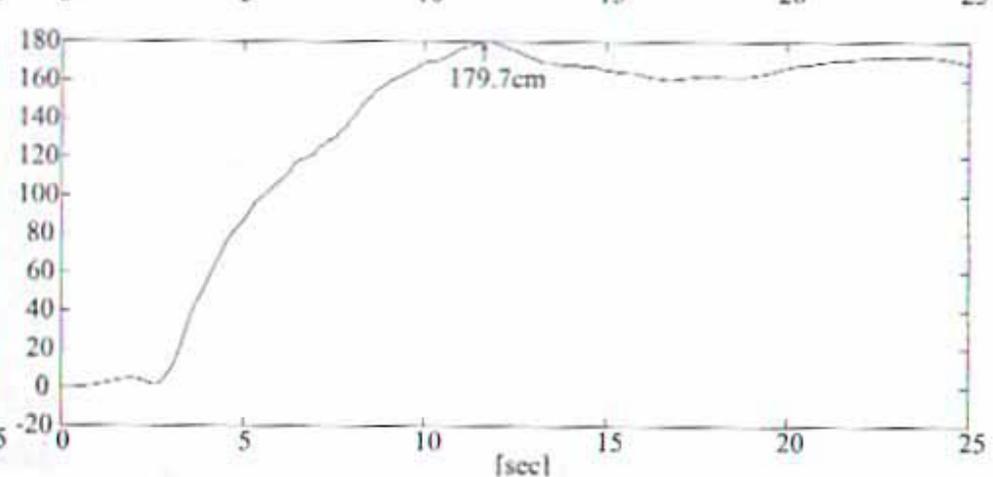
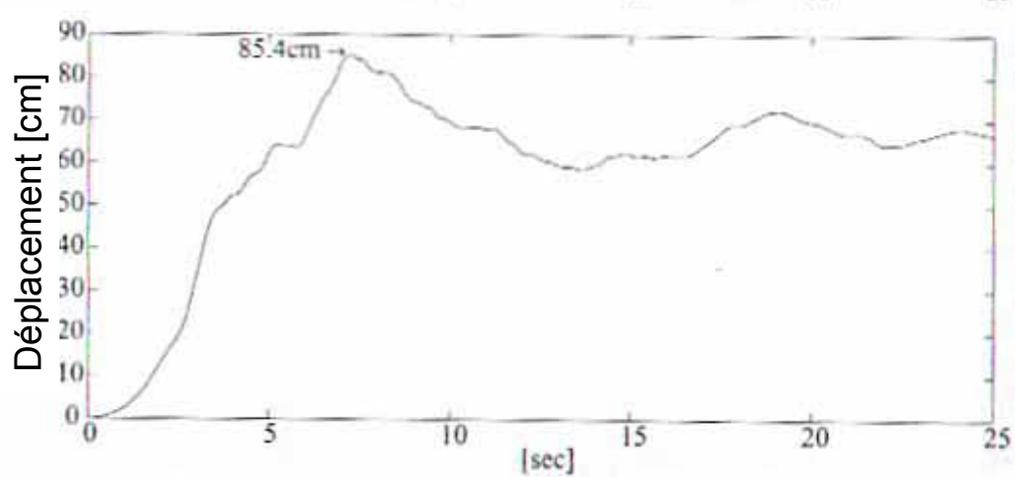
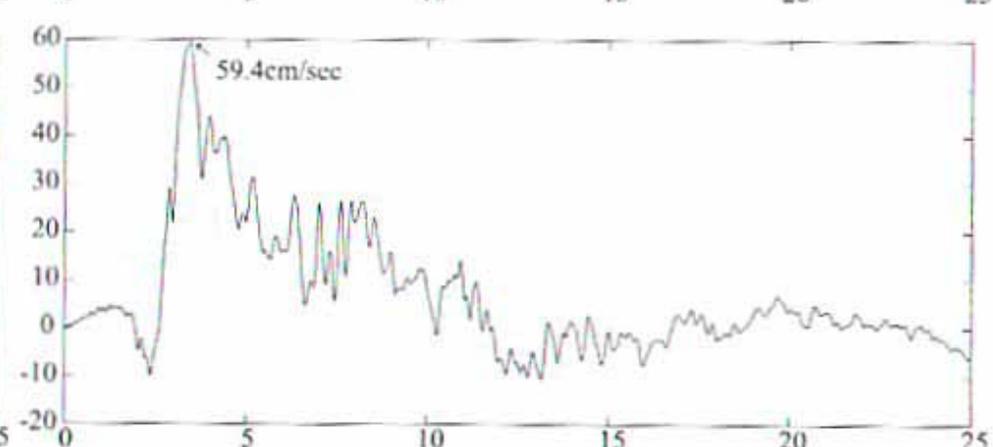
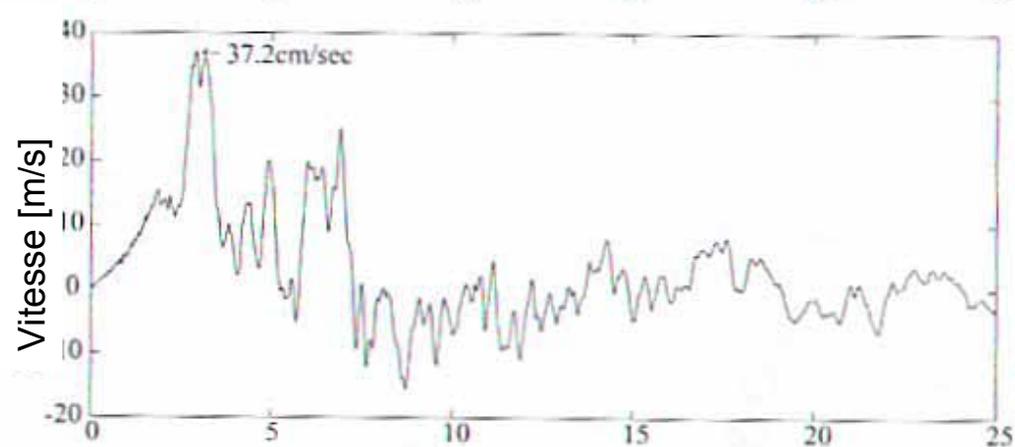
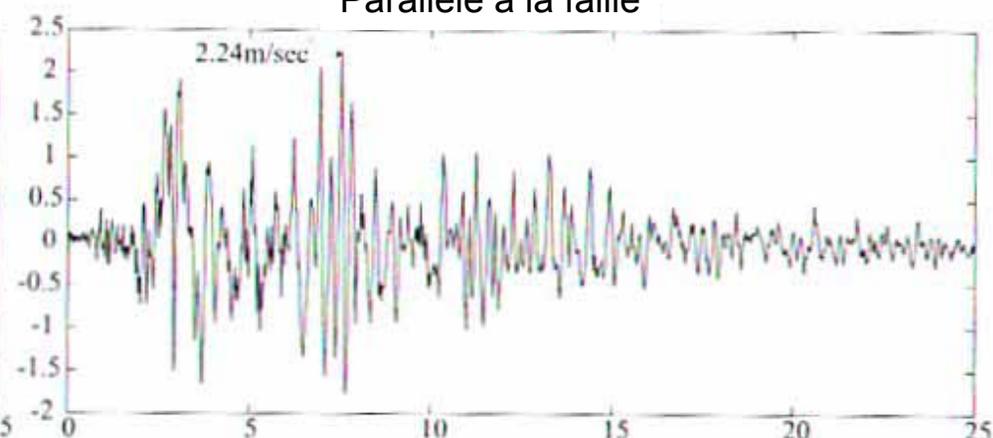
Tremblement  
de terre  
de Izmit,  
Turquie  
en  
1999,  
 $M_w = 7.4$



Perpendiculaire à la faille



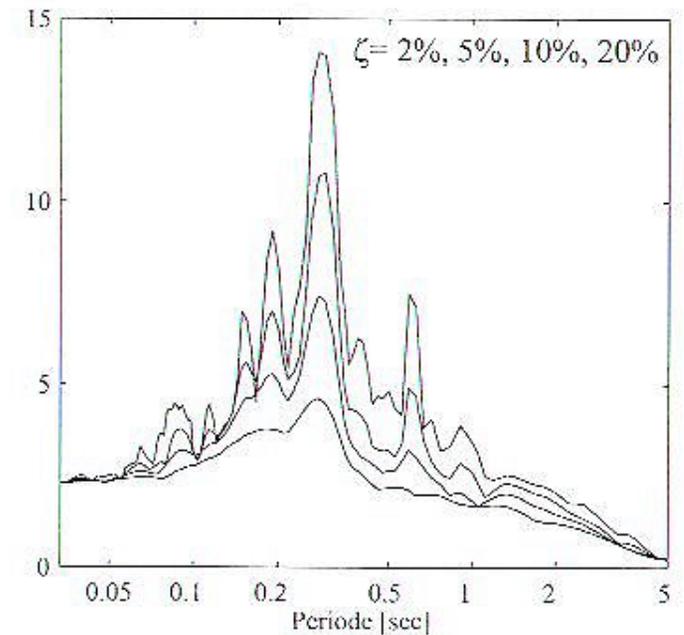
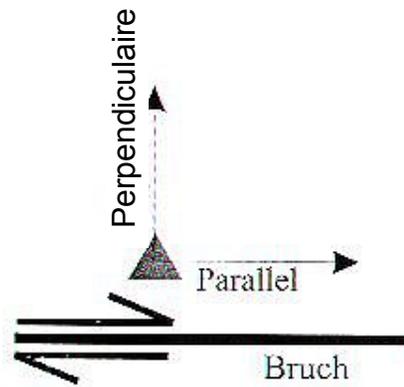
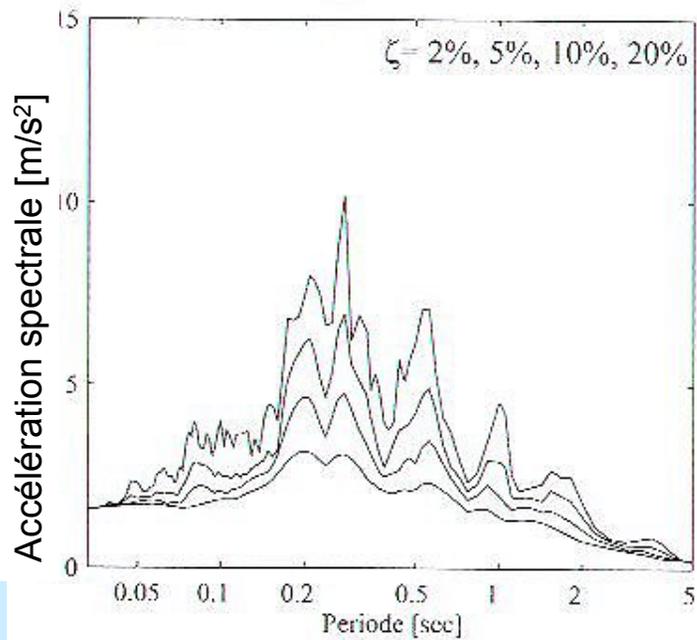
Parallèle à la faille



# Barrages en béton

## Barrages-poids

Tremblement de terre de Izmit en 1999,  $M_w = 7.4$



# Barrages en béton Barrages-poids

Tremblements de terre  
historiques en Suisse

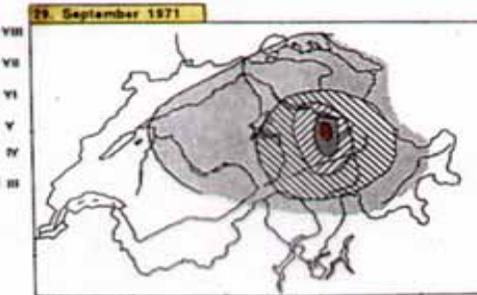
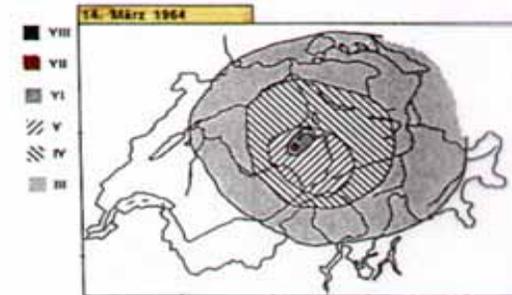
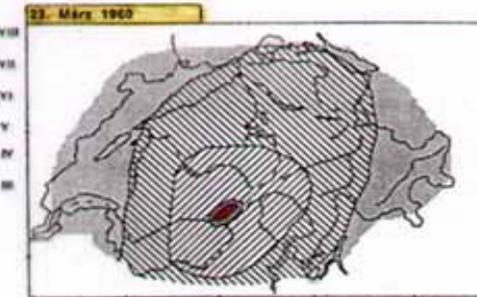
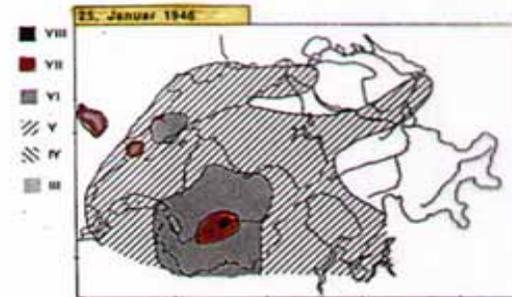
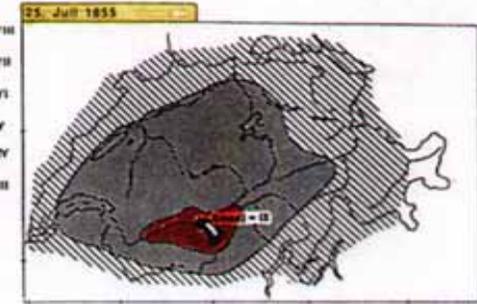


Bild 2.3: Isoseistenkarten von starken Erdbeben in der Schweiz.  
(Quelle: Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich)

## Barrages en béton Barrages-poids

Analyse  
statistique  
des  
tremblements  
de terre  
Accélération  
de  
dimensionnement

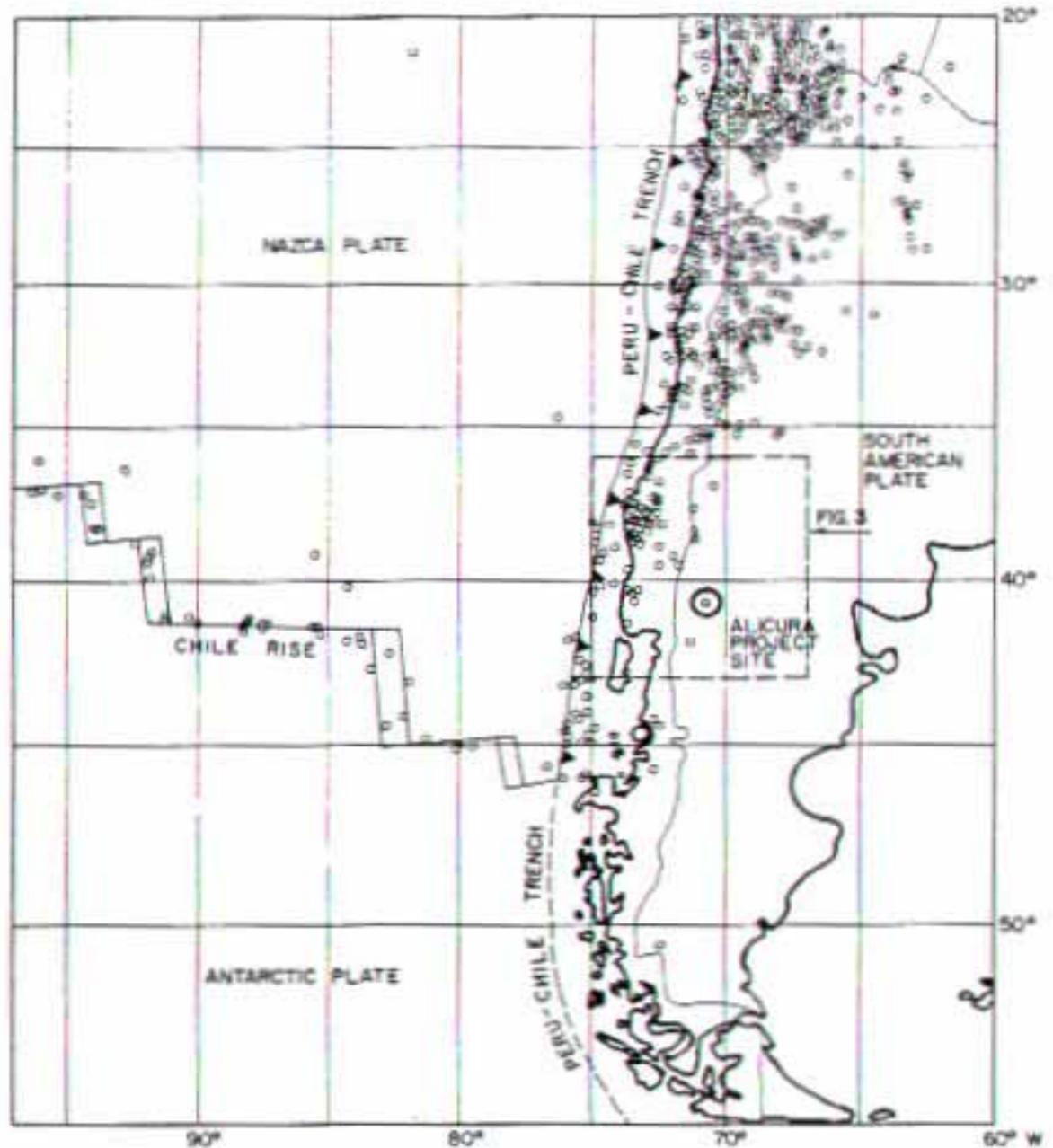


Fig. 2. Earthquake epicenters for period 1962-1969

Barrages en béton  
Barrages-poids

Analyse  
statistique  
des  
tremblements  
de terre  
Accélération  
de  
dimensionnement

Loi empirique

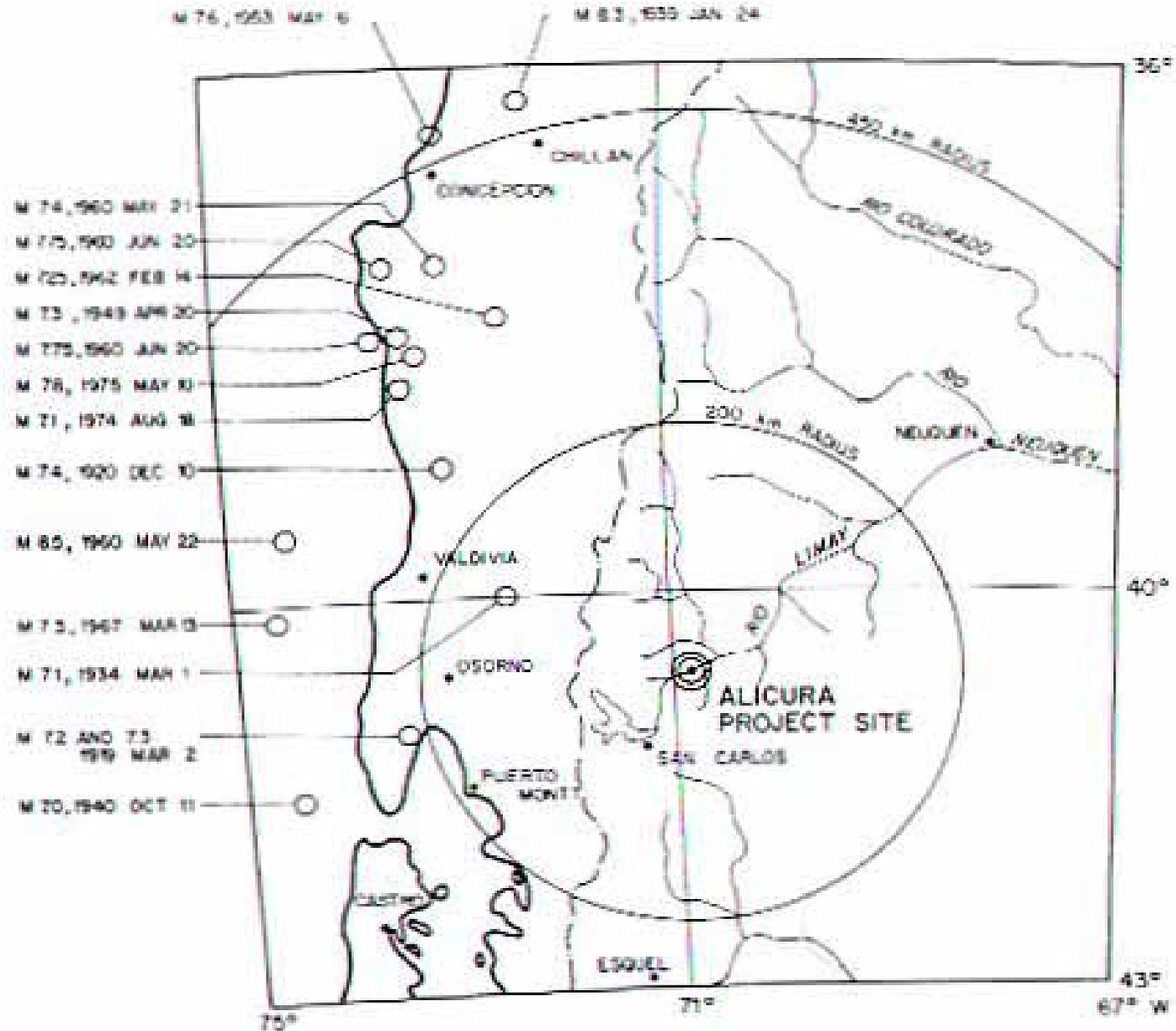


Fig. 3. Regional seismicity map with epicenters of major earthquakes  $M \geq 7.0$

## 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.

### Interactions eau-structure

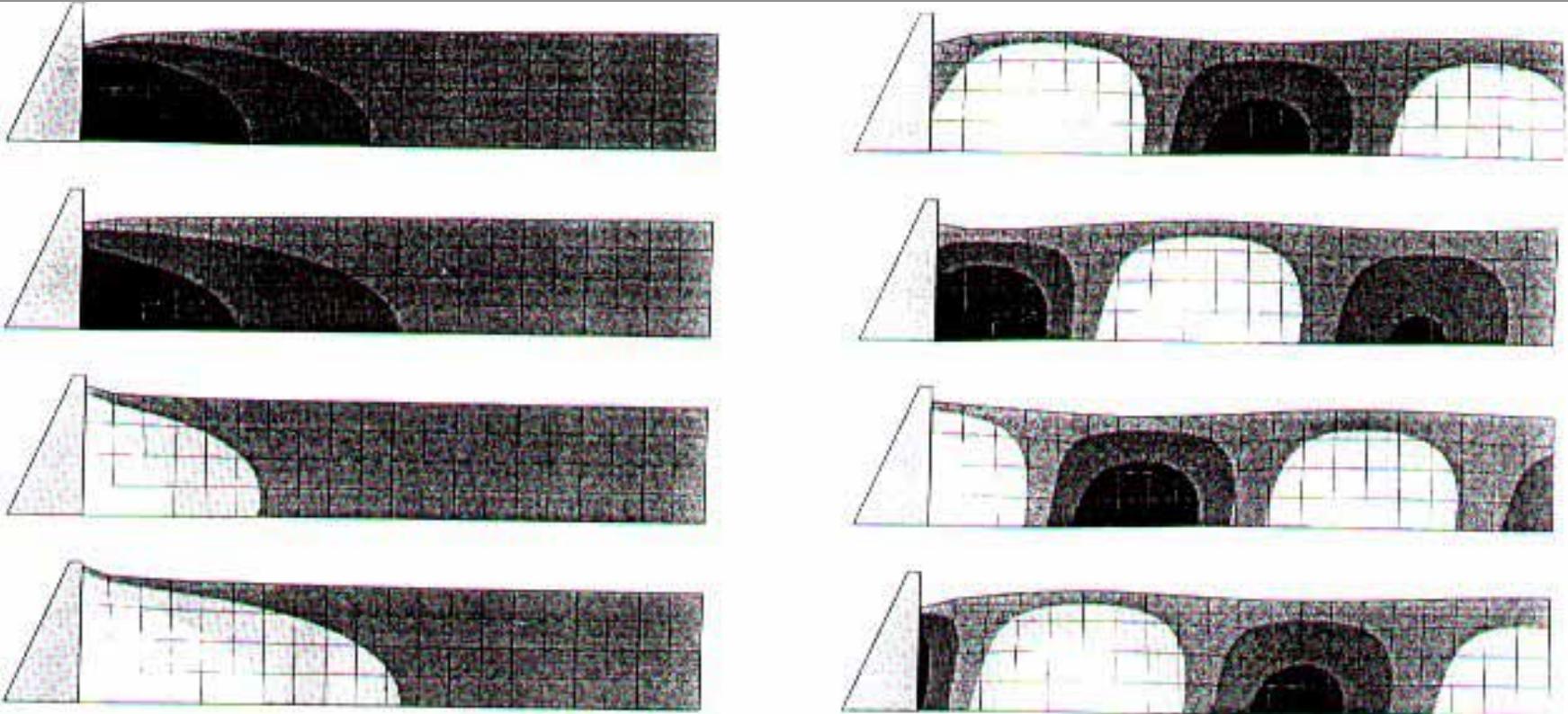
Exemples des fréquences propres des barrages et des lacs

Barrage	$h_{\text{barrage}}$ [m]	$l_{\text{couronnement}}$ [m]	$f_{\text{barr}}$ [Hz]	$f_{\text{lac}}$ [Hz]	$f_{\text{barr}}/f_{\text{lac}}$ [-]
Mauvoisin (CH) <sup>1)</sup>	250	560	2.0	2.1	1.0
K Inbrein (A) <sup>1)</sup>	197	626	1.7	2.3	0.7
Emosson (CH) <sup>1)</sup>	180	424	2.2	2.4	0.9
Morrow Point (USA) <sup>1)</sup>	142	219	3.7	3.0	1.2
Pacoima (USA) <sup>1)</sup>	113	180	5.1	4.4	1.2
Grand Dixence (CH) <sup>2)</sup>	285	695	1.4	1.3	1.1
Pine Flat (USA) <sup>2)</sup>	122	562	2.9	3.1	0.9

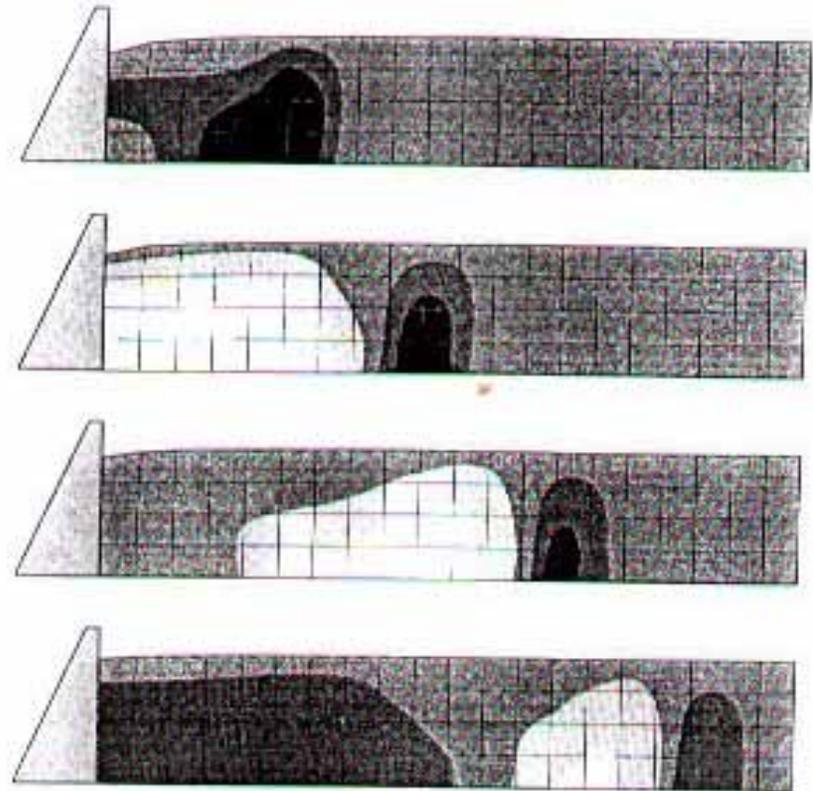
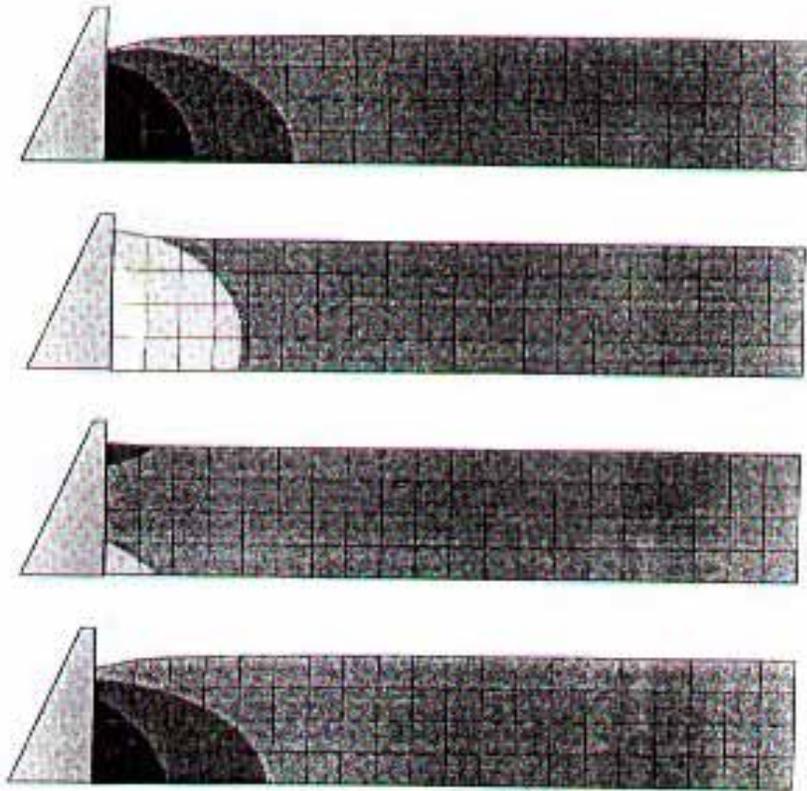
<sup>1)</sup> barrage voûte

<sup>2)</sup> barrage poids

Interactions eau-structure



- (a) L'eau compressible, mouvement harmonique :  $f_{\text{barr}}/f_{\text{lac}} = 0.8$   
la pression de l'eau est seulement influencée près du barrage ; on constate que la pression sur le barrage devient négative (cavitation).
- (b) L'eau compressible, mouvement harmonique  $f_{\text{barr}}/f_{\text{lac}} = 1.5$   
dans ce cas le barrage devient un générateur d'onde et la pression dynamique se manifeste dans le lac entier.



- (c) L'eau incompressible, mouvement harmonique  $f_{\text{barr}}/f_{\text{lac}} = 1.5$   
 si l'eau est incompressible, évidemment la pression dynamique dans l'eau se manifeste seulement près du barrage.
- (d) L'eau compressible, mouvement du barrage comme un choc  
 le cas est probablement le plus réaliste pour un tremblement de terre réel.



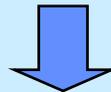
## Analyse pseudostatique

→ Applicable si:  $a < 0.15 g$  et  $f_m / f_{lac} < 0.7$ .

$f_m$ : Fréquence propre du barrage.

$f_{lac}$ : Fréquence propre du lac.

→ Considération de l'accélération horizontale et maximale seulement (accélération critique pour un barrage-poids).



A) Force d'inertie du barrage.

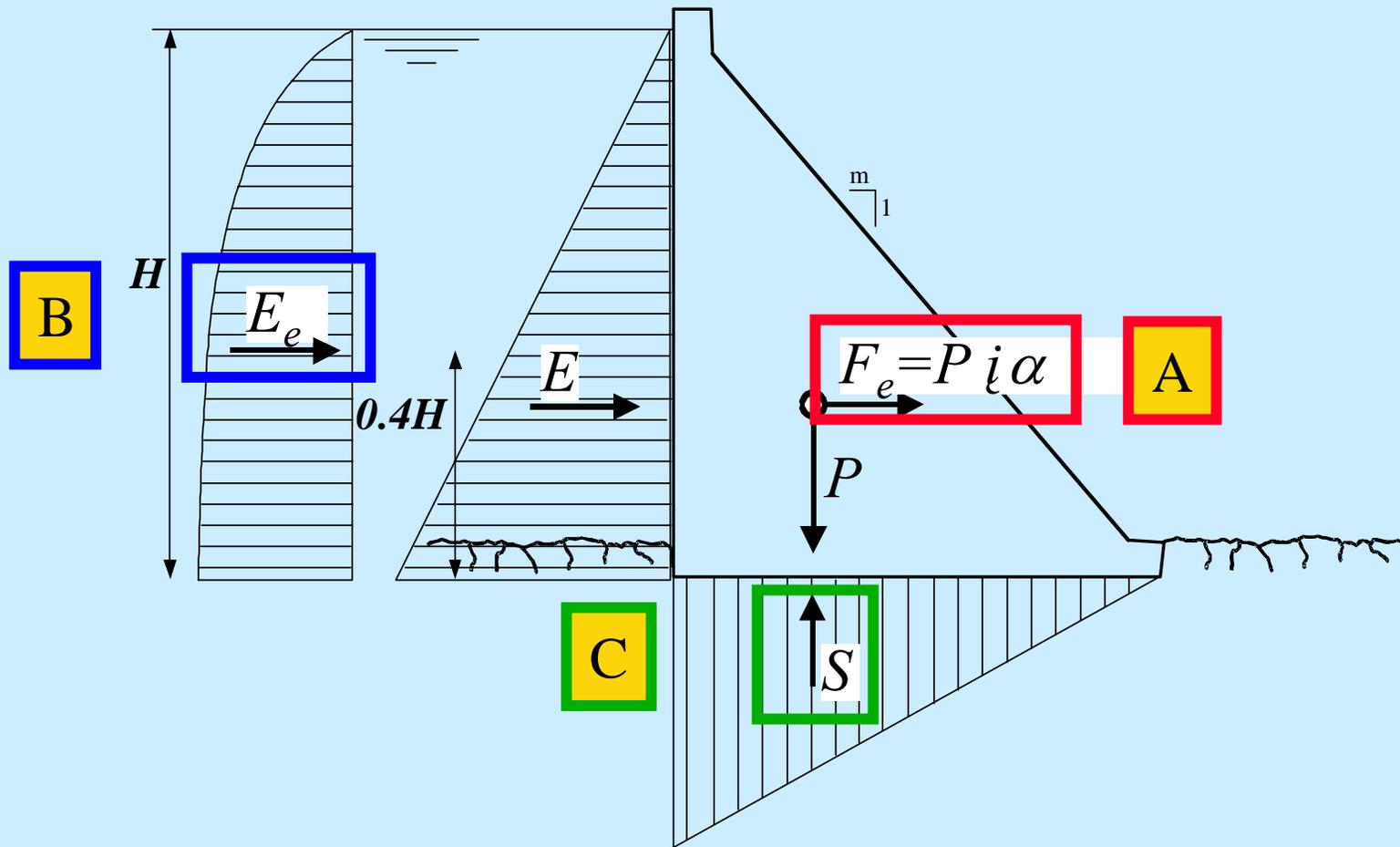
B) Force d'inertie de l'eau - surpressions hydrosismique.

C) Augmentation de la sous-pression

# Barrages en béton

## Barrages-poids

### Analyse pseudostatique d'un barrage-poids



## B Force d'inertie de l'eau

Suppression hydrosismique selon Westergaard:

$$p_e = K_e \cdot C_e \cdot a \cdot \rho_E \cdot \sqrt{H \cdot z} \quad \left[ \text{N/m}^2 \right]$$

$K_e$ : Coefficient dépendant de l'inclinaison du parement amont:

vertical:  $K_e = 1$  ; incliné:  $K_e < 1$

$C_e$ : Coefficient de Westergaard

$$C_e = \frac{0.817}{\sqrt{1 - 7.75 \left( \frac{H}{1000 \cdot T} \right)^2}}$$

$K_e = 1$  :

$$E_e = C_e \cdot a \cdot \rho_E \cdot 2/3 \cdot H^2$$

$T = 1 / f_m$   $f_m$  = période propre du barrage

$E_e$  : poussée de l'eau totale =  $\int_0^H p_e$

$h_m = 0.4 H$  (hauteur de la résultante de la poussée de l'eau)

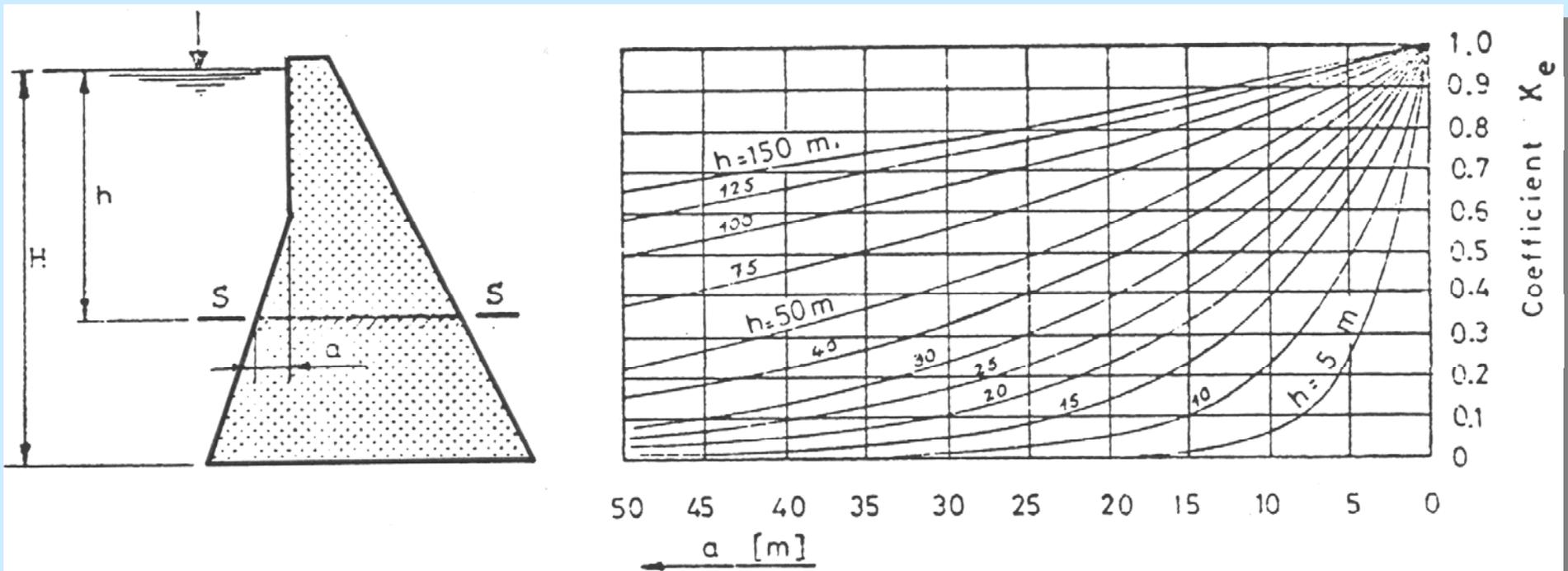
# Barrages en béton

## Barrages-poids

### B Force d'inertie de l'eau

Surpression hydrosismique selon Westergaard:

$K_e$ : Coefficient dépendant de l'inclinaison du parement amont:



### Sécurité en cas de séisme

- Contraintes:
- Compressions augmentées acceptables (sécurité à la compressibilité du béton par exemple 3 au lieu de 4).
  - Tractions locales acceptables (sur une petite partie de la section).
- $$\sigma_{\text{traction}} < 1-2 \text{ N / mm}^2$$
- Stabilité:
- On tolère que la résultante de toutes les forces se déplace vers l'aval jusqu'à 1/6 de la semelle.
  - Sécurité au glissement 1.1 à 1.2 au lieu de 1.5