

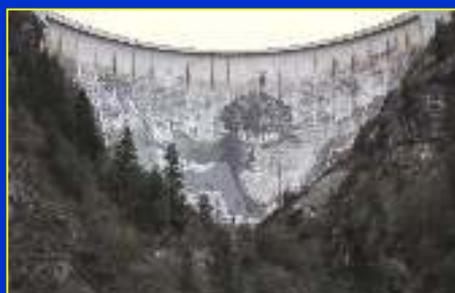
LES BARRAGES-VOÛTES



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



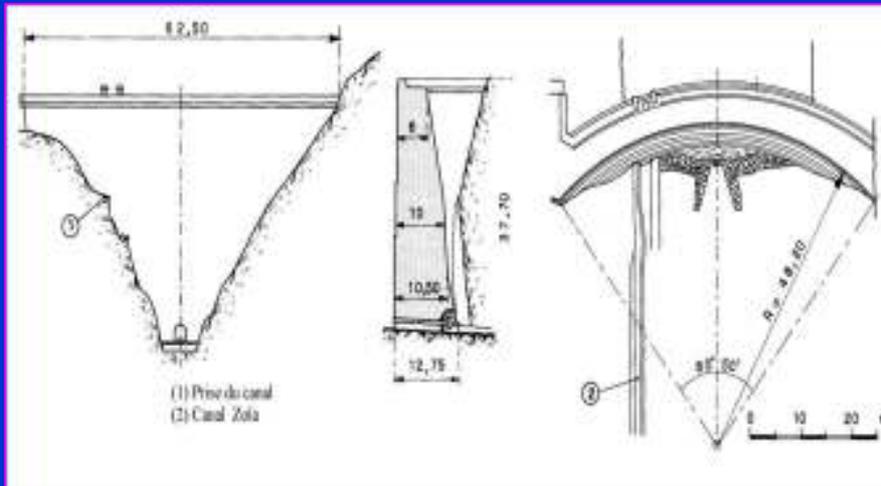
3/122

BARRAGE DE GLANUM (St Rémy de Provence)



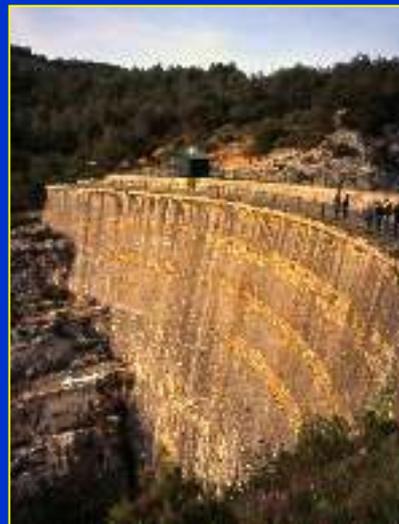
4/122

BARRAGE ZOLA (1854)



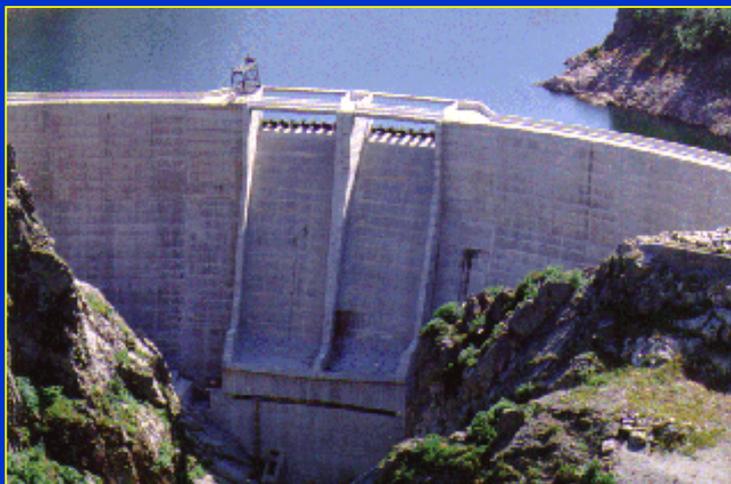
5/122

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

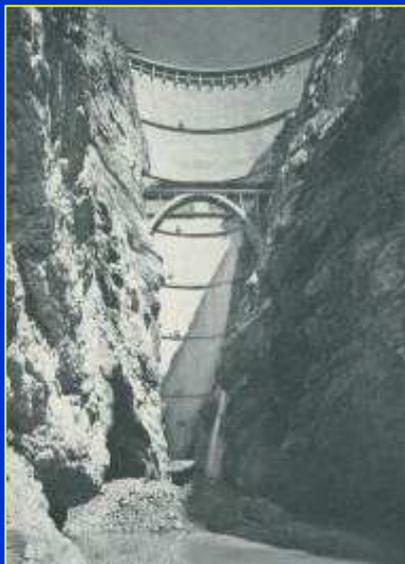
8/122

BARRAGE DE SWEETWATER (USA)



9/122

BARRAGE DE VAJONT (ITALIE)



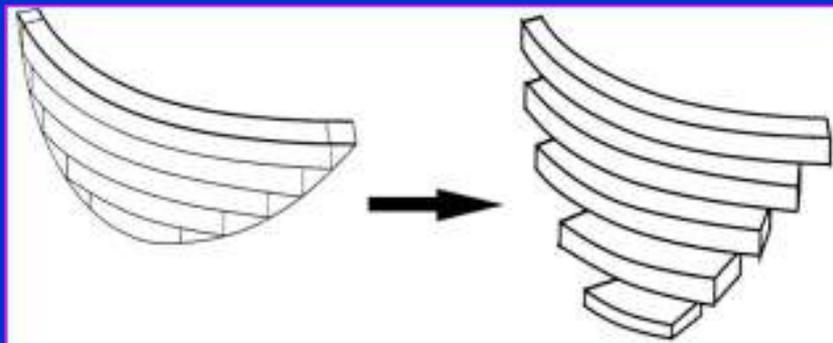
10/122

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

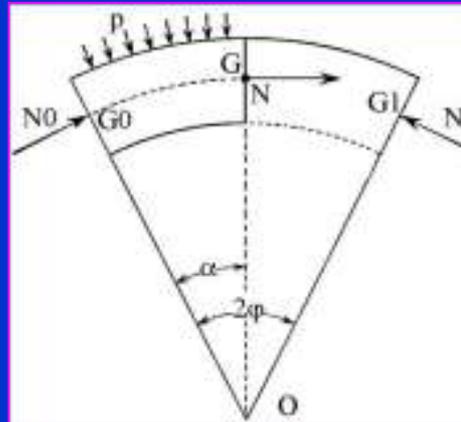


12/122

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



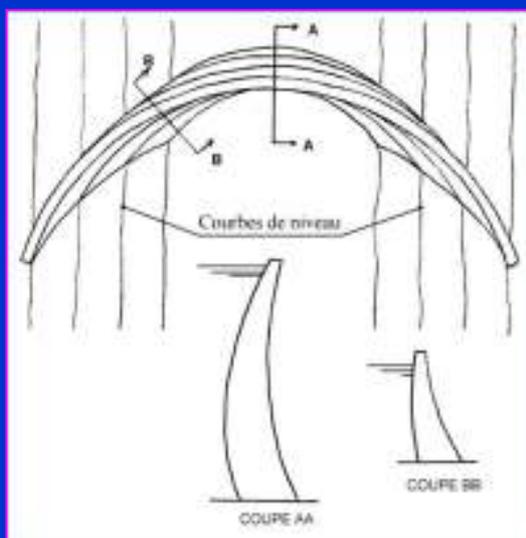
15/122

BARRAGE DU GAGE



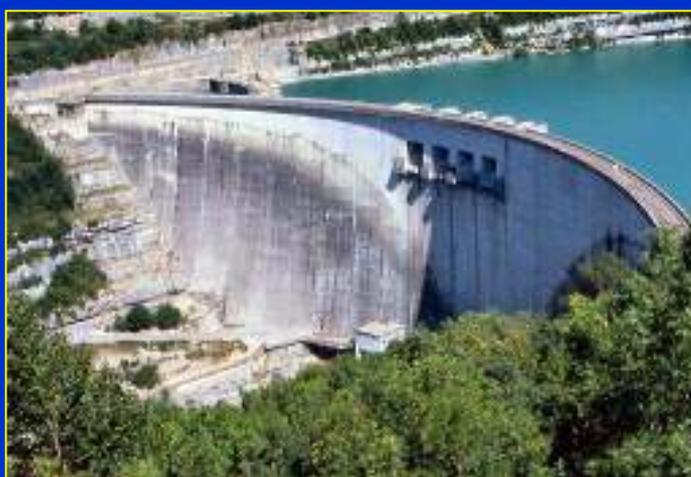
16/122

VOÛTES NON CYLINDRIQUES



17/122

BARRAGE DE VOUGLANS



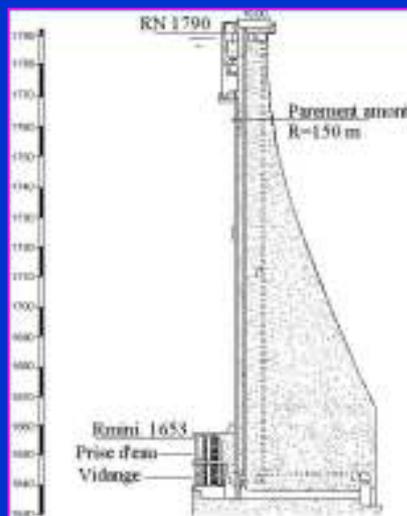
18/122

BARRAGE 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

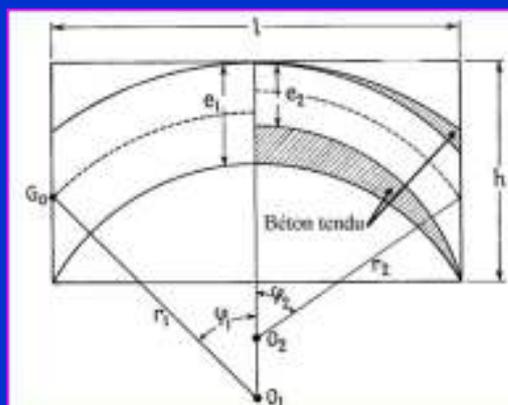
FORMULES DE VOGT (modifiées MLADYENOVITCH)



26/122

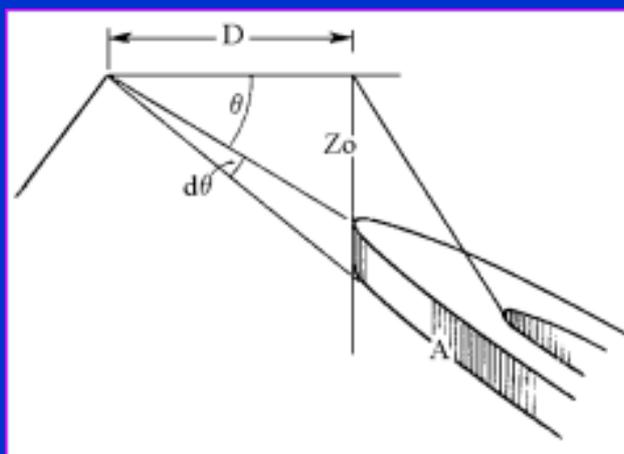
NOTION DE VOÛTE ACTIVE

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



27/122

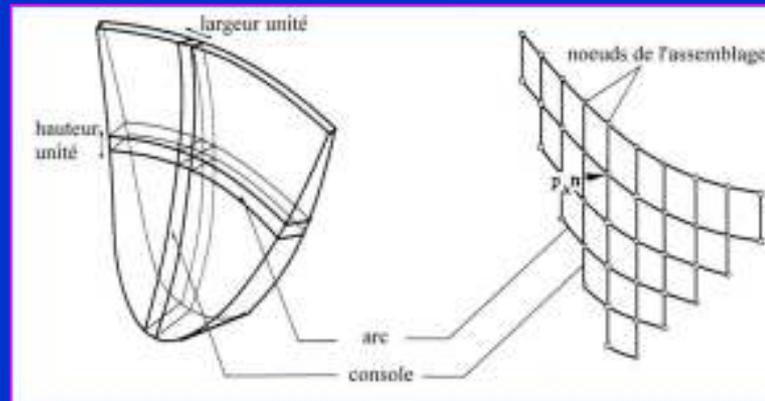
CALCULS PAR ARCS PLONGEANTS



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



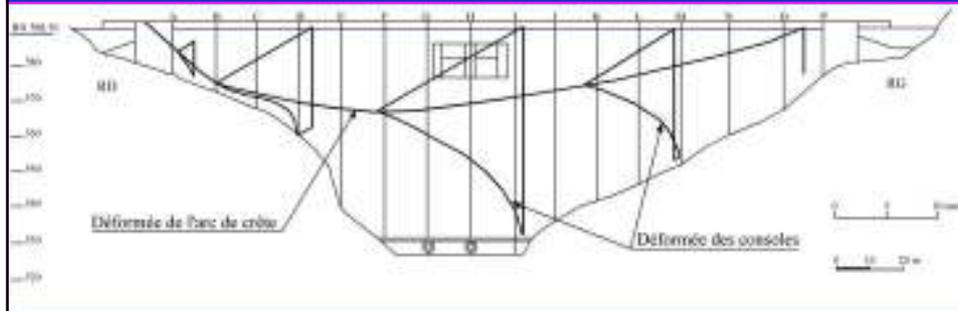
29/122

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

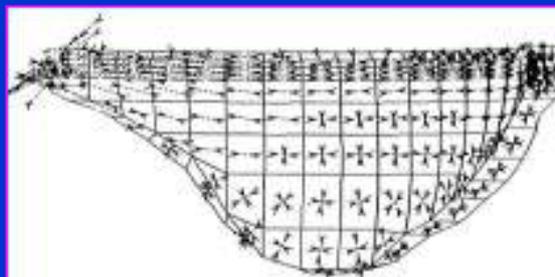
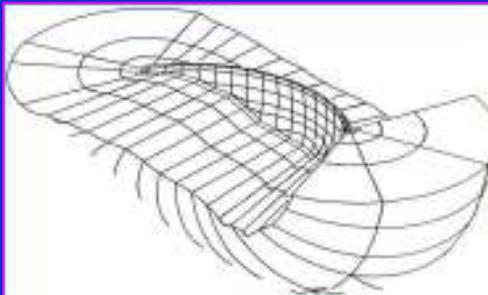
30/122

DÉFORMATIONS ARCS-CONSOLES



31/122

CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS



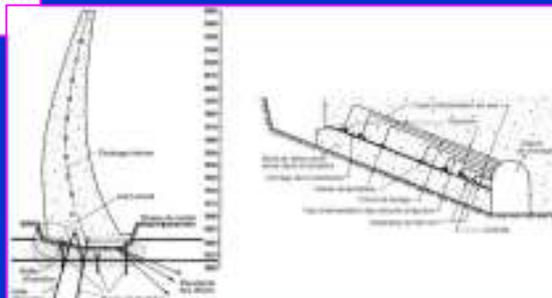
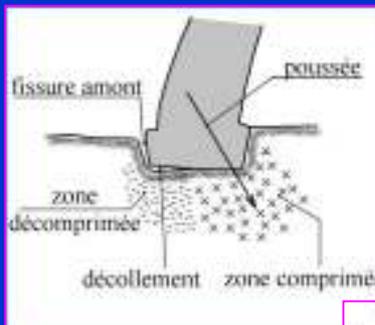
32/122

BARRAGE DE LANOUX



33/122

FISSURATION DE PIED AMONT



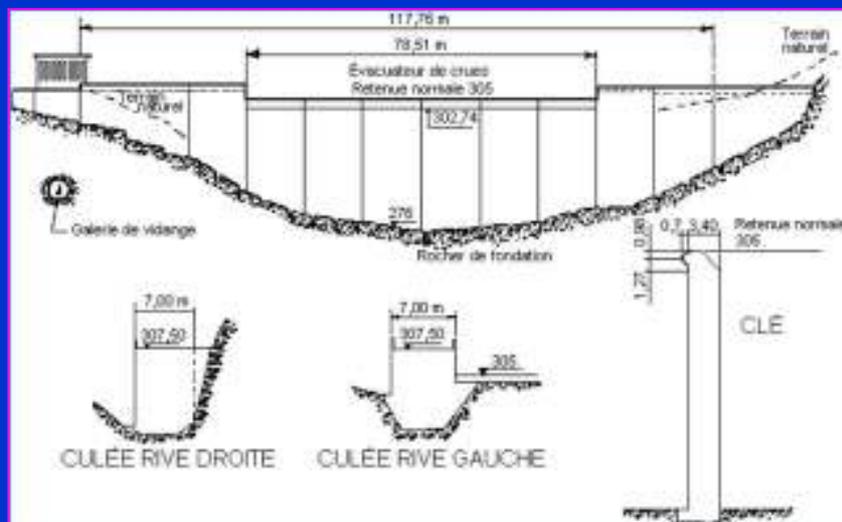
122

BARRAGE DE LAPARAN



35/122

MORPHOLOGIE : VOÛTE CYLINDRIQUE D'ÉPAISSEUR CONSTANTE



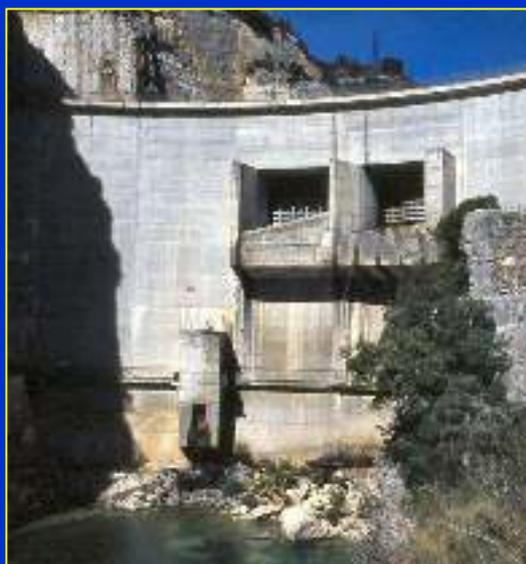
36/122

BARRAGE DE CHORANCHE



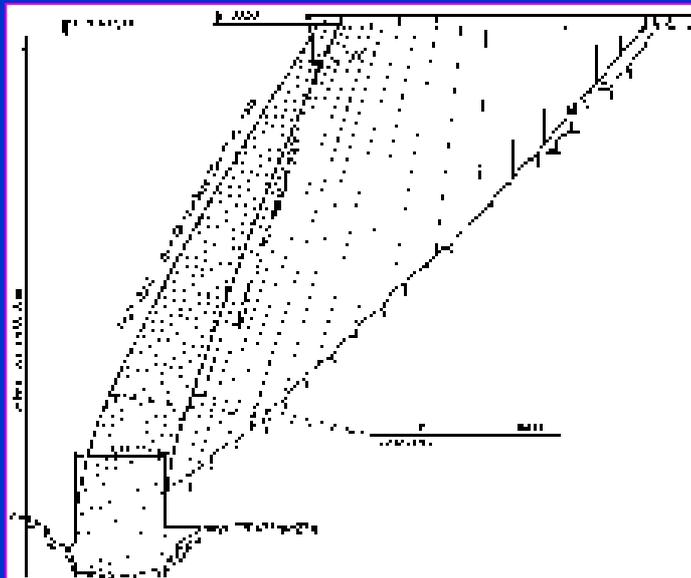
37/122

BARRAGE DE QUINSON



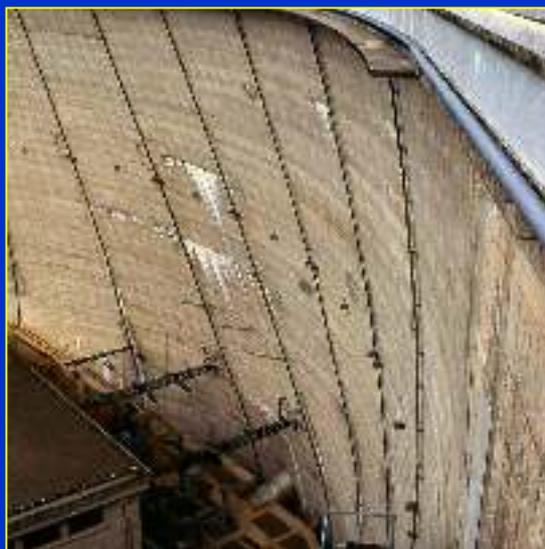
38/122

MORPHOLOGIE : VOÛTES INCLINÉES



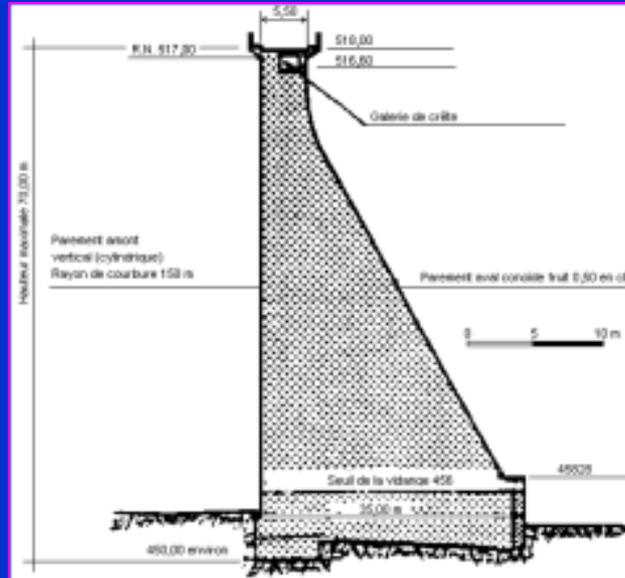
39/122

BARRAGE D'ENCHANET



40/122

MORPHOLOGIE : VOÛTES ÉPAISSES



41/122

BARRAGE DE L'AIGLE



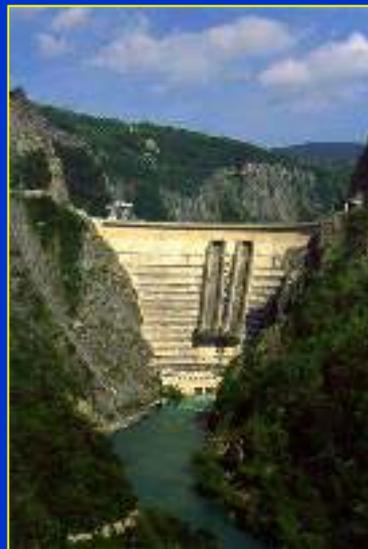
42/122

BARRAGE DE BORT LES ORGUES



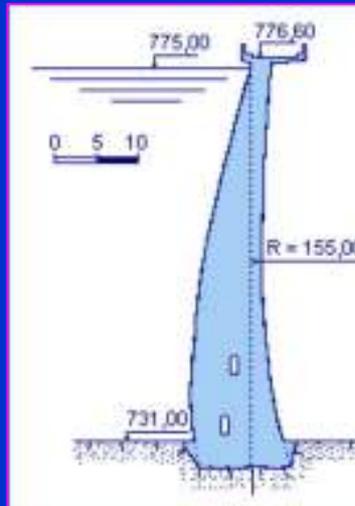
43/122

BARRAGE DE MONTEYNARD



44/122

VOÛTES MINCES A COURBURE SIMPLE OU DOUBLE



45/122

BARRAGE DE SAINT GUÉRIN



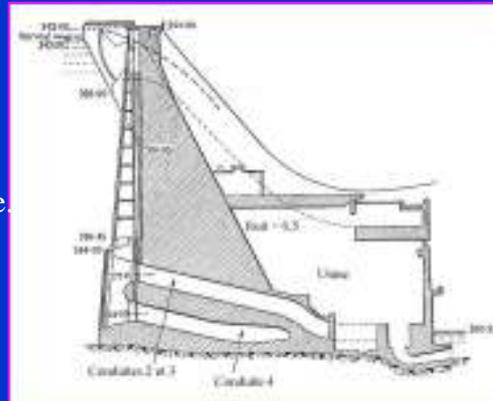
46/122

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

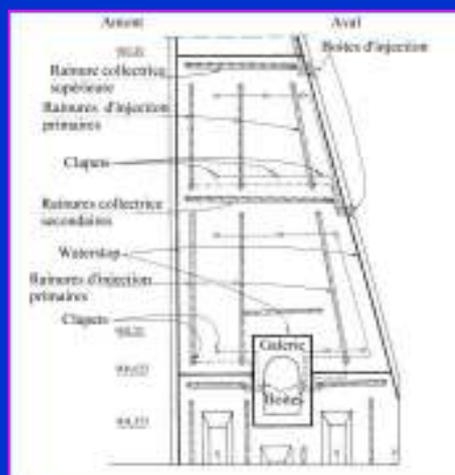
DÉCOUPAGE EN PLOTS



49/122

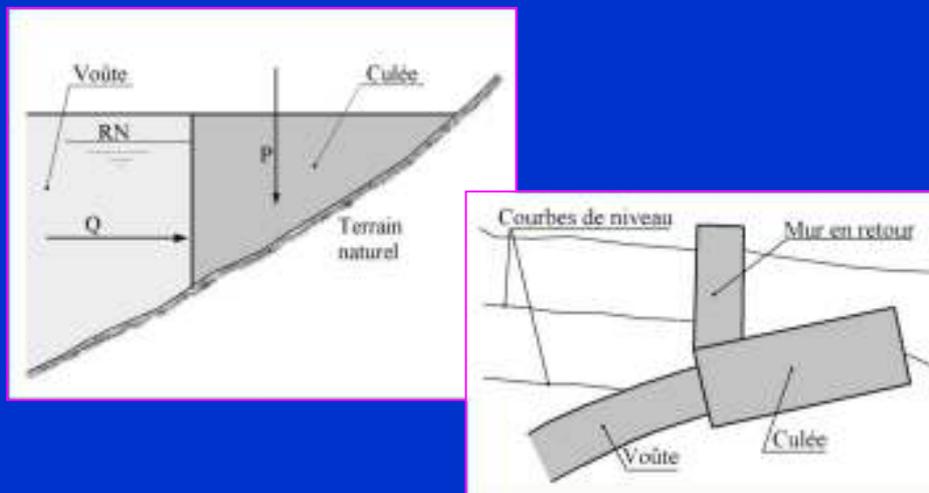
CLAVAGE DES JOINTS

- 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

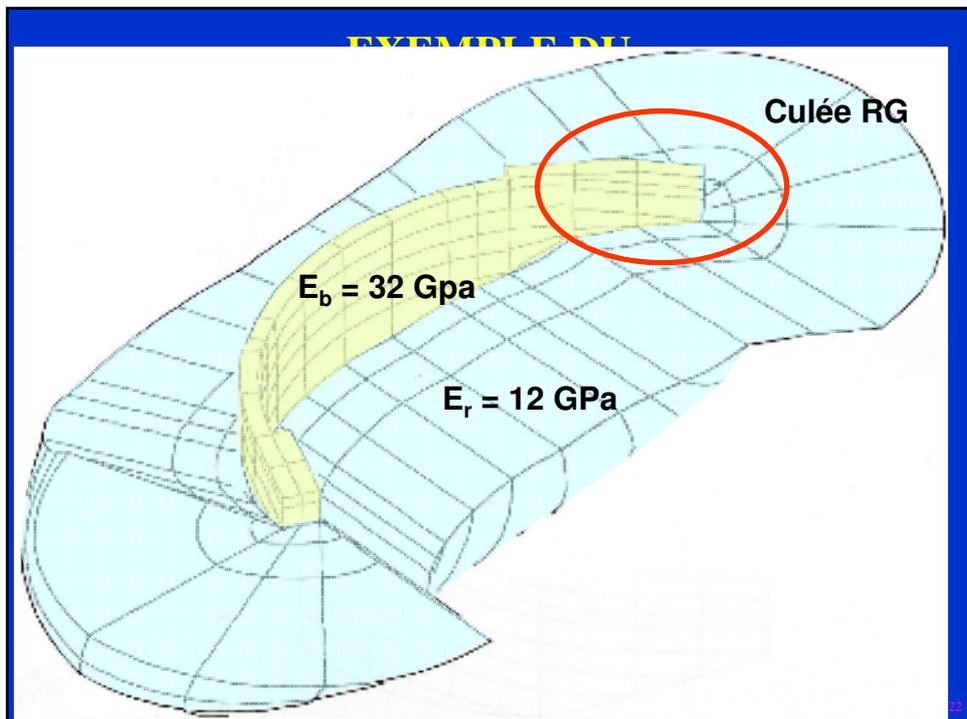


Barrage de Choranche

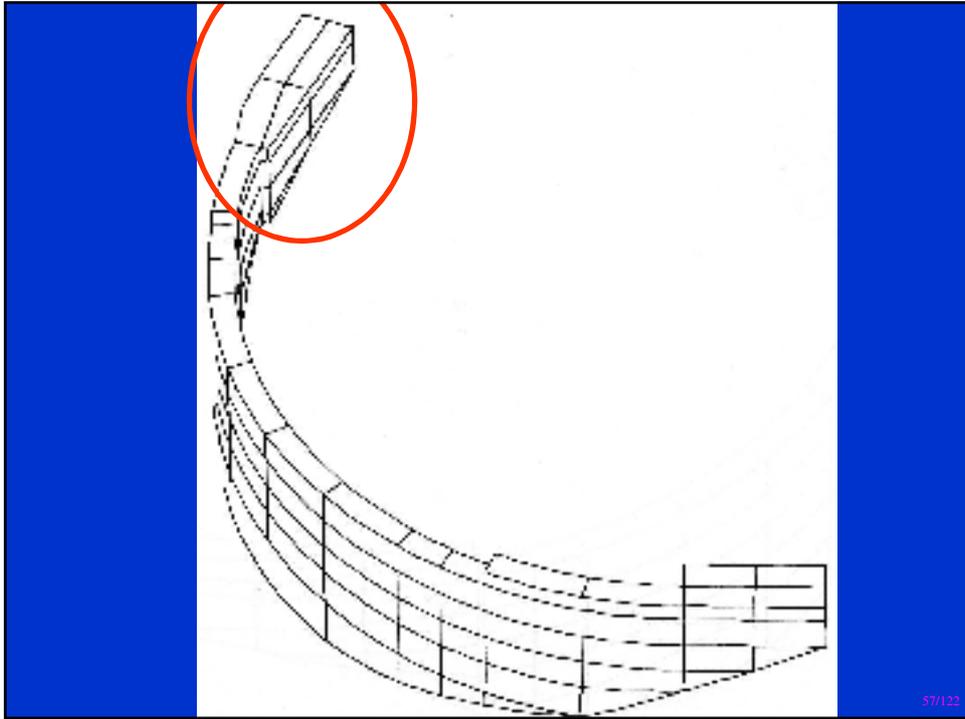
54/122



55/122



22



57/122

CULÉE DU BARRAGE DE MAURY



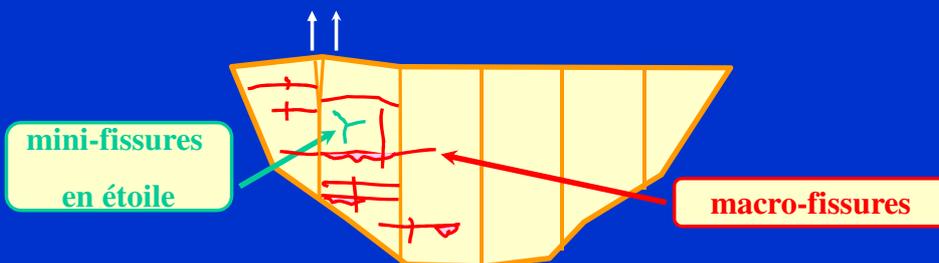
58/122

BARRAGE DE MAURY GONFLEMENT DU BÉTON

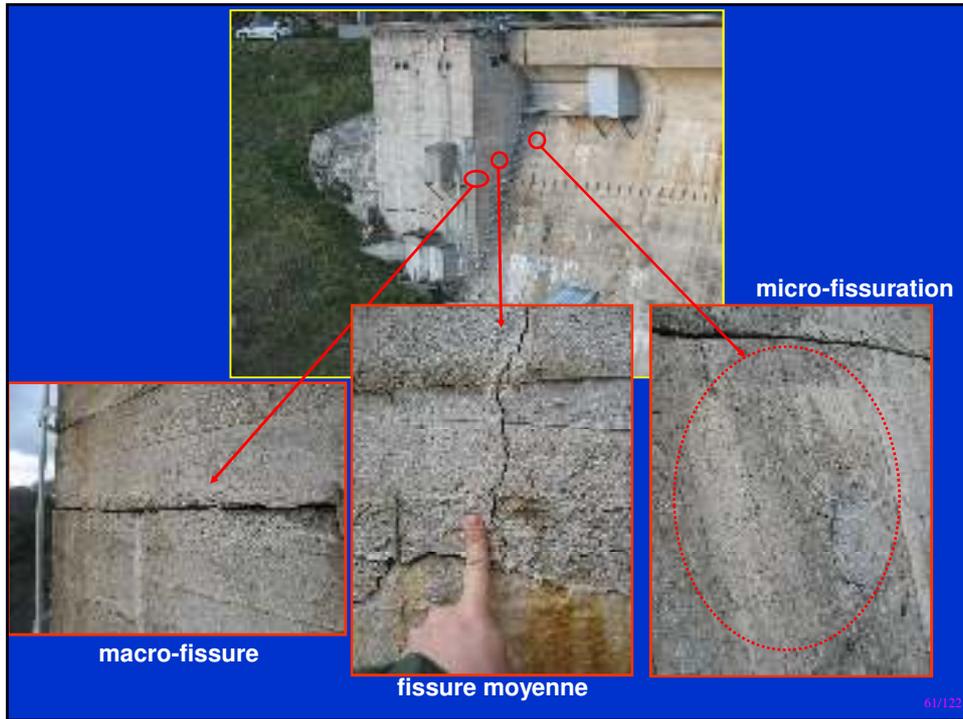


59/122

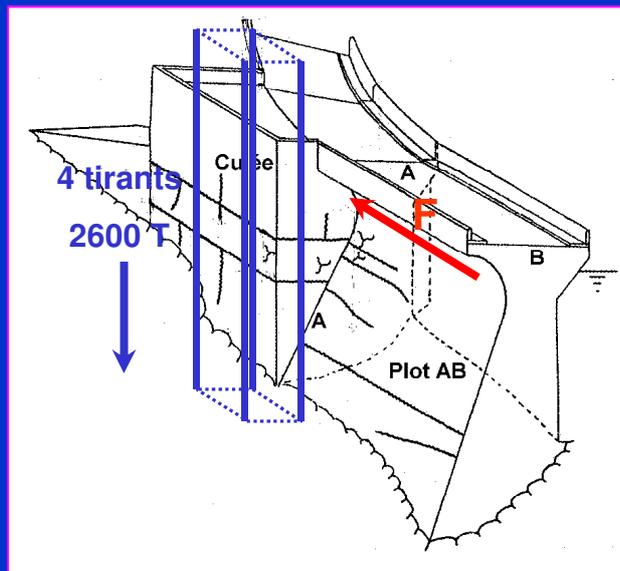
BARRAGE DE MAURY GONFLEMENT DU BÉTON



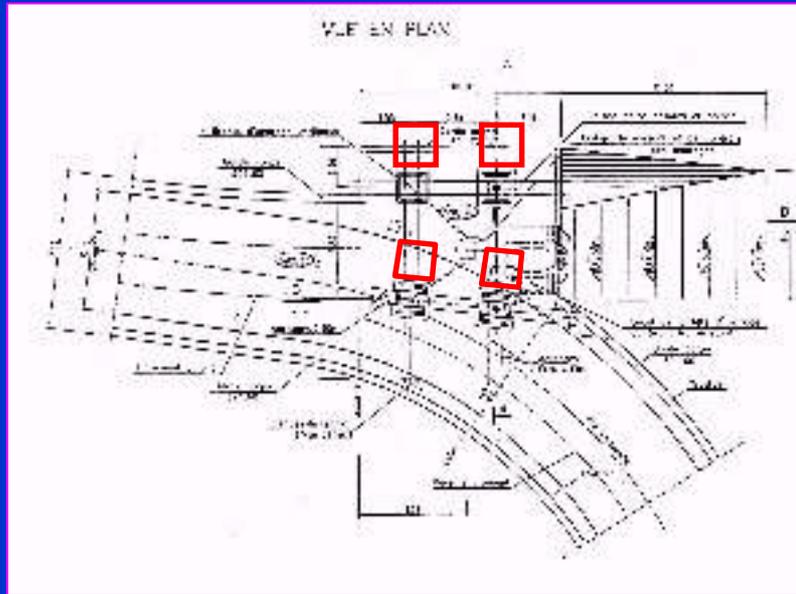
60/122



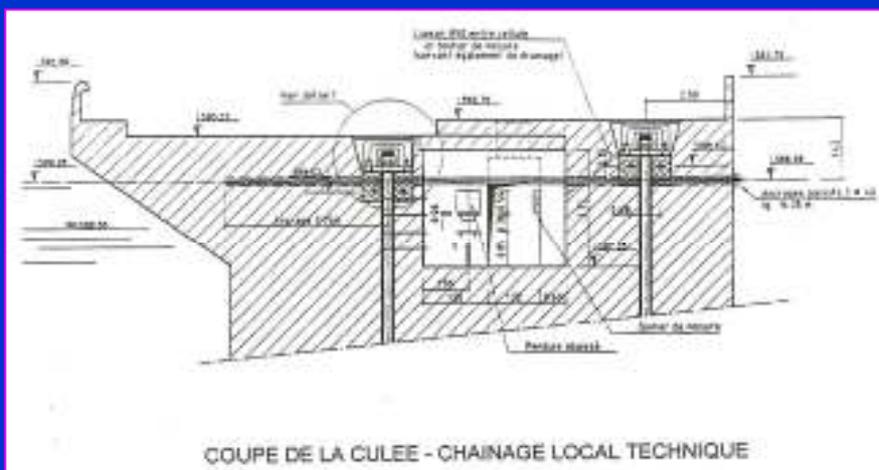
BARRAGE DE MAURY RENFORCEMENT PAR TIRANTS



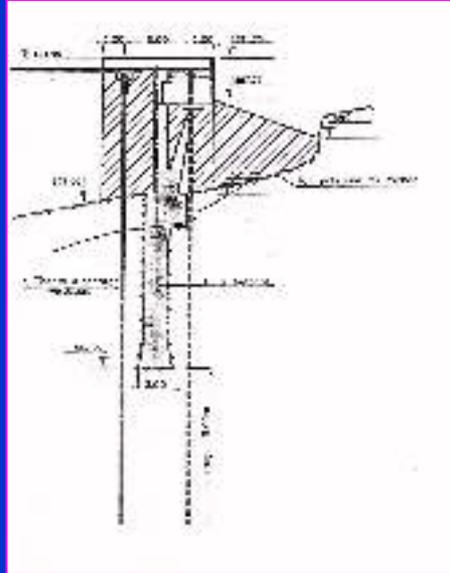
BARRAGE DE MAURY RENFORCEMENT PAR TIRANTS



BARRAGE DE MAURY RENFORCEMENT PAR TIRANTS

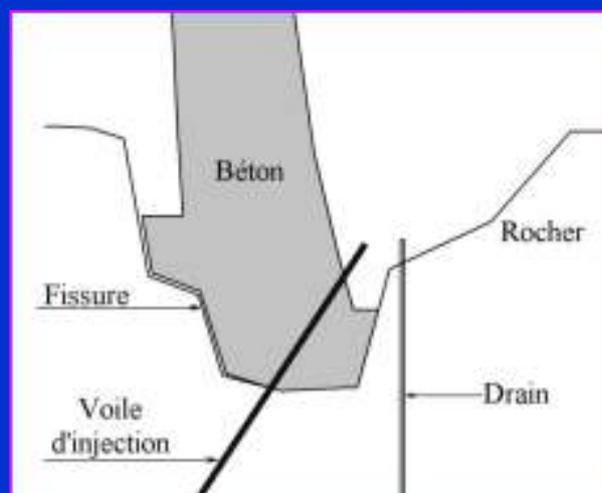


BARRAGE DE MAURY RENFORCEMENT PAR TIRANTS



65/122

INJECTION ET DRAINAGE DE LA FONDATION



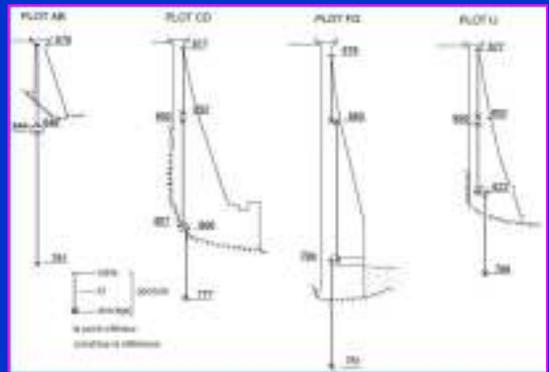
66/122

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

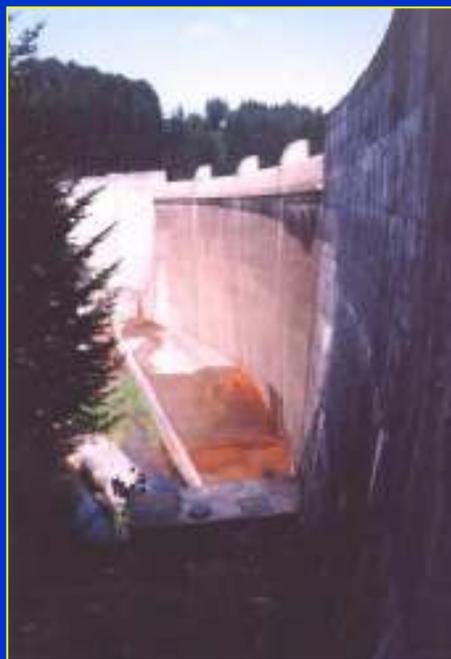


71/122

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



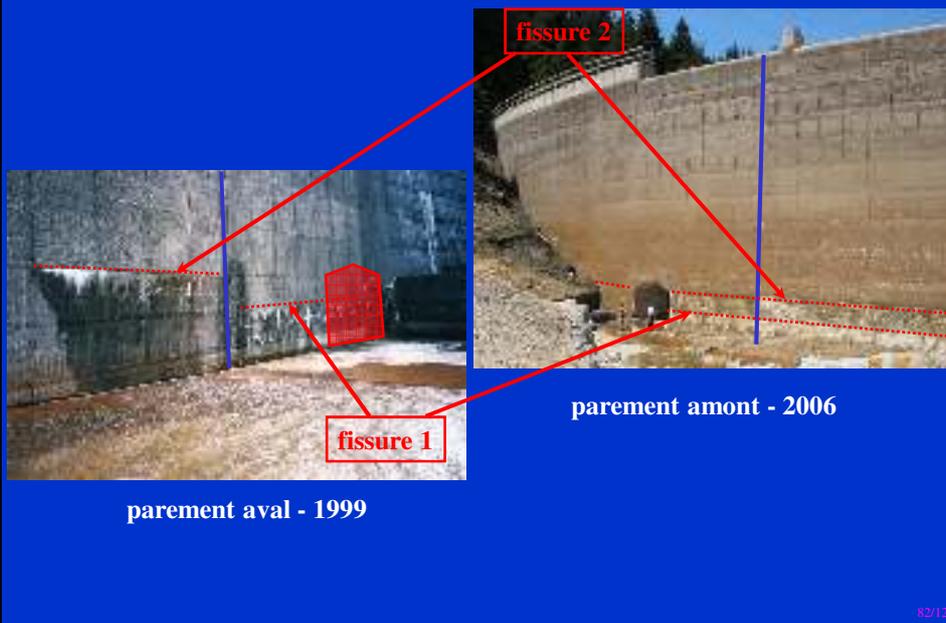
PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED



PERCEMENT DE LA VOÛTE EN PIED

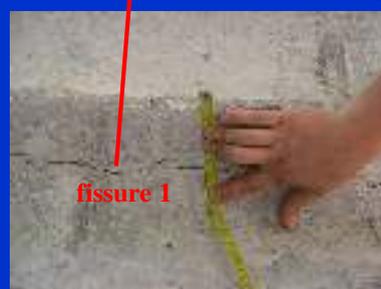


FISSURATION DU BARRAGE DES PLATS



82/122

FISSURATION DU BARRAGE DES PLATS



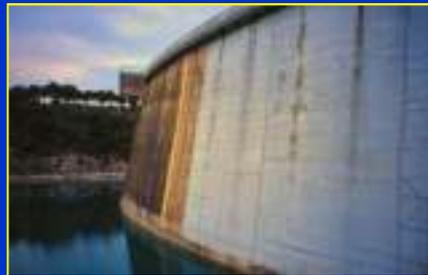
83/122

GONFLEMENT DU BÉTON : BARRAGE DE MAURY



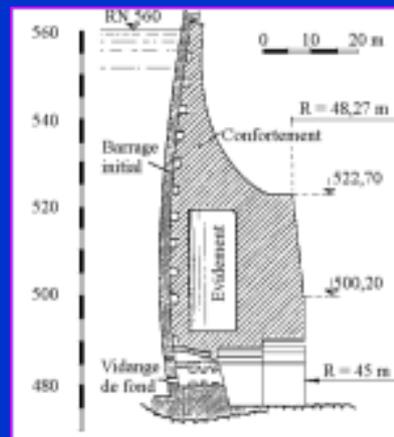
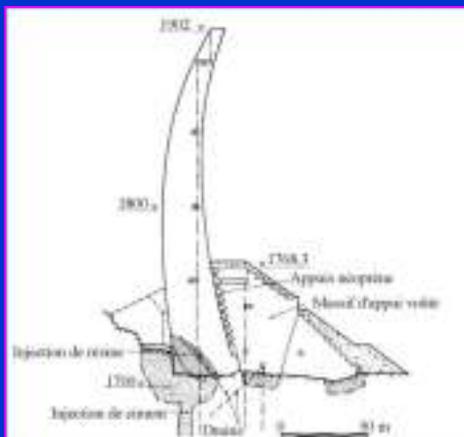
84/122

GONFLEMENT DU BÉTON : BARRAGE DE BIMONT



85/122

RENFORCEMENT DE LA VOÛTE



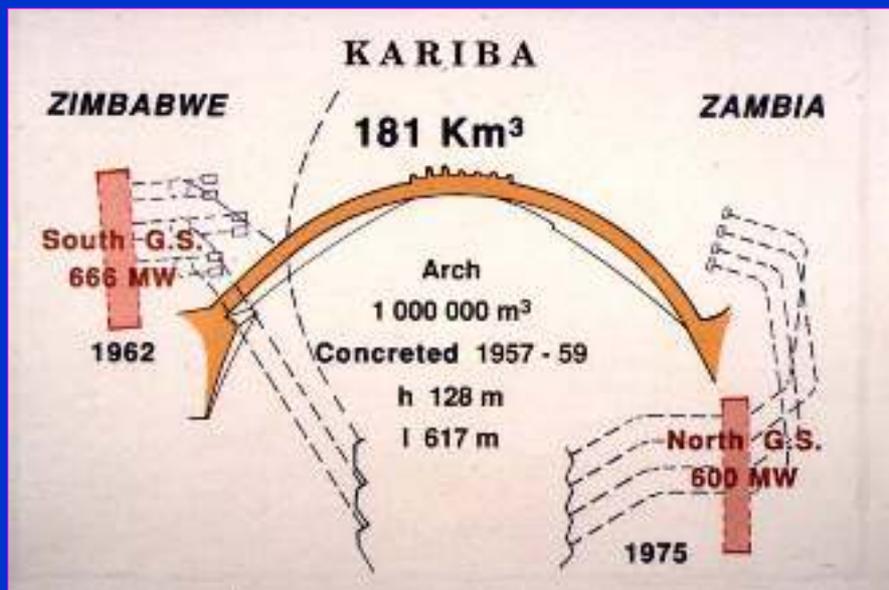
86/122

BARRAGE DE KARIBA (Zambie-Zimbabwe)



57/122

BARRAGE DE KARIBA



88/122

BARRAGE DE KARIBA (CHANTIER)

Crue de mars
1958
16 000 m³/s



89/122

BARRAGE DE KARIBA



11-1958

07-1958

90/122

BARRAGE DE KARIBA



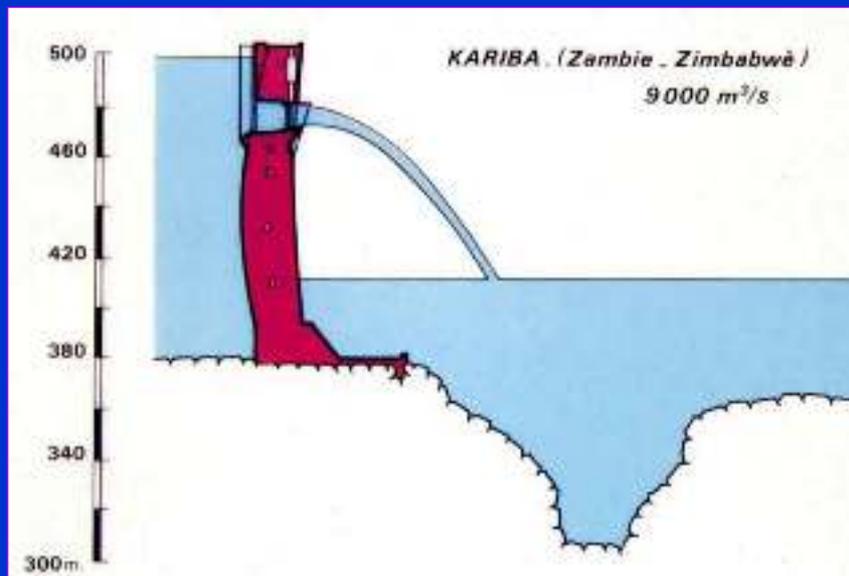
91/122

BARRAGE DE KARIBA



92/122

BARRAGE DE KARIBA - Fosse d'érosion aval



93/122

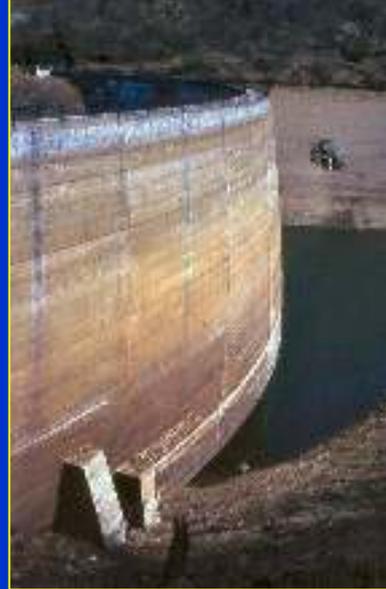
BARRAGE DE KARIBA - Appui rive droite



culée poids et butons en sous œuvre
à travers quartzites et gneiss altérés, pour atteindre
le gneiss sain profond : 65 000 m³ de béton 1961-62
avant la fin du remplissage 1963

94/122

ABANDON : BARRAGE DE PINEY



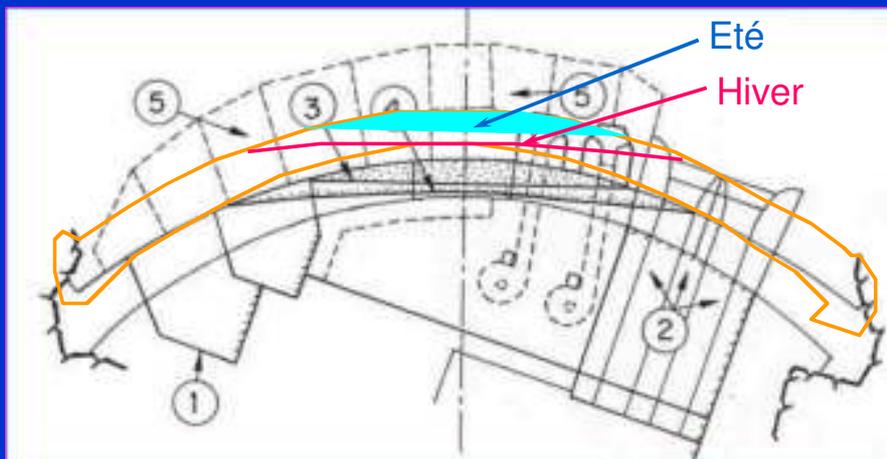
95/122

ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG



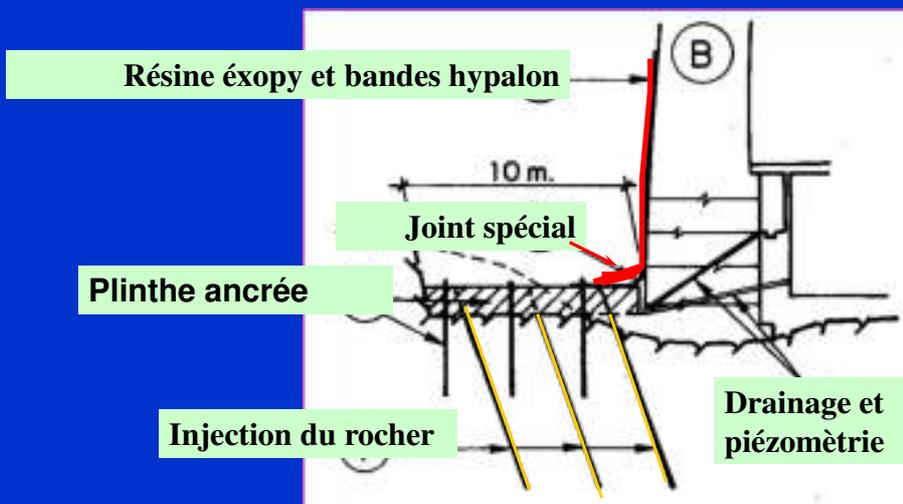
95/122

ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG OUVERTURE DU PIED AMONT



97/122

ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG



98/122

ESCH SUR SÛRE - LUXEMBOURG

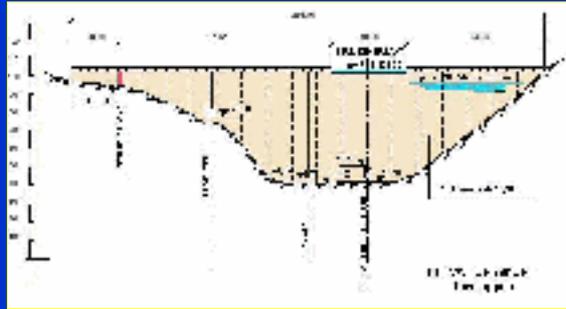
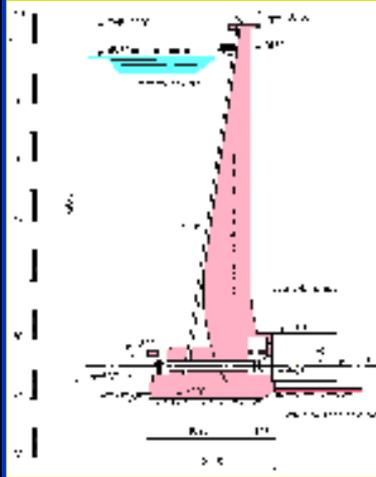


BARRAGE DE MALPASSET - France 1959

- 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 m³

100/122

BARRAGE DE MALPASSET - France 1959



101/122

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

- Volume de la retenue à RN : 50 hm³
- 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 m³/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.

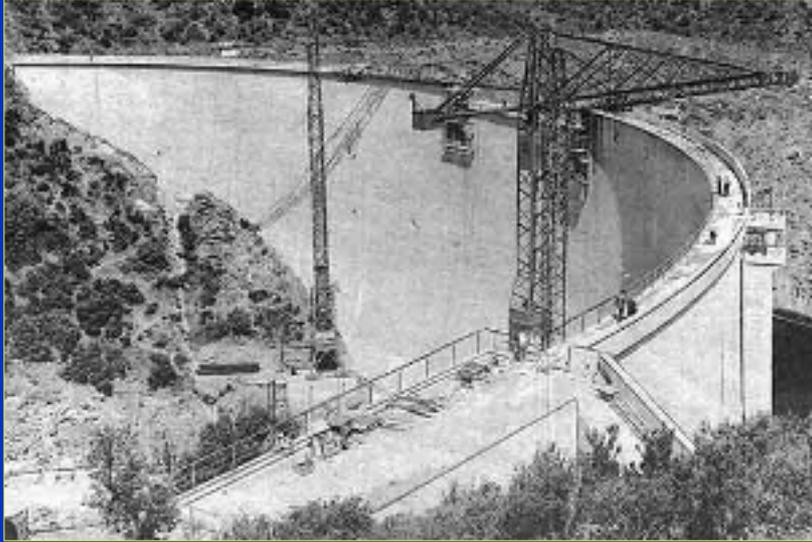
103/122

LA CONSTRUCTION ET LE REMPLISSAGE

- Le chantier démarre le 1^{er} 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.

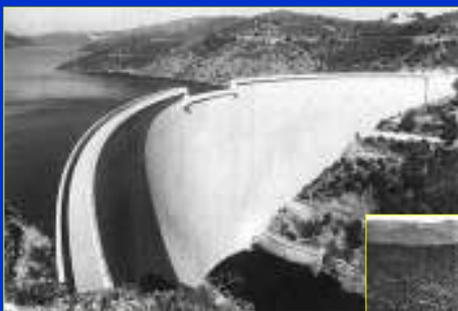
104/122

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

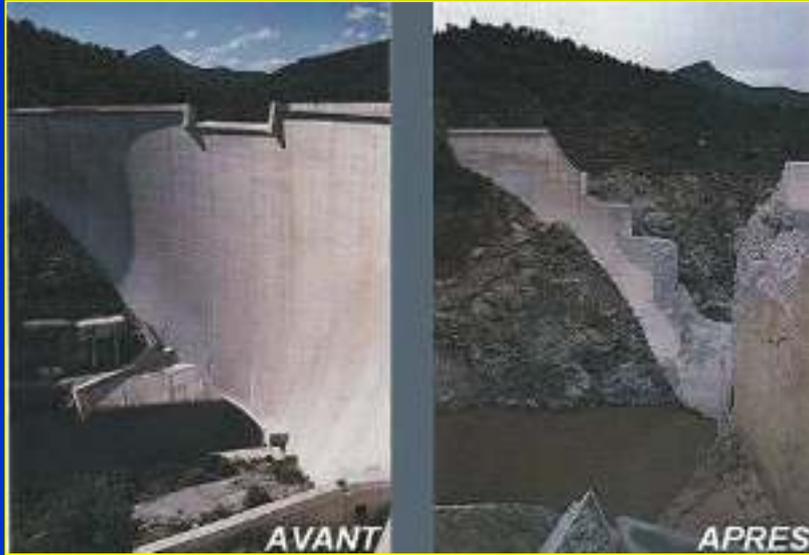
109/122

LA RUPTURE DU BARRAGE

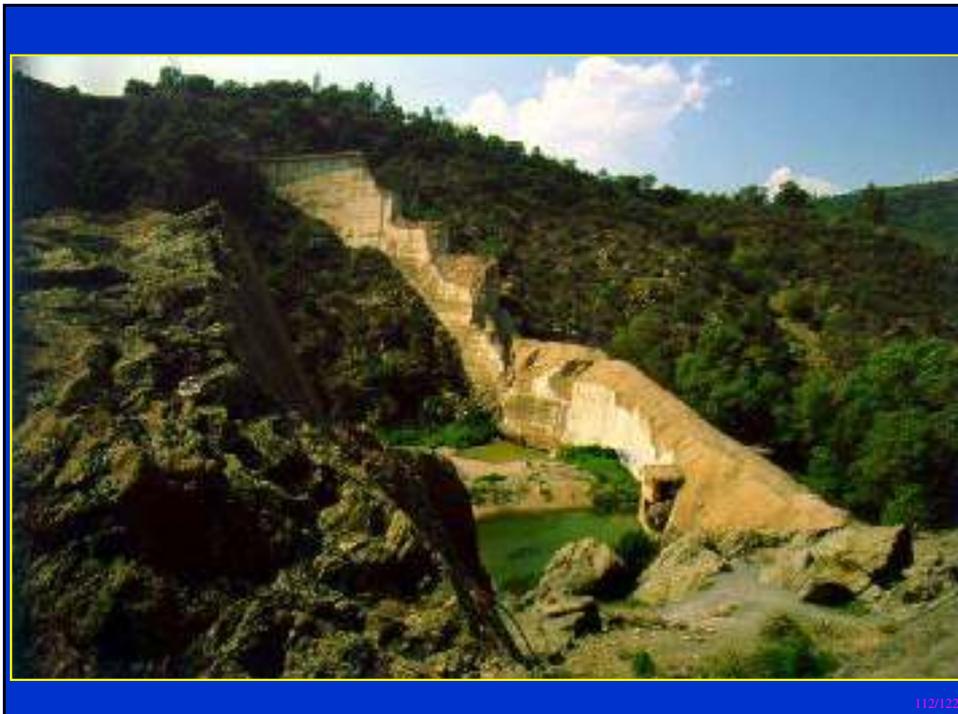
- De la moitié gauche du barrage, il ne subsiste que la culée en haute de la rive.
- Un volume considérable de fondation a été soulevé en entraînant avec lui le barrage situé au-dessus. La voûte s'est totalement ouverte en rive gauche puis s'est cassée en rive droite, ne laissant en place que la partie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

110/122

BARRAGE DE MALPASSET

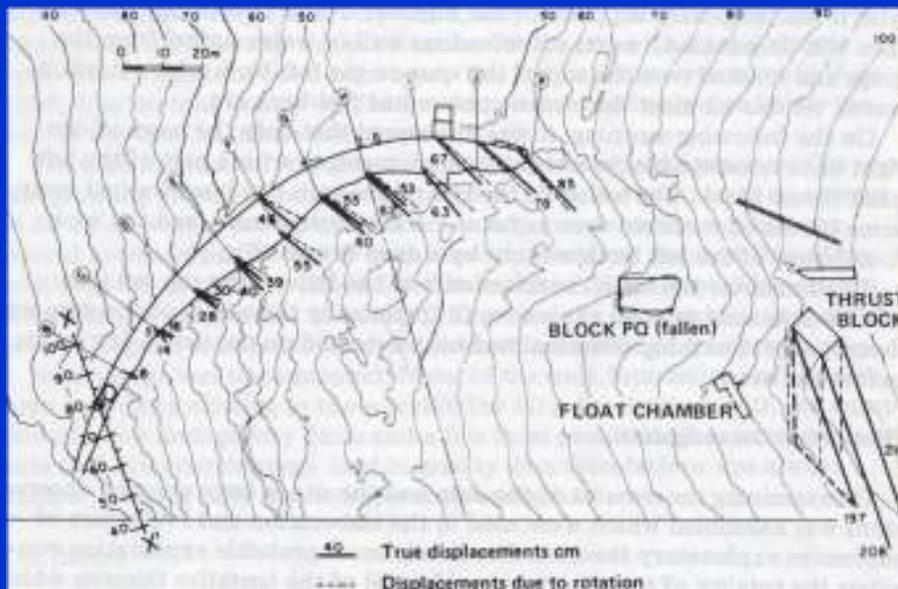


111/122





MALPASSET - VECTEURS DÉPLACEMENTS



114/122

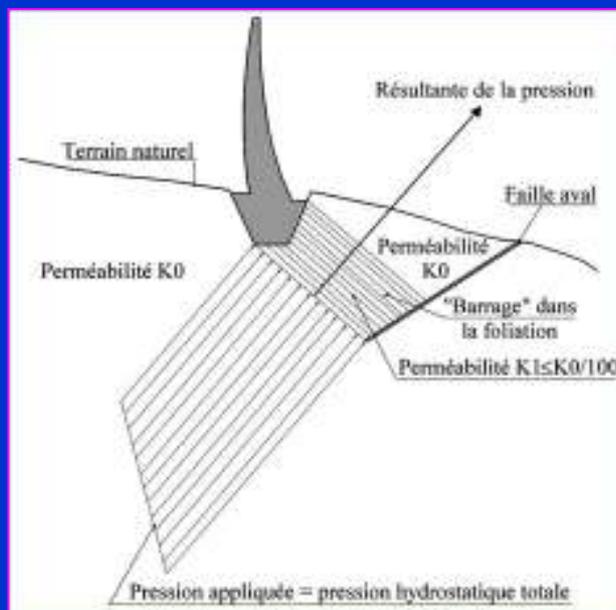


LES CONSÉQUENCES DE LA RUPTURE

- Une lame d'eau de 50 hm³ 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



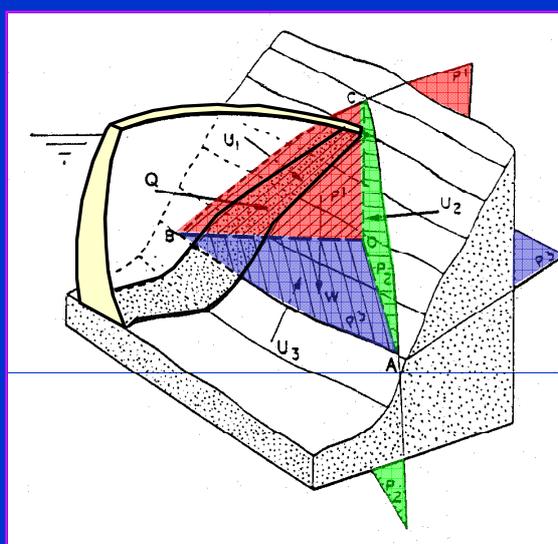
120/122

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