

# Contrôle de la sécurité des barrages

Grenoble, octobre 2015

## Barrages poids

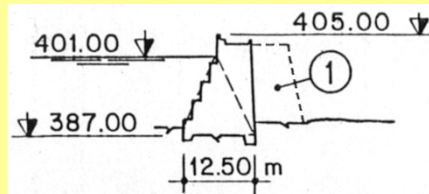


P. Royet, Irstea

- 1 - Maçonnerie, béton ou BCR  
Types de barrages poids  
Perspective historique
- 2 - Justification de la stabilité
- 3 - Pathologie, vieillissement,  
surveillance, auscultation
- 4 - Techniques de confortement

## La première génération

- Mur épais en maçonnerie épaulé par un remblai (St Ferréol)
- Barrages constitués de deux murs en maçonnerie avec remplissage en tout-venant
- Ajout de contreforts ou de remblai en aval



Chazilly (21) 1837  $f = 0,89$

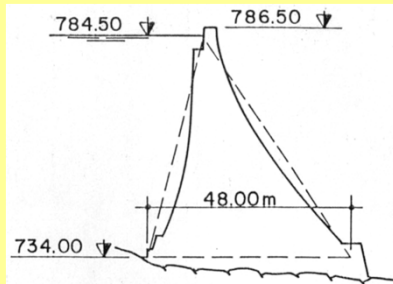
① Contrefort

Caromb (84) 1766 fruit 0,13 (avant confort.)

Et Lampy (11) 1792, Grosbois (21) 1838, ...

## La seconde génération

- Profil d'égal résistance (MM. de Sazilly & Delocre)



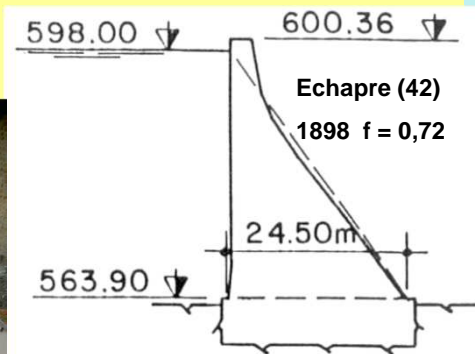
Gouffre d'enfer 1866  $f = 0,95$

Chartrain (42) 1892 fruit 0,84

Et Ternay (07) 1867, la Rive (42) 1870, la Mouche (52) 1890, ...

## A la même époque...

- Profil triangulaire à parement amont vertical
- De plus en plus mince...



La Mouche (52), 1890, fruit 0,78

Et Sault (03) 1869  $f = 0,57$ ; Pas de Riot (42) 1878  $f = 0,73$ ; Cennes-Monesties (11) 1885  $f = 0,59$

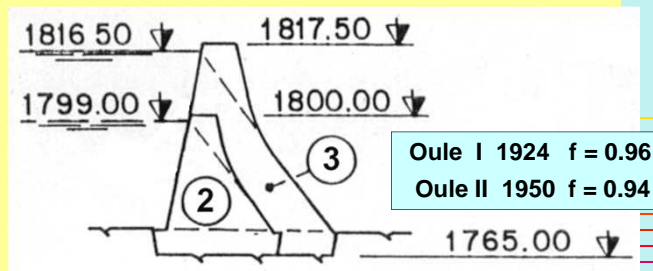
- ...jusqu'à la rupture du barrage de Bouzey 1895 fruit 0,52

## Suite à la rupture du barrage de Bouzey...

- Certains ont été abandonnés, tel l'ancien barrage poids-voûte de Saint Saturnin d'Apt (1835),
- Certains ont été confortés par un remblai aval : Alfeld en 1897, Altenweiher en 1898, Lauch en 1902...
- D'autres ont été confortés vers 1900 par des masques « Maurice LEVY » ; sous-pressions ramenées à zéro dans tout le corps du barrage : Settons, la Mouche, Ban de Champagney
- Solution du masque aussi appliquée pour plusieurs barrages neufs construits à cette époque : Martinet (1904), Bouillouse (1910), St Sernin (1921).

## Les derniers barrages en maçonnerie

- Prise en compte des sous-pressions
- Règle de non-traction en pied amont à RN
- Profil triangulaire à parements rectilignes
- Fruit amont + aval de 0,8 à 1,1 (sans galerie)



Et Cotatay (1905)  $H = 45$  m  $f = 0,8$  ; Charpal (1932)  $H = 29$  m  $f = 1,1$

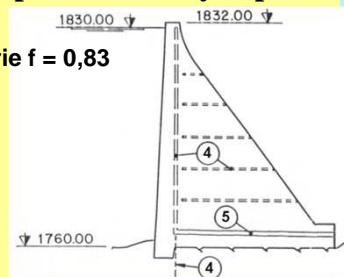
## La transition entre maçonnerie et béton

- Introduction du drainage interne et en fondation avec des galeries dans le corps de l'ouvrage
- De la maçonnerie au béton en passant par le béton cyclopéen

Gnioure 1949 maçonnerie  $f = 0,83$



Puyvalador (66) 1932 béton  $f = 0,77$



■ Les premiers barrages en béton: Eguzon (1926), Grande Rhue (1927), le Chambon (1934), ...

## Les barrages « modernes » en béton

- Injections et drainage en fondation
- Drainage du corps du barrage et galerie en pied amont, pour les grands barrages
- Technique largement utilisée entre 1945 et 1990, plus rarement récemment



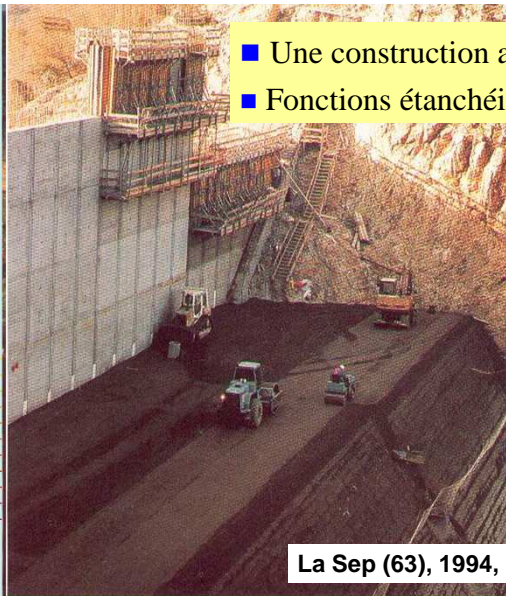
La Gordolasque (06), 1990, fruit 0,8



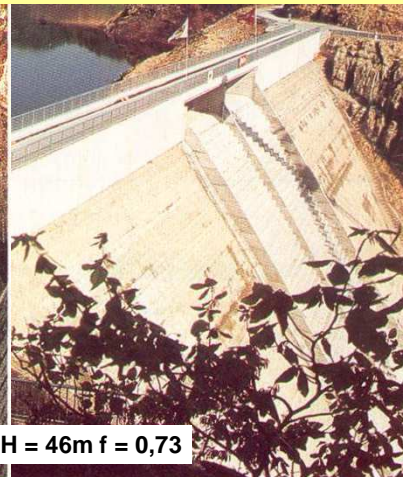
La Visance (60), 2011, Hfond = 15m

## La dernière génération : le BCR (1/2)

- Une construction avec les techniques des remblais
- Fonctions étanchéité et stabilité souvent dissociées



La Sep (63), 1994, H = 46m f = 0,73

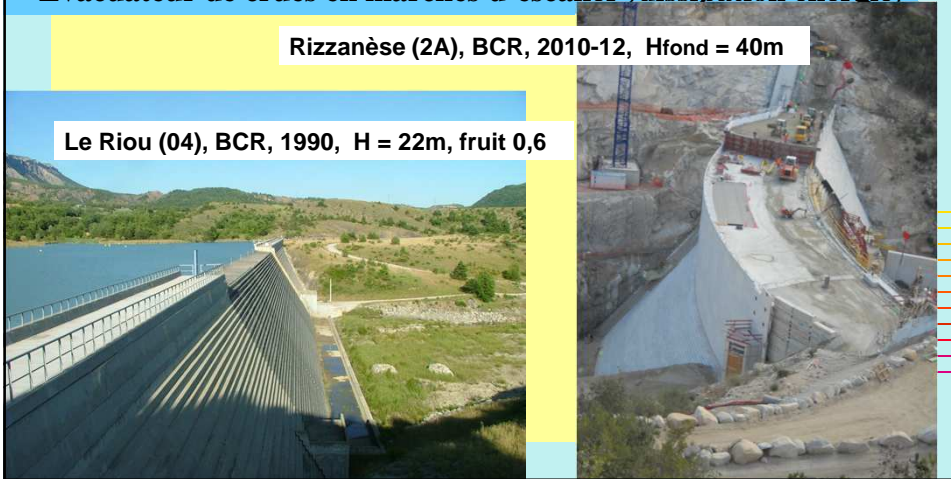


## La dernière génération : le BCR (2/2)

- Un béton maigre donc peu exothermique (peu ou pas de joints)
- Coffrage aval souvent préfabriqué
- Evacuateur de crues en marches d'escalier (dissipation énergie)

Rizzanèse (2A), BCR, 2010-12, Hfond = 40m

Le Riou (04), BCR, 1990, H = 22m, fruit 0,6



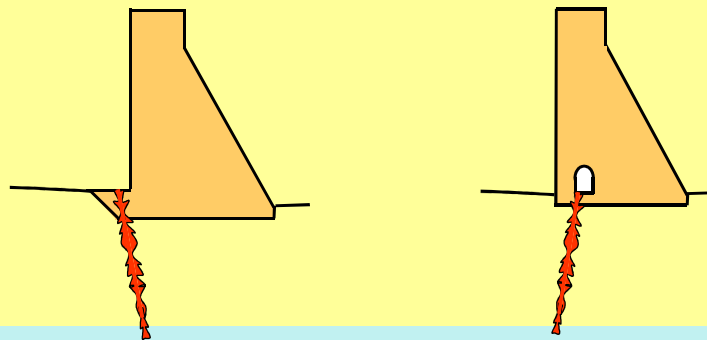
### Maçonnerie, béton ou BCR ? En résumé...

- Maçonnerie : main d'œuvre abondante (avant 1940)
- Béton conventionnel : si des ouvrages complexes doivent être insérés (ouvrages mobiles...) ou faibles volumes de béton
- BCR : solution économique au-delà d'environ 35 000 à 40 000 m<sup>3</sup>
- Remblai dur (profil symétrique, deux fruits de 0,5 à 0,9) si fondation médiocre, fortes crues ou séismes ; pas d'exemple à ce jour en France

## Conception moderne des barrages poids

### 1 - Traitement de la fondation

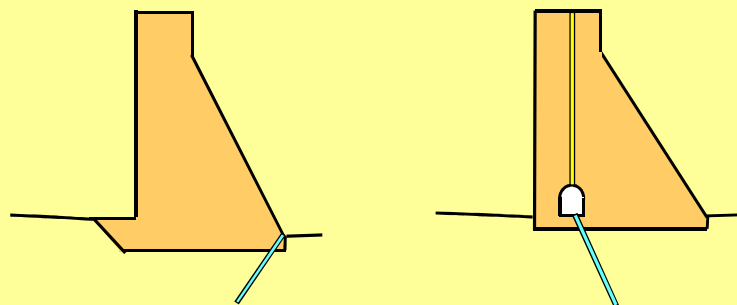
- Si galerie, injections depuis la galerie,
- Si pas galerie, injections depuis pied amont, pression d'injection  $< 0,5$  MPa dans les premiers mètres.



## Conception moderne des barrages poids

### 2 - Drainage: fondation et barrage

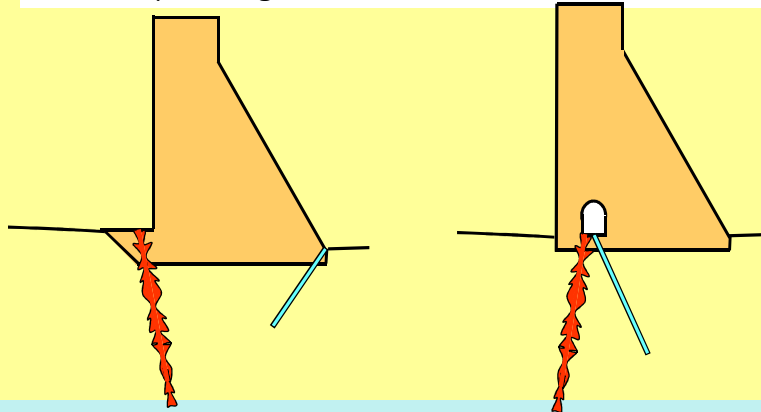
- Si galerie, drainage rocher depuis la galerie : le plus efficace.
- Si galerie, drainage du corps de barrage possible depuis crête, débouchant dans galerie
- Si pas de galerie, drainage depuis pied aval.



## Conception moderne des barrages poids

### 3 - Galerie ?

- Béton conventionnel : le plus souvent, pas de galerie si  $H < 15$  m
- BCR : pas de galerie si  $H < 20$  à  $25$  m



Barrage BCV de Saint-Esprit (83) H = 24 m

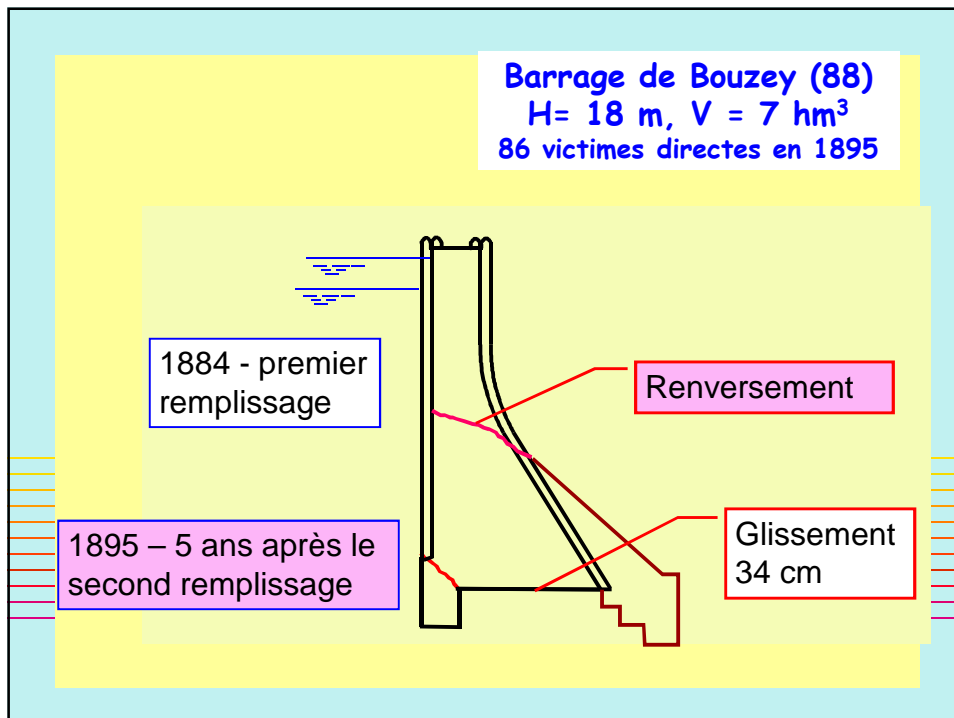




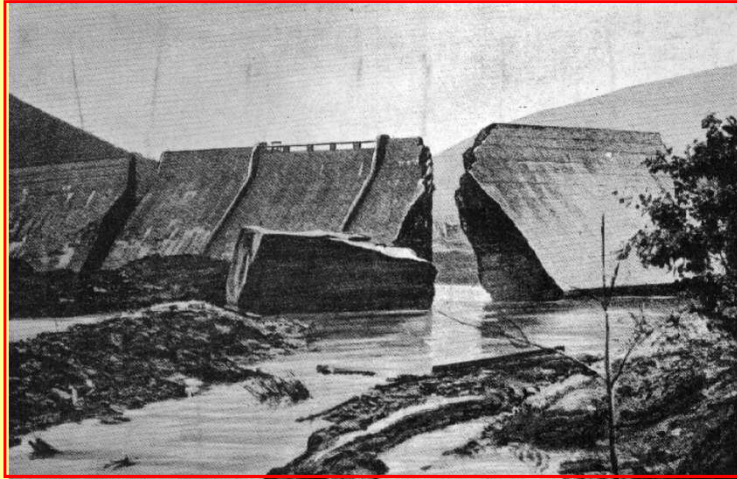
## 2 - Justification de la stabilité

### 2.1 - Les mécanismes de rupture et de dégradation

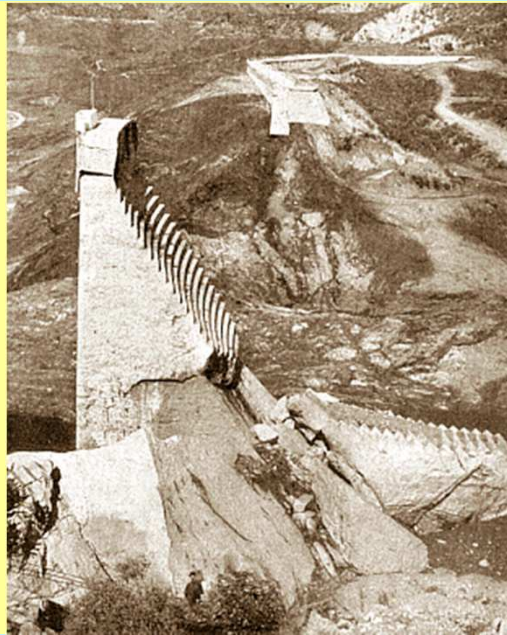
- **cisaillement (ou glissement) (ELU)**
  - » dans le corps du barrage
  - » au contact barrage / fondation
  - » dans la fondation
- **renard en fondation (ELU)**
- **(contournement)**
- **fissuration (ELS)**
- **(dissolution liant)**



**Barrage d'Austin USA (15 m, 1 million m<sup>3</sup>) rompu  
en 1911 par glissement, 78 victimes**



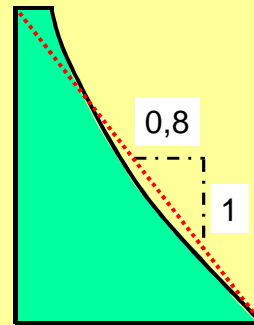
**Barrage San Francis  
(59 m, 47 millions m<sup>3</sup>)  
rompu en 1928,  
près de 500 victimes  
Érosion en fondation**



## 2 - Justification de la stabilité

### 2.2 - Vérification rapide

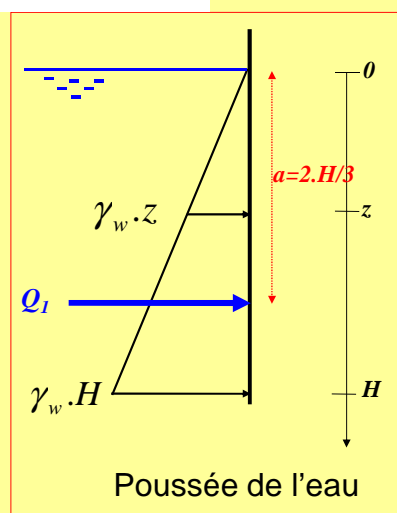
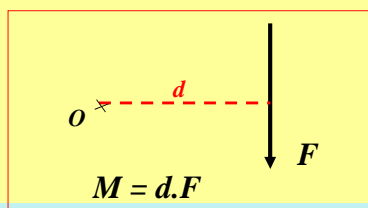
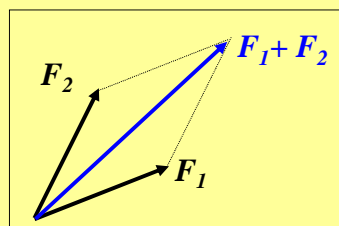
Barrage	fruit
• drainé	0,75
• non drainé	0,80 à 0,85



## 2 - Justification de la stabilité

### 2.2 - Calcul moderne

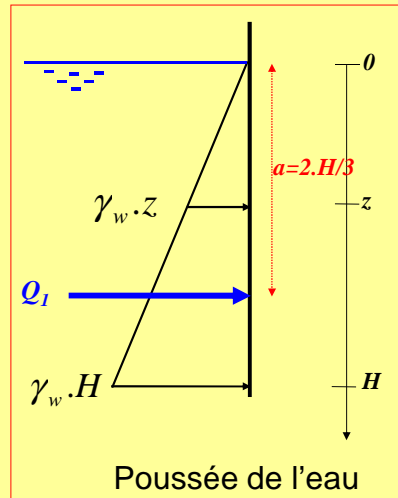
#### 2.2.0 - Rappels



### 2.2.0 - Rappels

$$Q_1 = \int_0^H \sigma \cdot dz = \int_0^H \gamma_w \cdot z \cdot dz = \gamma_w \frac{H^2}{2}$$

$$a \cdot Q_1 = \int_0^H \sigma \cdot z \cdot dz = \int_0^H \gamma_w \cdot z^2 \cdot dz = \gamma_w \frac{H^3}{3}$$



### 2.2.1 - Grands principes du calcul moderne

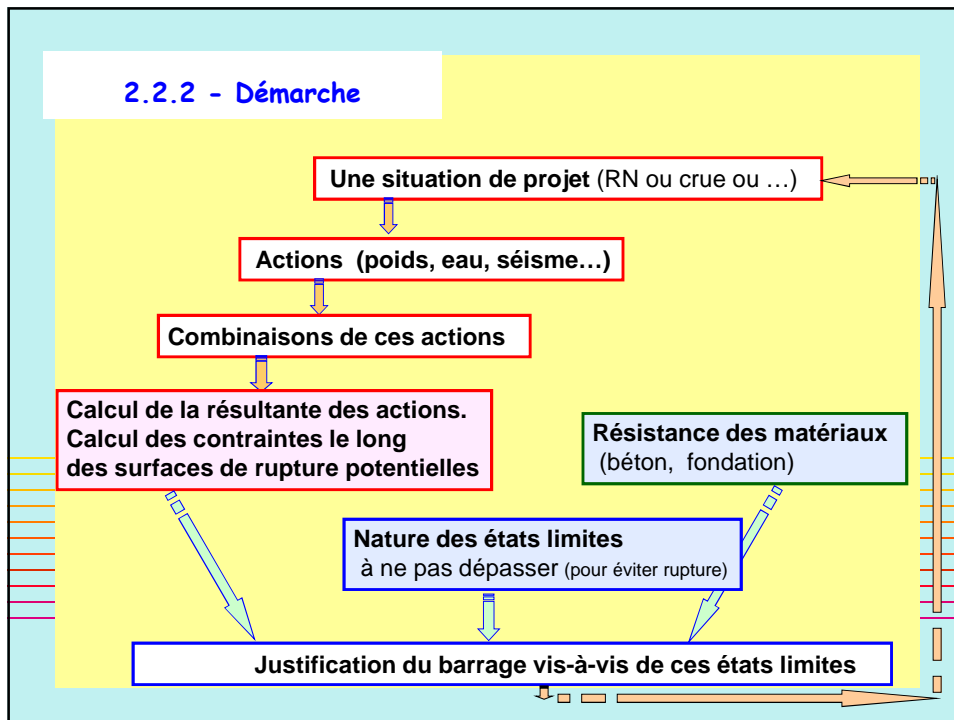
- Vérification d'un ouvrage prédimensionné
- Calcul 2D, élasticité
- Calcul aux états limites de service et ultimes
- Résistances des matériaux affectées de coefficients minorateurs partiels, **et non plus coefficient de sécurité global**
- Recommandations CFBR, compatibles EUROCODES (octobre) <http://www.barrages-cfbr.org/index2.html>

  
Groupe de Travail « Justification des barrages-poids »

Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids

octobre 2012

### 2.2.2 - Démarche



### 2.2.3 - Situations de projet

- situations normales d'exploitation (ex : cote de RN)
- situations transitoires ou rares (défaillance organe, retenue vide)
- situations de crue (crue de projet, crue de danger)
- situations accidentelles (séisme, avalanche)
- autres situations liées à la défaillance ou à l'indisponibilité d'un composant

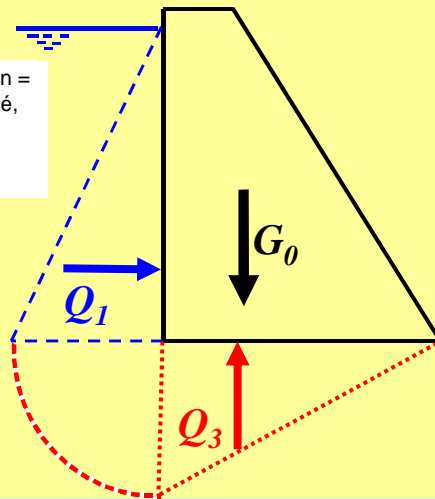
### 2.2.4 - Calcul des actions (pour une situation de projet) 1/5

Valeur caractéristique d'une action = estimation prudente de son intensité, notée avec indice  $k$  :

$G_{0k}$ ,  $Q_{1k}$  ....

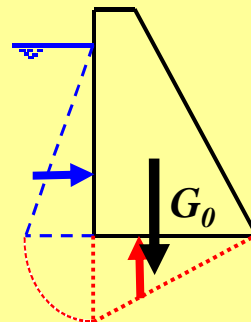
... pour le mécanisme considéré

Actions variables de l'eau considérées en situations de projet (donc pas de coefficient partiel)



### 2.2.4 - Calcul des actions 2/5

Action permanente : le poids  $G_0$

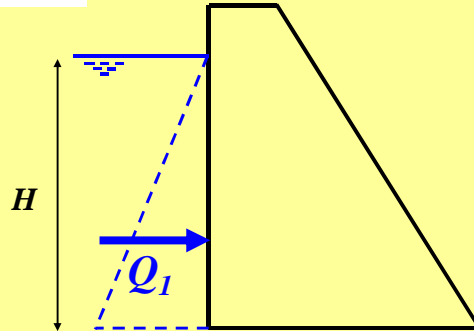


Matériau	Poids volumique kN/m <sup>3</sup> valeurs guide
Béton conventionnel	24
BCR riche (200 kg liant par m <sup>3</sup> )	23,5
BCR maigre (100 kg liant par m <sup>3</sup> )	22
Maçonnerie	19 à 24

### 2.2.4 - Calcul des actions 3/5

Poussée hydrostatique  $Q_1$

$$Q_1 = \int_0^H \gamma_w z \cdot dz = \gamma_w \frac{H^2}{2}$$



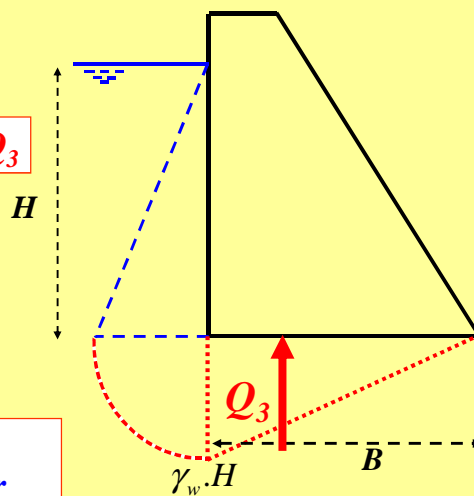
Le cas échéant, poussée hydrostatique aval  $Q_2$

Trois situations à considérer : *RN, PHE, cote de danger*

### 2.2.4 - Calcul des actions 4/5

Action des sous pressions  $Q_3$

$$Q_3 = \gamma_w \frac{H \cdot B}{2}$$



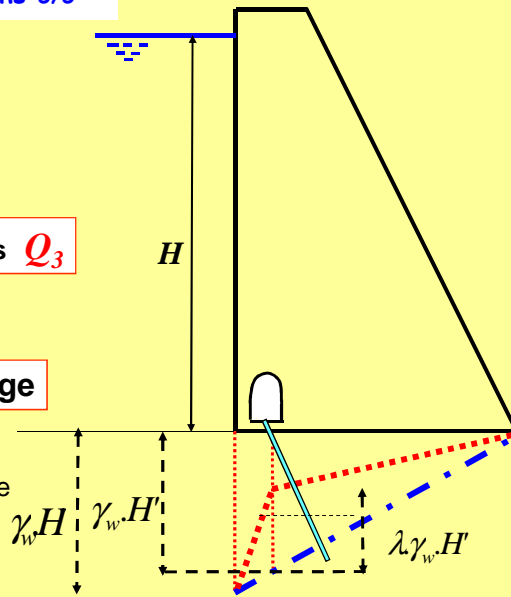
Trois situations à considérer :  
*RN, PHE, cote de danger*

### 2.2.4 - Calcul des actions 5/5

Action des sous pressions  $Q_3$

Avec galerie et drainage

Rabattement  $\lambda = 1/2$  à  $2/3$   
 $\lambda < 1/2$  si pendage défavorable  
Voir aussi auscultation



### 2.2.5 - Combinaisons d'actions

#### Situations les plus classiques

Ⓞ situation quasi-permanente...

RN sans séisme

Ⓞ situation exceptionnelle de crue

PHE sans séisme

Ⓞ Situation extrême de crue

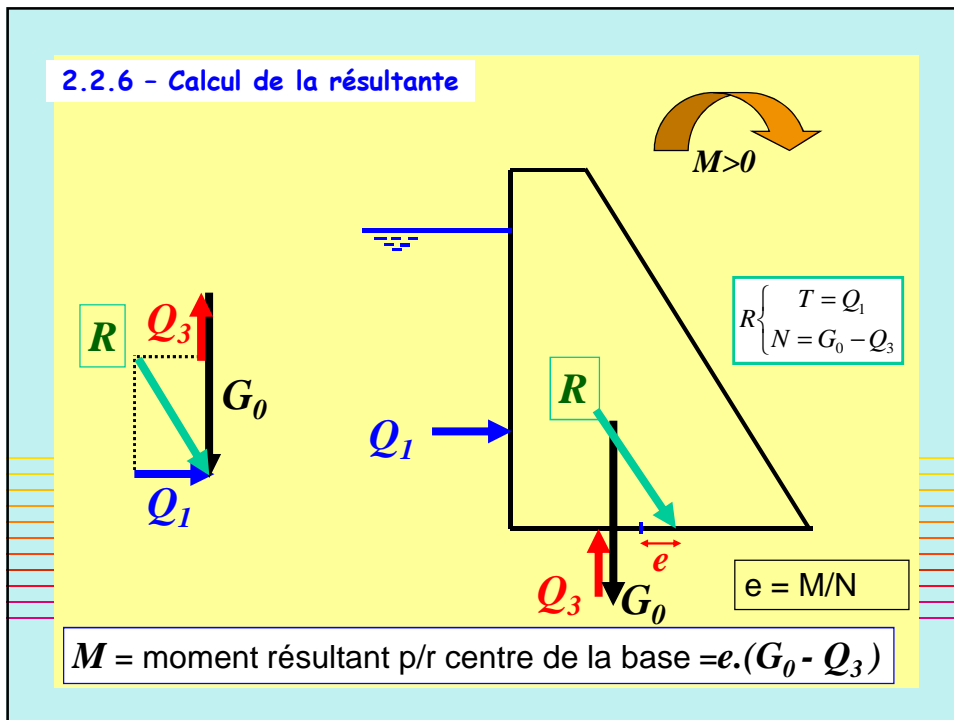
cote de danger  
sans séisme

Ⓞ situation accidentelle .....

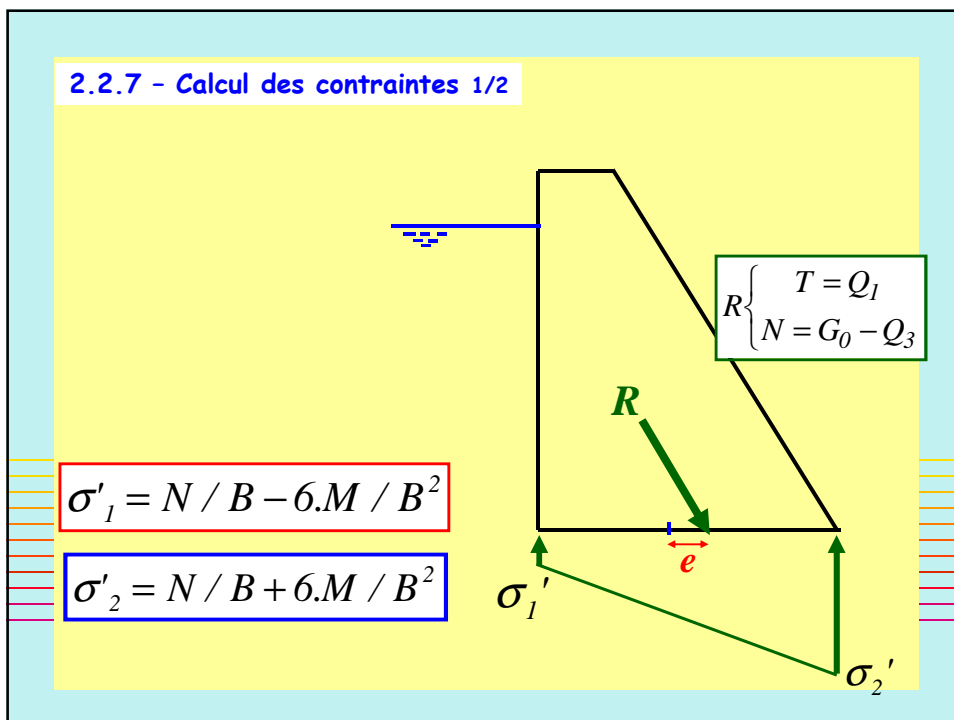
RN + séisme



### 2.2.6 - Calcul de la résultante



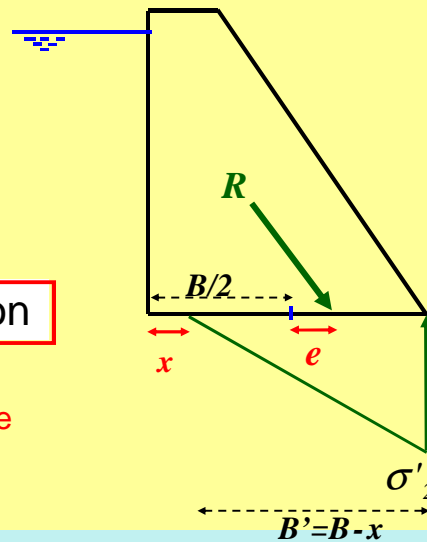
### 2.2.7 - Calcul des contraintes 1/2



### 2.2.7 - Calcul des contraintes 2/2

Si  $\sigma'_1 < 0 \Rightarrow$  traction

$x$  = longueur fissurée



### 2.2.8 - Valeurs caractéristiques des résistances des matériaux

	compression	traction	cohésion	frottement
Rocher	<i>essais</i>	$0$	<i>essais</i>	<i>essais</i>
Interface	/	$0$	<i>idem fondation</i>	$\tan \varphi_k = 1$ (voire 1,2 à 1,4)
Béton	$f_{ck} = 20 \text{ à } 30 \text{ MPa}$	$f_{tk} = 2 \text{ à } 3 \text{ MPa}$	$c_k = 2 \text{ à } 3 \text{ MPa}$	$\tan \varphi_k = 1,4$
Reprise traitée	/	$f_{tk}(\text{béton})/2$	$c_k(\text{béton})/2$	<i>idem béton</i>
Reprise non traitée	/	$< f_{tk}(\text{béton})/3$	$< c_k(\text{béton})/3$	<i>idem béton, maxi 1</i>
Fissure béton	/	$0$	$0$	<i>idem béton, maxi 1</i>
Maçonnerie	$f_{ck} = 5 \text{ à } 10 \text{ MPa, parfois plus}$	$0$ en résiduel	$0$ en résiduel, très variable en pic	$\tan \varphi_k = 0,6 \text{ à } 1$

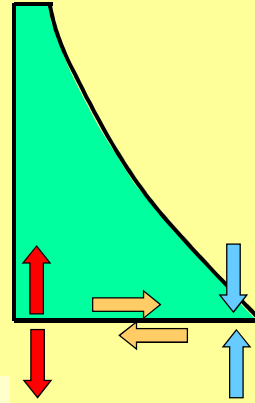
## 2.2.9 - Quels états limites ?

**État-limite de résistance à l'effort tranchant**  
C'est un état-limite ultime (rupture)

(État-limite de résistance à la compression)  
C'est un état-limite ultime (rupture)

**État-limite d'extension des fissures**  
C'est un état-limite de service (fissuration, fuites)

État-limite de portance de la fondation  
État-limite de flottaison (barrages en rivière)  
État-limite d'érosion de la fondation par surverse



## 2.2.10 - Justifications 1/3

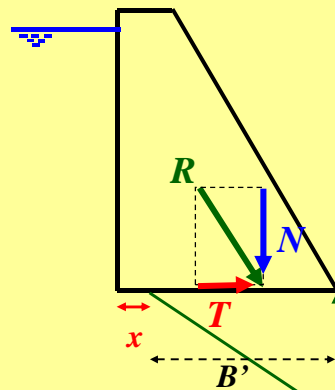
**État limite de résistance à l'effort tranchant**

$B' = B - x$  : base non fissurée

✦ combinaison quasi-permanente :  $T < \frac{c_k}{3} \cdot B' + N \cdot \frac{\tan \varphi_k}{1,5}$

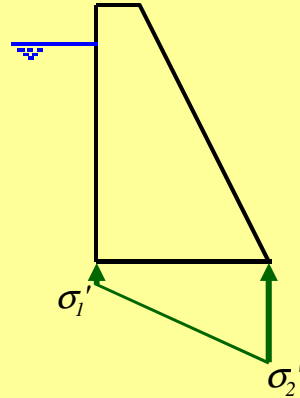
✦ combinaison rare :  $T < \frac{c_k}{2} \cdot B' + N \cdot \frac{\tan \varphi_k}{1,2}$

● combinaison accidentelle hydrostatique ou sismique :  $T < \frac{c_k}{1} \cdot B' + N \cdot \frac{\tan \varphi_k}{1}$



### 2.2.10 - Justifications 2/3

**État limite de résistance à la compression**  
(dimensionnant uniquement pour les grands barrages)



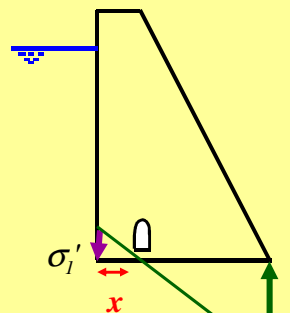
combinaison quasi-permanente :  $\sigma_2 < \frac{f_{ck}}{3}$

combinaison rare :  $\sigma_2 < \frac{f_{ck}}{2}$

combinaison accidentelle hydrostatique ou sismique :  $\sigma_2 < \frac{f_{ck}}{1}$

### 2.2.10 - Justifications 3/3

**État limite d'extension de fissures**



combinaison quasi-permanente :  $\sigma_1 > -\frac{f_{tk}}{3}$

combinaison rare : fissuration reste amont galerie et/ou drains  
ou :  $x < B/4$

## 3 - Pathologie, vieillissement, surveillance, auscultation

### 3.1 Pathologie, vieillissement

- Vieillissement du matériau, en particulier pour la maçonnerie, se traduisant par baisse des caractéristiques mécaniques et augmentation des fuites
- Vieillissement du drainage, se traduisant par une augmentation des sous-pressions

## Processus de vieillissement des maçonneries

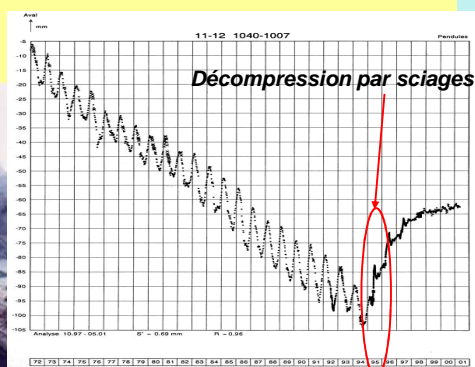
- Dissolution du mortier entraînant :
  - Perte de densité (densité abaissée de 2,5 à 2,08 en 150 ans au barrage des Settons);
  - Augmentation de la perméabilité, mais à travers des passages localisés;
  - Baisse des propriétés mécaniques (- 50% en 150 ans au barrage des Settons).
- Causes du vieillissement: eaux agressives, fluctuation du niveau d'eau, conditions climatiques, gradients hydrauliques, fatigue mécanique.



## Vieillessement du béton

- Le gonflement dû à l'alcali-réaction
- Exemple du barrage du Chambon (38)

Pendule P11-12



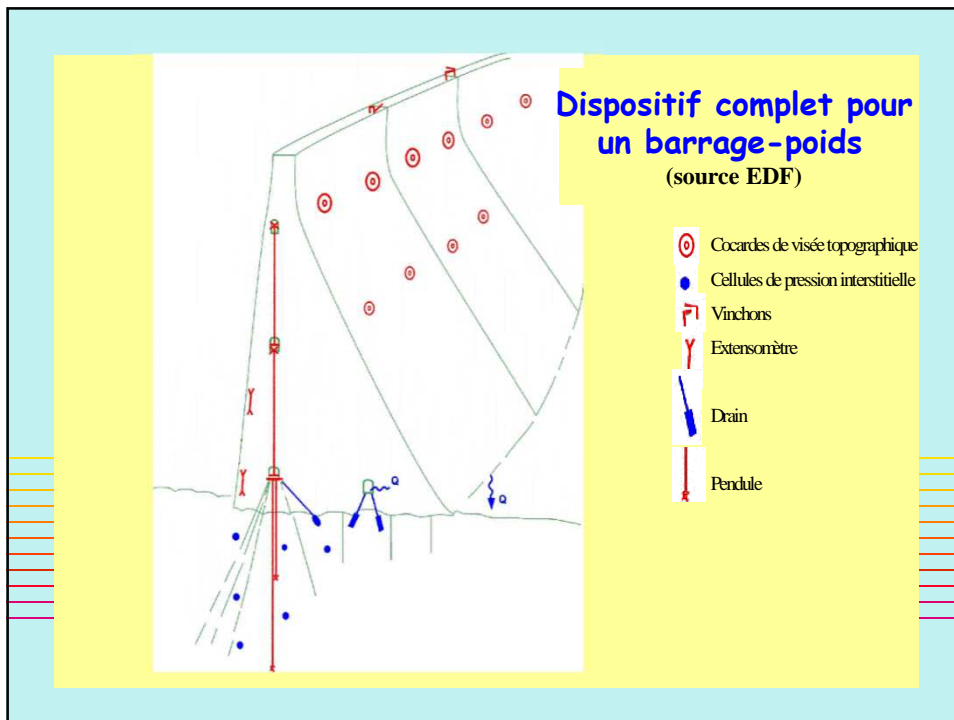
Mouvement amont-aval au pendule P11-12

## Surveillance visuelle

- Parement amont
  - Parement aval
  - Crête
  - Galerie
- Fissuration, joints, suintements, végétation,
  - Suintements, drains, fissures, végétation
  - Fissures ouvertes ou fermées
  - Suintements, état rocher ou corps barrage, auscultation

## L'auscultation

- Le dispositif de base :
  - Cote de la retenue
  - **Sous-pressions** (en particulier à l'interface barrage / fondation)
  - Débits des drains
  - Déplacements



## 4 - Techniques de confortement des barrages poids

### ■ 4.1 - DIMINUER LA POUSSEE

▶ 4.1.1- Abaissement du niveau exploitation

▶ 4.1.2 - Abaissement PHE



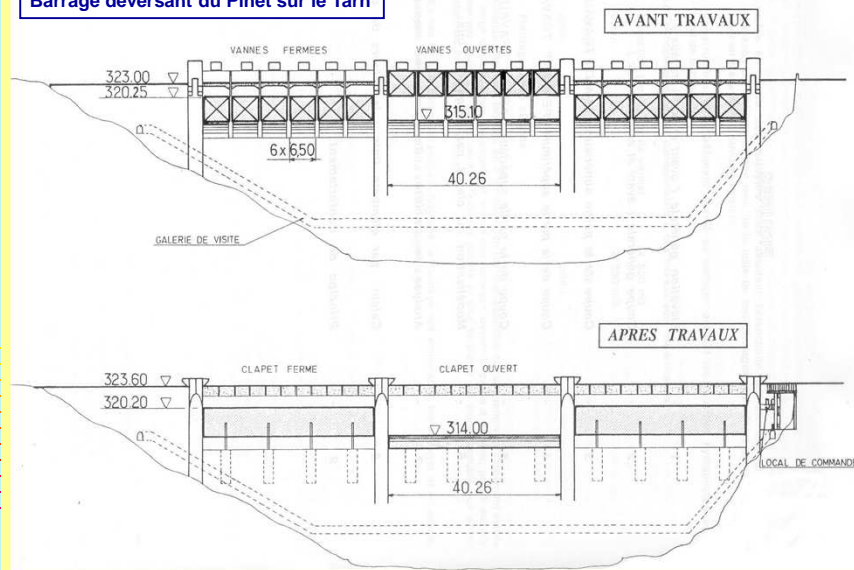
### Diminuer la poussée ; abaissement RN



Barrage de St Saturnin d'Apt

### Diminuer la poussée ; abaissement PHE

Barrage déversant du Pinet sur le Tarn



## Diminuer la poussée ; abaissement PHE

### Barrage de Pont & Massène (21)

- une capacité d'évacuation des crues largement insuffisante ( $133 \text{ m}^3/\text{s}$  pour  $Q_{100} = 235 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- abaisser de près de 3 m le seuil actuel (à la cote 291,35 m NGF) ;
- équiper l'évacuateur de clapets sur deux passes (2 x 7 m) et de hausses fusibles sur la troisième (3 x 5 m). Les clapets et les hausses ont une hauteur de 4,05 m. Basculement des hausses entre les cotes 295,92 et 296,15 m NGF (PHE);
- élargir (jusqu'à 5 m coté gauche) et approfondir (de 2,5 à 3 m) le coursier, tout en conservant sa forme en grandes marches d'escalier.



Photo chantier  
juillet 2015 (VNF)

## 4 - Techniques de confortement

### ■ 4.2 - DIMINUER LES SOUS-PRESSIONS

#### ▶ 4.2.1 - Étanchéité

#### ▶ 4.2.2 - Drainage

## 4.2.1 Amélioration de l'étanchéité ce qui ne marche pas très bien

- Injections dans le corps du barrage
  - Retour d'expérience peu concluant; efficacité rarement durable
    - » Effets positifs sur les propriétés mécaniques de la maçonnerie
- Enduit généralisé sur le parement amont
  - Retour d'expérience variable : succès mais aussi échecs
    - » Nombreux facteurs influençant la qualité des travaux, dont certains difficilement contrôlables

## Etanchéité par rejointoiement du parement amont

Les joints sont d'abord recreusés, lavés et séchés; puis un mortier est appliqué par projection à la machine



Barrage d'Alfeld (68)

## Étanchéité par rejointoiement du parement amont

### ■ ... et injection du parement amont

- Forages de 0,5 à 1 m de profondeur ;  
injection de résine acrylique

Retour d'expérience positif sur ces  
deux techniques complémentaires,  
mais... travail de grande qualité  
exigé !



## Étanchéité par géomembrane

### **Barrage de la Rive**

Préparation  
de la face  
amont

et  
construction  
de la plinthe

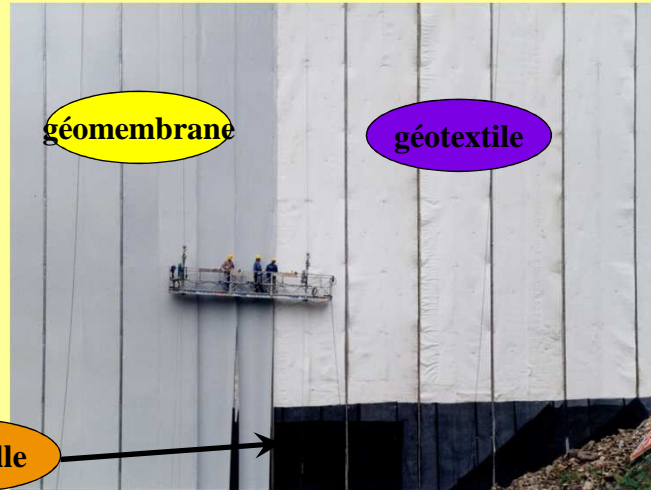
(photo Sogréah)



## Etanchéité par géomembrane

### **Barrage de la Rive**

Installation de la membrane  
(photo Sogréah)



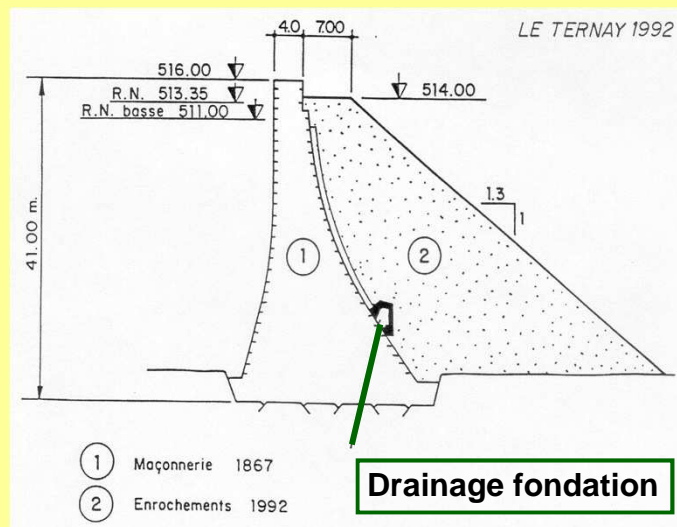
## Etanchéité par géomembrane

### **Barrage de la Rive**

Vue générale de la face amont avec la membrane installée en rive gauche  
(photo Sogréah)



## Diminuer sous-pressions ; drainage



## Diminuer sous-pressions ; drainage



St Martin de Londres (34)  
Forage de drains inclinés  
depuis le pied aval

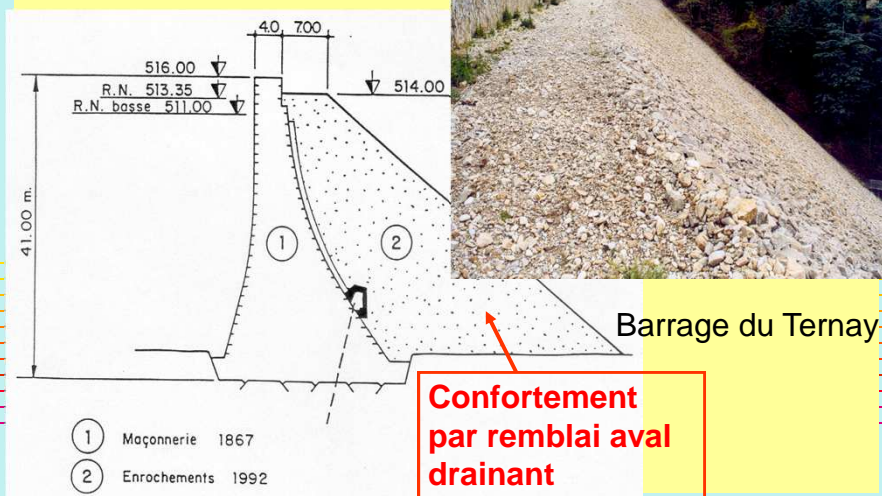
**Mais attention au colmatage des drains !**  
**Attention aussi aux conséquences de l'augmentation des gradients**

## 4 - Techniques de confortement

### ■ 4.3 - AUGMENTER LE POIDS :

- ▶ 4.3.1 - massif aval
- ▶ 4.3.2 - tirants
- 4.3.3 - régénération maçonnerie

### Augmenter le poids ; remblai aval



**Augmenter le poids ; béton aval**



**Barrage du Paty (84)**

**Augmenter le poids ; tirants actifs**

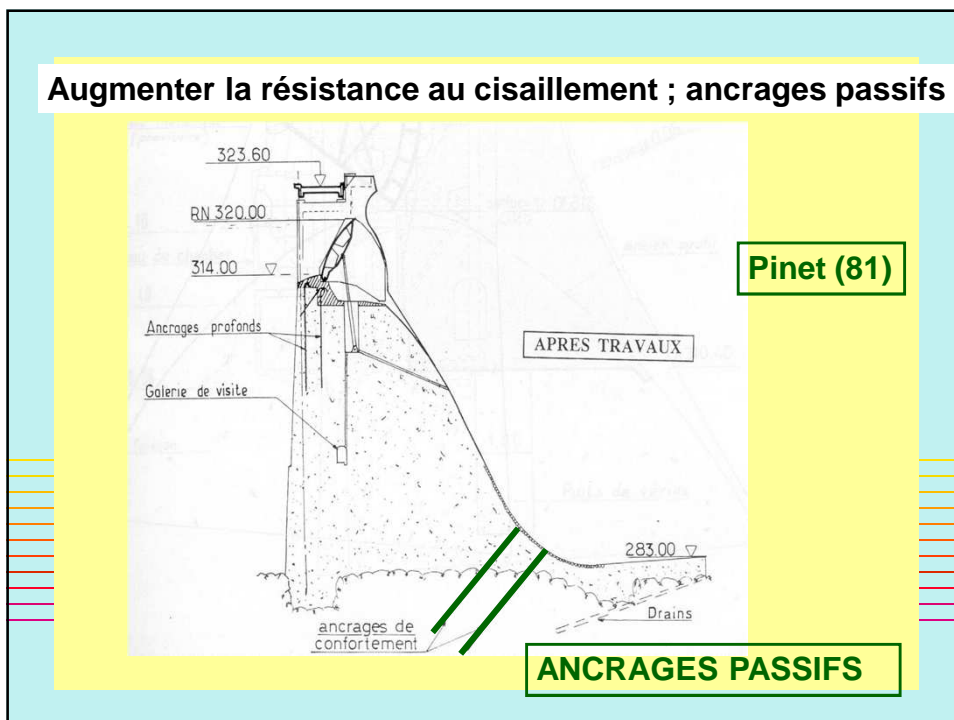
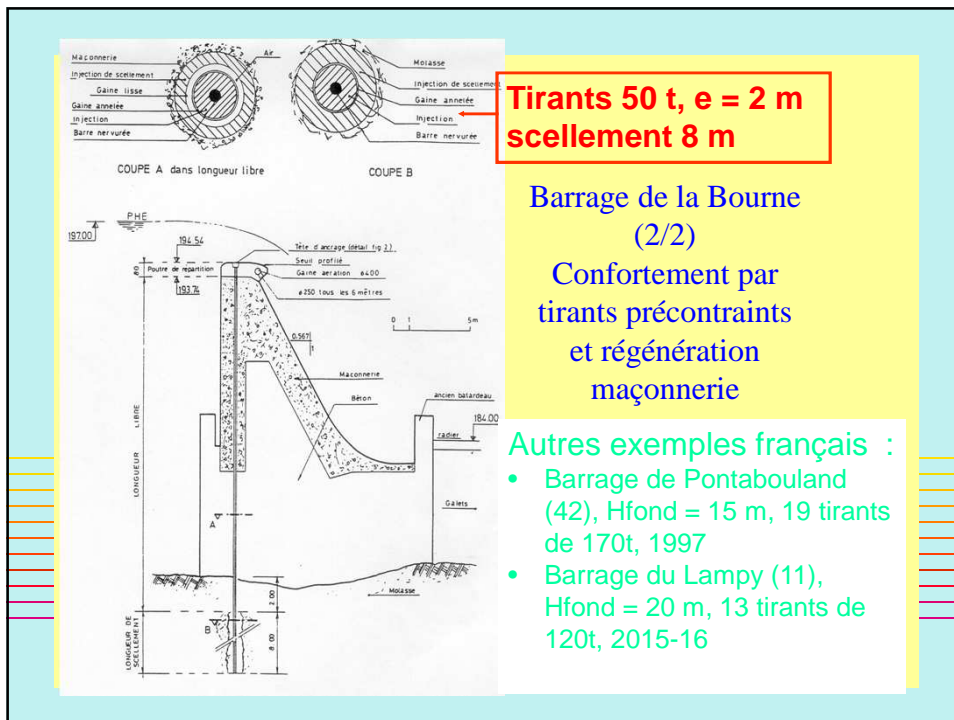
Première génération au milieu du 20ème siècle avec Rex médiocre ; nouvelle technologie depuis les années 1980



**Barrage de la Bourne  
(1/2)**

Confortement par  
tirants précontraints  
et régénération  
maçonnerie



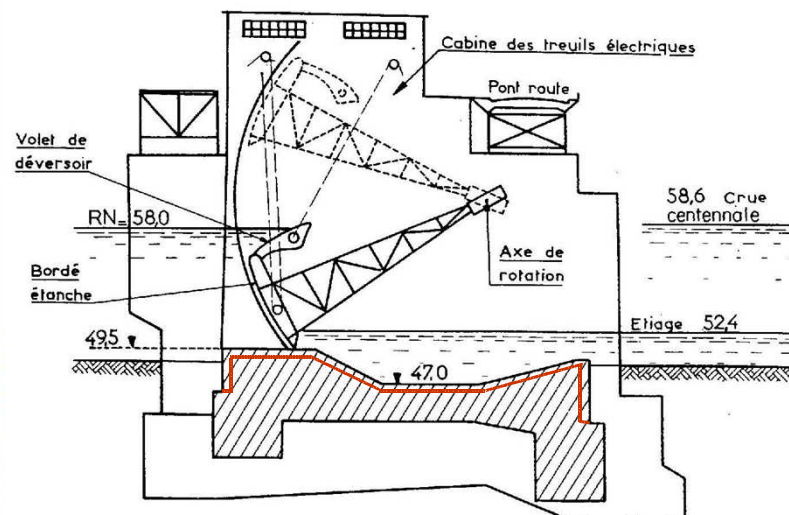


## Conclusions

Tendances récentes pour le confortement des anciens barrages en maçonnerie :

- Amélioration de la stabilité :
  - » par tirants précontraints (et, éventuellement, injections dans le corps du barrage pour améliorer la résistance de la maçonnerie)
  - » remblai aval, mais problème d'espace disponible (et d'esthétique ?)
- Amélioration de l'étanchéité en amont :
  - » réfection des joints et injections de surface
  - » ou dispositif d'étanchéité par géomembrane

## 5 - Barrages mobiles



La stabilité se justifie comme pour un barrage-poids

### Évacuateur de crues du barrage de Carcès (83)



La stabilité du déversoir se justifie comme pour un barrage-poids (en tenant compte des diverses situations pour les sollicitations sur les clapets)

#### Pour en savoir plus :

- USBR, 1987, *Design of small dams, United States Department of Interior – Bureau of Reclamation*, 3ème réédition, 1987.
- USACE, 1995, US Army Corps of Engineers, *Gravity Dam Design, Washington, 30 june 1995. 88 p.*
- Ruggeri, G., 2004. *Uplift Pressures under Concrete Dams - Final Report*. European Working Group on Uplift Pressures under Concrete Dams, 27p.
- CFBR 2012, *Recommandations pour la justification des barrages poids*, <http://www.barrages-cfbr.org/index2.html>
- Royet & al 2013, *Le parc des barrages français en maçonnerie - Techniques de reconnaissance et de confortement, Colloque CFBR « Modernisation des barrages », 4 - 5 Décembre 2013.*