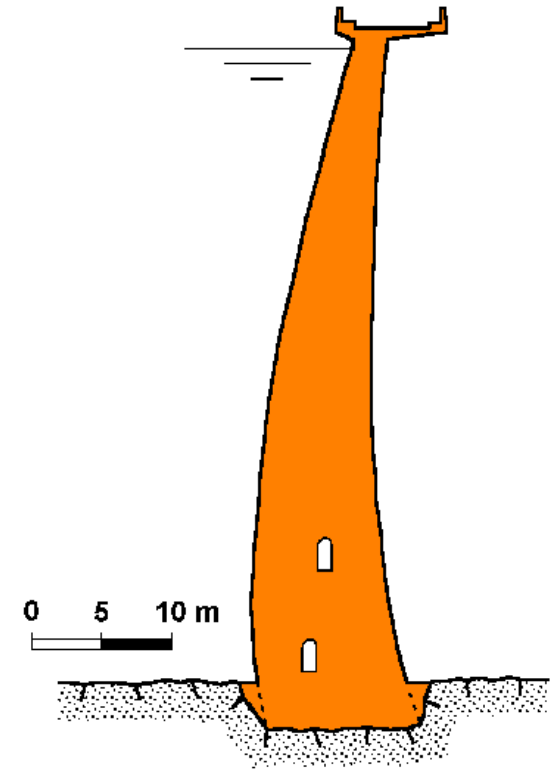
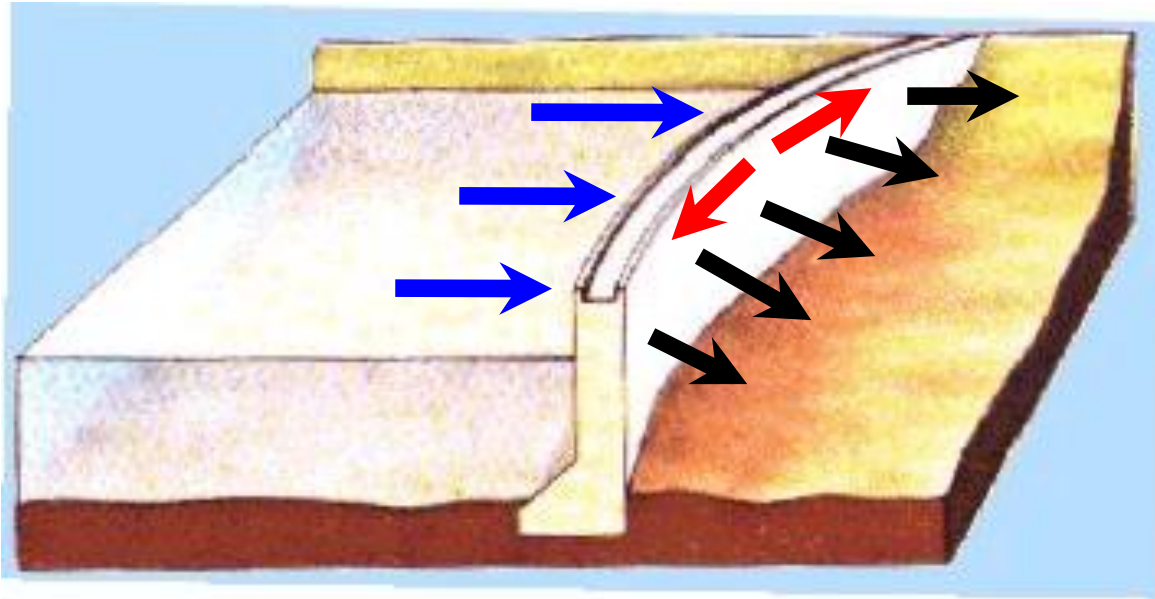


La sûreté des barrages voûtes existants

**Les voûtes, des ouvrages majestueux,
limpides dans leur expression visuelle**

Comment fonctionne une voûte ?



- structure mince et élancée
- transmet les efforts hydrostatiques aux FONDATIONS

Un tel profil ne
tiendrait pas
en poids pur

Comment fonctionne une voûte ?

- effet voûte : connu par les anciens



Comment fonctionne une voûte ?



- **il faut un très bon rocher**
 - ❑ forts gradients hydrauliques
 - ❑ contraintes de compression + élevées / barrages-poids
 - ❑ décapé, étanché, drainé

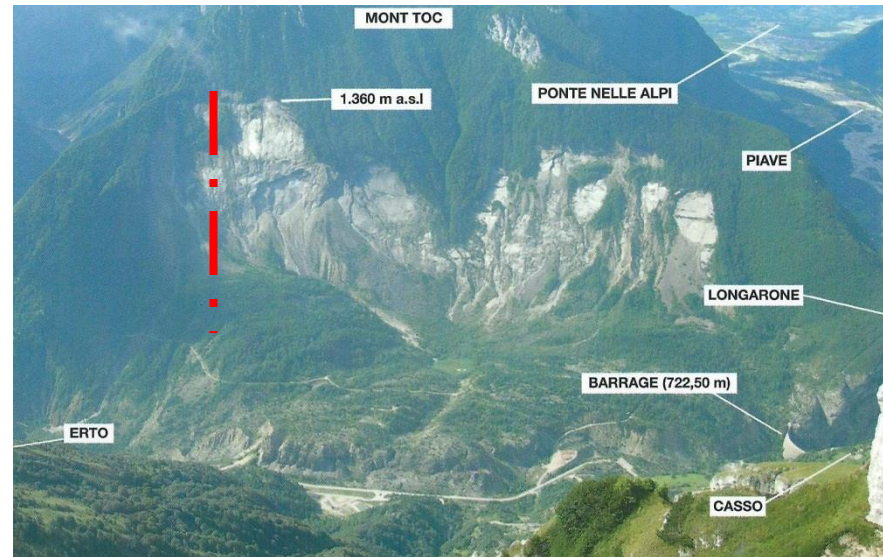
- **structure très hyperstatique**
- **peu sensible aux déversements**
 - ❑ exemple de Vajont (1963)

Comment fonctionne une voûte ?

➤ Le glissement catastrophique du Vajont (Italie)

□ 9 octobre 1963, 22h39

- ❖ glissement 250 Mm³, durée $\approx$ 20-25 s, $v \approx$ 70-100 km/h
- ❖ vague 25-30 Mm³, $h = 150$ m par-dessus le barrage, qui a résisté
- ❖ près de 2000 morts, Lavarone rasée



**une catastrophe majeure ...
... mais la voûte a résisté,
soumis à une charge environ
8 fois la charge normale**

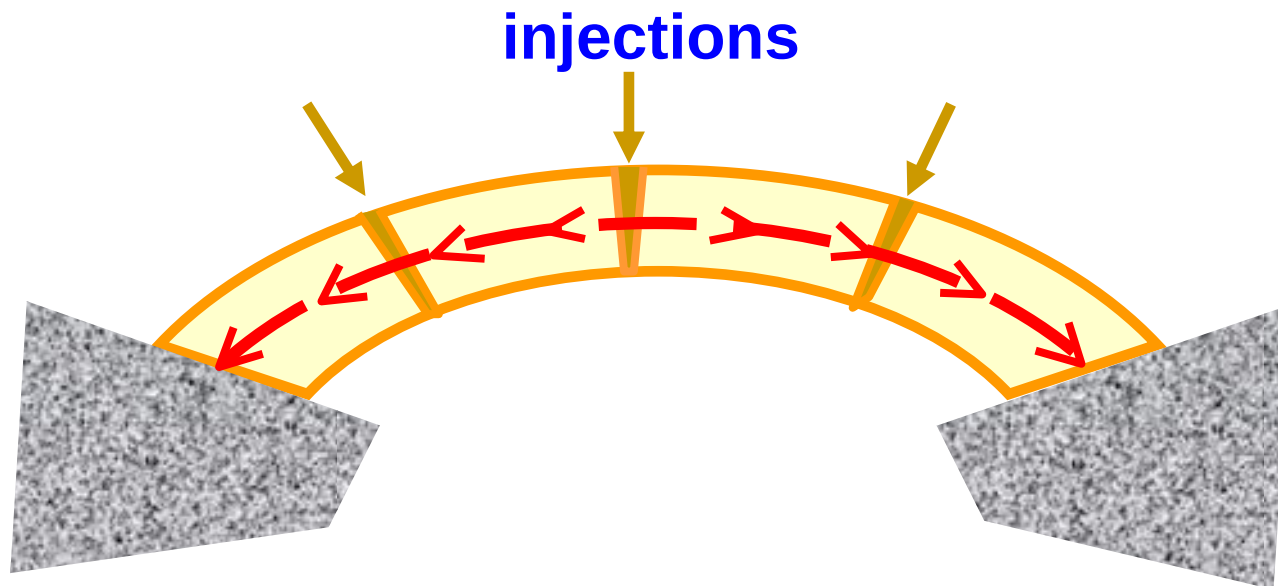
Comment fonctionne une voûte ?

➤ construction par plots



➤ puis clavage des joints

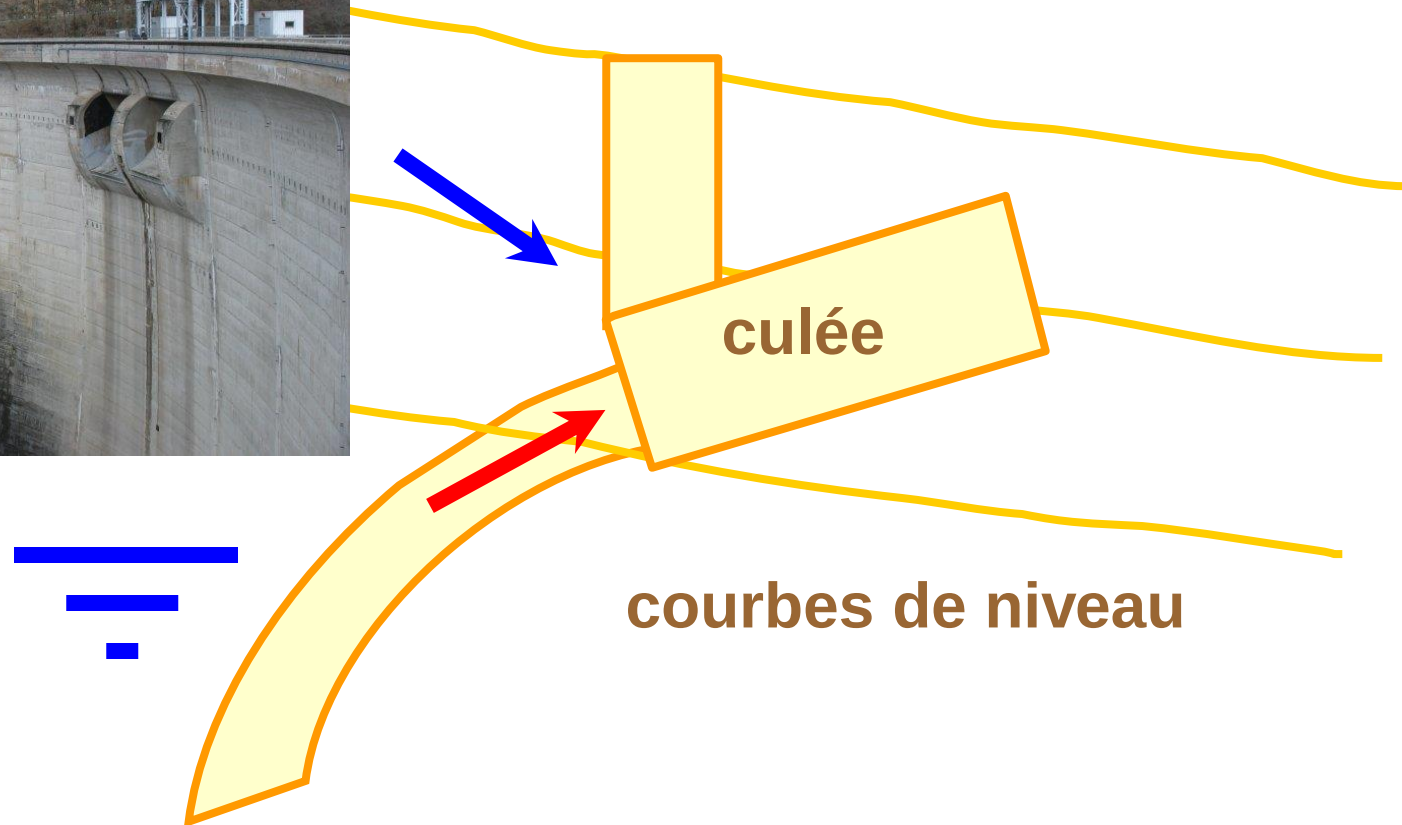
- ❑ c'est une soudure qui donne à la voûte son monolithisme
- ❑ par temps froid, de bas en haut



Comment fonctionne une voûte ?

➤ culées

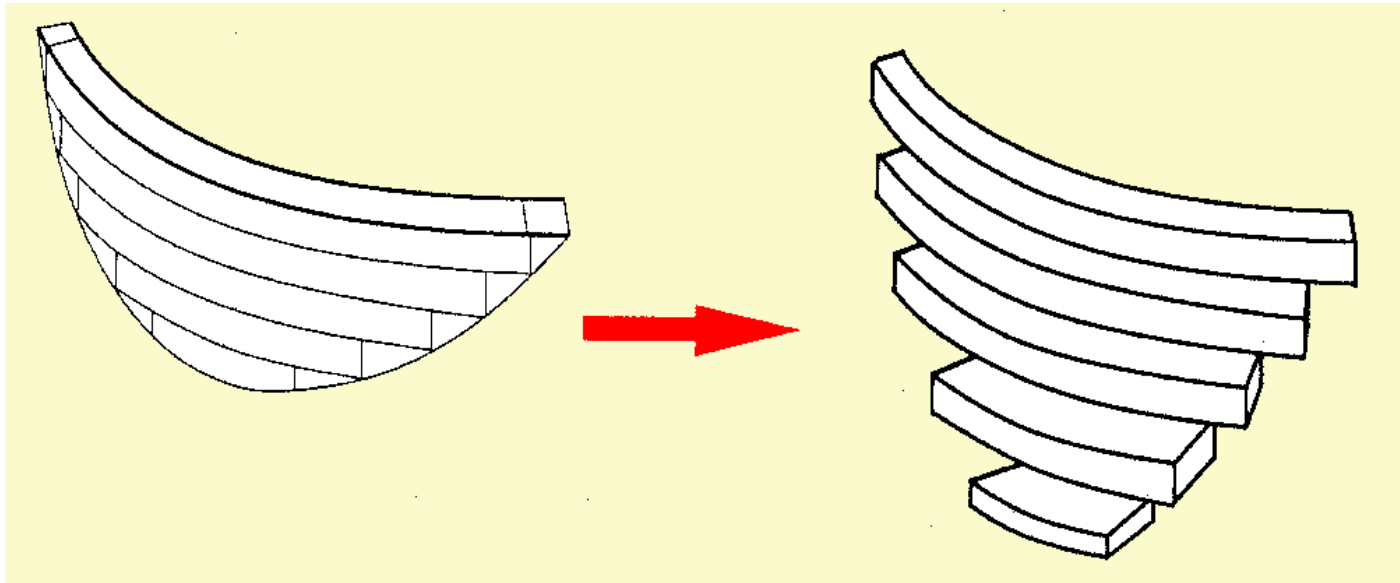
- meilleur accostage en sommet de rive



Comment calculer une voûte ?

➤ Les premières voûtes : arcs indépendants

- ❑ pas de liaison physique entre les arcs
- ❑ chaque arc est soumis à la charge hydrostatique à son niveau

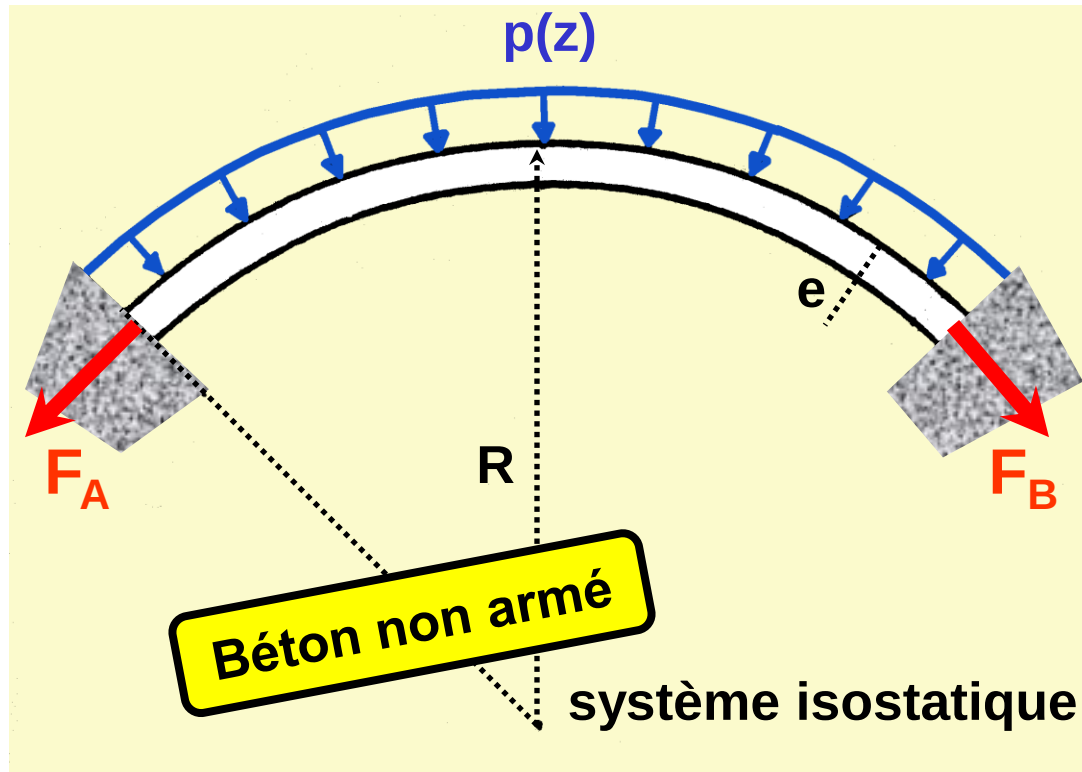


Simplification de calcul

Comment calculer une voûte ?

➤ Les premières voûtes : arcs indépendants

□ cas de l'arc parfait sur appuis simples (partie supérieure)



e/R petit - E_B/E_R modéré

contrainte : $\sigma = pR/e$

flèche : $f \approx 1,5 \sigma R / E_B$

$z = 50 \text{ m}$ $R = 100 \text{ m}$

$e = 10 \text{ m}$

$E_B = 15\,000 \text{ MPa}$

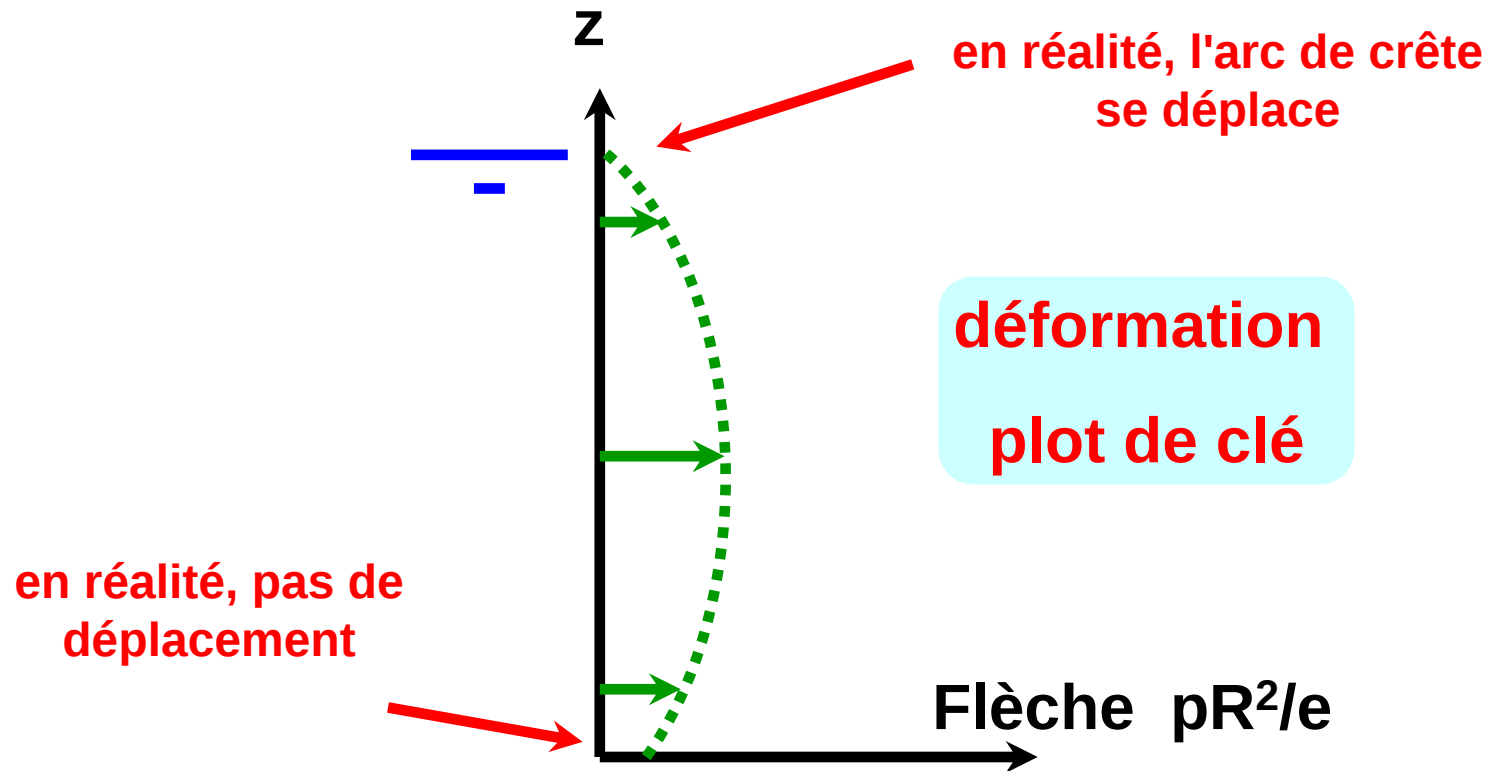


$\sigma = 5 \text{ MPa}$ $f = 33 \text{ mm}$

contraintes modérées : $< 9 - 10 \text{ MPa}$
déplacements hydrostatiques : qqs cm

Comment calculer une voûte ?

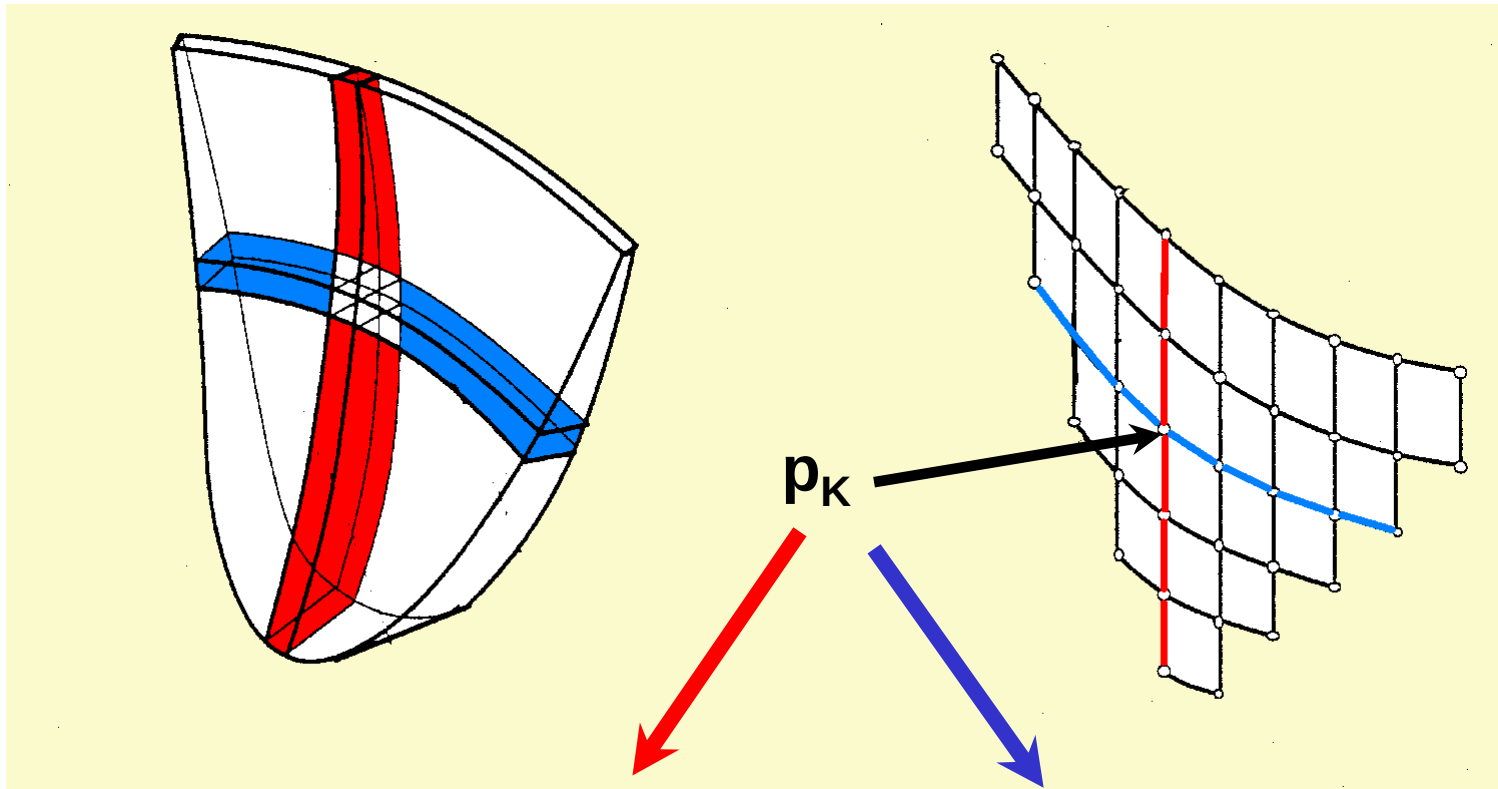
- si calculs en arcs indépendants :



en réalité, il y a continuité physique le long de la console

Comment calculer une voûte ?

- modélisation en arcs et consoles



$$c_K p_K$$

repris par la console

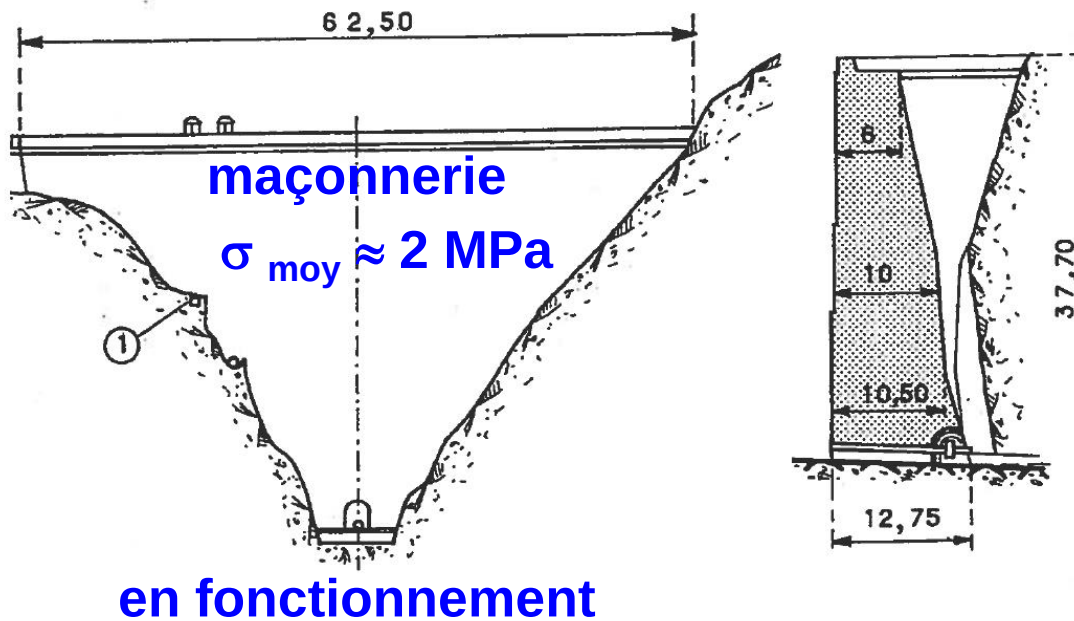
$$(1 - c_K) p_K$$

repris par l'arc

Un peu d'histoire

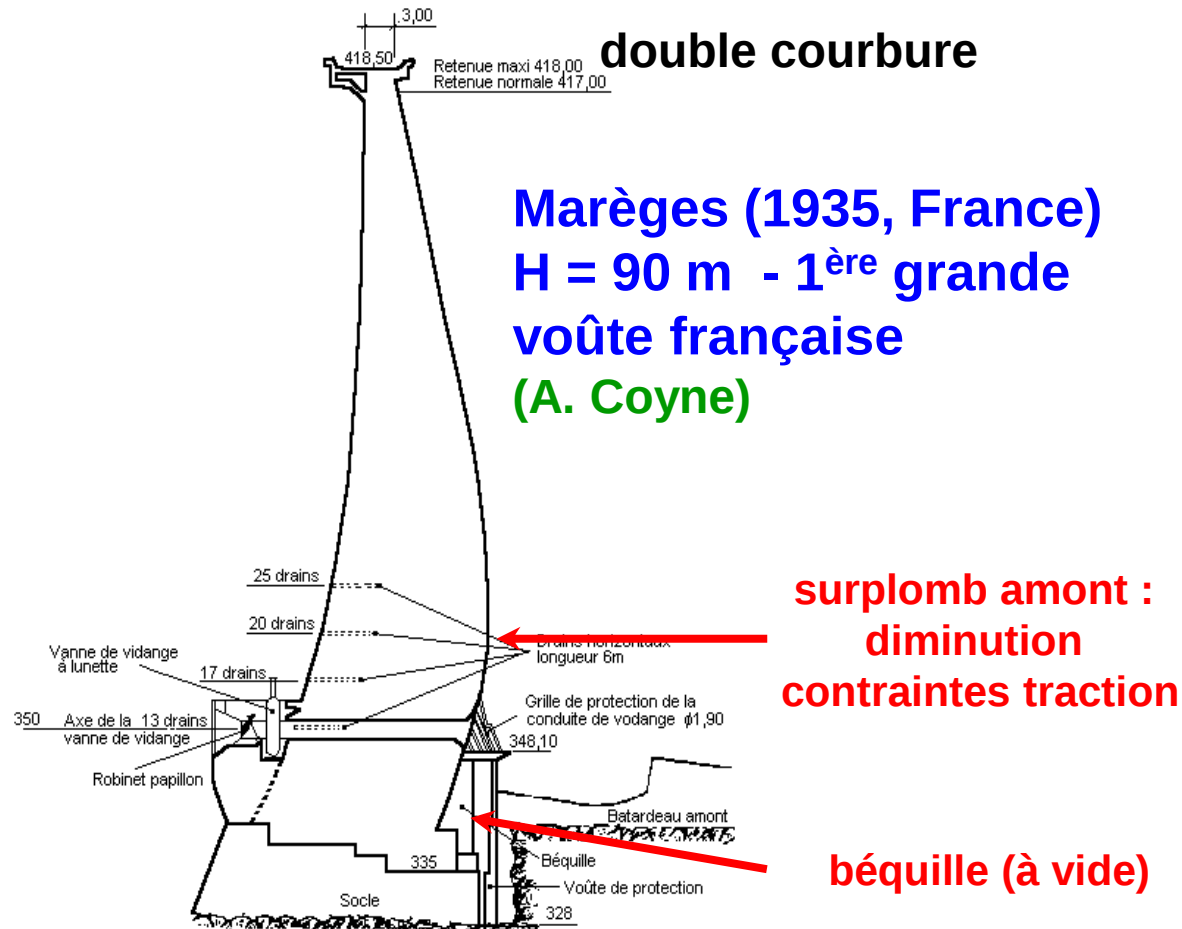
➤ Les précurseurs modernes (XIX^{ème} siècle)

□ barrage Zola (Aix-en-Provence, 1854) – H = 42 m / fond



Un peu d'histoire

- Les formes s'affinent, avec les calculs (début XX^{ème})



Un peu d'histoire

➤ Le boom des voûtes (2^{ème} moitié XX^{ème} siècle)

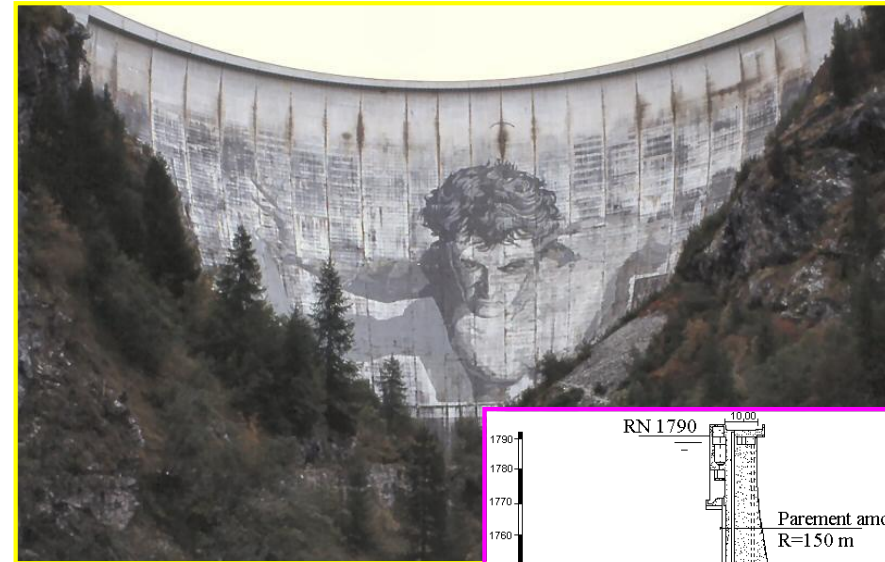
□ les décennies glorieuses en Europe (1945 – 1970) :

- ❖ des grands ingénieurs : **A. Coyne (F) – A. Stucky (S) – C. Semenza (I)**
- ❖ des formes épaisses ... et d'autres très hardies, des coques minces
- ❖ sophistication des calculs



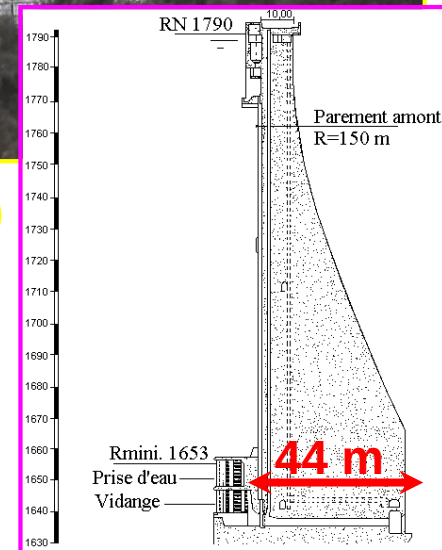
**Punt Dal Gall
(Suisse - 1968)**

H = 130 m



Tignes - 1952)

H = 180 m



Un peu d'histoire

➤ Le boom des voûtes (2^{ème} moitié XX^{ème} siècle)

❑ 2 décembre 1959 : rupture du barrage de Malpasset

❖ retour vers des formes plus épaisses

barrage
initial

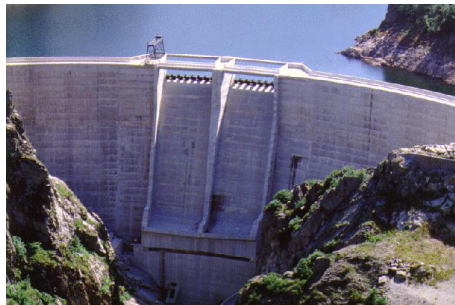
$\sigma_{\text{moy}} \approx 8 \text{ Mpa}$
 $e = 2,4 \text{ m}$

1965

En France :
94 voûtes
 $H > 15 \text{ m}$
Dernière voûte :
Puylaurent (1996)

Evidement

Tolla (1958-65)
 $H = 90 \text{ m}$



Jinping 1 (2015) :
plus haute voûte du monde
 $H = 305 \text{ m}$

❑ essor des voûtes chinoises

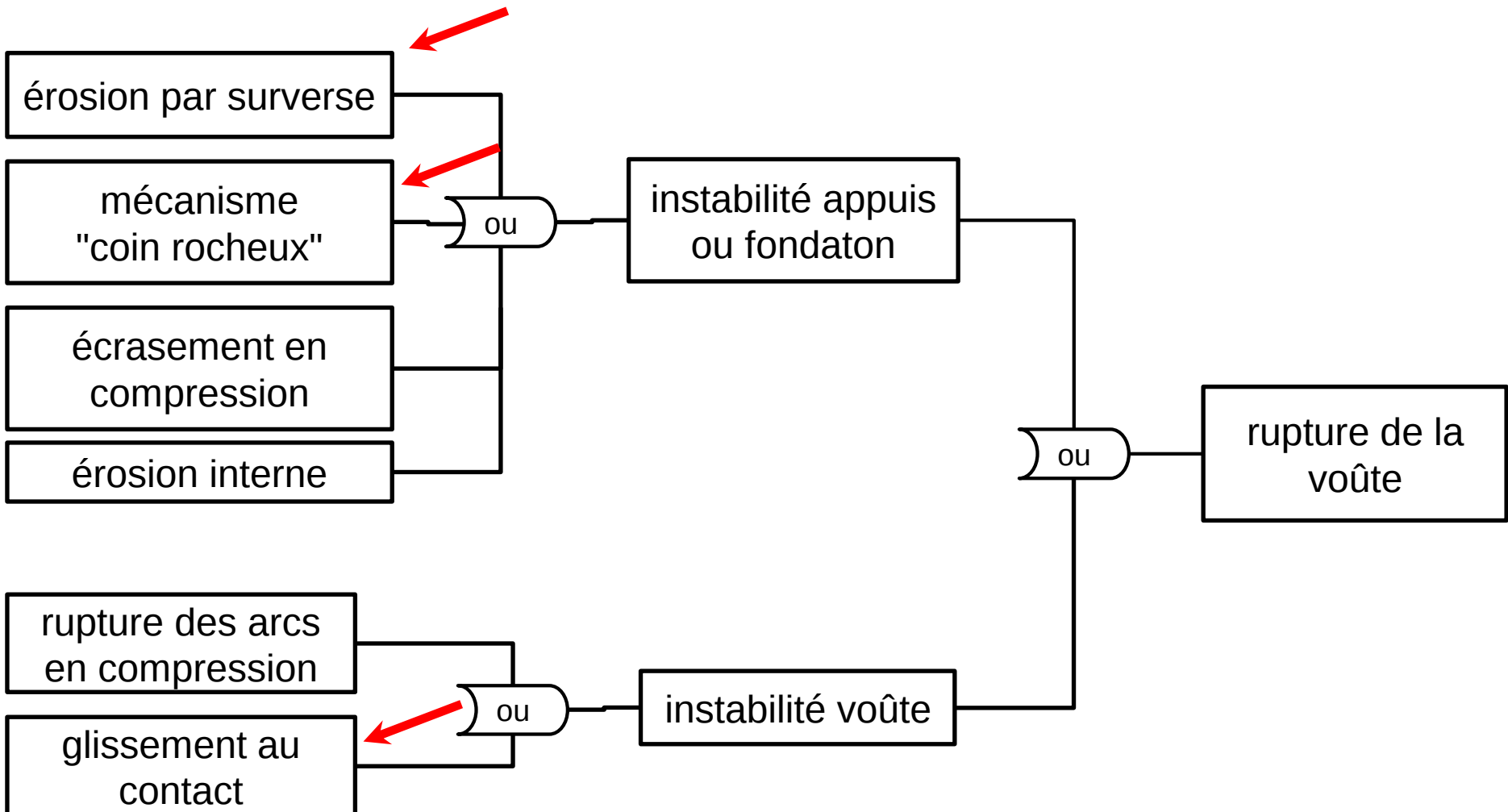


en BCR

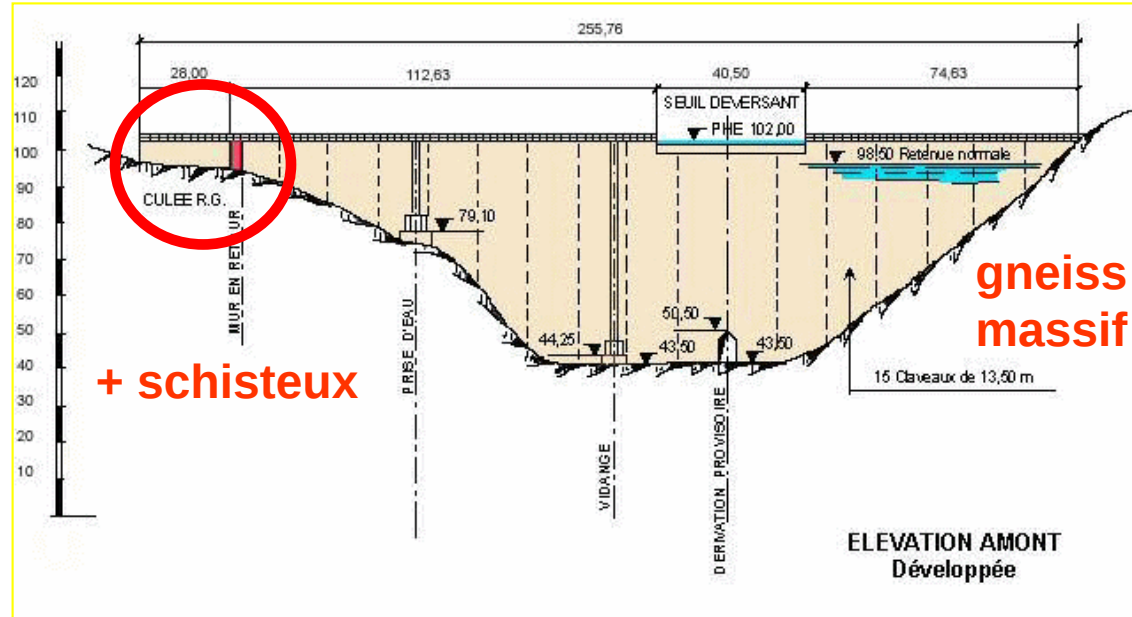
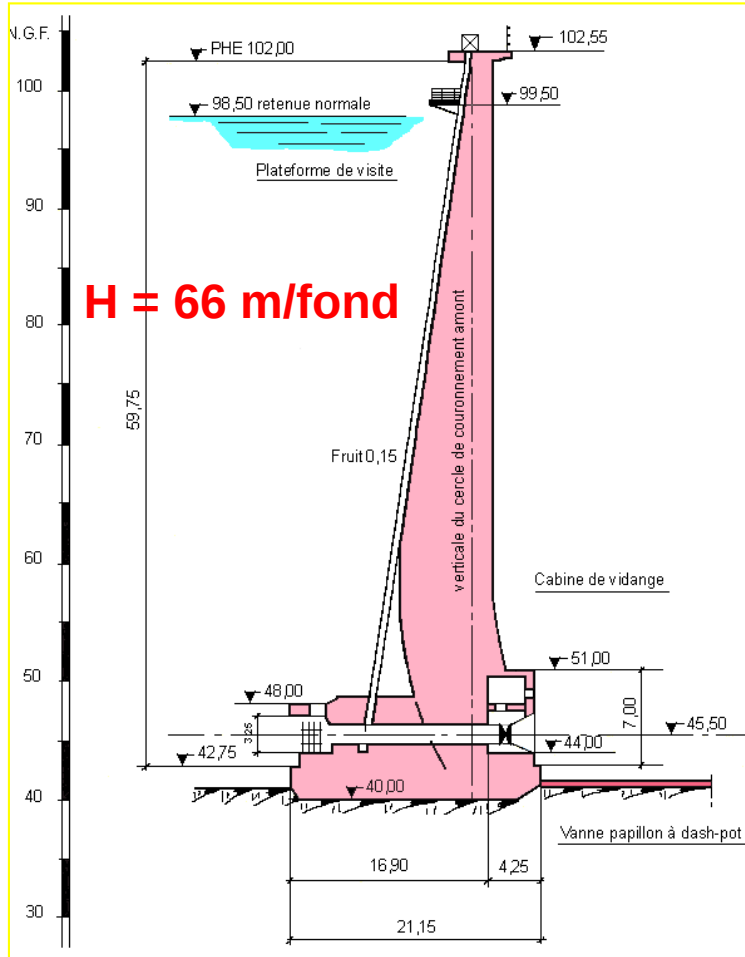
Shapai (2004)

$H = 237 \text{ m}$

Les modes de défaillance d'une voûte



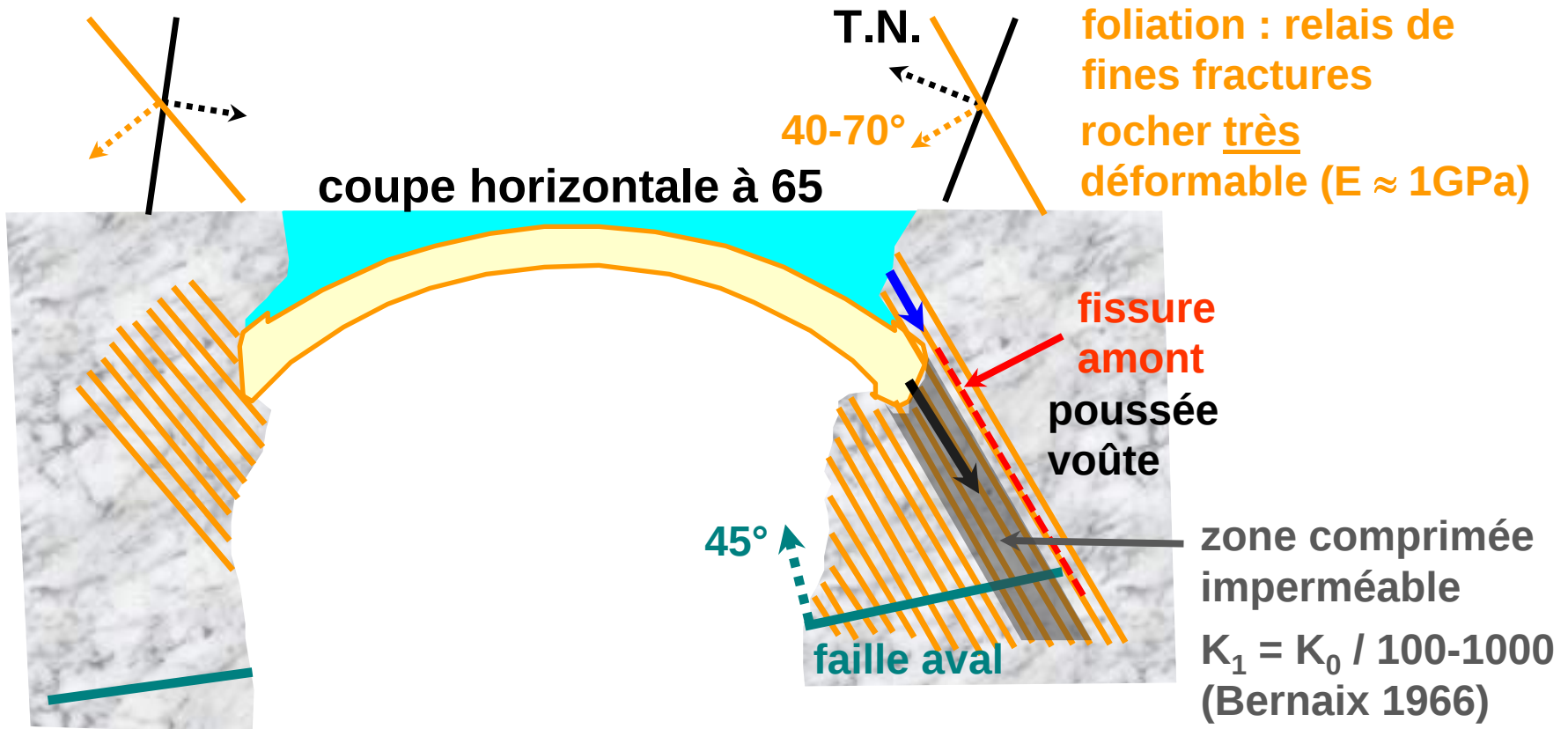
Rupture en fondation : Malpasset



- ❑ chantier 1952-54
- ❑ mise en eau 1954-59 (RN-3.50m)
- ❑ 11/59 : pluies $\Rightarrow Z = RN + 1.62m$
 $= PHE - 1.88m$
- ❑ 02/12/59 à 21h : rupture barrage
- ❑ 21 mn plus tard : 50 hm³ dans Fréjus - 423 morts - 7000 sinistrés

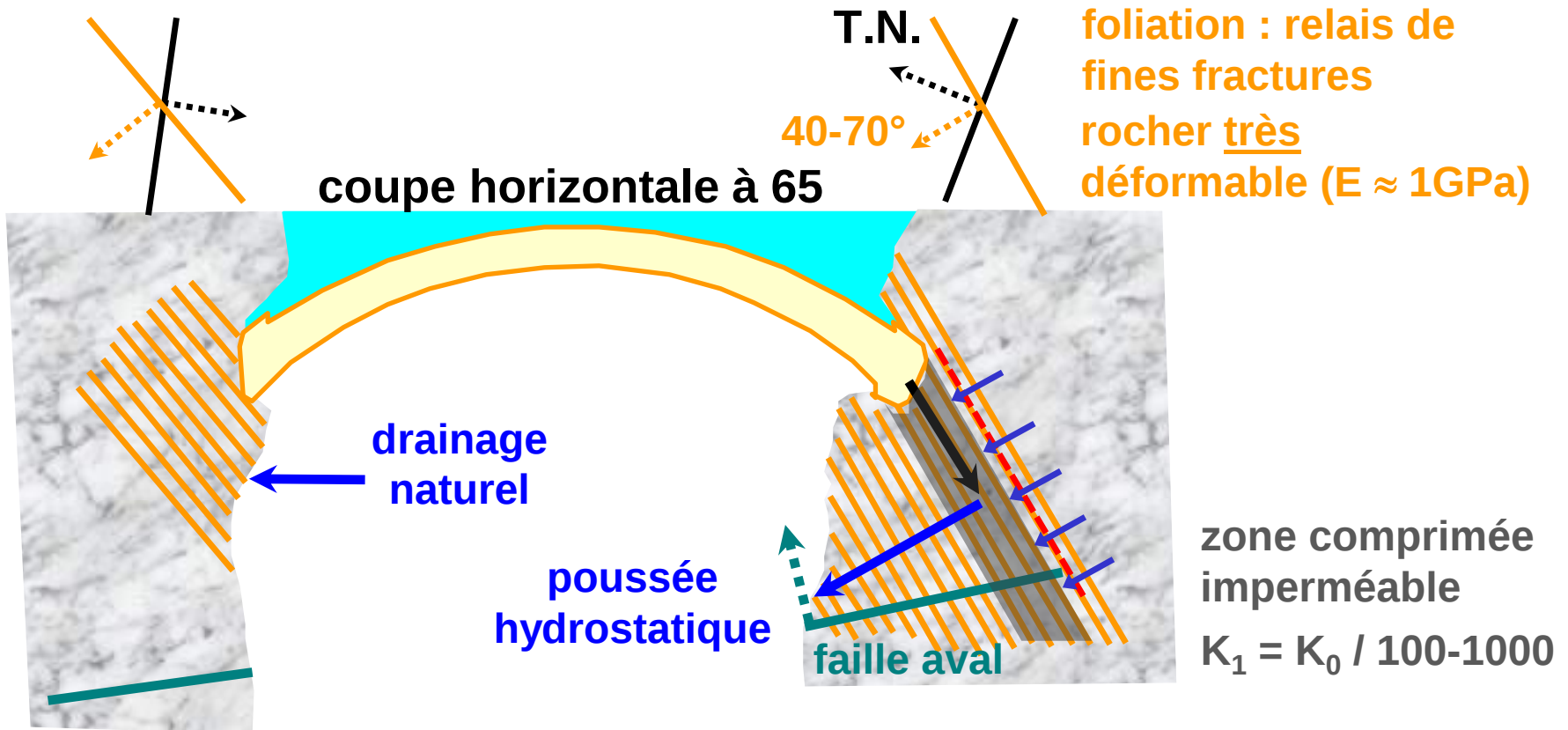
Rupture en fondation : Malpasset

➤ Le mécanisme



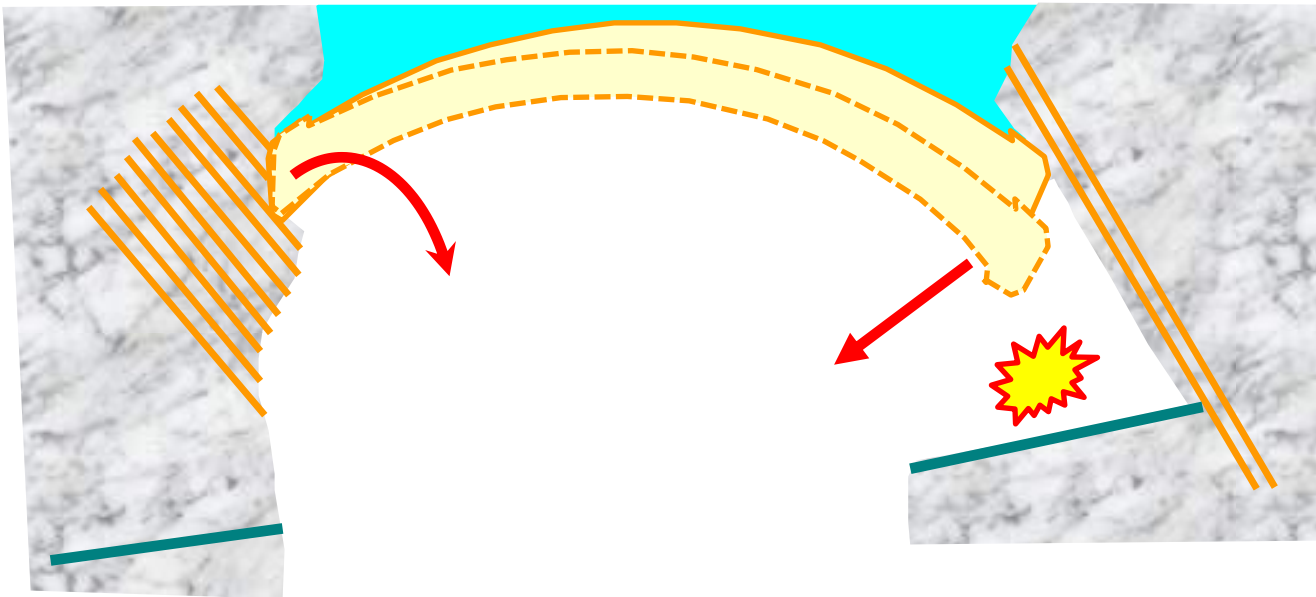
Rupture en fondation : Malpasset

➤ Le mécanisme



Rupture en fondation : Malpasset

➤ Le mécanisme



Rupture en fondation : Malpasset

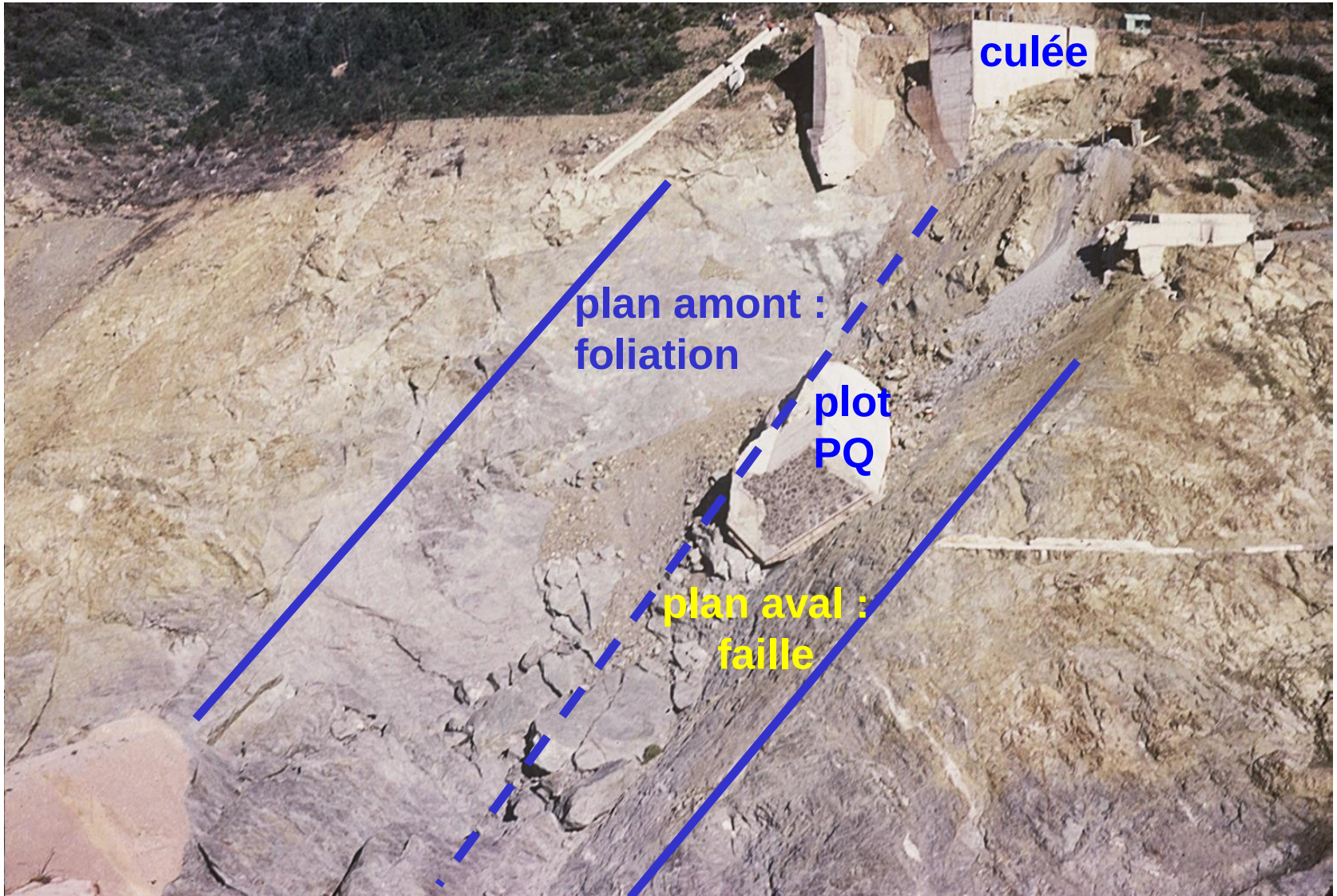


avant



après

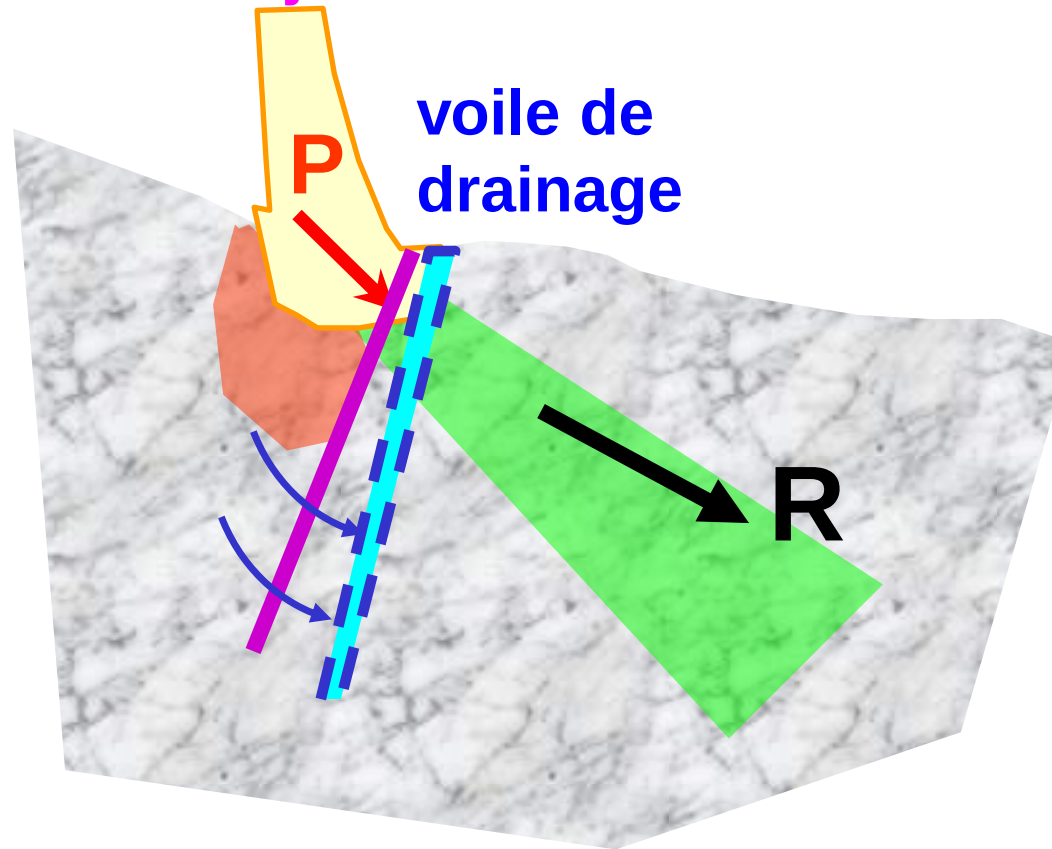
Rupture en fondation : Malpasset



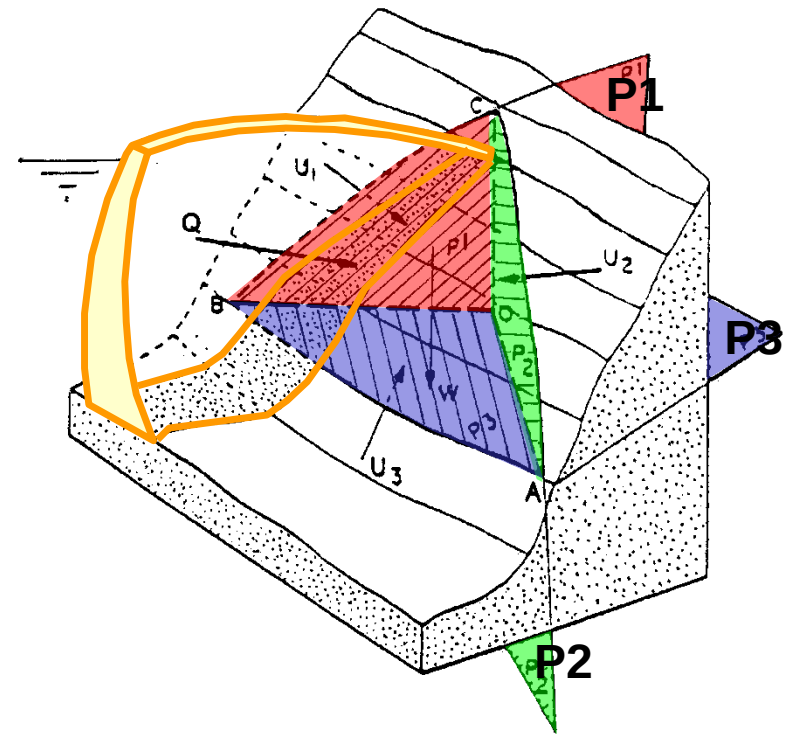
Instabilité de la fondation : précautions

- pratiques de bonne conception

voile d'injection



- vérification des "coins de Londe"



Instabilité de la fondation par surverse généralisée (crue extrême)

- méthodes de vérification encore peu explorées, d'application difficile



- USA : plusieurs ruptures de culées suite à déversement

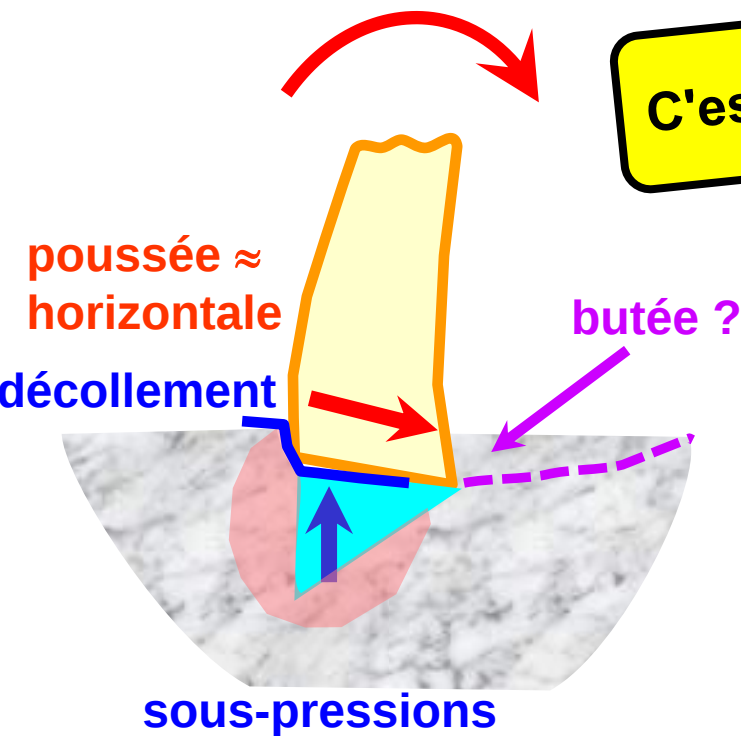


Sweetwater (1916) - Californie

Instabilité de la voûte : deux cas

➤ Instabilité en pied central

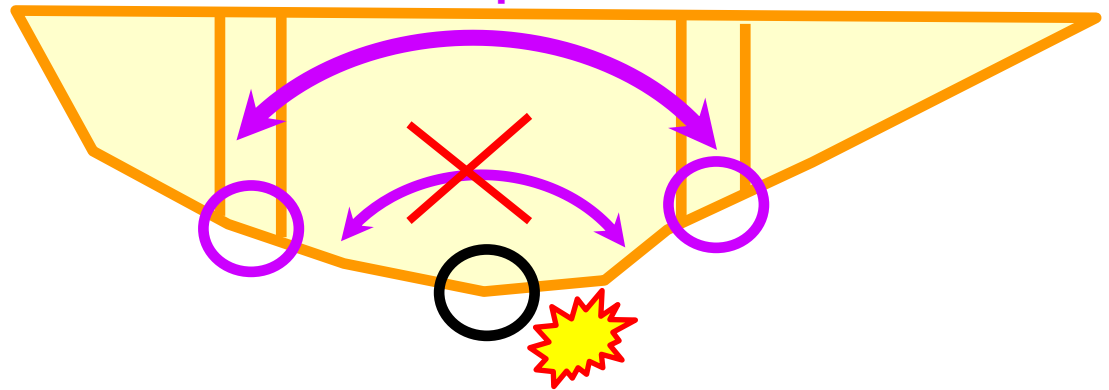
- ❑ en hiver
- ❑ cote de retenue haute
- ❑ aggravé par retrait, fluage



C'est le problème principal des "voûtes larges"

transfert d'efforts en rive :

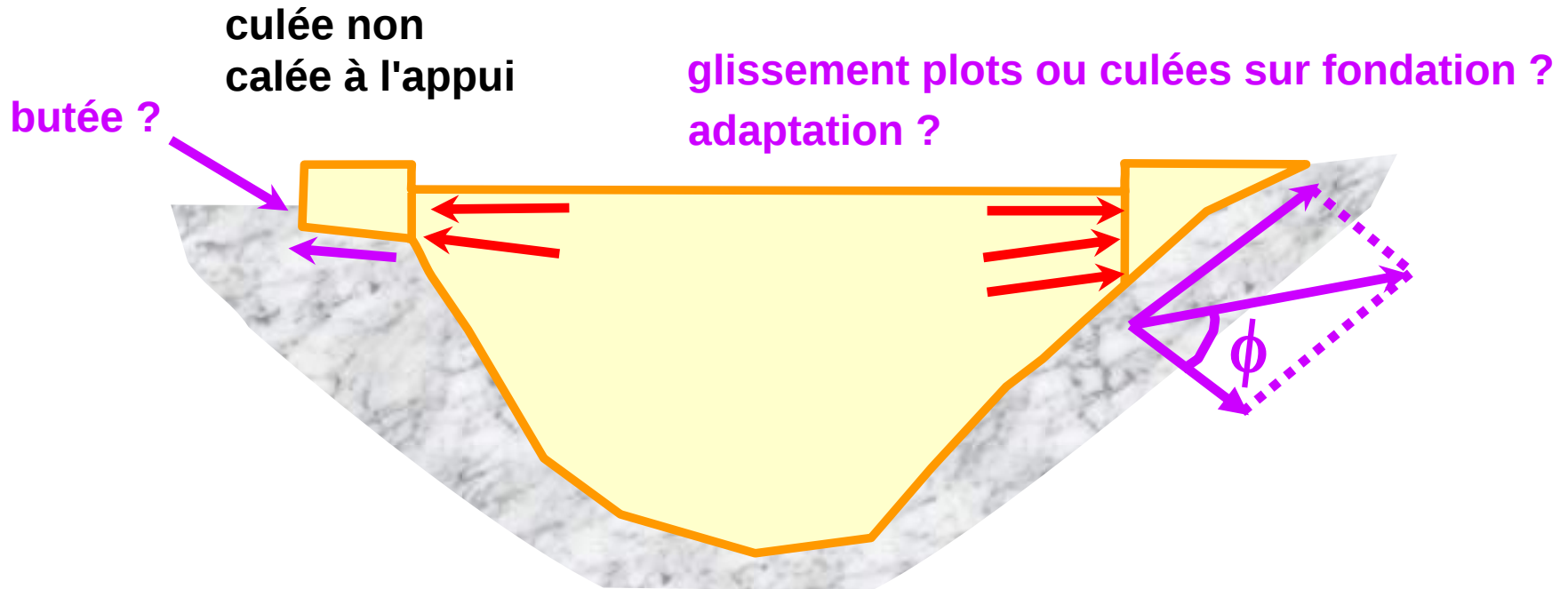
- résistance des arcs ?
- glissement sur fondation ?
- adaptation ?



Instabilité de la voûte : deux cas

➤ Instabilité en partie haute

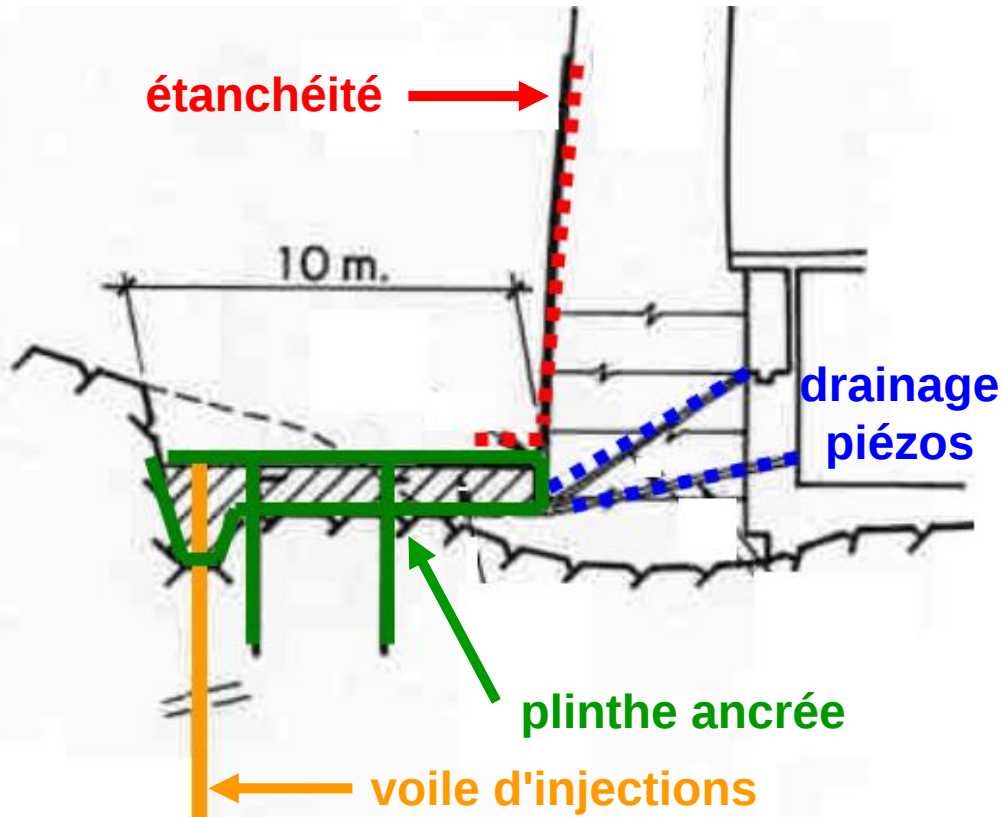
- ❑ en été
- ❑ cote de retenue haute
- ❑ aggravé par le gonflement



Si l'adaptation de la fondation ne suffit pas :
confortement (ajout de poids, tirants)

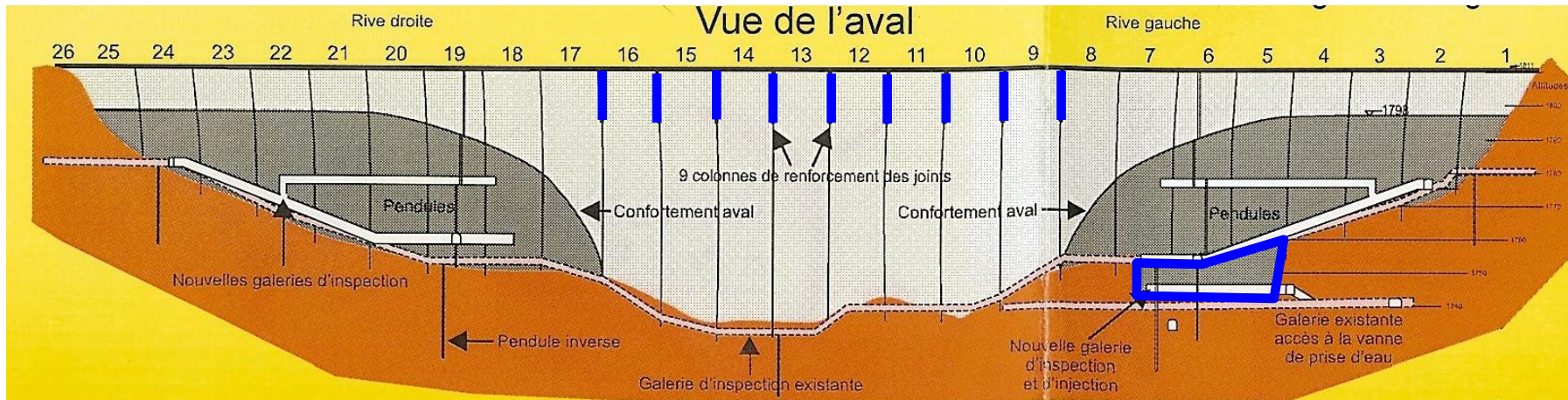
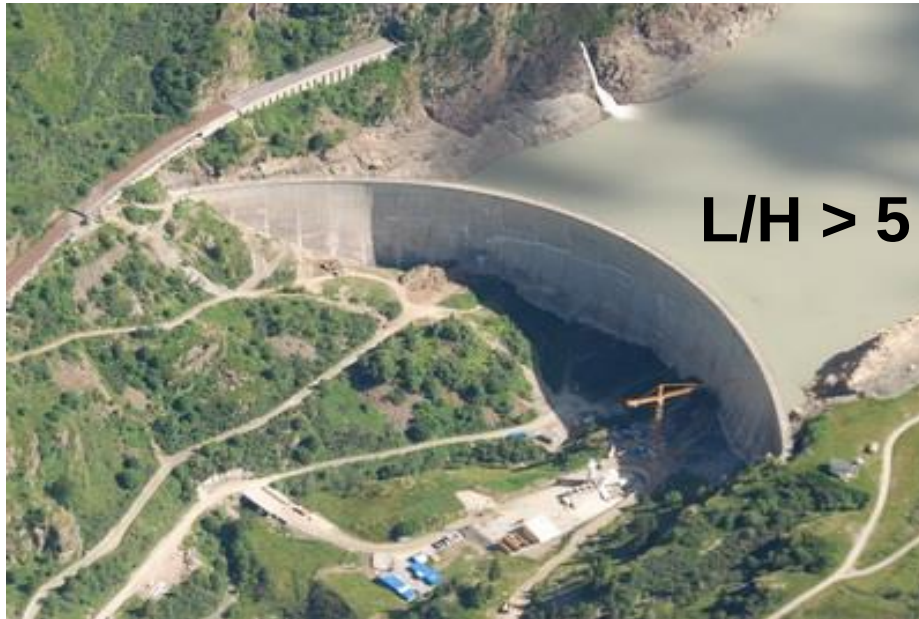
Quelques confortements de voûtes larges

- Etancher le pied amont par une plinthe



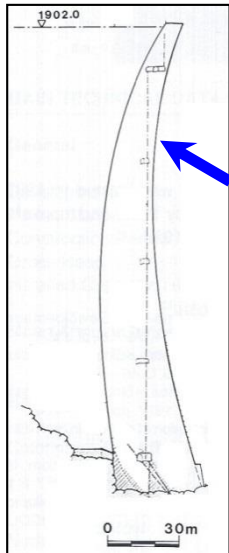
Quelques confortements de voûtes larges

➤ Epaissir les consoles de rive

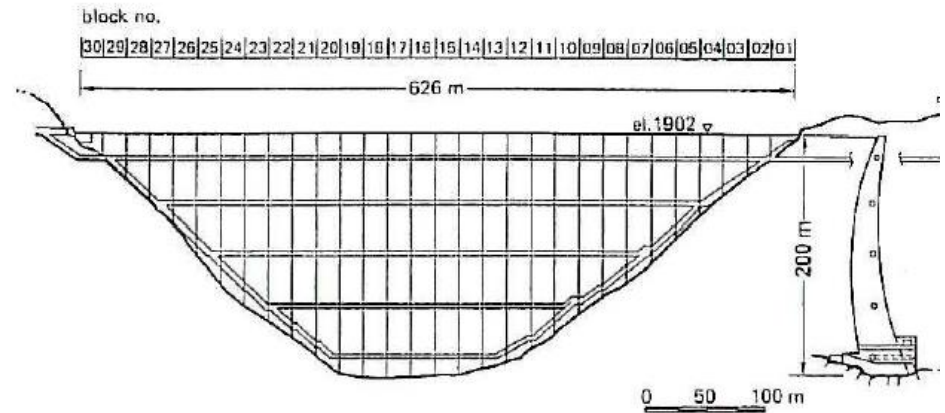


Quelques confortements de voûtes larges

➤ Conforter le pied aval



H = 200 m



support amont
(stabilité à vide)

liaison souple : 613 appuis
néoprène sur consoles
 $S = 1.1 \text{ m}^2$

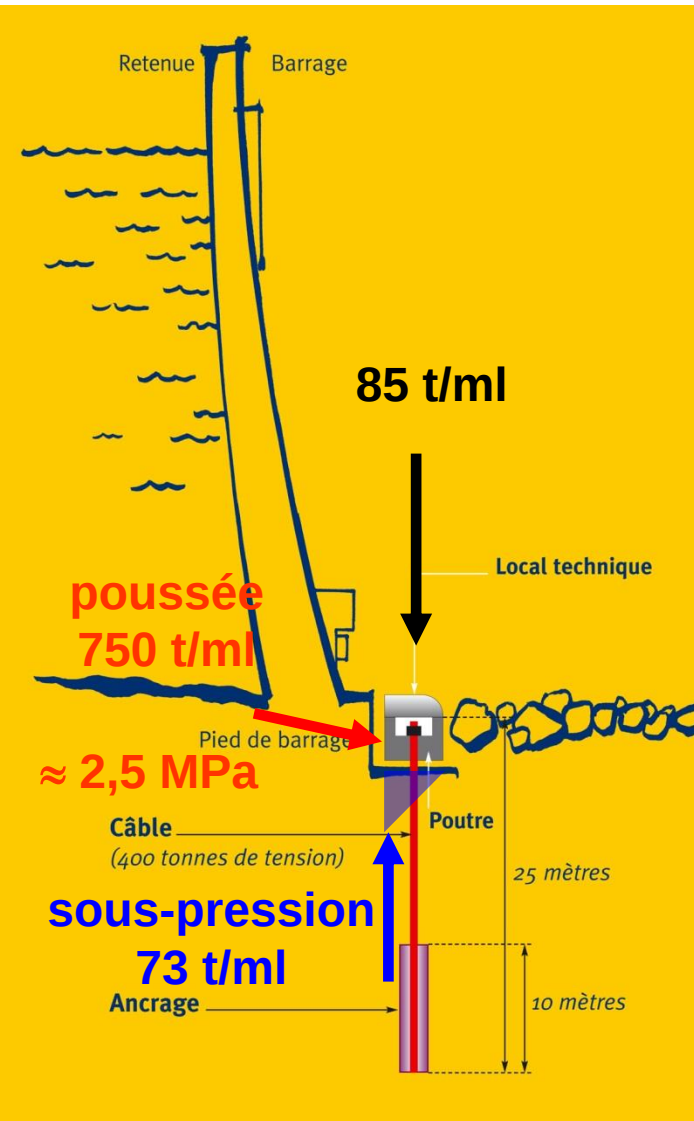
injections de résine

injections de ciment

massif de renfort aval

Quelques confortements de voûtes larges

➤ Garantir la tenue de la butée rocheuse aval



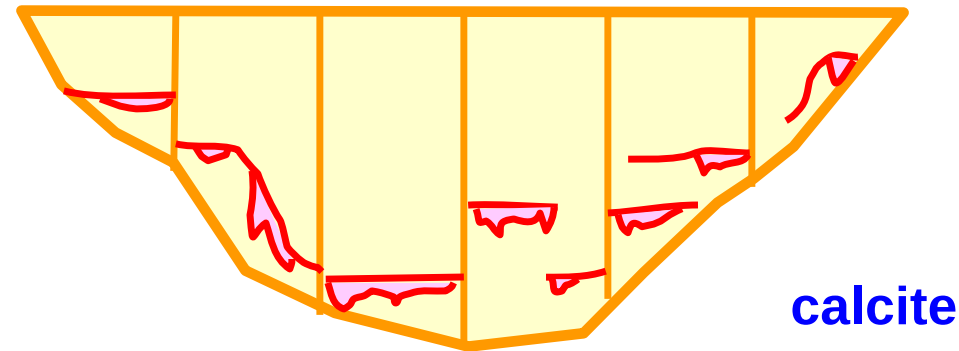
En rives : bonne reprise des efforts par consoles encastrées

poutre en béton armé, support de la précontrainte qui reprend les sous-pressions induites par les joints horizontaux du rocher

Toutes les voûtes fissurent

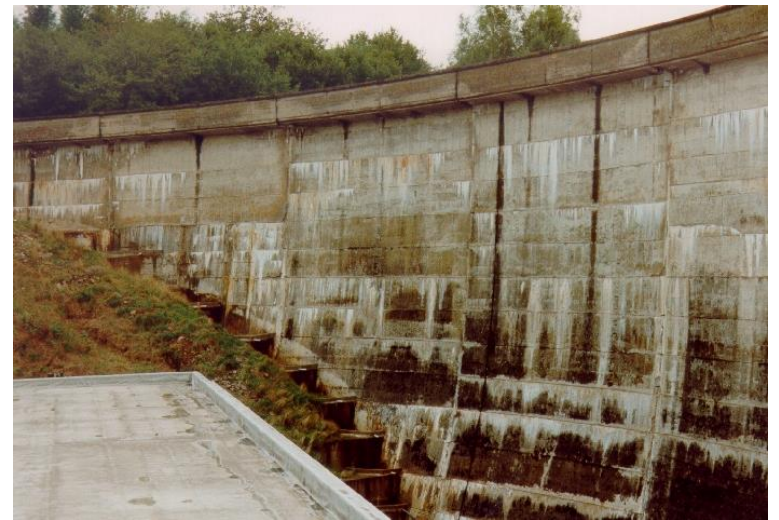
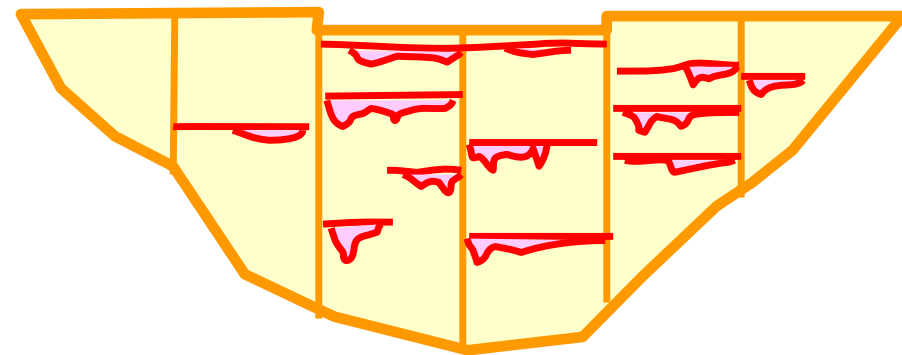
mais toutes les fissures n'ont pas la même signification

❑ rotation de consoles empêchée



généralement pas préoccupant

❑ cisaillements d'arcs



Toutes les voûtes fissurent

mais toutes les fissures n'ont pas la même signification

□ gonflement chimique

exhaussement ↑ ↑

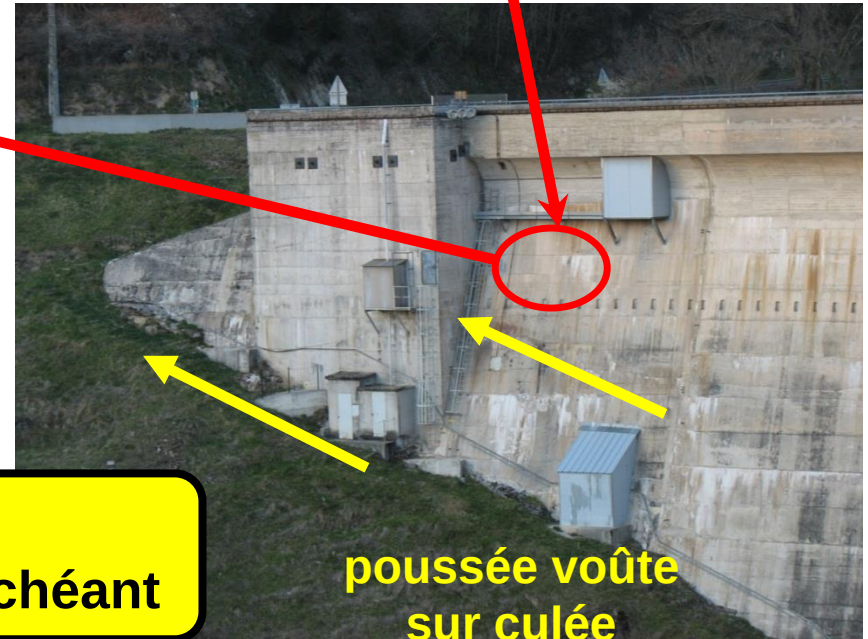
déport amont ↗

□ alcali-réaction

□ réaction sulfatique

mini-fissures
en étoile

macro-fissures

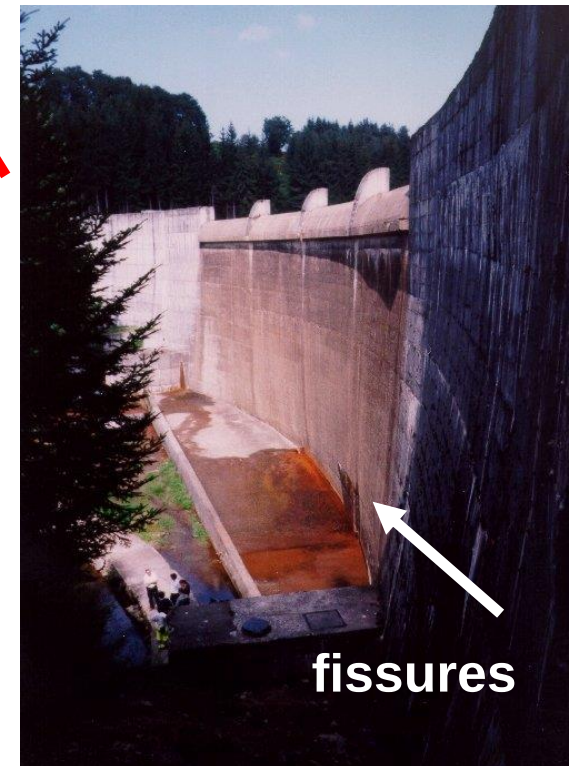
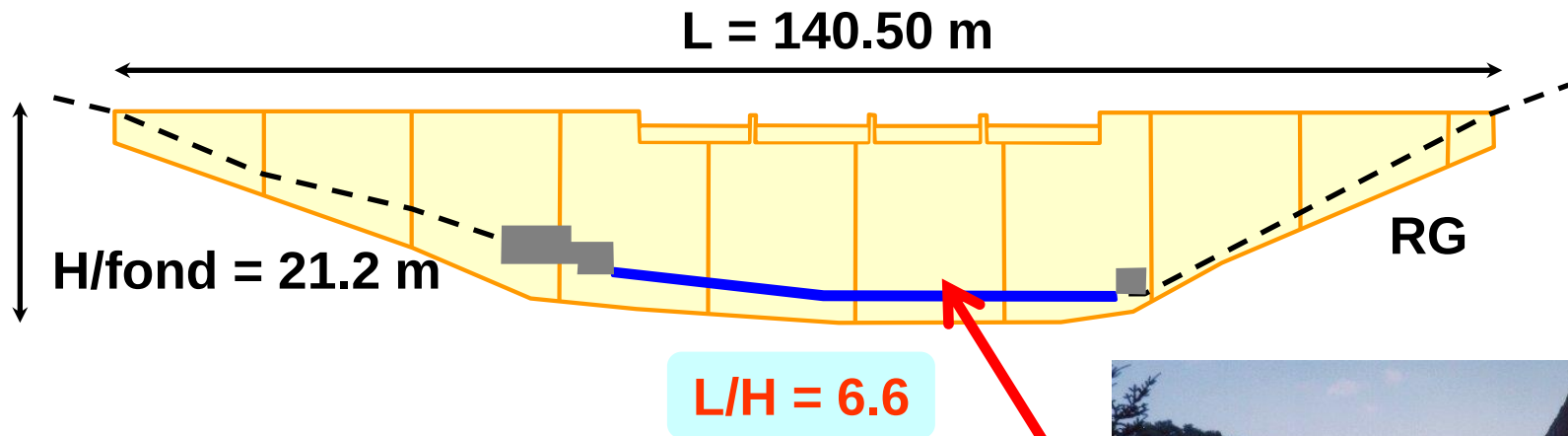


- à surveiller
- à conforter le cas échéant

Toutes les voûtes fissurent

mais toutes les fissures n'ont pas la même signification

❑ cisaillement en pied



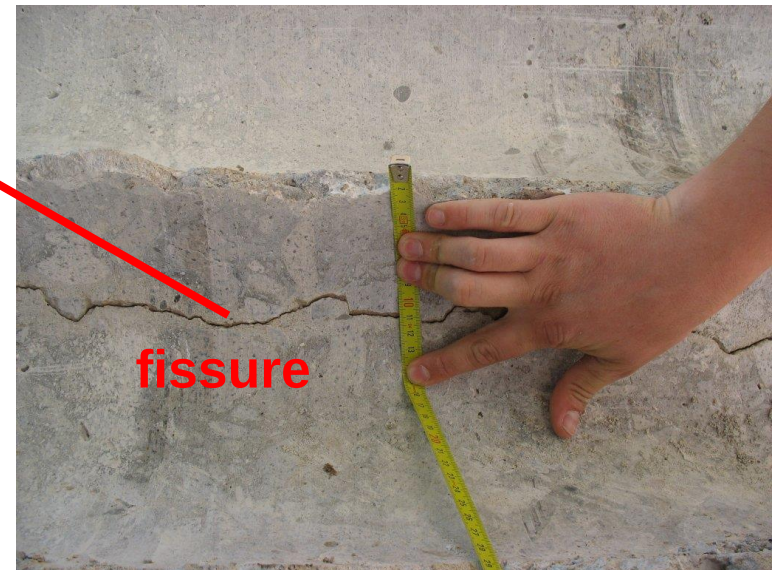
Toutes les voûtes fissurent

mais toutes les fissures n'ont pas la même signification

❑ cisaillement en pied



Après vidange de la
retenue et percement
d'un puits de sécurité

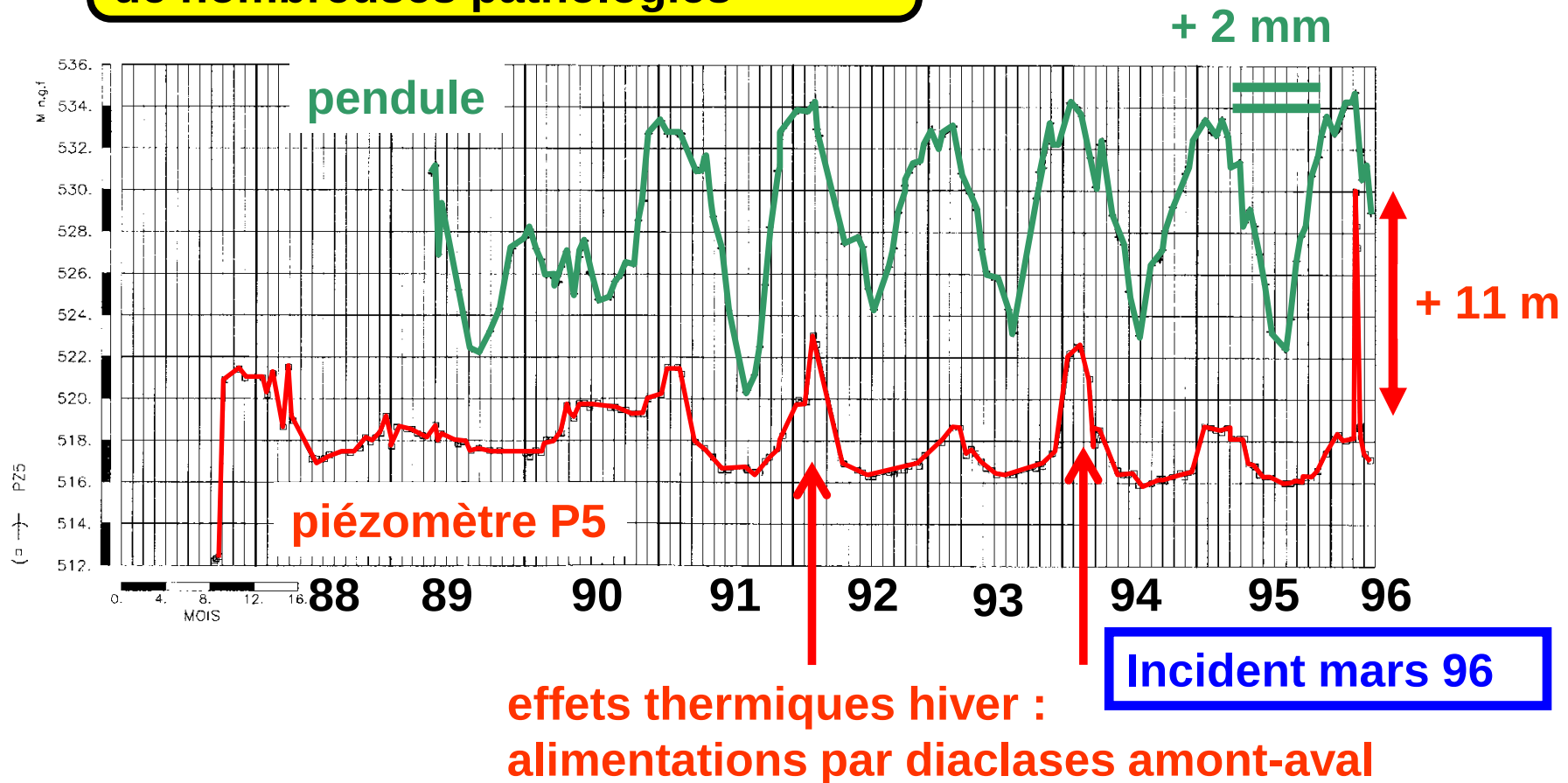


le confortement est inéluctable !

L'importance de l'auscultation

- Mécanique (déplacements)
- Hydraulique (sous-pressions dans le rocher)

l'auscultation a permis de détecter de nombreuses pathologies



Conclusion sur les voûtes

- Des barrages très sûrs, à condition ... que les rives tiennent bon
- L'hyperstaticité autorise des adaptations locales
- Les voûtes larges : un fonctionnement arcs / consoles perturbé
- Importance de l'auscultation
- Un groupe de travail du CFBR travaille sur des recommandations de justification
 - ❑ en partant des mécanismes connus ou supposés
 - ❑ en insistant sur les effets thermiques à prendre en compte
 - ❑ en proposant des critères de performance
 - ❑ en laissant une large place au jugement de l'ingénieur

Je vous remercie pour votre attention

