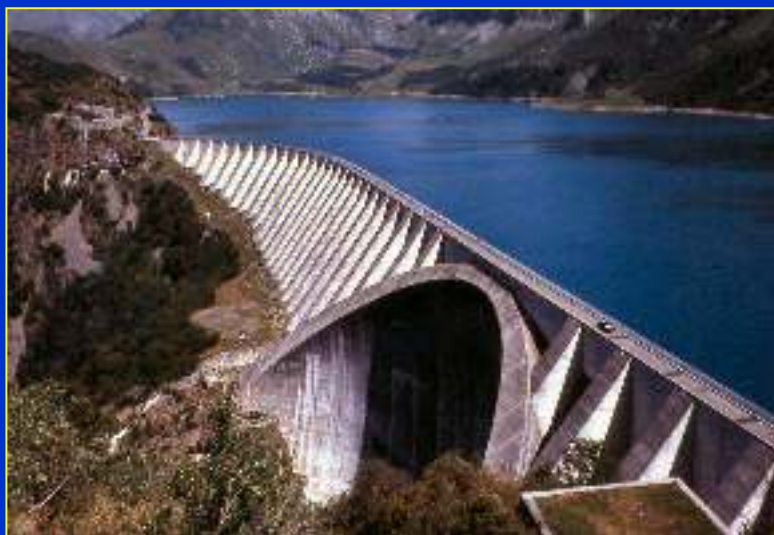


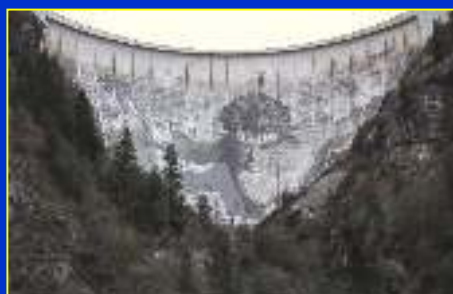
## LES BARRAGES-VOÛTES



1/122

## QUELQUES STATISTIQUES

- Le plus haut : Inguri (Géorgie) 272 m
- Le plus haut en chantier : Xiaowan (Chine) 292 m
- Le plus haut barrage français : Tignes 180 m



- Nombres de barrages en service en France : 94

2/122

## DEUX EX BARRAGES-VOÛTES



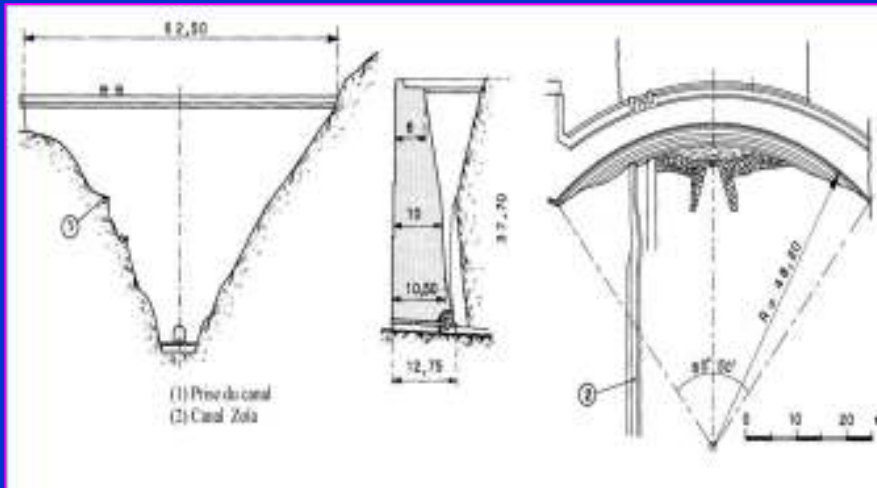
3/122

## BARRAGE DE GLANUM (St Rémy de Provence)



4/122

### BARRAGE ZOLA (1854)



5/122

### BARRAGE ZOLA (1854)



6/122

## BARRAGE DE PUYLAURENT



7/122

## RUPTURES DE BARRAGES-VOÛTES

- Mogie (USA) : 1925 - rupture de la fondation de l'appui rive droite
- Vajont (Italie) : 1963 - effondrement d'une falaise dans la retenue
- Malpasset (France) : 1959 - rupture du rocher de fondation en rive gauche

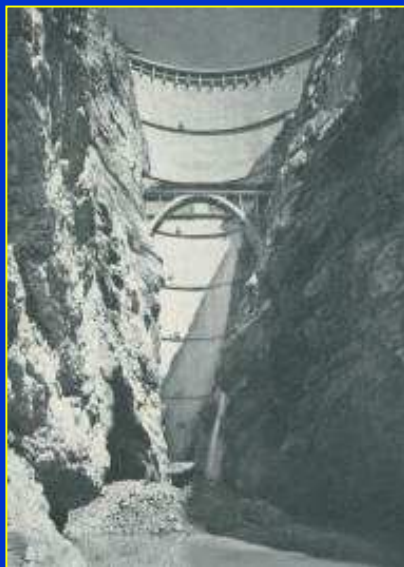
8/122

## BARRAGE DE SWEETWATER (USA)



9/122

## BARRAGE DE VAJONT (ITALIE)



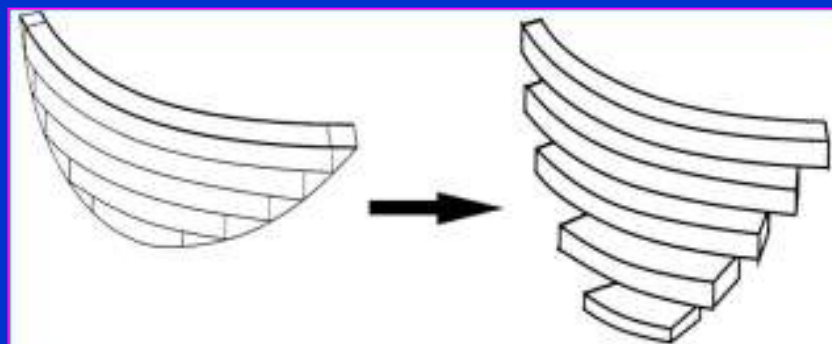
10/122

## PRINCIPE DE RÉSISTANCE DES BARRAGES-VOÛTES

- La forme arquée de l'ouvrage permet un report d'une partie de la poussée hydrostatique due à l'eau de la retenue vers les rives
- L'effort transmis aux fondations est très élevé : **un barrage-voûte exige d'asseoir l'ouvrage sur un rocher de très bonne qualité**

11/122

## CALCUL EN ARCS HORIZONTAUX

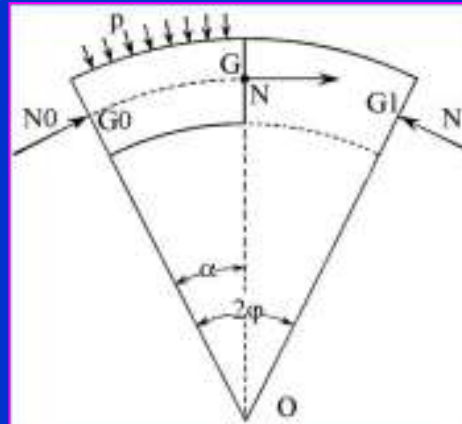


12/122

## FORMULE DU TUBE

$N = p \times re = \text{constante}$

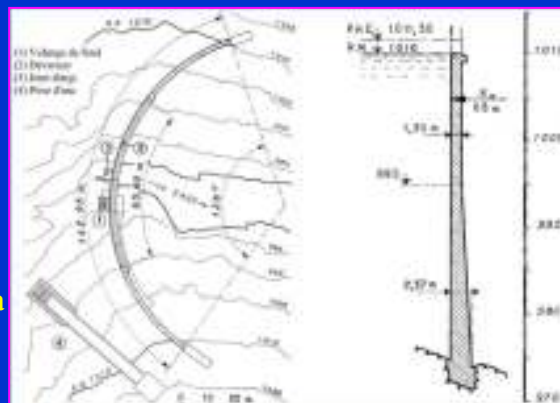
$$\sigma_M = p \frac{re}{e}$$



13/122

## TAUX DE COMPRESSION ADMISSIBLE DU BÉTON

- $\sigma_M \leq 5 \text{ MPa}$
- Expériences négatives au delà :
  - Tolla :  $\sigma_M = 9 \text{ MPa}$  barrage renforcé
  - Gage :  $\sigma_M = 10 \text{ MPa}$  barrage abandonné



14/122

## BARRAGE DE TOLLA



15/122

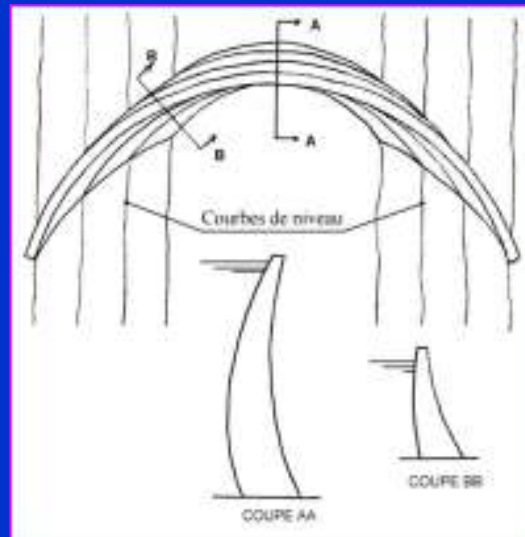
## BARRAGE DU GAGE



16/122



## VOÛTES NON CYLINDRIQUES



17/122

## BARRAGE DE VOUGLANS



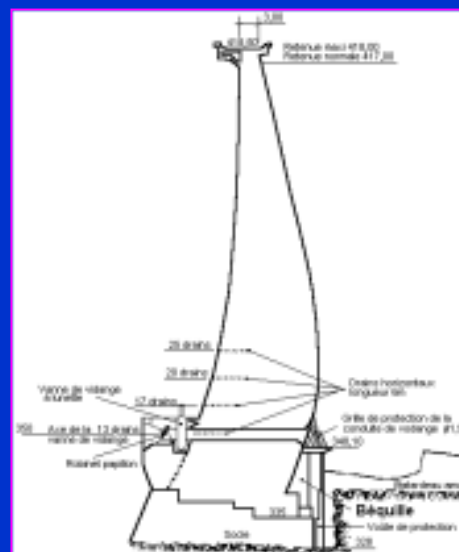
18/122

## BARRAGE D'ÉMOSSON



19/122

## BASCULEMENT DES CONSOLES VERS L'AMONT



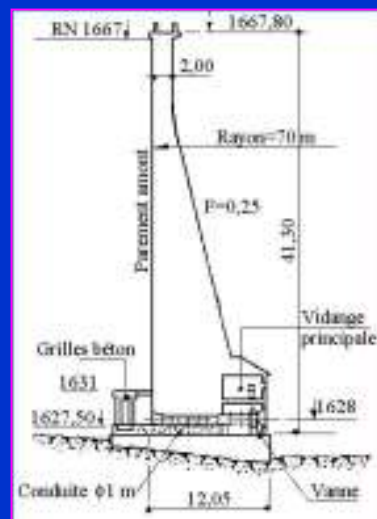
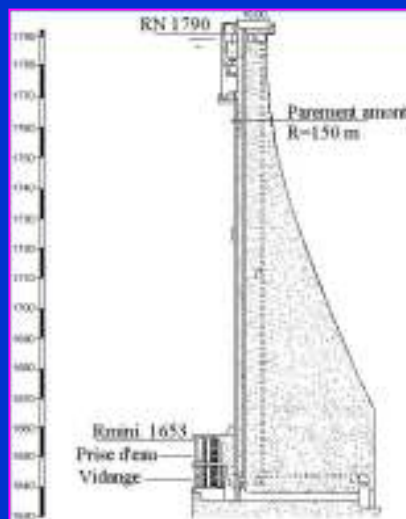
20/122

## BARRAGE DE MARÈGES



21/122

## VOÛTES A PAREMENTS AMONT VERTICAUX



22/122

## BARRAGE DE TIGNES



23/122

## BARRAGE DE TIGNES



24/122

## CALCUL PAR LES FORMULES DE BRESSE

$$\sigma = \frac{N}{e} \pm \frac{6M}{e^2}$$

- **Prise en compte de :**
  - effet thermique
  - retrait et fluage après clavage
  - gonflement
  - déformabilité de la fondation (formules de Vogt)
  - flambement de l'arc de crête (épaisseur minimale)

25/122

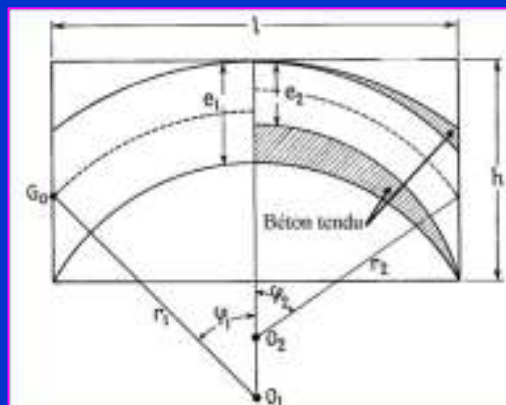
## FORMULES DE VOGT (modifiées MLADYENOVITCH)



26/122

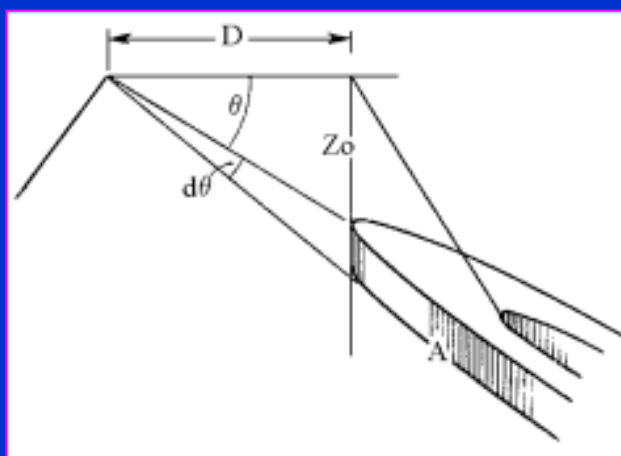
## NOTION DE VOÛTE ACTIVE

Voûte active à l'intérieur de la voûte réelle et dont le béton n'est pas soumis à des tractions



27/122

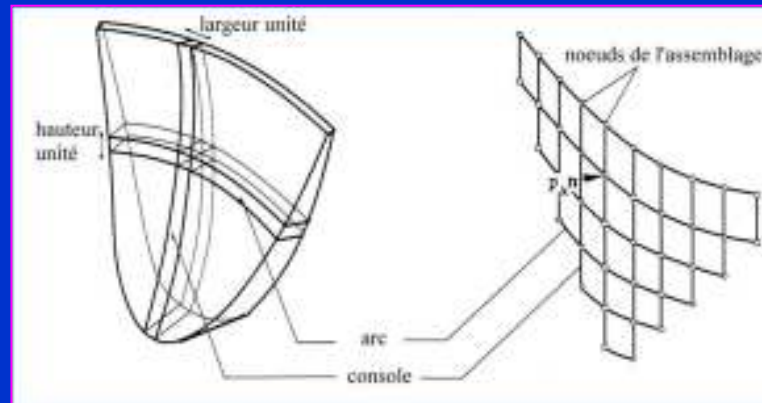
## CALCULS PAR ARCS PLONGEANTS



28/122

## FONCTIONNEMENT EN ARCS + CONSOLES

La part relative de la poussée de l'eau reprise par les arcs et par les consoles s'obtient en égalant les déformations des 2 systèmes



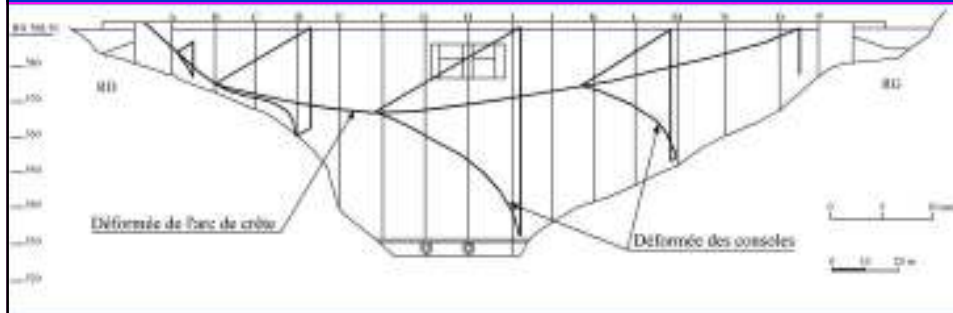
29/122

## MÉTHODE TRIAL LOAD

- Mise au point par l'USBR (1930)
- Ajustement de 4 composantes des déplacements :
  - déplacement radial
  - déplacement tangentiel
  - rotation de l'arc dans son plan
  - rotation de la console dans son plan

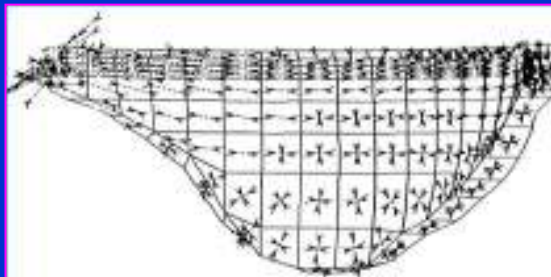
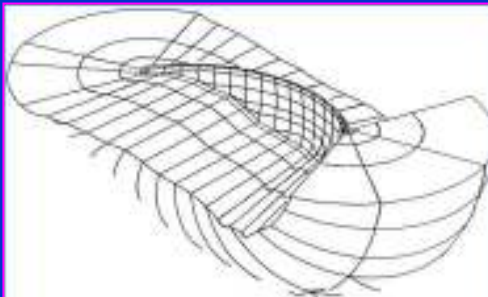
30/122

## DÉFORMATIONS ARCS-CONSOLES



31/122

## CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS



32/122

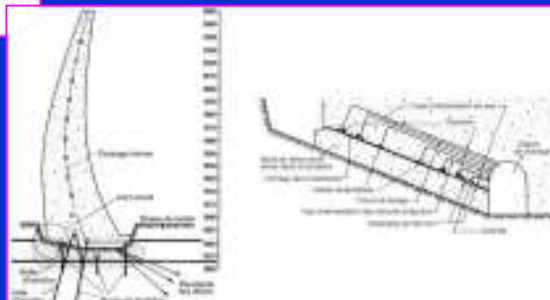
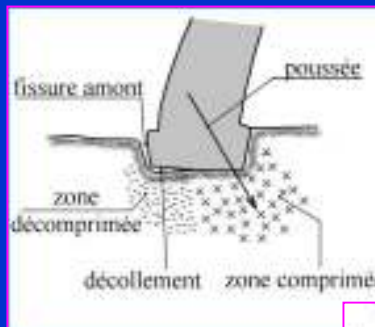


## BARRAGE DE LANOUX



33/122

## FISSURATION DE PIED AMONT



122



## BARRAGE DE CHORANCHE



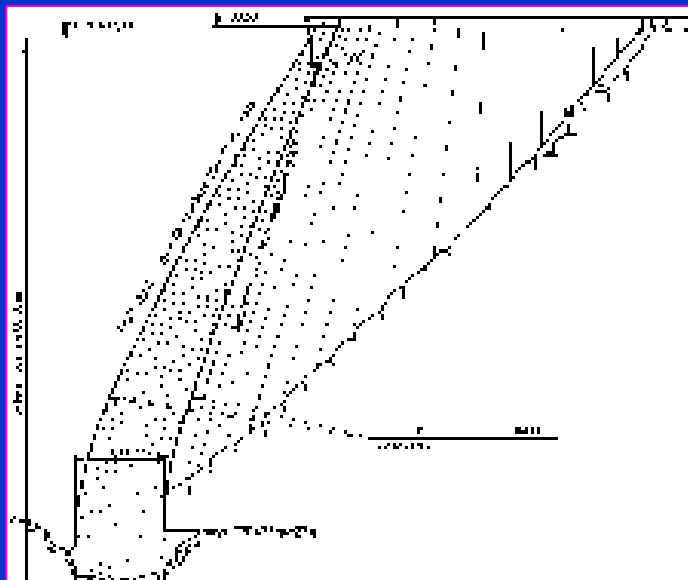
37/122

## BARRAGE DE QUINSON



38/122

## MORPHOLOGIE : VOÛTES INCLINÉES



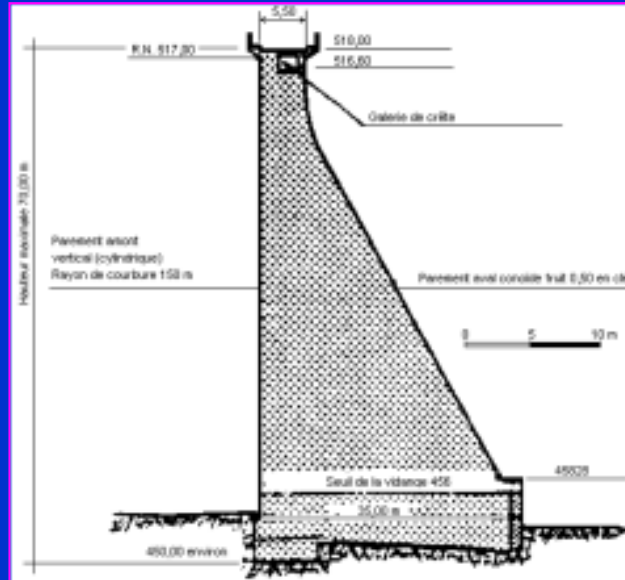
39/122

## BARRAGE D'ENCHANET



40/122

## MORPHOLOGIE : VOÛTES ÉPAISSES



41/122

## BARRAGE DE L'AIGLE



42/122

## BARRAGE DE BORT LES ORGUES



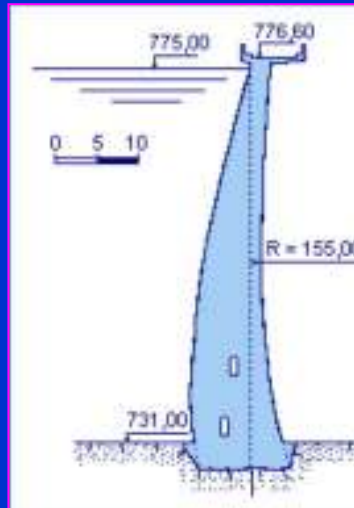
43/122

## BARRAGE DE MONTEYNARD



44/122

## VOÛTES MINCES A COURBURE SIMPLE OU DOUBLE



45/122

## BARRAGE DE SAINT GUÉRIN



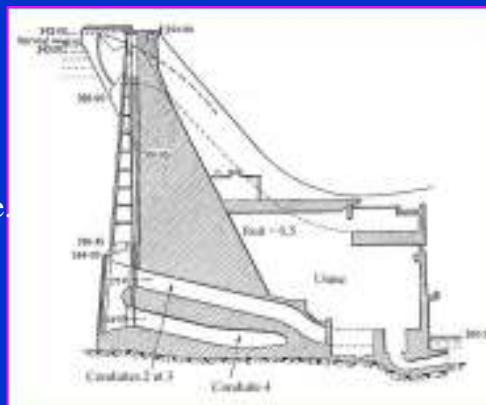
46/122

## POIDS ↔ POIDS-VOÛTES ↔ VOÛTES NOMBRE DE TOLKE

$$t = \frac{h^2}{e \times r}$$

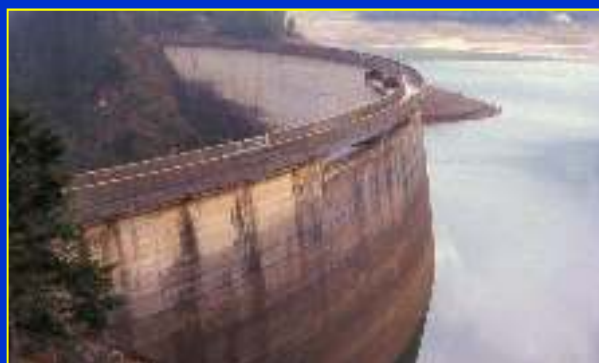
h hauteur du barrage  
e épaisseur en clé à la base  
r rayon moyen de l'arc de crête.

t < 0,5 effet poids prépondérant  
t > 8 effet voûte prépondérant



47/122

## DÉCOUPAGE EN PLOTS



48/122



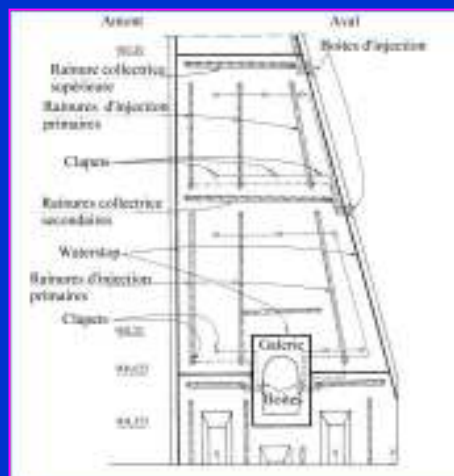
## DÉCOUPAGE EN PLOTS



49/122

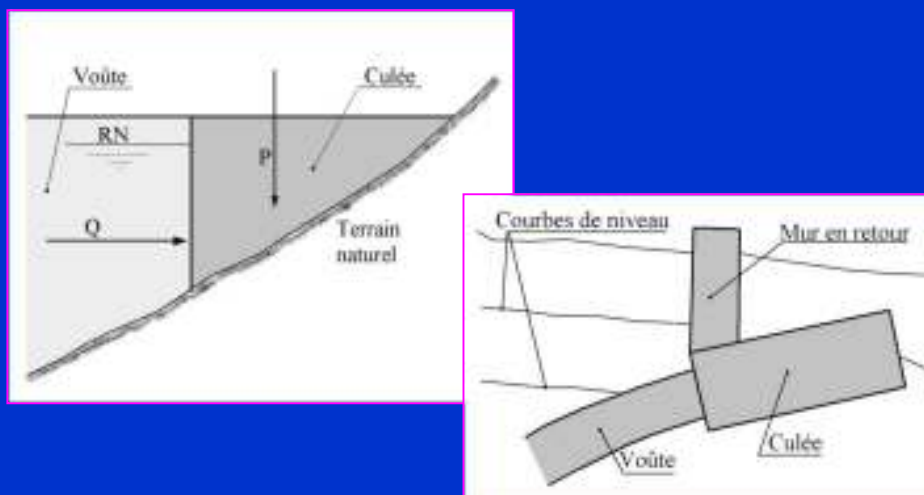
## CLAVAGE DES JOINTS

- Plots de 10 à 25 m
- Clavage par injection en fin de construction
- Clavage à vide en fin d'hiver



50/122

## CULÉES DES VOÛTES



51/122

## QUELQUES CULÉES



Barrage de la Palisse

52/122

## QUELQUES CULÉES



**Barrage de Cap de Long**

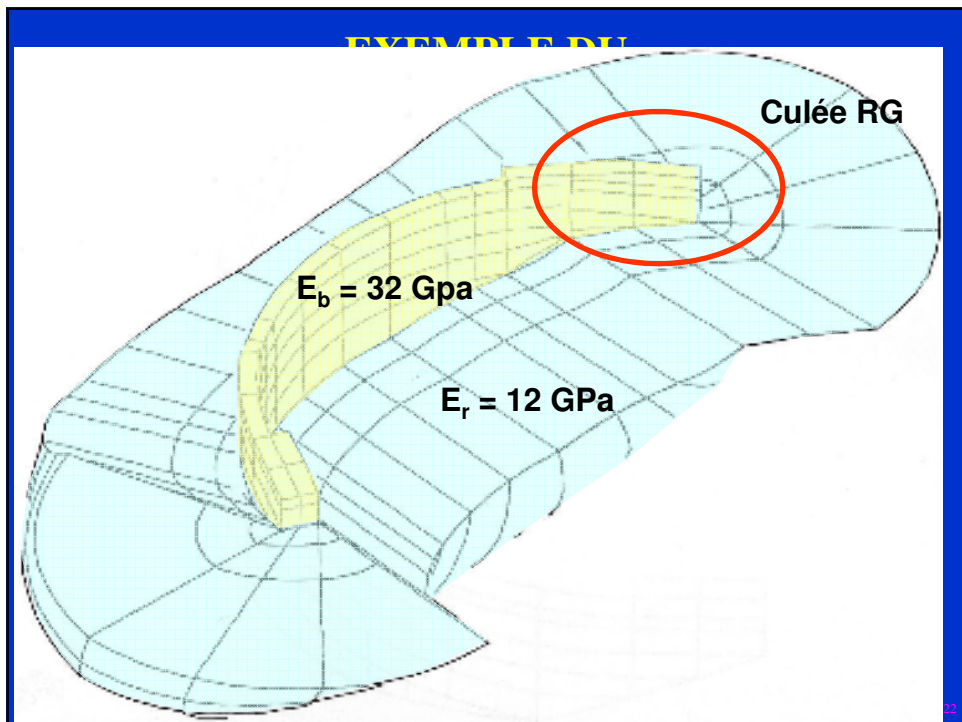
53/122

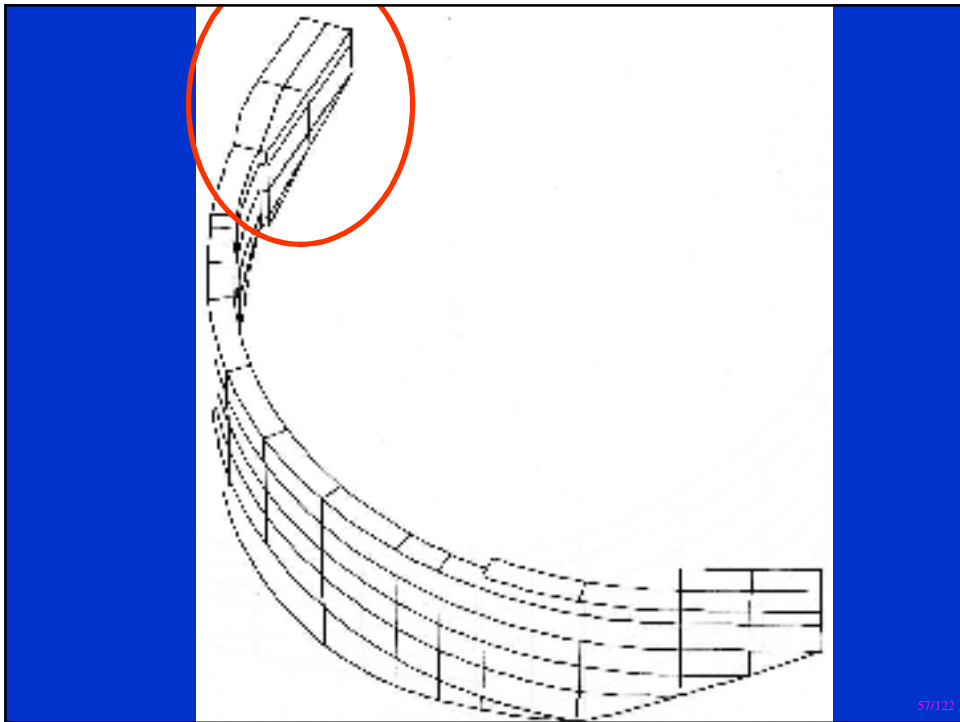
## QUELQUES CULÉES



**Barrage de Choranche**

54/122





57/122

## CULÉE DU BARRAGE DE MAURY



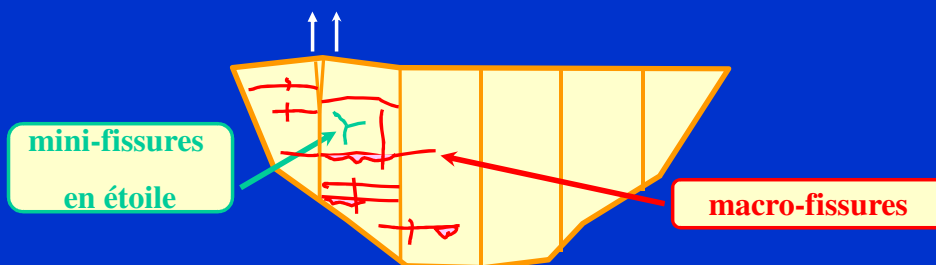
58/122

## BARRAGE DE MAURY GONFLEMENT DU BÉTON

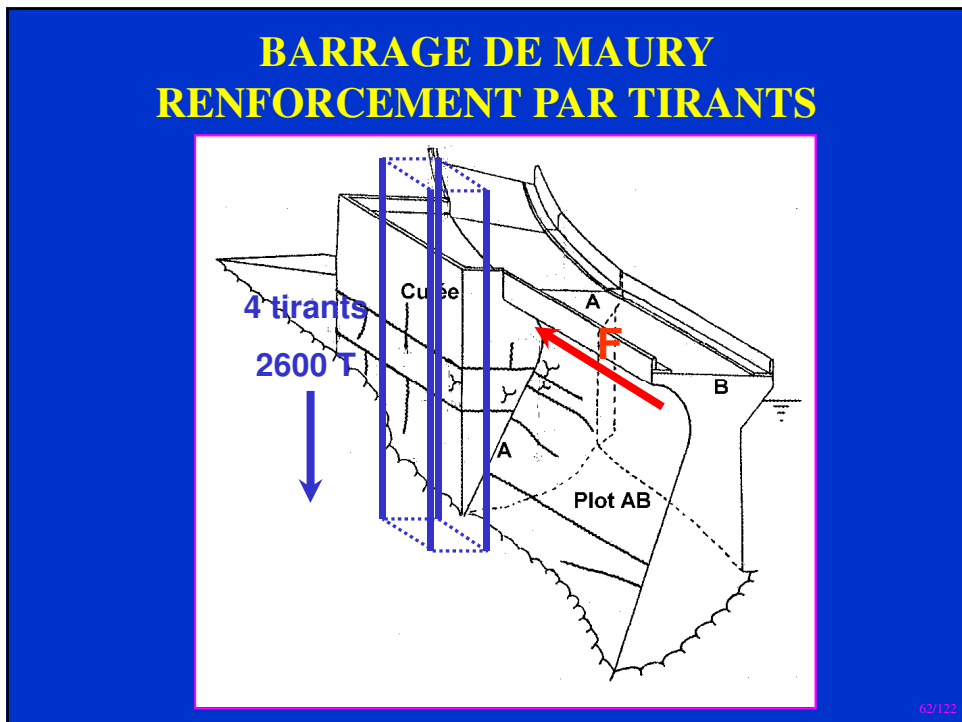
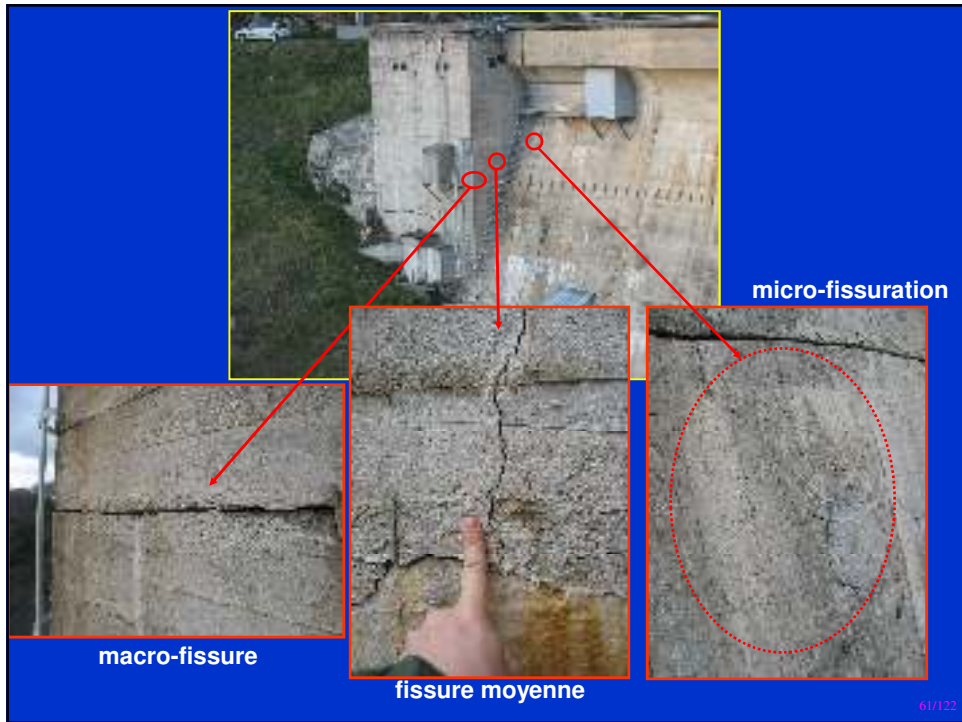


59/122

## BARRAGE DE MAURY GONFLEMENT DU BÉTON



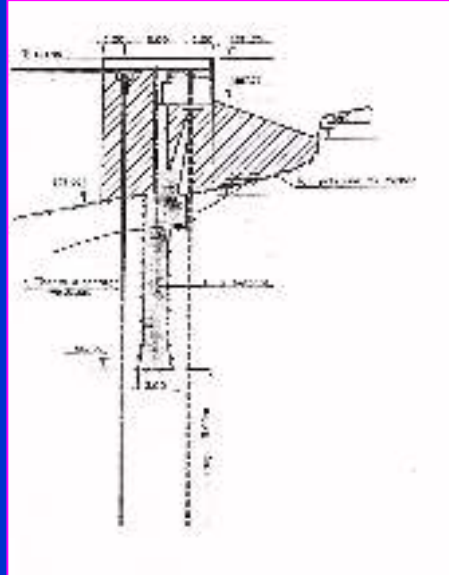
60/122





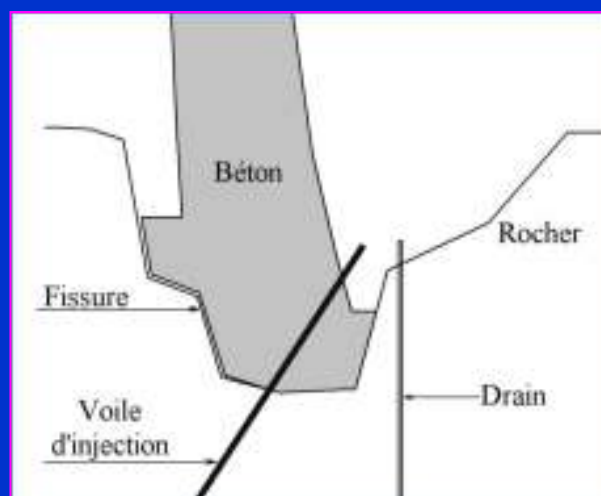


## BARRAGE DE MAURY RENFORCEMENT PAR TIRANTS



65/122

## INJECTION ET DRAINAGE DE LA FONDATION



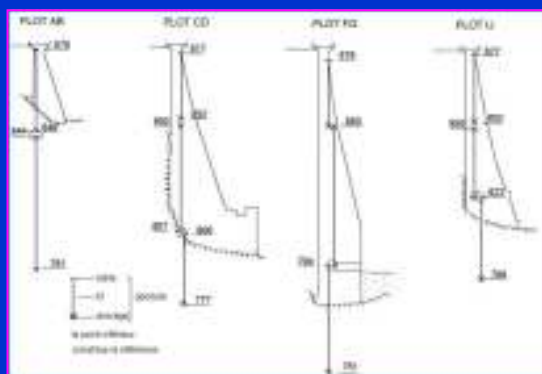
66/122

## AUSCULTATION DES DÉPLACEMENTS

- Par topographie



- Par pendules



## PATHOLOGIES

- Défaut des parements
- Fissuration
- Déclavage de la voûte
- Gonflement du béton
- Stabilité insuffisante des culées
- Insuffisance de résistance
- Insuffisance de la fondation

## DÉFAUT DE PAREMENT



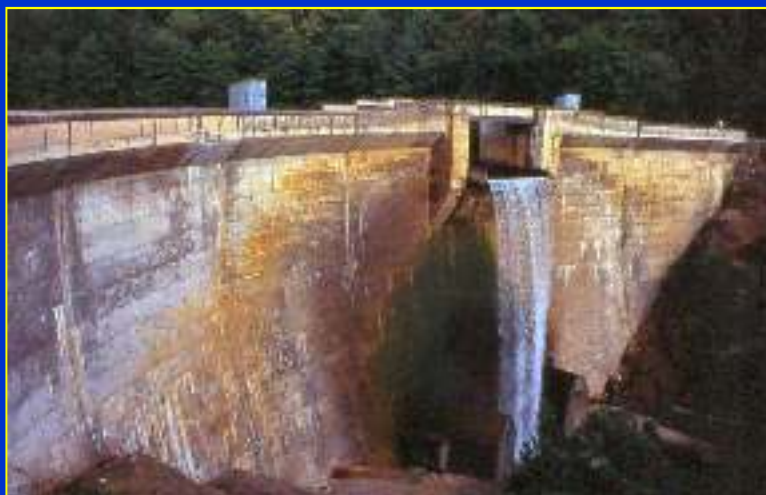
69/122

## FISSURATION DE LA VOÛTE



70/122

## DÉCLAVAGE DE LA VOÛTE



71/122

## BARRAGE DE LA COUZE



72/122



**Barrage des Plats**  
**Ville de Firminy**  
**Contrôle : DDE 42**

**Construction 1958**  
**Eau potable**

73/122



74/122





## PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED



78/122

## PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED



## PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED

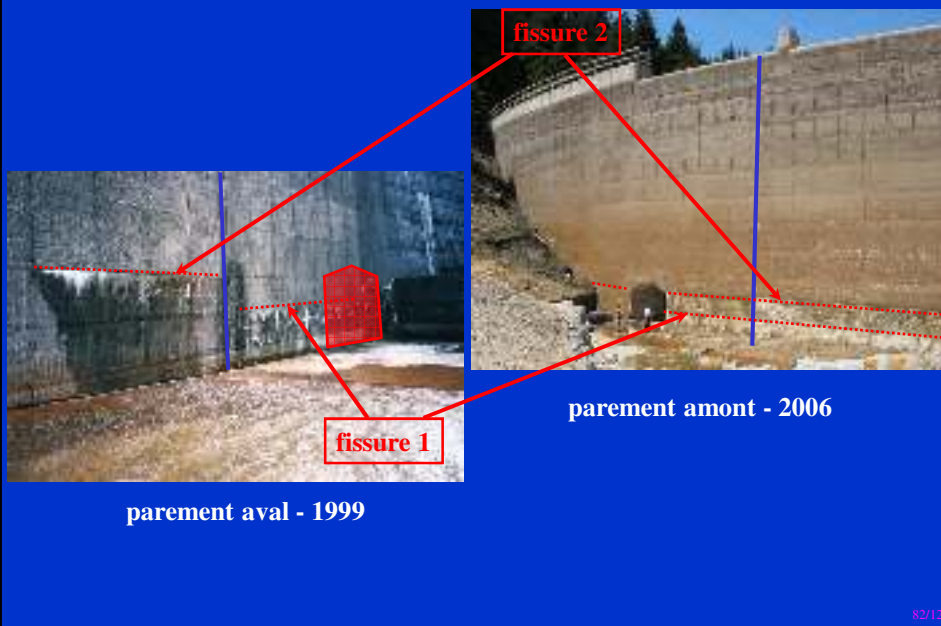




## PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED

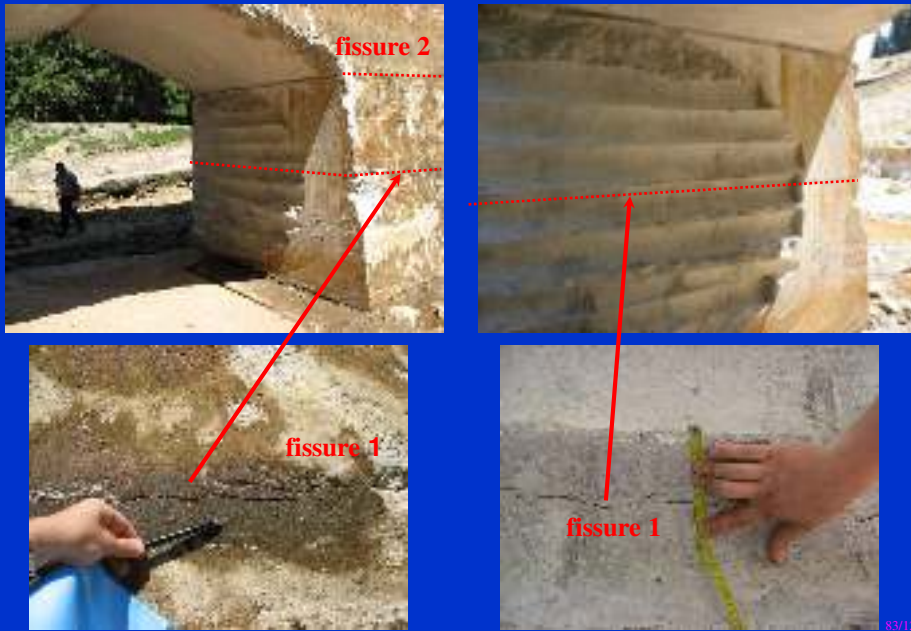


## FISSURATION DU BARRAGE DES PLATS



82/122

## FISSURATION DU BARRAGE DES PLATS



## GONFLEMENT DU BÉTON : BARRAGE DE MAURY

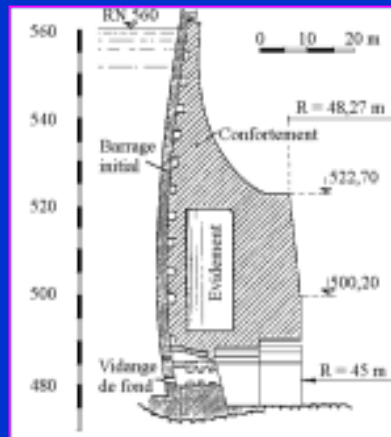
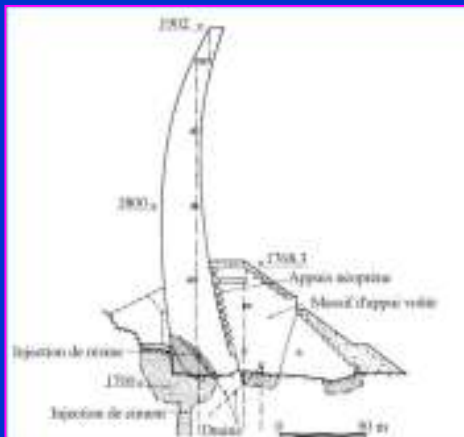


## GONFLEMENT DU BÉTON : BARRAGE DE BIMONT



85/122

## RENFORCEMENT DE LA VOÛTE

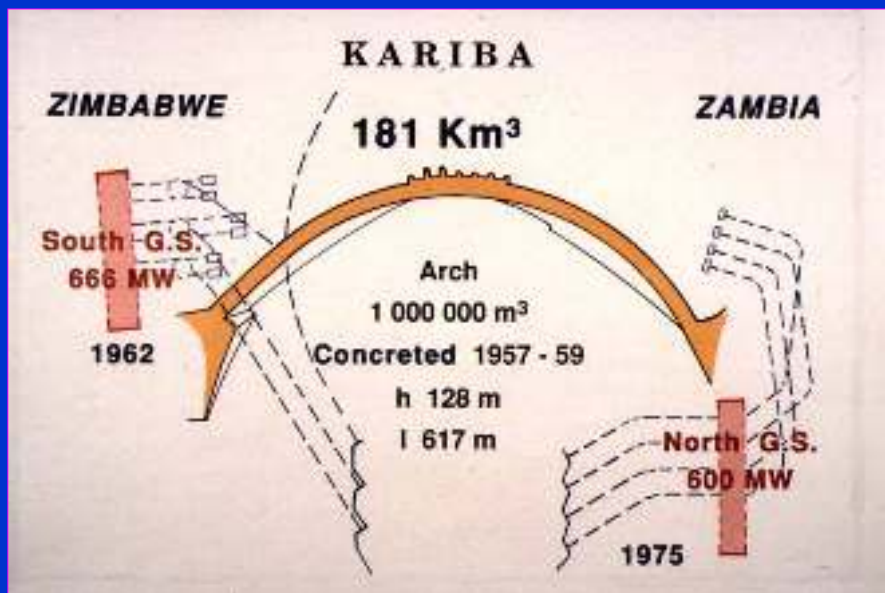


86/122

## BARRAGE DE KARIBA (Zambie-Zimbabwe)



## BARRAGE DE KARIBA



## BARRAGE DE KARIBA (CHANTIER)

Crue de mars  
1958  
16 000 m<sup>3</sup>/s



89/122

## BARRAGE DE KARIBA



11-1958

07-1958

90/122

## BARRAGE DE KARIBA



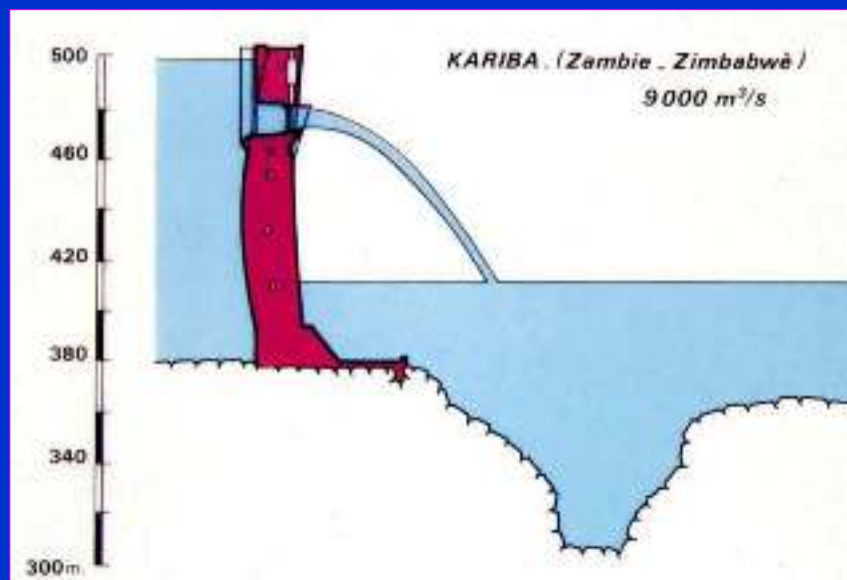
91/122

## BARRAGE DE KARIBA



92/122

## BARRAGE DE KARIBA - Fosse d'érosion aval



93/122

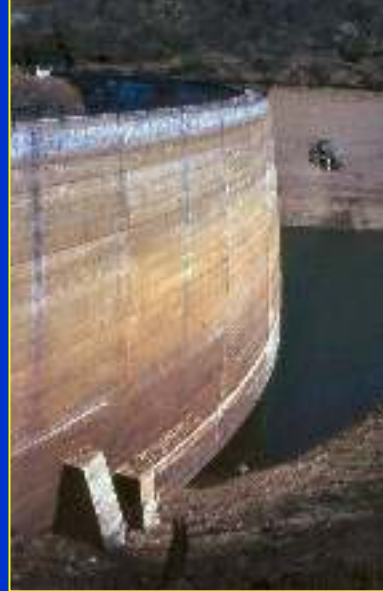
## BARRAGE DE KARIBA - Appui rive droite



culée poids et butons en sous œuvre  
à travers quartzites et gneiss altérés, pour atteindre  
le gneiss sain profond : 65 000 m<sup>3</sup> de béton 1961-62  
avant la fin du remplissage 1963

94/122

## ABANDON : BARRAGE DE PINEY



95/122

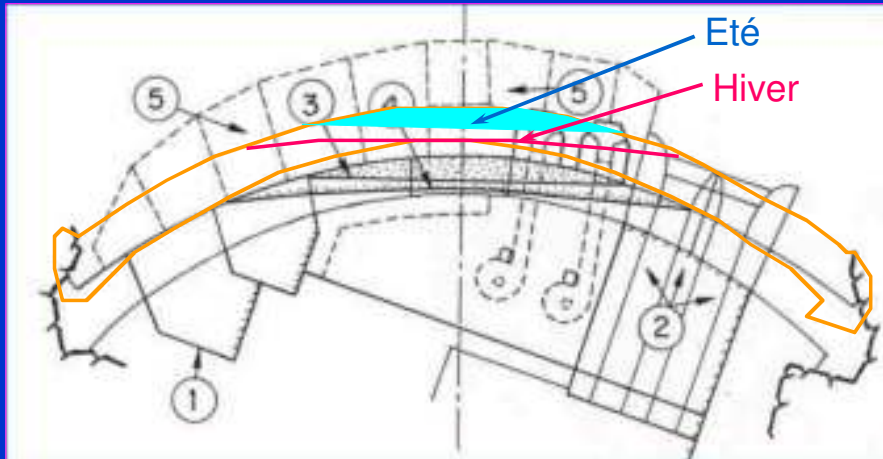
## ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG



95/122

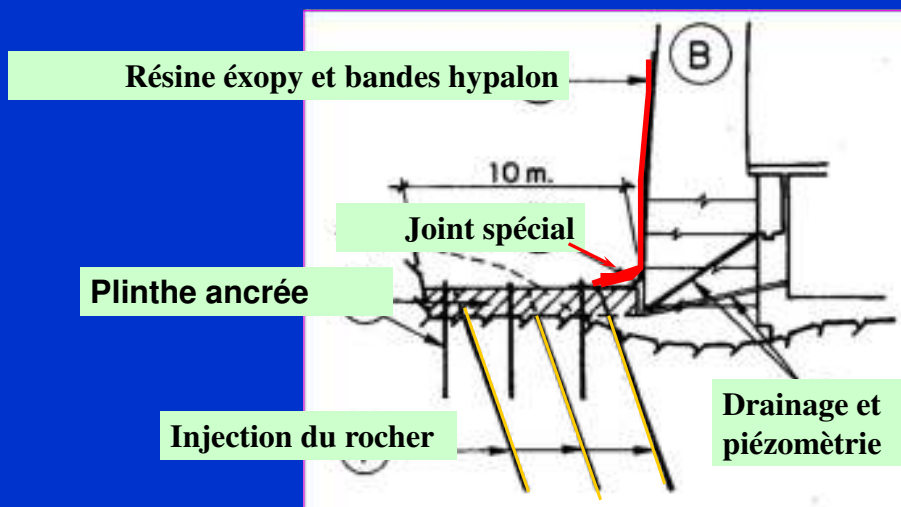


## ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG OUVERTURE DU PIED AMONT



97/122

## ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG



98/122

## ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG

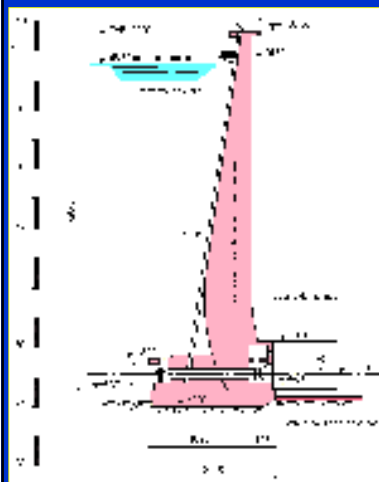


## BARRAGE DE MALPASSET - France 1959

- Propriétaire : Conseil Général du Var
- Implanté dans la vallée du Reyran
- Barrage-voûte
  - hauteur au-dessus de la fondation : 66,5 m,
  - longueur en crête : 222 m à la cote 102,50,
  - voûte à double simple courbure (rayon de référence 105 m),
  - épaisseur : 7 m à la base et 1,5 m en crête
  - volume de béton : 48 000 m<sup>3</sup>

100/122

## BARRAGE DE MALPASSET - France 1959



101/122

## CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

- Volume de la retenue à RN : 50 hm<sup>3</sup>
- Nature du rocher de fondation :
  - en rive droite la fondation est un gneiss massif
  - en fond de vallée et en rive gauche, le rocher présente une tendance schisteuse marquée. Cette dissymétrie entre les deux rives explique la nécessité de construire en haut de la rive gauche une culée massive de 10 m de hauteur complétée par un mur en aile.

102/122

## LES ORGANES HYDRAULIQUES

- Les organes hydrauliques de l'ouvrage comprennent :
  - un conduit de vidange de 1,5 m de diamètre traversant l'ouvrage et dimensionné pour évacuer environ 40 m<sup>3</sup>/s
  - un évacuateur de crue par seuil à surface libre de 40 m de longueur à la cote 100,40
  - une prise d'eau par conduite de 0,9 m de diamètre à la cote 79,50.

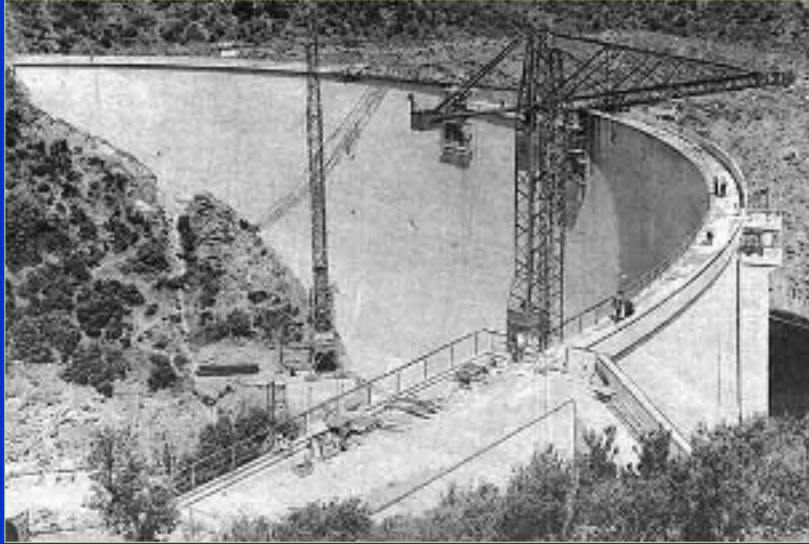
103/122

## LA CONSTRUCTION ET LE REMPLISSAGE

- Le chantier démarre le 1<sup>er</sup> avril 1952
- Les travaux se déroulent sur plus de deux ans pour être achevés en octobre 1954
- Le remplissage commence dès la fin de l'année 1954, mais pendant 4 ans, suite à des retards dans les expropriations et à une succession de sécheresses, la retenue ne dépasse la cote 87
- La cote 95 est atteinte en fin de printemps 1959 soit encore 3,50 m sous le niveau de remplissage normal de la retenue.

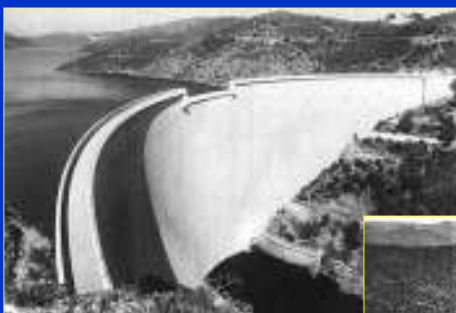
104/122

## BARRAGE DE MALPASSET - France 1959



105/122

## BARRAGE DE MALPASSET - France 1959



02

## BARRAGE DE MALPASSET - France 1959



107/122

## LA FIN DE LA MONTÉE DU PLAN D'EAU

- Fin novembre 1959 et début décembre, des pluies importantes s'abattent sur la région en provoquant une montée rapide du plan d'eau.
- Le soir du 2 décembre, on atteint la cote 100,12 soit 28 cm sous le déversoir de l'évacuateur.
- La vanne de vidange, qui aurait dû, pour la gestion des crues, être ouverte à la cote de retenue 99,5 (donc la veille), n'a été ouverte qu'en fin d'après-midi le 2 décembre.

108/122

## LA RUPTURE DU BARRAGE

- La rupture brutale a eu lieu le 2 décembre 1959 un peu après 21 h
- Le gardien habitant à proximité entend deux « explosions » avant de constater que l'ouvrage a disparu

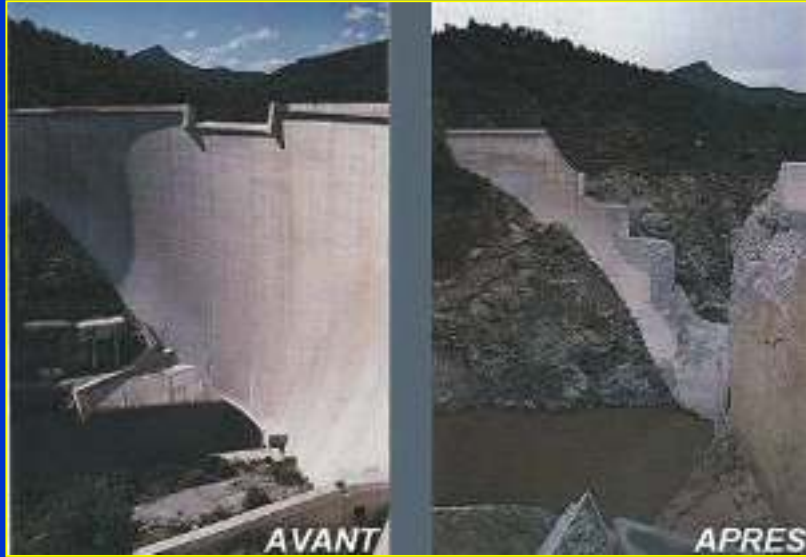
109/122

## LA RUPTURE DU BARRAGE

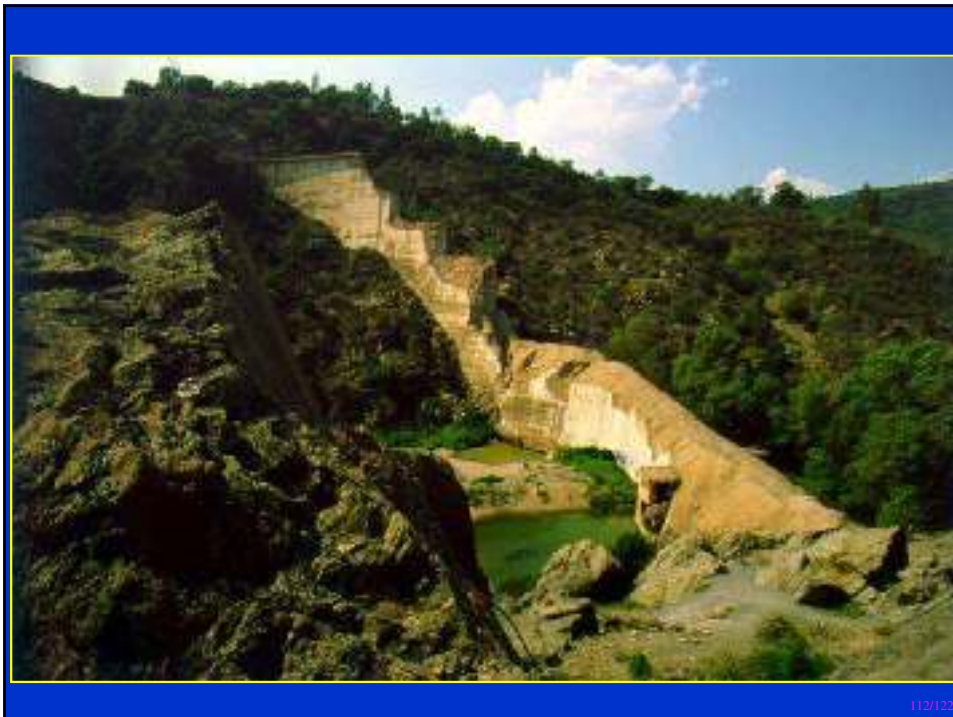
- De la moitié gauche du barrage, il ne subsiste que la culée en haute de la rive.
- Un volume considérable de fondation a été soulevé en entraînant avec lui le barrage situé au-dessus. La voûte s'est totalement ouverte en rive gauche puis s'est cassée en rive droite, ne laissant en place que la partie centrale basse et les plots en extrémité rive droite.

110/122

## BARRAGE DE MALPASSET



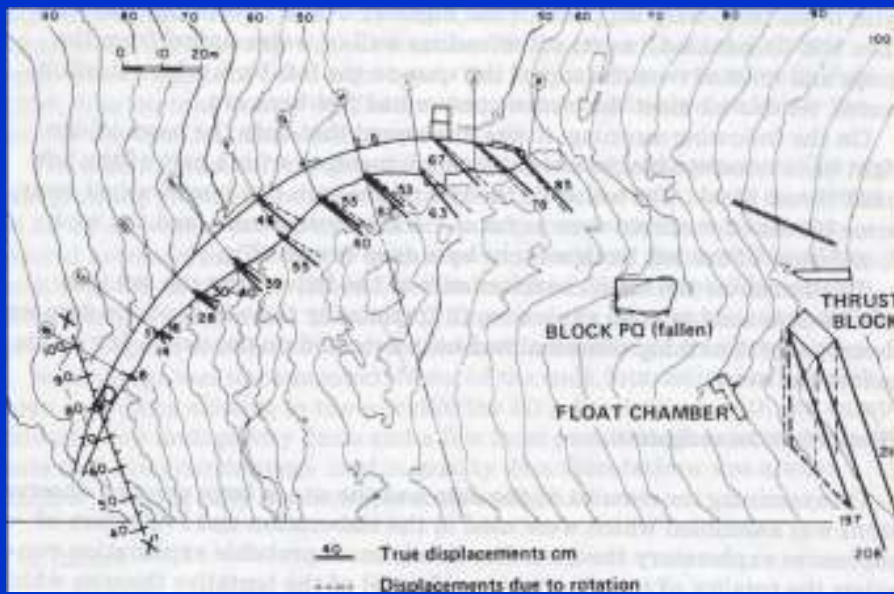
111/122







## MALPASSET - VECTEURS DÉPLACEMENTS



114/122

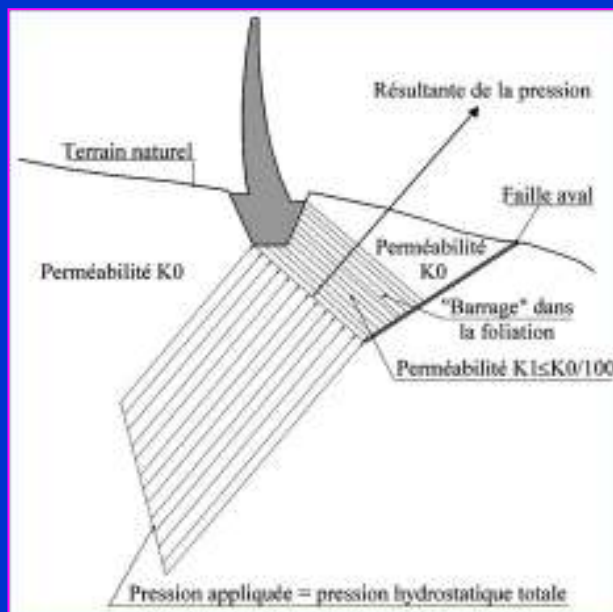


## LES CONSÉQUENCES DE LA RUPTURE

- Une lame d'eau de 50 hm<sup>3</sup> s'engouffre dans la vallée du Reyran, dévastant tout sur son passage.
- Fréjus est submergée en quelques minutes par une vague d'eau et de boue 21 mn plus tard. La lame d'eau fait encore 3 m lorsqu'elle rejoint la côte.
- La rupture a causé 423 morts et 7000 sinistrés. Elle a détruit totalement 155 immeubles et maisons et endommagé 800 autres.
- Les dégâts seront, en 1970, chiffrés à plus de 100 millions de francs.

116/122

## CAUSES DE LA RUPTURE DE MALPASSET



117/122

## LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS (1/3)

- Naissance de la mécanique des roches avec, en particulier, le développement de la méthode de stabilité des dièdres rocheux et la prise en compte de l'influence des contraintes sur la perméabilité.
- Importance des conditions de fondation et nécessité absolue de mener des investigations très détaillées et attentives sur les caractéristiques des terrains d'appui.

118/122

## LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS (2/3)

- Drainage du pied aval des voûtes, de façon à libérer les éventuelles sous-pressions présentes dans le rocher devint la règle quasi systématique.
- Auscultation des barrages améliorée, renforcée notamment pendant la phase de première mise en eau des barrages. Les conditions de mise en eau sont affinées avec des phases organisées de paliers permettant d'observer le comportement réel du barrage au fur et à mesure de la montée du niveau de la retenue.

119/122

## AUSCULTATION = SURVEILLANCE IMMEDIATE



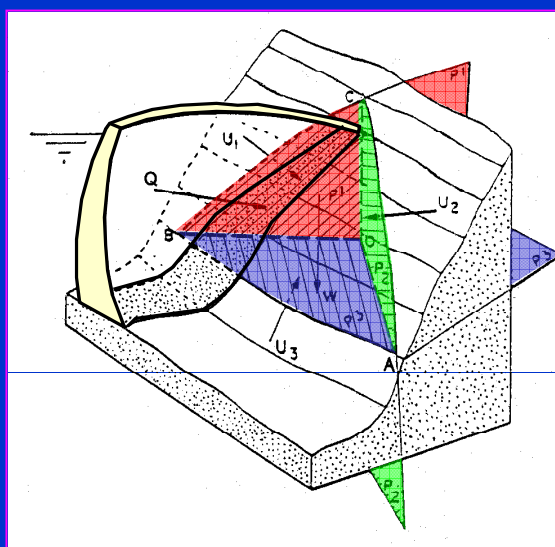
120/122

### LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS (3/3)

- Mise en place en 1967 du Comité Technique Permanent des Barrages.
- Adoption le 14/08/1970 d'une circulaire réglementant la sécurité des barrages intéressant la sécurité publique (rénovée et étendue par le décret du 11/12/2007).
- Les plus grands barrages (plus de 20 m de hauteur et de plus de 15 millions de mètres cube de capacité) font l'objet d'un Plan Particulier d'Intervention.

121/122

### VÉRIFICATION DES COINS DE LONDE



122/122