



# Comportement mécanique des Barrages en Enrochement à Masque Amont

**REX EDF**

*Période de construction  
1900-1960*

François LAIGLE

Electricité de France  
Centre d'Ingénierie Hydraulique

Journée d'Etude  
CFBR - CFGI - CFMR – CFMS  
02/02/2006

Historique des « *CFRD* » avant 1960

Caractéristiques techniques spécifiques

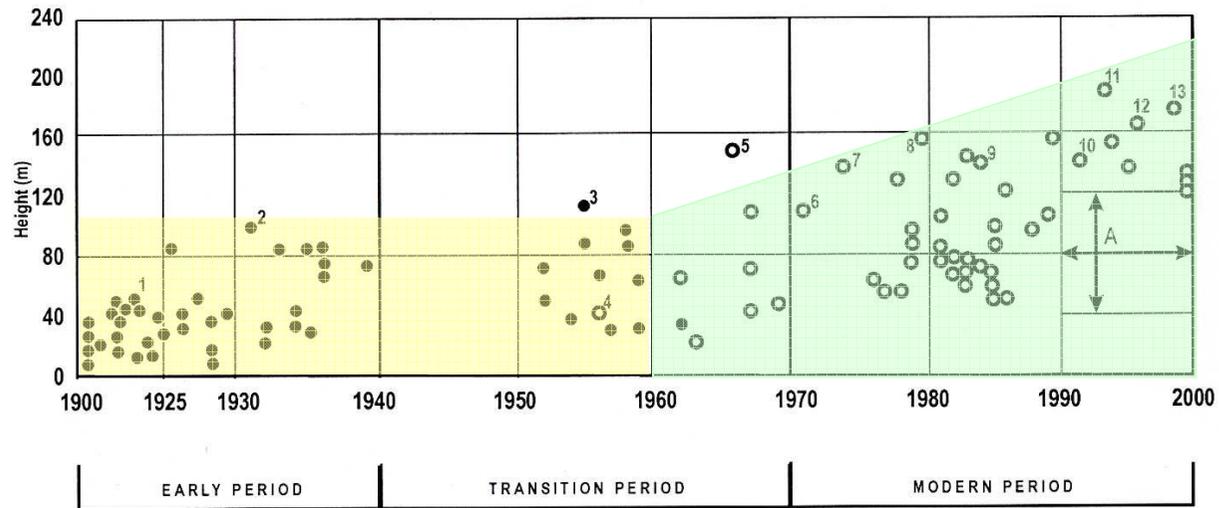
Comportements caractéristiques et pathologies

Modélisation et prédiction

Justification sur ouvrages



# Historique des « CFRD » avant 1960



Legend:

- |    |  |    |                    |
|----|--|----|--------------------|
| •  | Dumped Rockfill  | ○  | Compacted Rockfill |
| 1  | Strawberry Creek   | 2  | Salt Springs       |
| 3  | Paradela   | 4  | Quioch             |
| 5  | New Exchequer  | 6  | Cethana            |
| 7  | Anchicaya  | 8  | Areia              |
| 9  | Khao Laem  | 10 | Segredo            |
| 11 | Aguamilpa  | 12 | Yacambu            |
| 13 | Tianshenqiao   |    |                    |
| A  | 68 CFRDs completed between 1990 and 2000, height 40 to 120 m |    |                    |

# Historique des « CFRD » avant 1960

## Bowman Dam (1872)

Hauteur: 30 m  
**Fruits amont/aval: 1/1**  
 Masque d'étanchéité amont: Bois  
 Enrochement interne : *blocs de petites taille + terre*  
 Perré aval épaisseur: 60 cm à 90 cm

## Escondido Dam (1895)

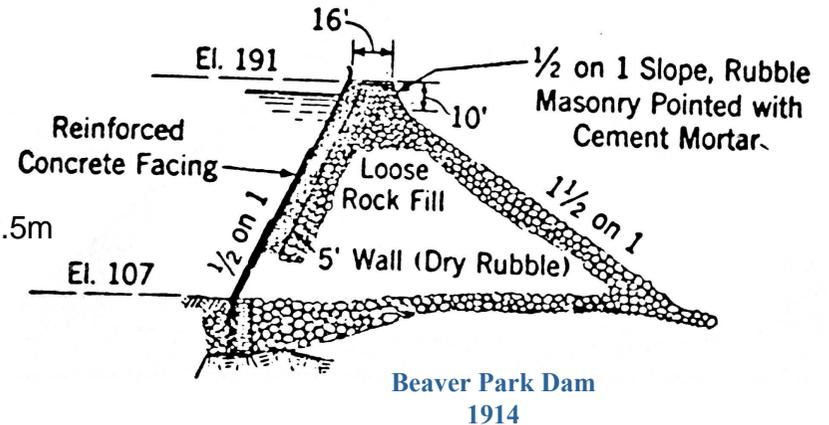
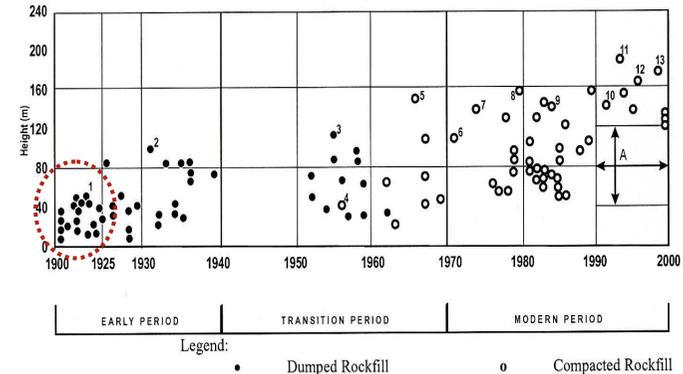
Hauteur: 23m  
**Fruits amont/aval: 0.5/1.25-1.0**  
 Masque d'étanchéité amont: Bois  
 Enrochement interne : *enrochement lâche*  
 Perré amont en **maçonnerie sèche**: épaisseur: 4.6m à 1.5m

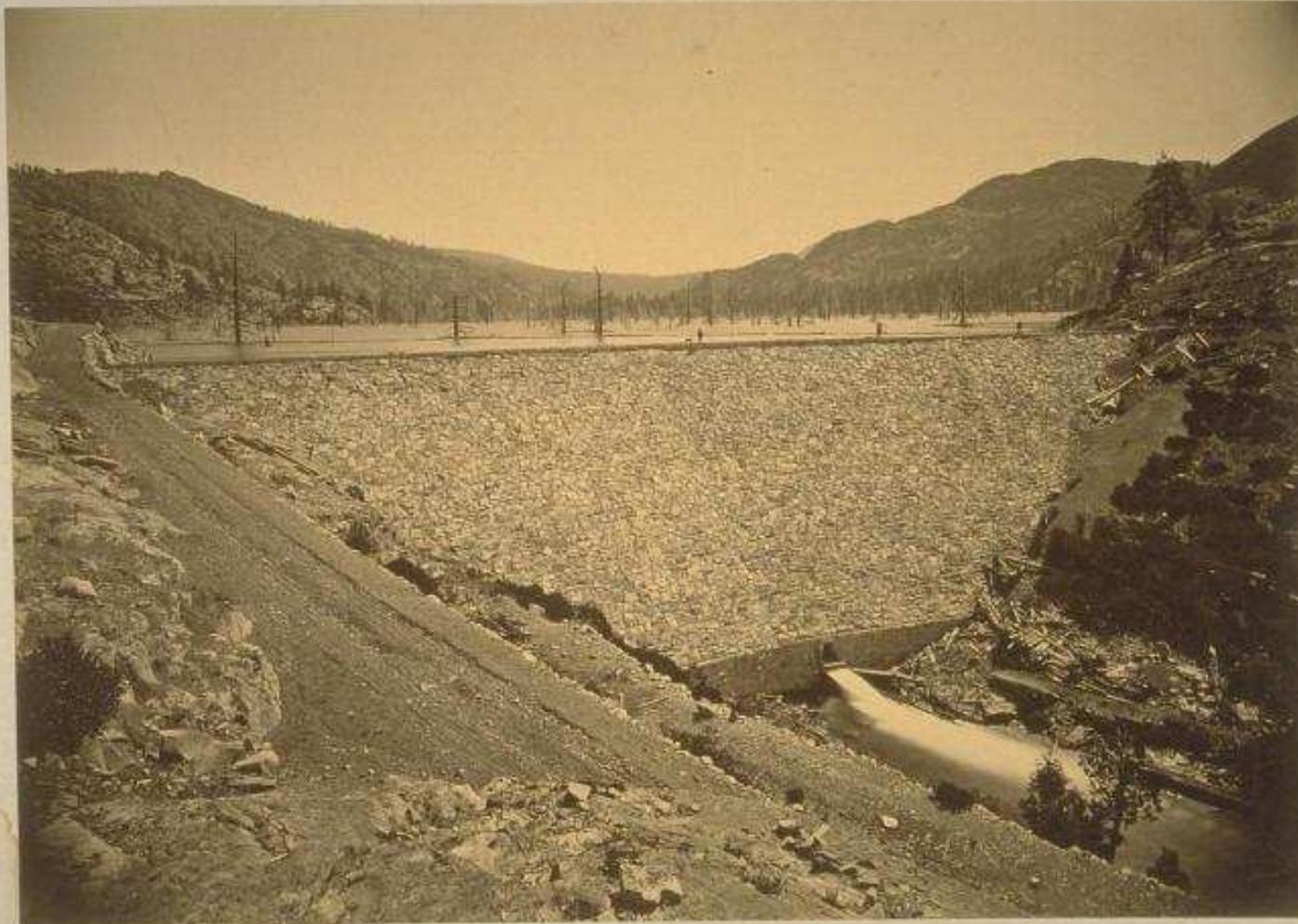
## Bear River Dam (1900)

Hauteur: 24m  
**Fruits amont/aval: 0.5/0.75**  
 Masque d'étanchéité amont: Bois  
 Enrochement interne : *blocs de petites taille + fines.*  
 Perré amont en **maçonnerie sèche**: épaisseur: 5.0 m à 2.5m

## Meadow lake Dam (1903)

Hauteur: 18 m  
**Fruits amont/aval: 0.5/0.75**  
 Masque d'étanchéité amont: Bois  
 Enrochement interne : .....  
 Perré amont en **maçonnerie sèche**: épaisseur: 1.8 m à 1.8m





BOWMAN DAM,  
SISKIYOU COUNTY, CALIFORNIA

### Steele & Cook

Rockfill dams: Salt Spring  
and lower Bear River Concrete Face dams  
American Society of Civil Engineering  
Août 1958

« ... these early impervious face rockfill dams, of 23m to 42 m heights and ages of 30 to 85 years, have given **excellent** service with nominal, if any, maintenance except for replacing timber face by gunite in two cases.

**There has never been any question as to safety... »**

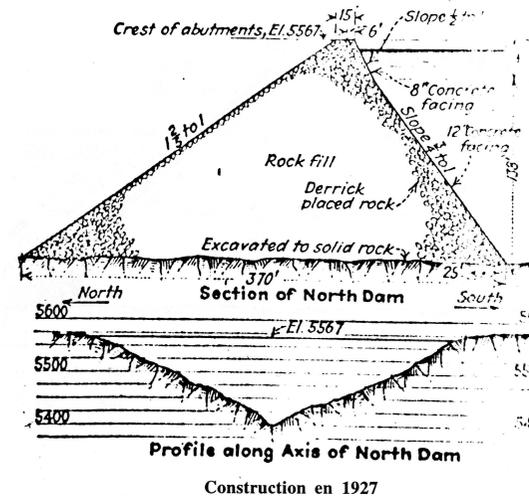
#### Ruptures par submersions

- Walnut Grove Dam

h=33 m:  
1888 → février 1890

- Lower Otay Dam

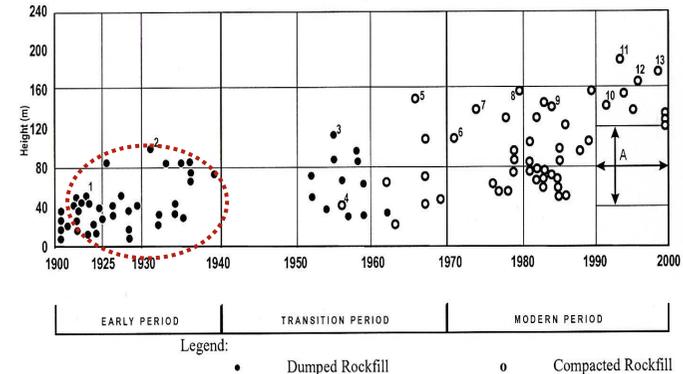
h=40 m:  
1905 → Janvier 1927



## Historique des « CFRD » avant 1960

→ Angle de pente de talus naturel: → 1.3-1.4 / 1

Nécessité de mise en œuvre d'un perré aval  
Main d'œuvre



### Dix River Dam (1923-1925)

Hauteur: 84m

Fruits amont/aval: 1.0-1.2/1.4

Masque d'étanchéité amont: béton

Enrochement interne : *enrochement lâche*

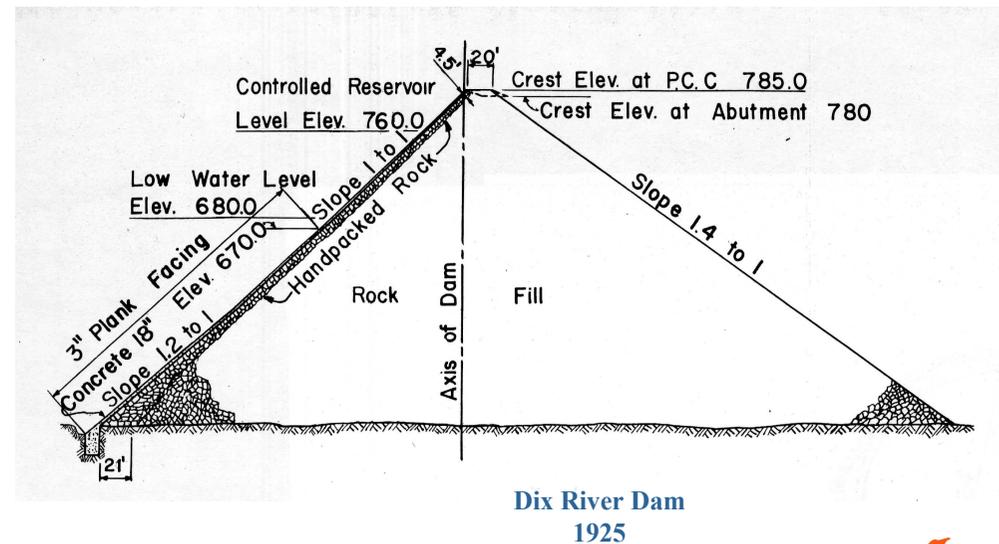
### Salt Spring Dam (1931)

Hauteur: 100 m

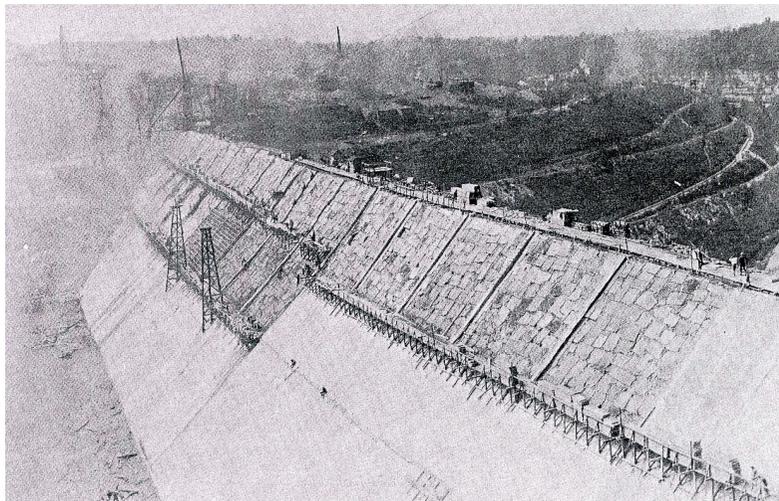
Fruits amont/aval: 1.0-1.4/1.4

Masque d'étanchéité amont: béton

Enrochement interne : *enrochement lâche*



## Historique des « CFRD » avant 1960



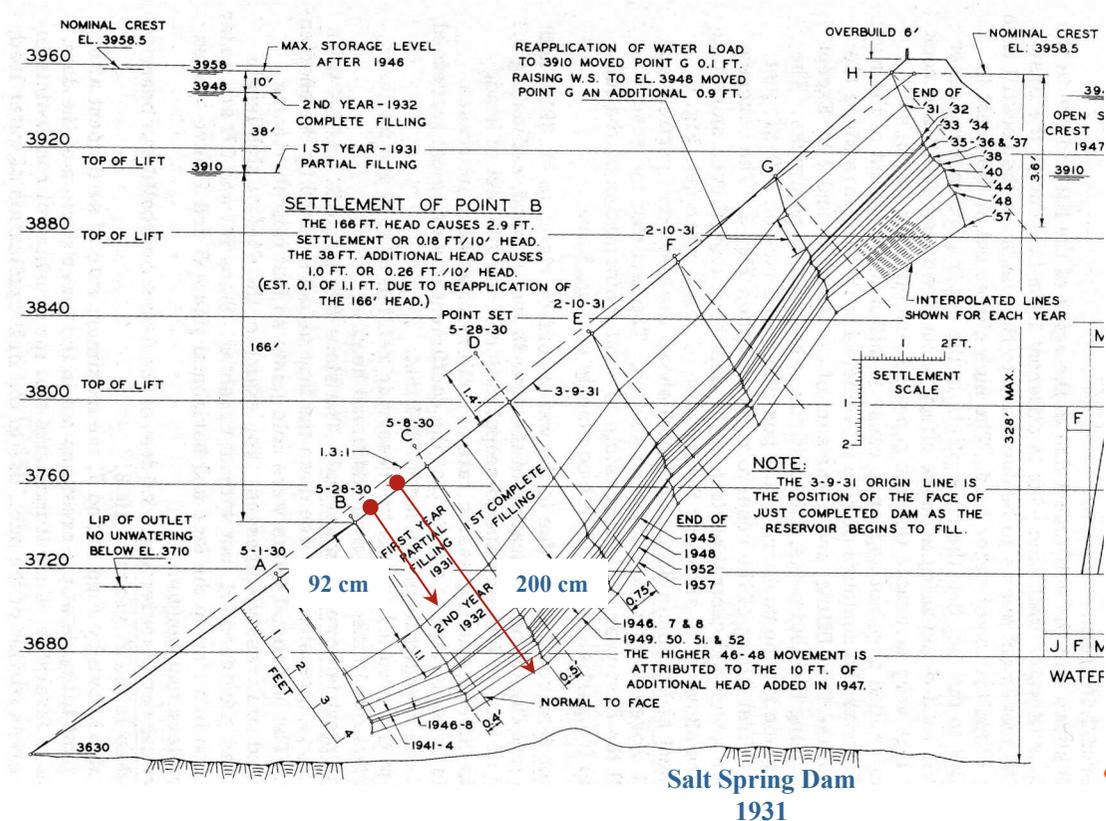
# Historique des « CFRD » avant 1960

## Tassements immédiats et différés importants

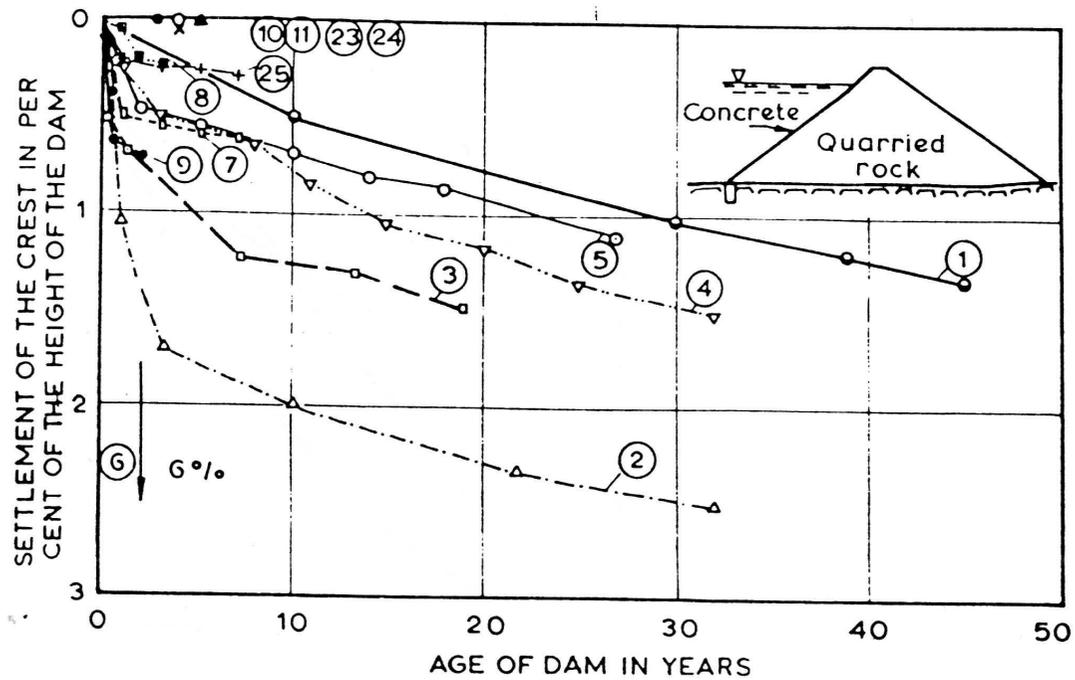
- Cogswell: 85 m → 5.10m (passage d'une crue)
- Salt Spring: 100 m → 2.80m

Tassement: 1.5-2%

- Diminution de la revanche
- Fissuration du masque



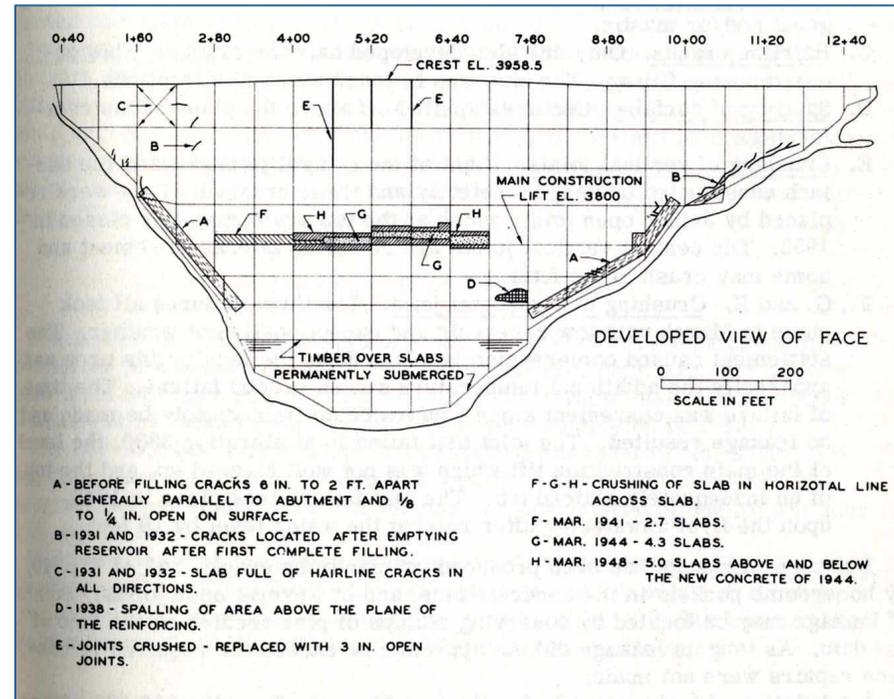
# Historique des « CFRD » avant 1960



- |                |                         |                         |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| ① Bowmann      | ⑥ San Gabriel no.2      | ⑪ The Quoich            |
| ② Swift        | ⑦ Lower Bear River no.1 | ⑫ Genkel                |
| ③ Strawberry   | ⑧ Montgomery            | ⑬ Henne                 |
| ④ Dix River    | ⑨ Wishon                | ⑭ Lower Bear River no.2 |
| ⑤ Salt Springs | ⑩ Nissaström            |                         |

## Dégradation du masque

## Fuites

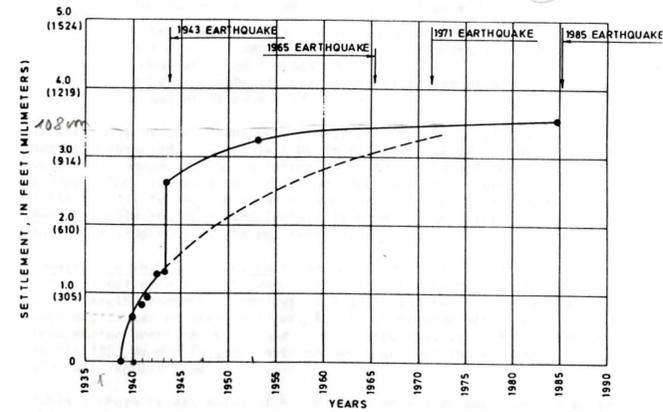


Hauteur limite  $\approx 100$  m

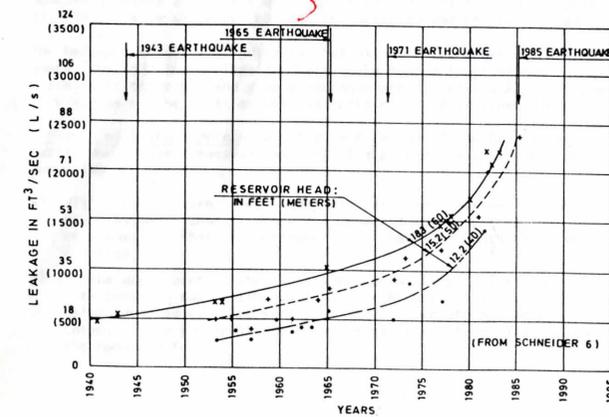
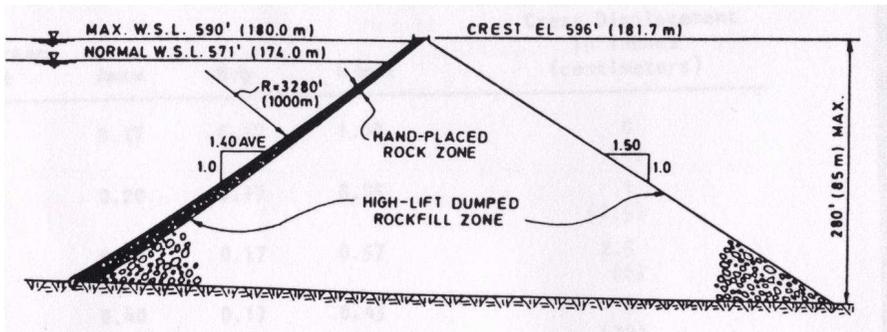
# Historique des « CFRD » avant 1960



## Barrage de Cogoti Chili 1938

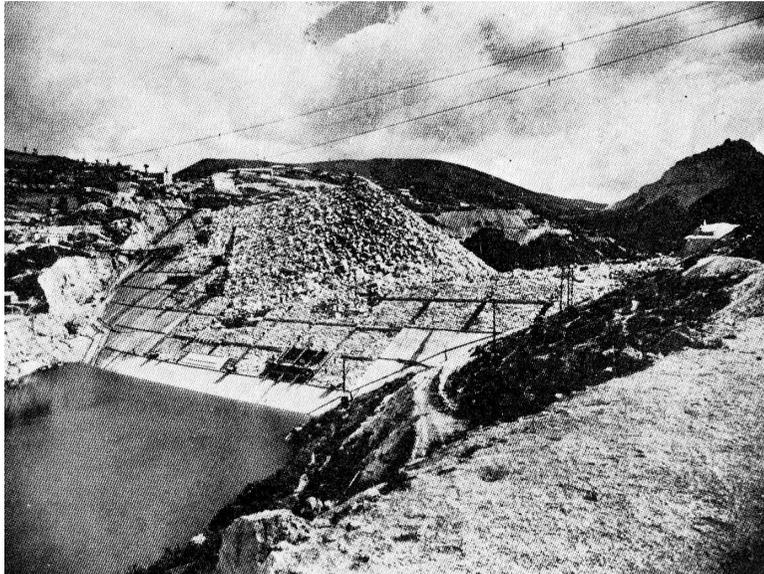


CREST SETTLEMENT CURVE



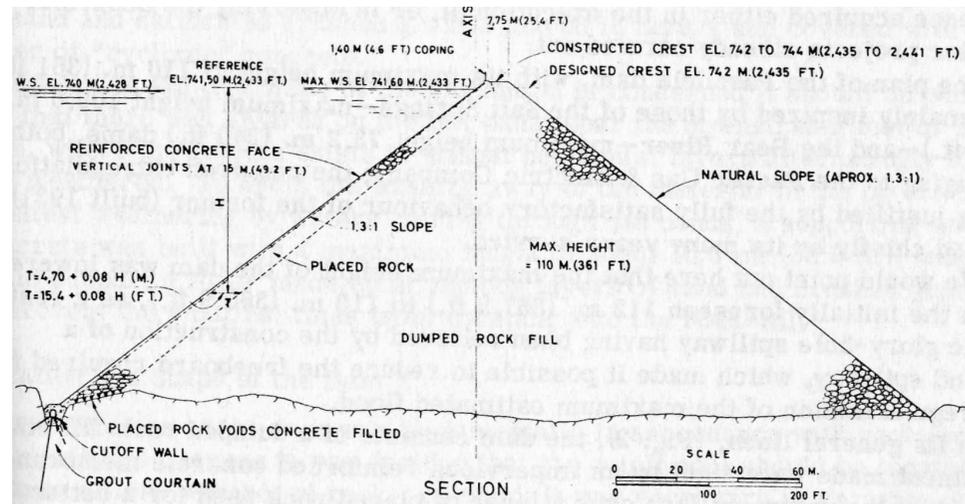
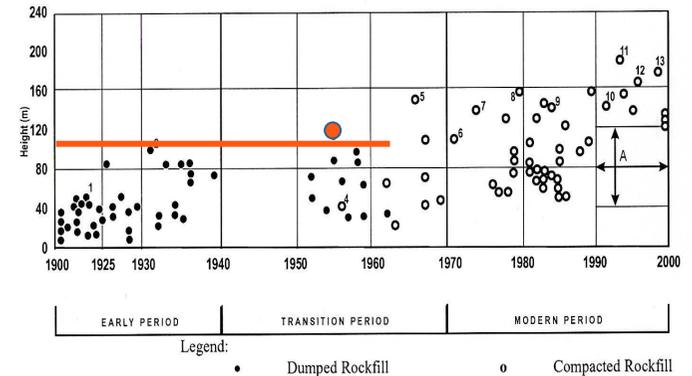
LEAKAGE AT COGOTI DAM

# Historique des « CFRD » avant 1960

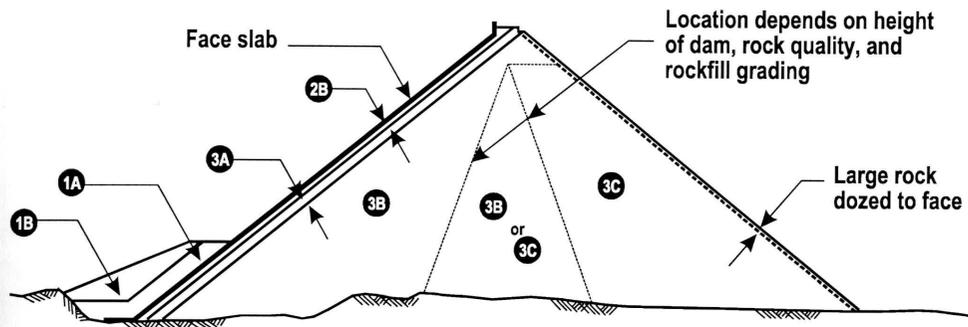


**Barrage de Paradela**  
(Portugal)

110 m

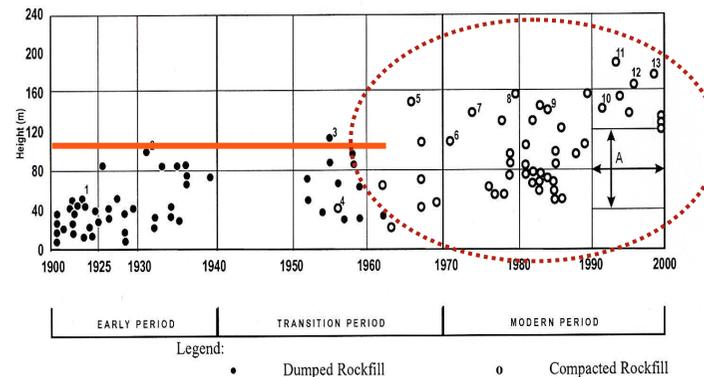


# Historique des « CFRD » avant 1960



### Dam Section

- 1A Cohesionless fine-grained soil
- 1B Random fill
- 2A Perimeter zone filter
- 2B Processed minus 75 mm
- 3A Selected rockfill - 0.4 m layers
- 3B Quarry run rockfill - 1 m layers
- 3C Quarry run rockfill - 2 m layers



Segredo(Brásil 1993)



## Barrage en maçonnerie sèche

### → Italie

(17 ouvrages en 1949)

$30\text{m} < h < 50\text{m}$

→ Belice

→ La Gela

→ Mont Cavalli

### → Afrique du Nord

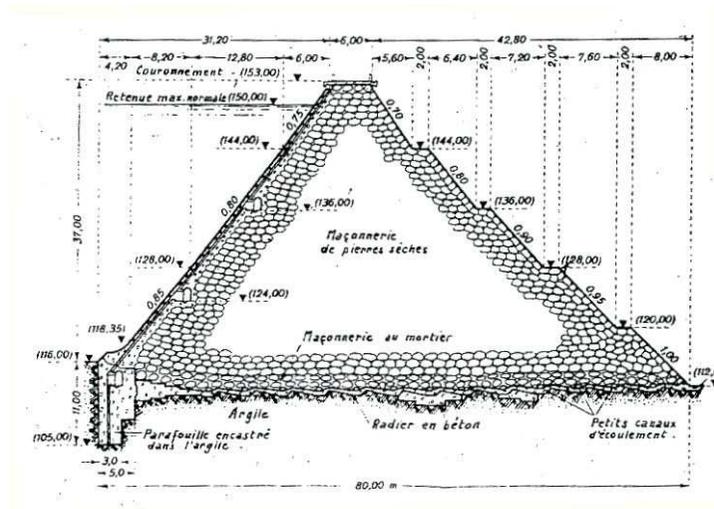
(1930 → 1937)

→ Bakhadda (45 m)

→ Bou-Hanifia (54 m)

→ Foum-el-Gueiss (20m)

→ Ghrib (71m)



## Barrages EDF construits avant 1960

Plan Monnet

1.	Lac Long Supérieur	1919	15.0m
2.	Araing	1942	25.0m
3.	Laurenti	1943	15.0m
4.	Grandes Pâtures	1949	20.0m
5.	Portillon	1950	22.5m
6.	Chammet	1951	19.3m
7.	Gréziolles	1951	30.0m
8.	Escoubous	1953	20.0m
9.	La Sassièrè	1959	30.0m
10.	Candes	1967	55.0m
11.	Les Fades	1968	68.0m
12.	La Coche	1975	35.0m



# Historique des « CFRD » avant 1960

The central map of France is titled 'FRANCE Cartes Interactives Interactive Maps Copyright © 2000 CyberVision Tous droits réservés - All rights reserved'. It features a 'DOK.COM' logo and labels for various French regions: Bretagne, Normandie, Basse Normandie, Pays de la Loire, Poitou-Charentes, Aquitaine, Midi-Pyrénées, Auvergne, Limousin, Centre, Bourgogne, Franche-Comté, Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, and Corse. Neighboring countries like Belgique, Allemagne, Italie, Espagne, and Suisse are also labeled. Red arrows originate from specific points on the map and point to six different photographs of dam structures:
 

- Top-left: A dam in a rocky, mountainous landscape with snow patches.
- Middle-left: A large concrete dam with a spillway.
- Bottom-left: A dam with a gravel embankment on a hillside.
- Bottom-center: A dam in a snowy mountain landscape.
- Bottom-right: A dam with a gravel embankment in a green valley.
- Top-right: A dam under construction with a crane.
- Middle-right: A dam with a gravel embankment in a mountain valley.



Fruit aval : 1.  
 Fruit amont: <1

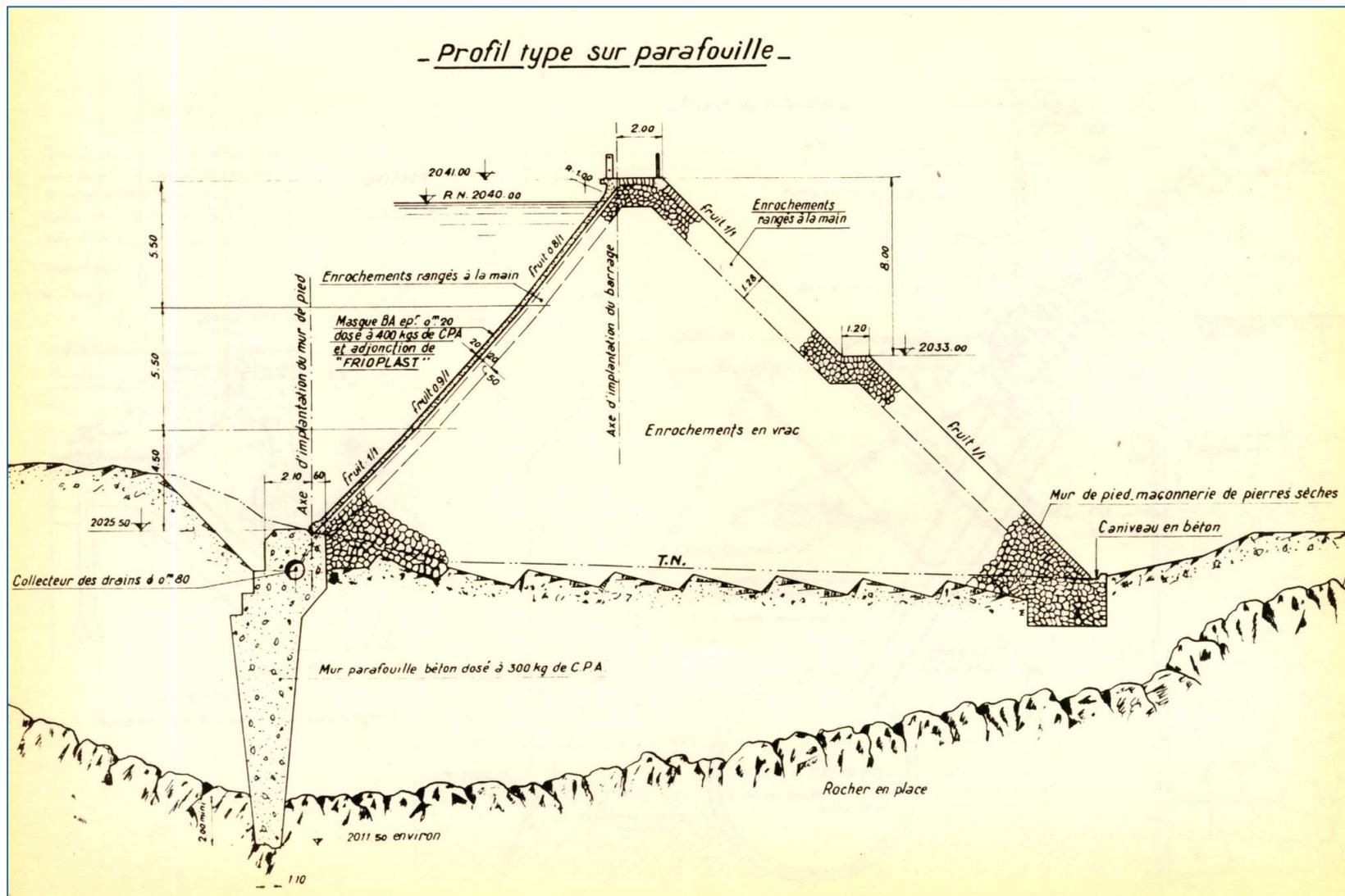
1.	Lac Long Supérieur	1919	1.0	0.5
2.	Araing	1942	1.0	0.9-0.8
3.	Laurenti	1943	1.0	0.25
4.	Grandes Pâtures	1949	1.0	0.4
5.	Portillon	1950	1.0	0.5
6.	Chammet	1951	1.0	0.4
7.	Gréziolles	1951	1.0 <td 1.0-0.8	
8.	Escoubous	1953	1.0	0.8

Angle de frottement des enrochements ↔ fruit

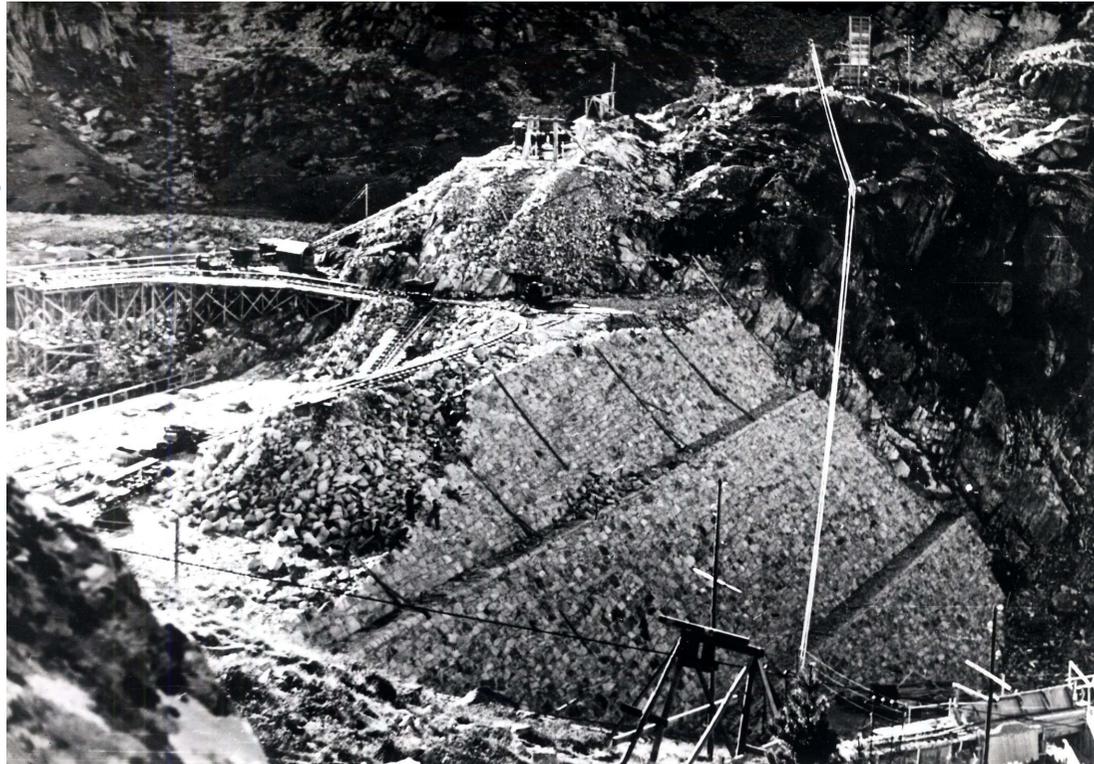
9.	La Sassièr	1959	1.4	1.4
----	------------	------	-----	-----







Forte épaisseur de levées



Granulométrie étroite

Nature géologique

Forte porosité

Ségrégation des enrochements

Pas de compactage

Forte épaisseur de levées

→ 10m

$$\frac{\Delta h}{H} = 0.38 + 8.8 \times 10^{-5} (\text{levée}) \quad (\text{Perrier 1995})$$

Ségrégation des matériaux

→ Variation de granulométrie

→ Variation de densité



Pas de compactage

Mise en œuvre à sec

Faible arrosage

Nature géologique

Roches peu altérables et très résistantes

-Granodiorites

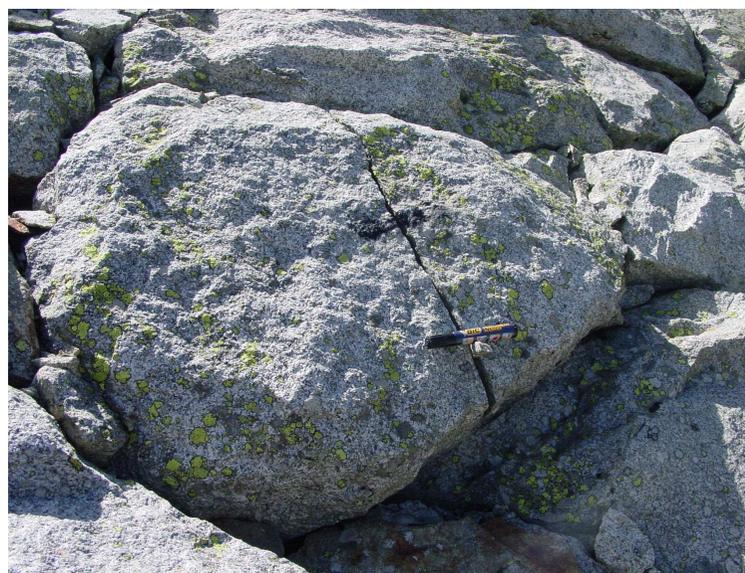
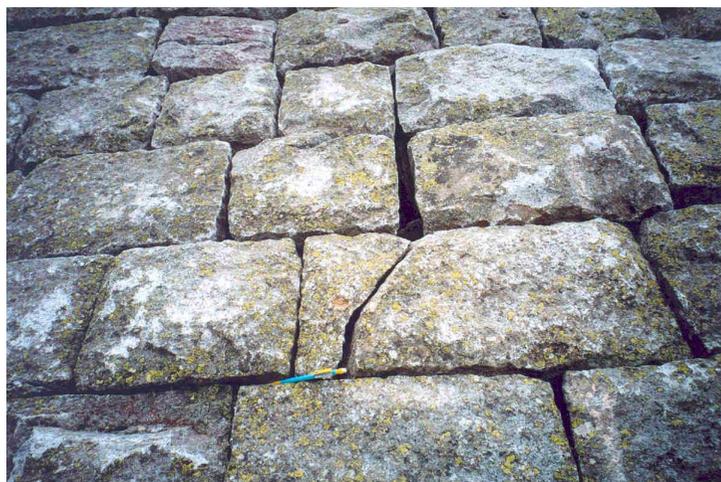
-Schistes

-Granites et gneiss



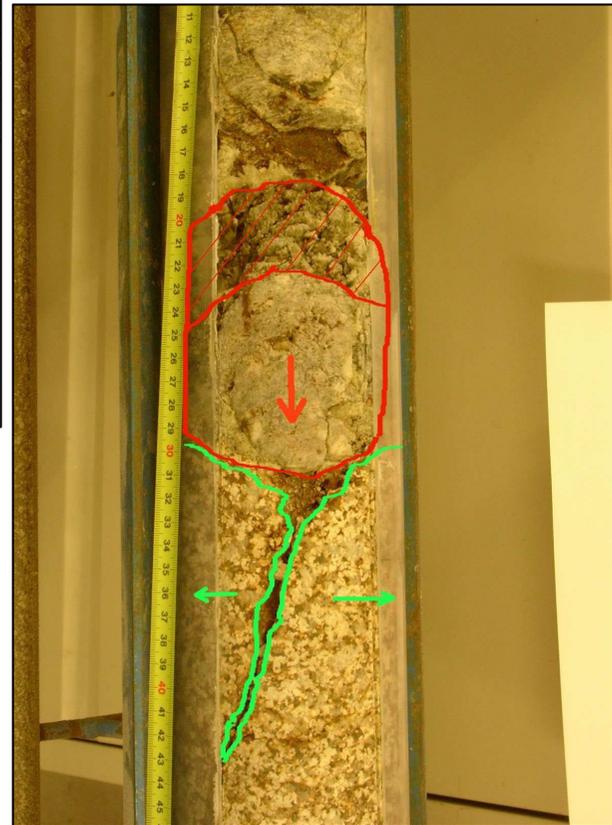
Centre d'Ingénierie Hydraulique





# Caractéristiques techniques spécifiques

## Enrochement



E D F Direction de l'écoulement SITE GÉNÉRAL PRIMAEL  
 Division Géologie Géotechnique Nbre d'ouvr. sondage SC 502-05  
 exécuté par TEALATTC de 28-11-2001 au 03-11-2001

profondeur (m)	niveau	description	coupe	distances		essais d'eau	observations
				en m	en %		
0.00	114	État de grande eau					
0.52	113.5	État de grande eau					
0.88	113.2	État de grande eau					
1.14	112.9	État de grande eau					
1.40	112.6	État de grande eau					
1.76	112.3	État de grande eau					
2.12	112.0	État de grande eau					
2.48	111.7	État de grande eau					
2.84	111.4	État de grande eau					
3.20	111.1	État de grande eau					
3.56	110.8	État de grande eau					
3.92	110.5	État de grande eau					
4.28	110.2	État de grande eau					
4.64	109.9	État de grande eau					
5.00	109.6	État de grande eau					
5.36	109.3	État de grande eau					
5.72	109.0	État de grande eau					
6.08	108.7	État de grande eau					
6.44	108.4	État de grande eau					
6.80	108.1	État de grande eau					

### Granulométrie étroite

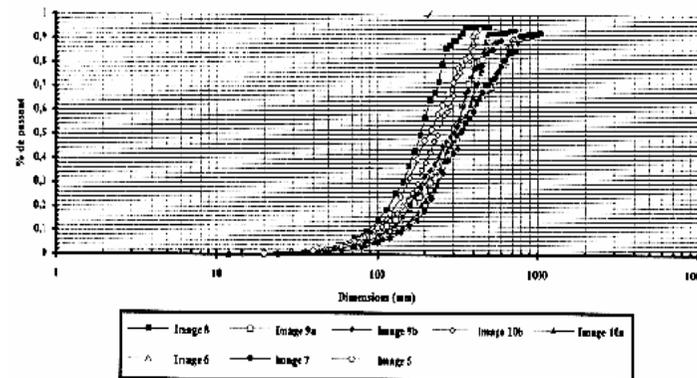
Document interne EDF 1954

- Afin d' « ...éviter la formation de nids de petits matériaux qui pourraient favoriser d'importants tassements... il est préférable d'utiliser des blocs de dimensions à peu près uniformes afin d'obtenir un massif dont les blocs sont directement en contact... »

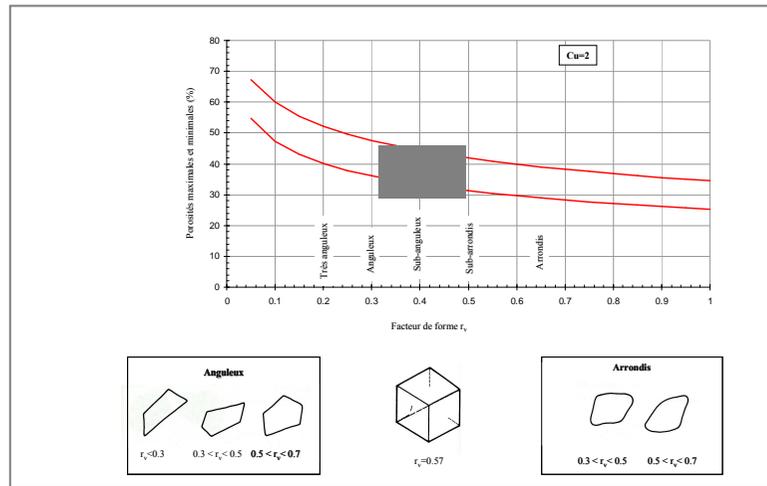
J.D. Galloway ASCE 1937

- « ... It is believed that the fill should be composed of individual rocks of fairly uniform size, one rock bearing directly upon another, usually expressed as « rock to rock » ... »

Coefficient d'uniformité  
 $C_u < 10$



### Forte porosité



**Talobre**  
 "... pour un remblai de vrac pur... le volume des vides est de l'ordre de 40% ..."

**Girardeau:** Barrage de Grandes-Pâtures  
 Enrochement grossièrement rangé :  $n=40\%$   
 Rangé à la main et partiellement maçonnée côté parement amont :  $n=20\%$

**Barrage de Chammet**  
 Porosité globale pour "...l'ensemble de l'ouvrage..." est estimée à 34%.  
 Enrochement rangé à la main ==> porosité de 40%  
 Maçonnerie sèche ==> porosité de 20%  
 la porosité globale de l'ouvrage, calculée au prorata des surfaces sur la section type, serait de 35%.

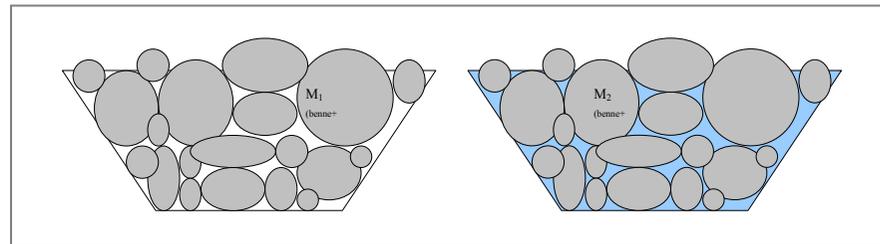
**Barrage de la Gela (Contessini 1951)**  
 → 3 échantillons de maçonnerie sèche  
 → ... beaucoup de soin avec un personnel spécialisé... 17%  
 → ... même personnel sans soins particuliers... 26%  
 → ... personnel inexpérimenté avec des pierres quelconques... 32%

**Villemus (2004)**  
 → murs en pierres sèches  
 → ... calcaire...déchets de taille... 23% à 27%  
 → ... schistes ... de formes élancées... 24% à 32%

**Manual of the Use of Rock in Coastal Shoreline Engineering**  
 → ... blocs de gros diamètres déversés 40% à 47 %

**Barrage de Salt Spring (1931)** → Déversé: 29 %

**Barrage de Quoich (1931)** → Déversé en carrière : 41 %



## Mode de mise en œuvre

- Déversé sec
- Déversé arrosé
- « *Grossièrement* » rangé à la main
- Maçonnerie sèche
- ...

## Granulométrie

- Étroite
- Étalée

## Forme

- Arrondis
- Anguleux
- ...

## Porosité

20% - 25%

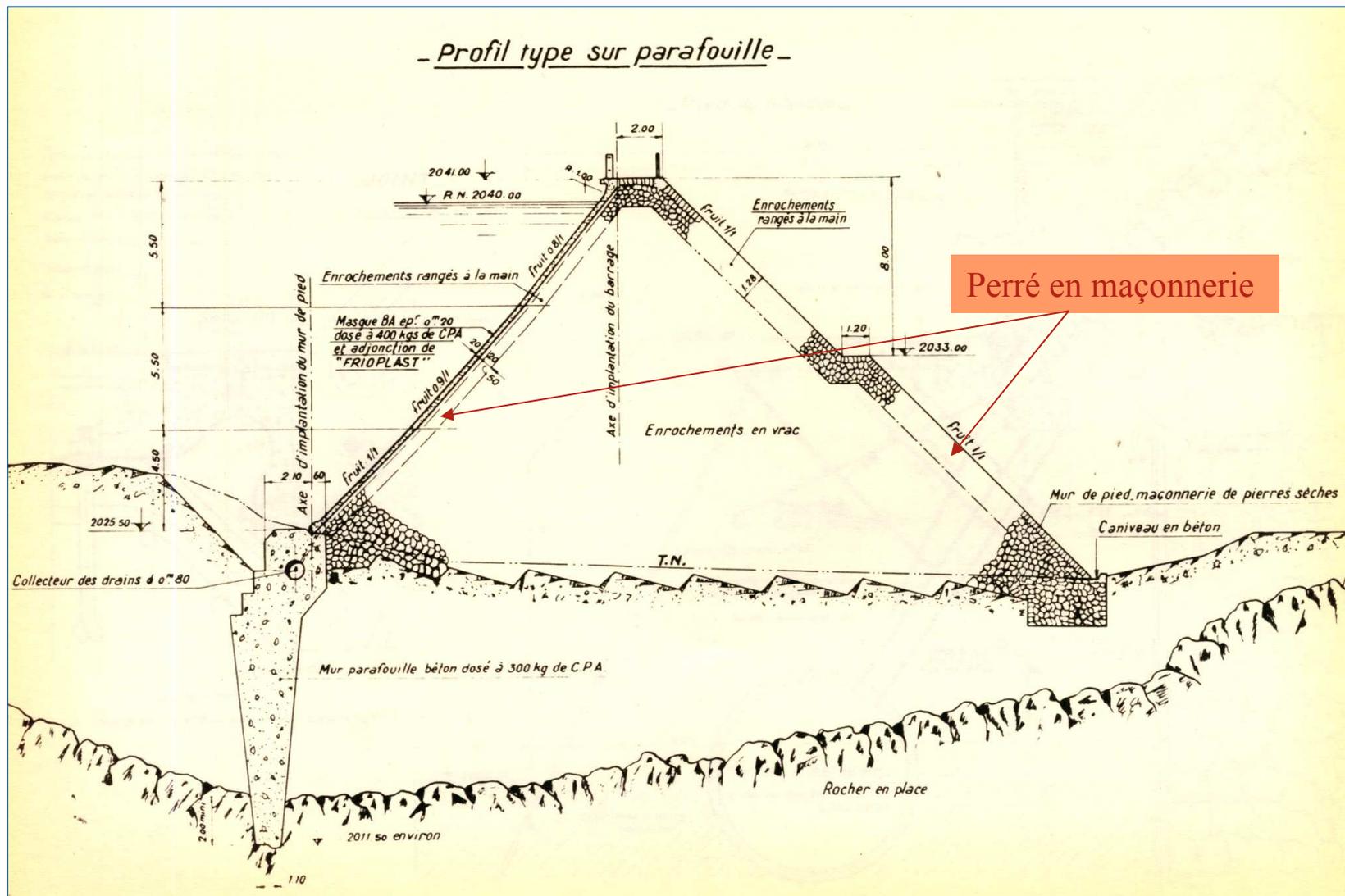


28% - 32%



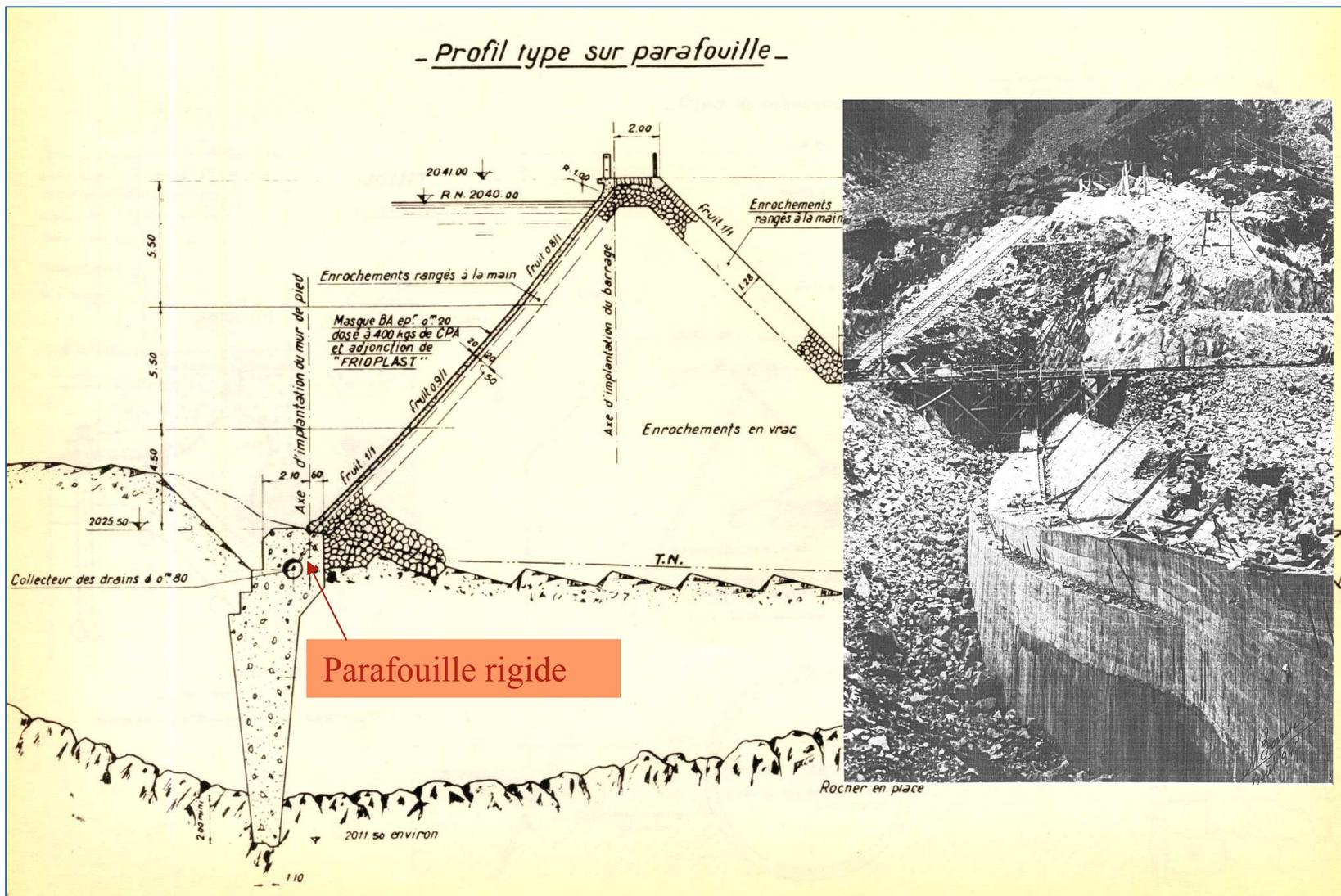
40% - 45%











## Comportements caractéristiques

### Géométrie

Fruits très faibles

Changements de profil

### Matériau

Matériaux non compactés

Faible densité

### Structure

Barrages hétérogènes

Structures rigides ↔ Matériau déformable

Perrés  
Parafouille

Enrochement interne

Comportements

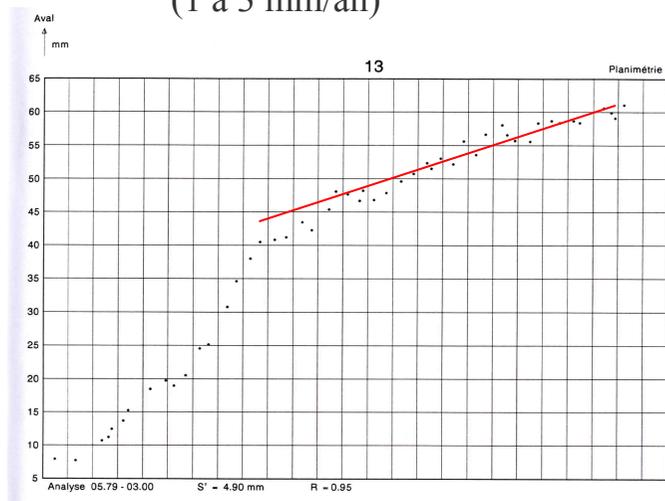
spécifiques

Pathologies

## Tassements

-1<sup>ere</sup> mise en eau  
0.7% à 1.2%  
(20 – 30 cm)

-Différés  
0.006%/an à 0.01 %/an  
(1 à 3 mm/an)



## Conséquences de ces tassements

### Déformations du parement aval

Gonflements localisés  
Plissement et ruptures de blocs  
Basculement des risbermes vers l'amont



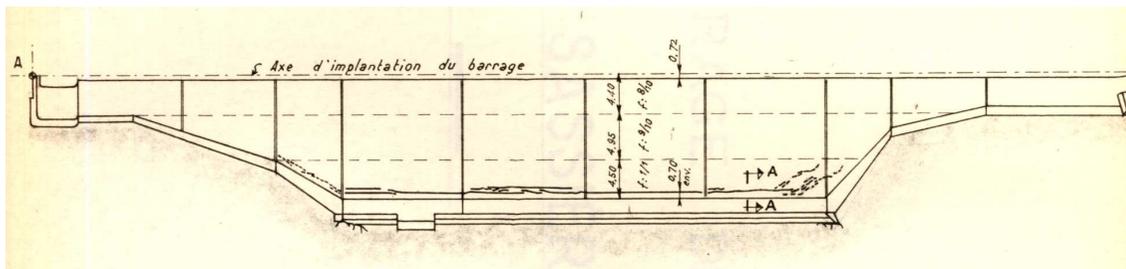
Centre d'Ingénierie Hydraulique



Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006

## Conséquences de ces tassements

Dégradation de l'étanchéité  
et  
Augmentation progressive des fuites



## Conséquences de ces tassements

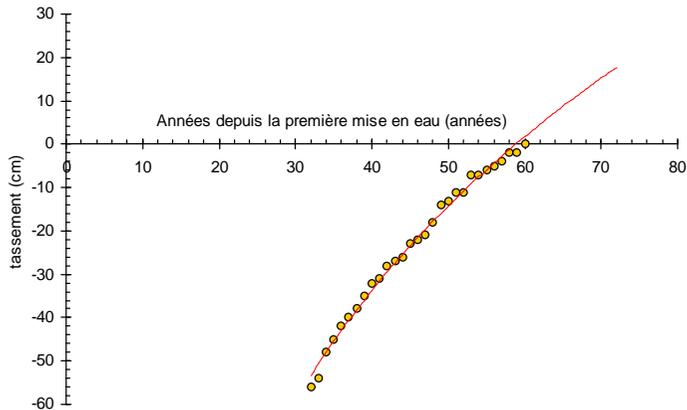
Réduction de la revanche

Hypothèse fondamentale

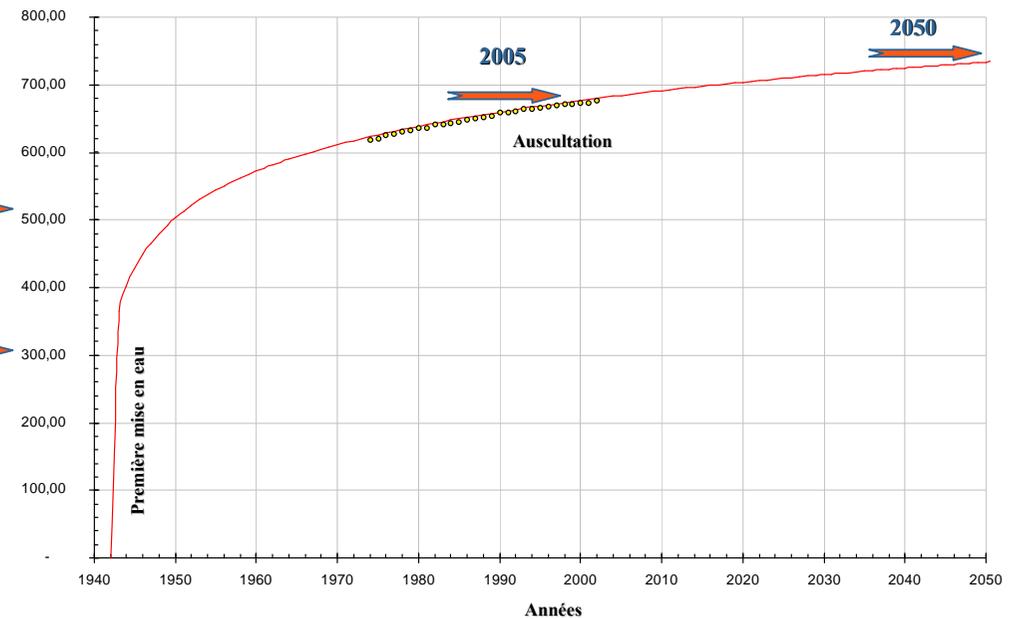
Pas de modification du mécanisme

Première mise en eau + 9 ans (1951)

Première mise en eau



Tassement total (mm)



## Compréhension - Modélisation - Prédiction

**Comprendre** → le comportement mécanique au niveau micro & macro

**Définir** → le niveau et la marge de sécurité vis à vis d'un mode de ruine

**Prédire** → le comportement sous sollicitation accidentelle et  
les conséquences du comportement différé  
(sécurité, exploitation)

Microbe  
(RGCU)

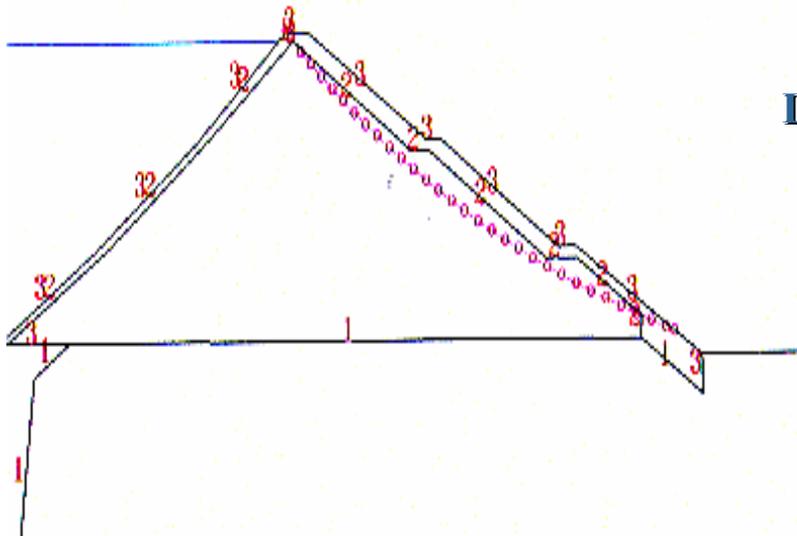
ACABECE  
(EDF)

## Calculs de stabilité limite

*Cercles et surfaces de glissement*

→ *Définition d'un coefficient de sécurité statique et pseudo-statique*

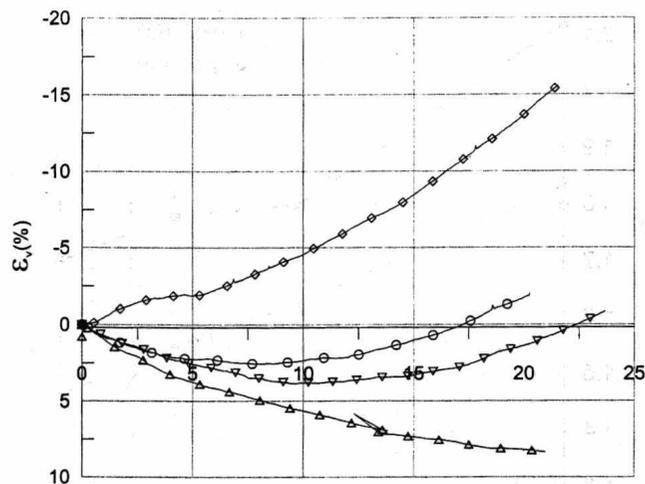
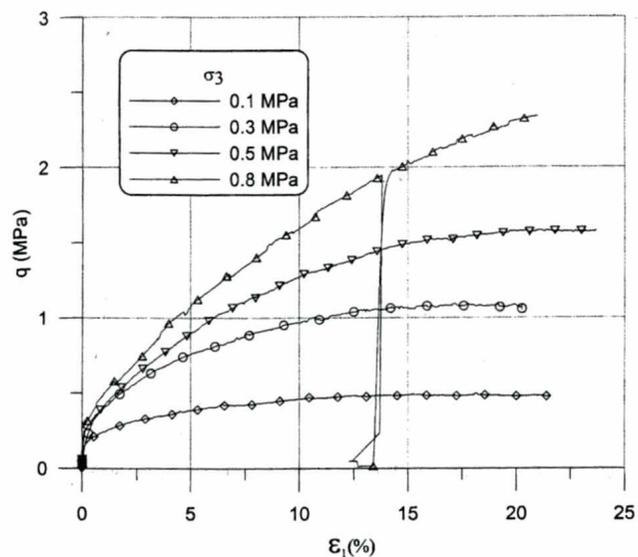
→ *Démarche d'interprétation* ↔ *Critères « usuels »*



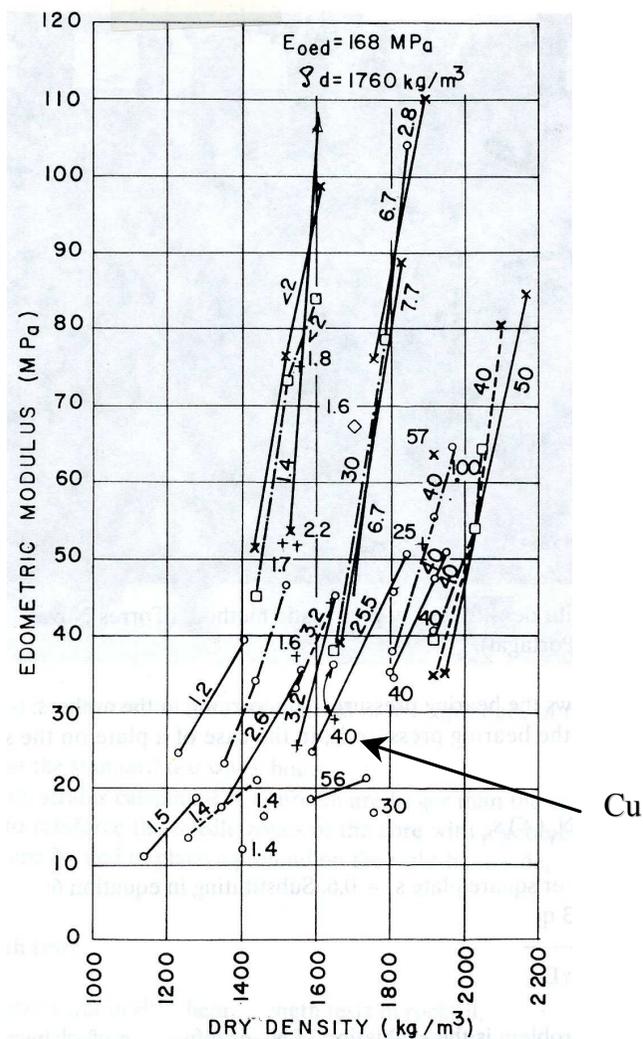
**Cette approche ne prend pas en compte**

**Le mode de fonctionnement réel et le rôle du perré**

**La rhéologie « macro »  
spécifique aux enrochements non-compactés**



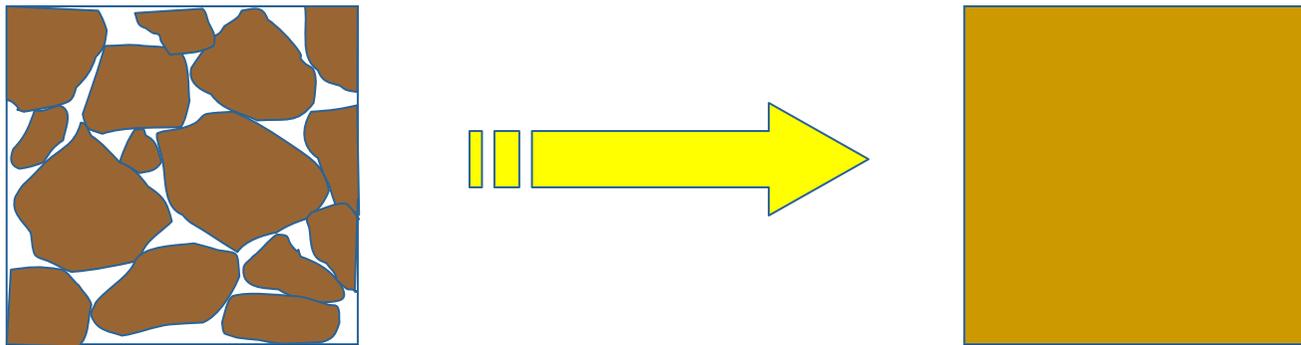
Centre d'Ingénierie Hydraulique



Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



## Approche MMC

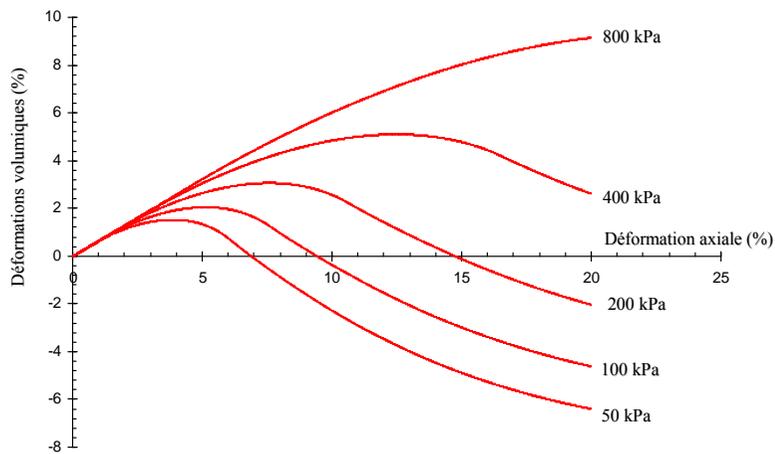
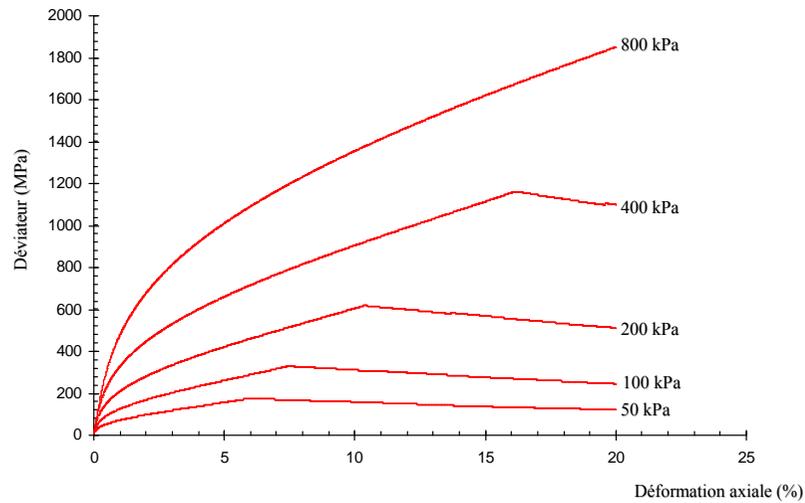


- Choix et justification du modèle rhéologique
- Identification des propriétés mécaniques des enrochements à l'échelle macroscopique

## Choix et justification du modèle rhéologique

### **Cette démarche de justification s'appuie sur:**

- Une identification des mécanismes et de l'influence des caractéristiques d'état
- Une quantification de l'influence des caractéristiques d'état
- Un travail de justification sur des ouvrages auscultés et connus
- L'expérience EDF dans la modélisation rhéologique géotechnique



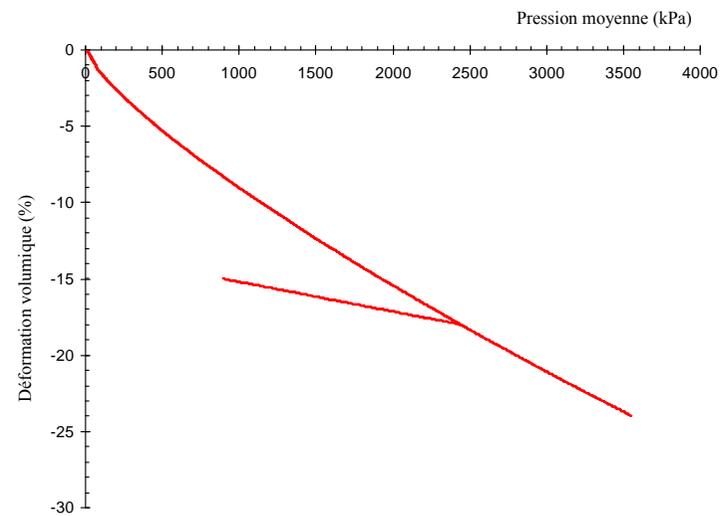
Critère de cisaillement non linéaire fonction de l'état des contraintes

Grande déformabilité irréversible

Contractance-dilatance dépendant de l'état des contraintes

Etat critique

Mécanisme de compressibilité isotrope

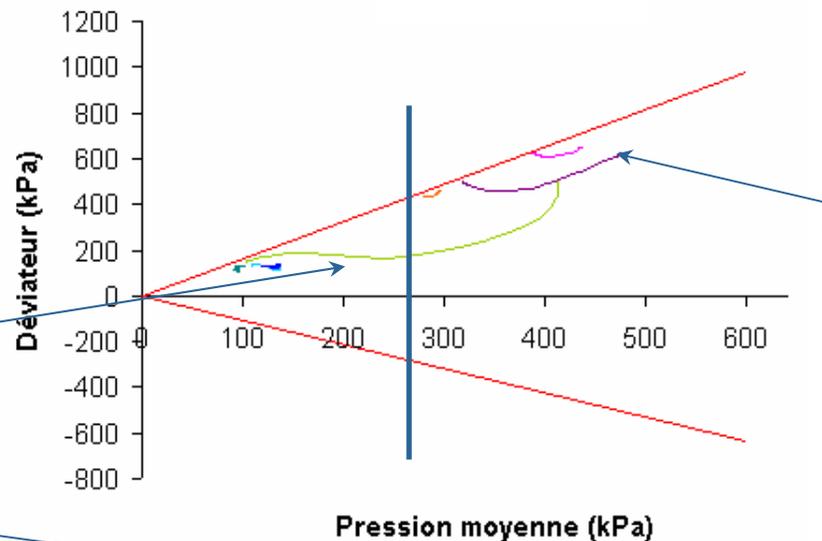
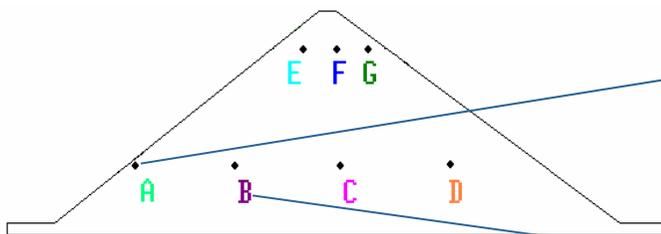
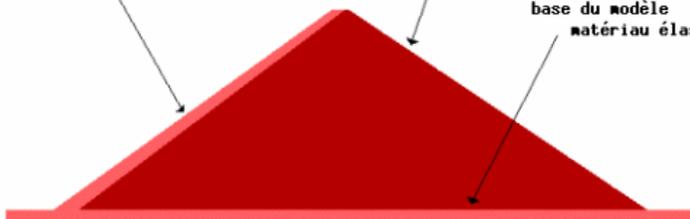


# Compréhension – Modélisation - Prédiction

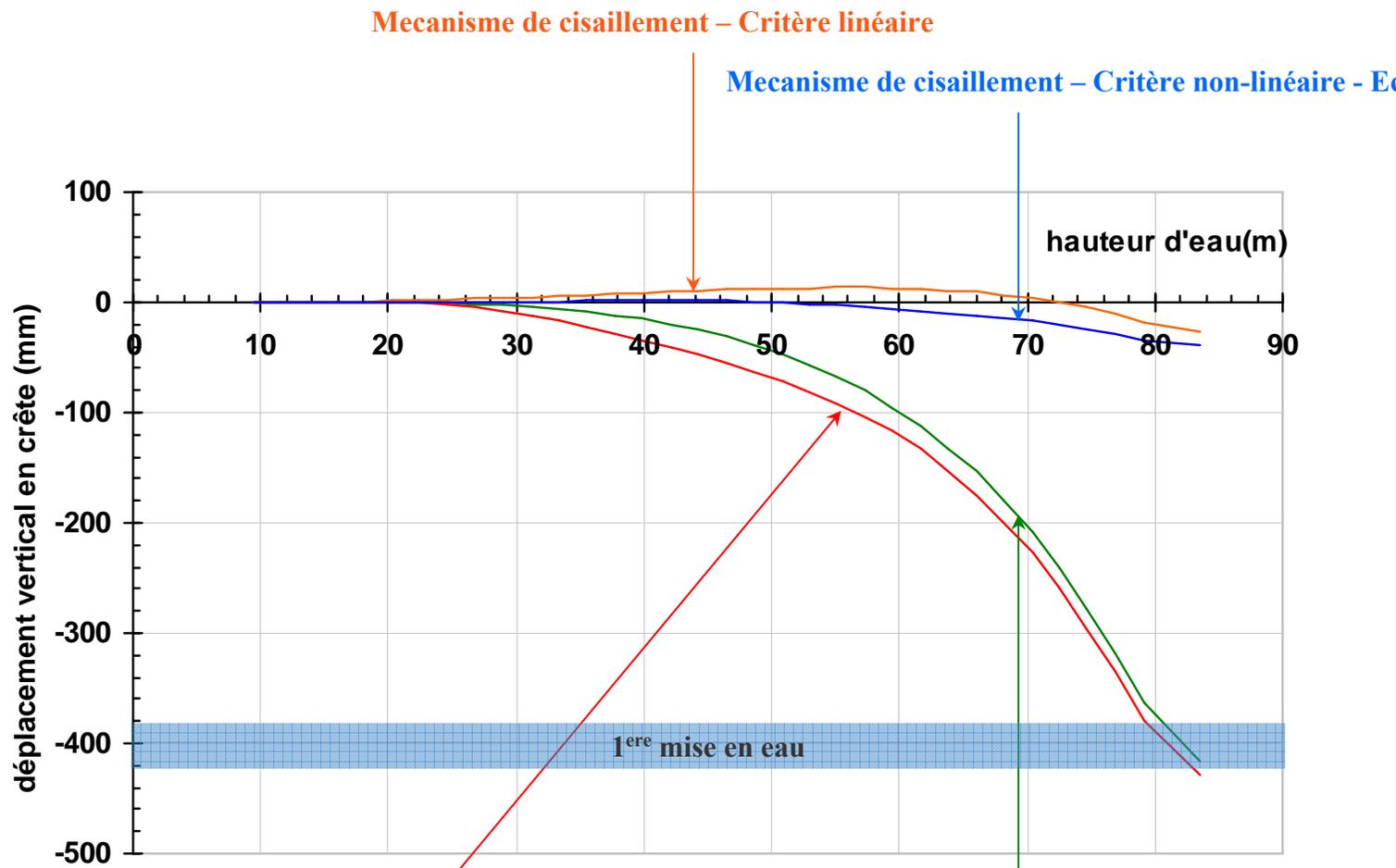
perré en enrochement de pierres sèches matériau élastique

enrochement cinq modèles rhéologiques testés

base du modèle matériau élastique



Centre d'Ingénierie Hydraulique



Mécanisme de cisaillement – Critère non-linéaire - Ecroûissage

+

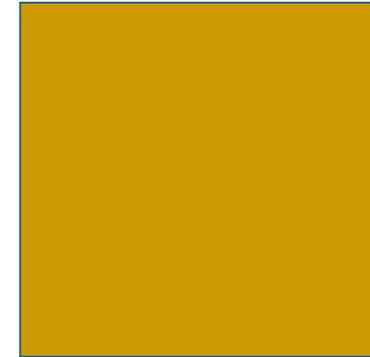
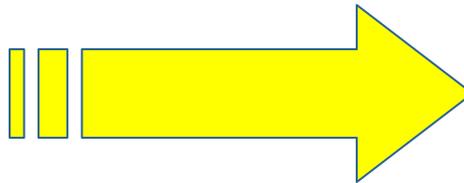
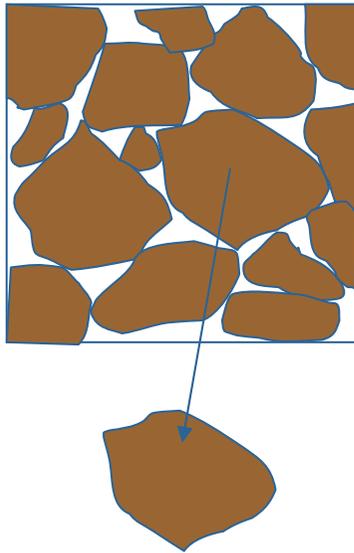
Mécanisme de compressibilité isotrope

Mécanisme de cisaillement – Critère linéaire

+

Mécanisme de compressibilité isotrope

## Identification des propriétés « Macro »



### *Paramètres indépendants géométrie de l'arrangement*

Forme  
Dimension  
Résistance  
Altérabilité  
Nature géologique  
.....

### *Paramètres décrivant la géométrie de l'arrangement*

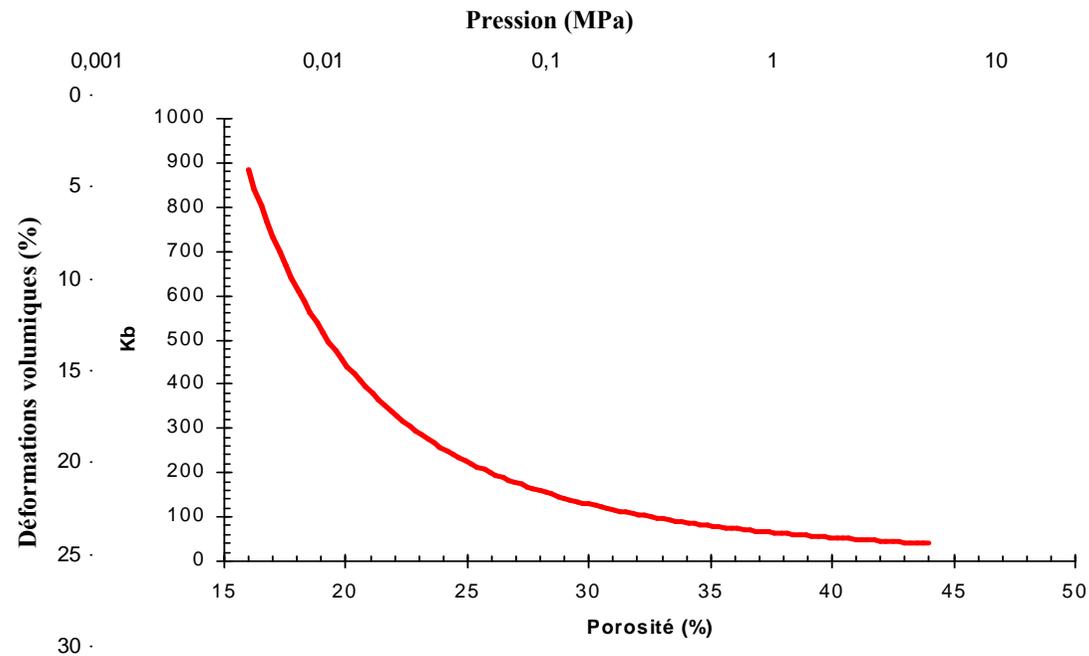


### *Paramètres macroscopiques*

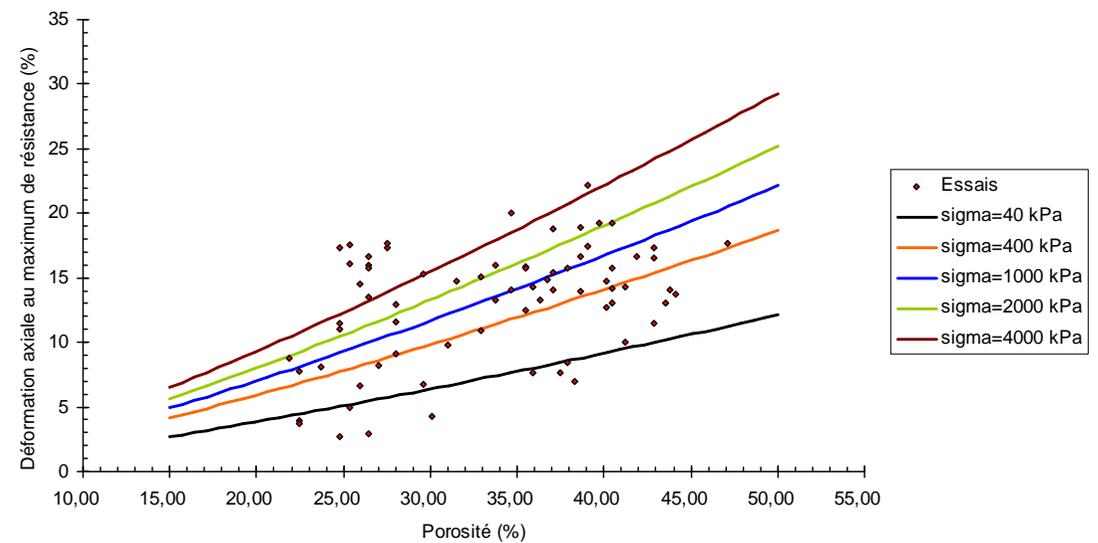
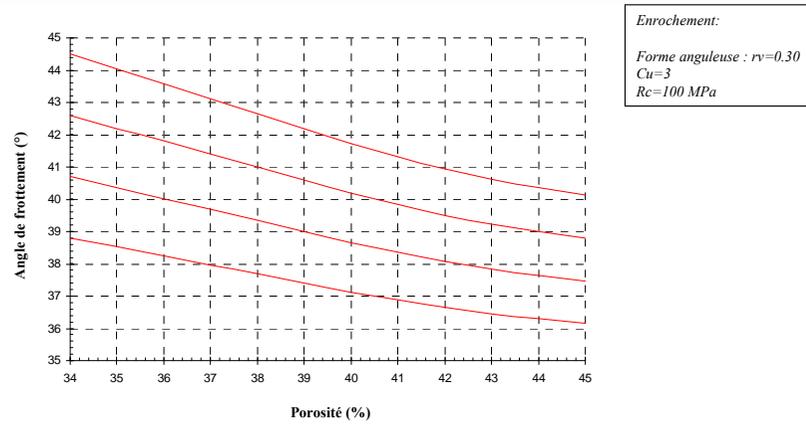
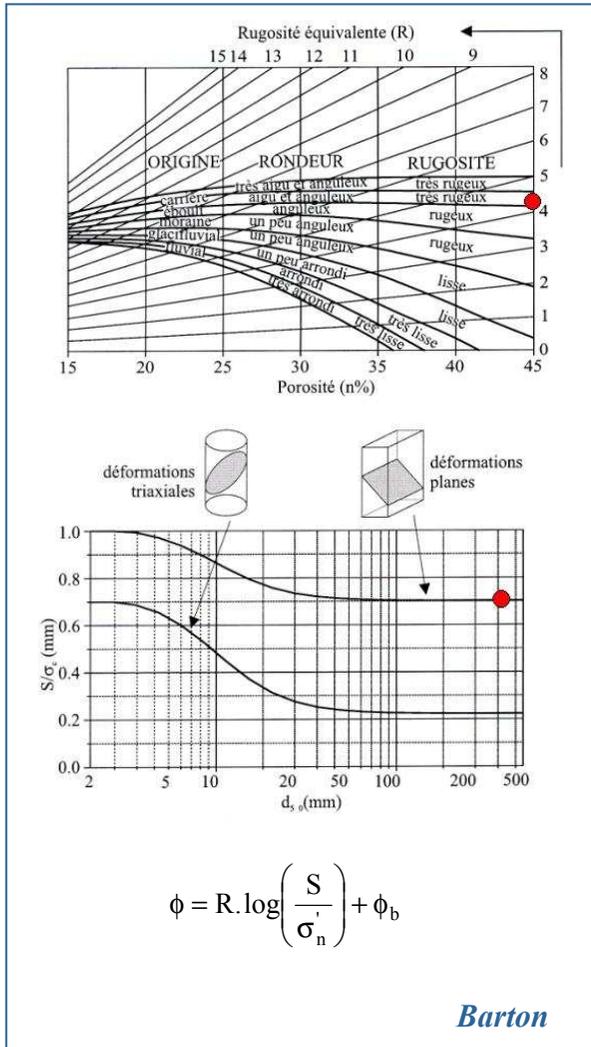
Angle de frottement  
Compressibilité  
Module de déformation  
.....

Analyse en retour du comportement des CFRD

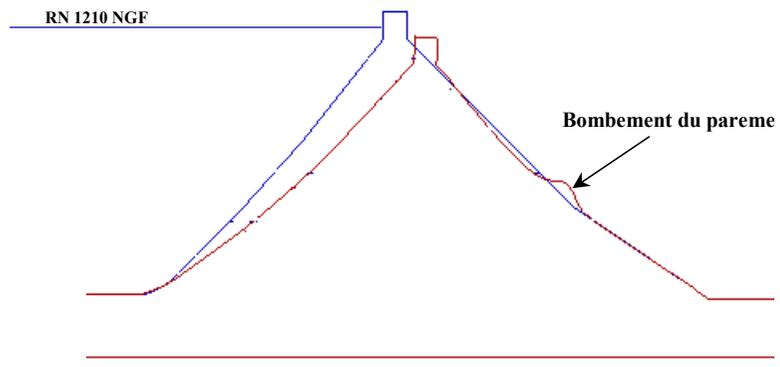
$$B = K_b \cdot P_{atm} \cdot \left( \frac{P}{P_{atm}} \right)^m$$



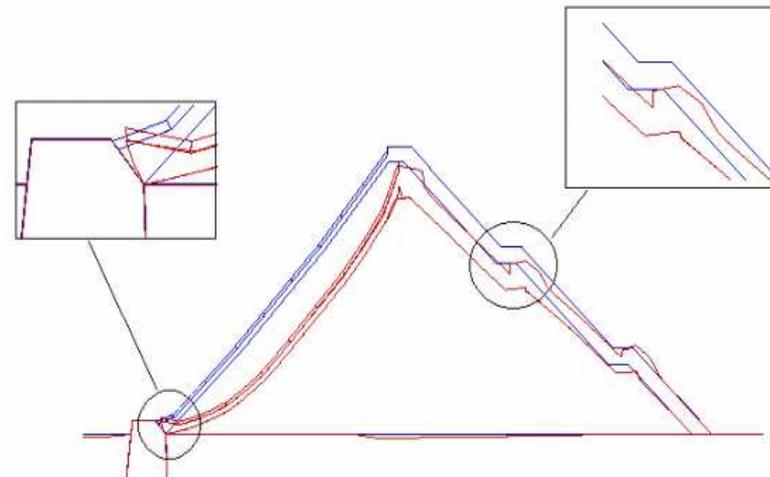
# Compréhension – Modélisation - Prédiction



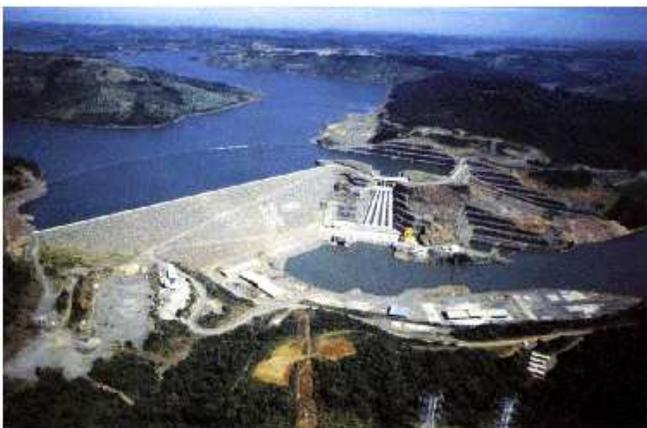
# Justification sur Ouvrages



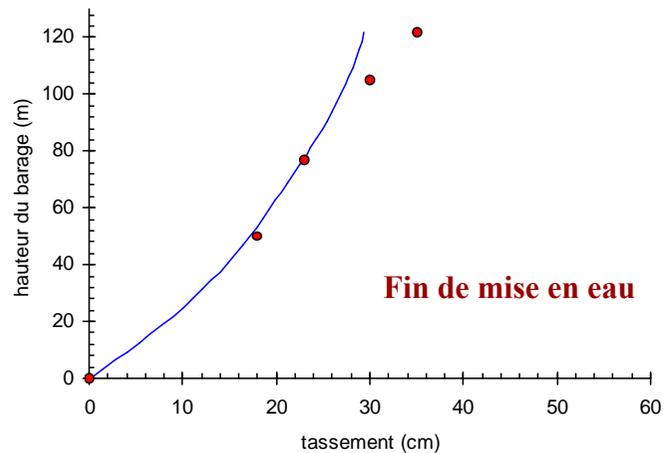
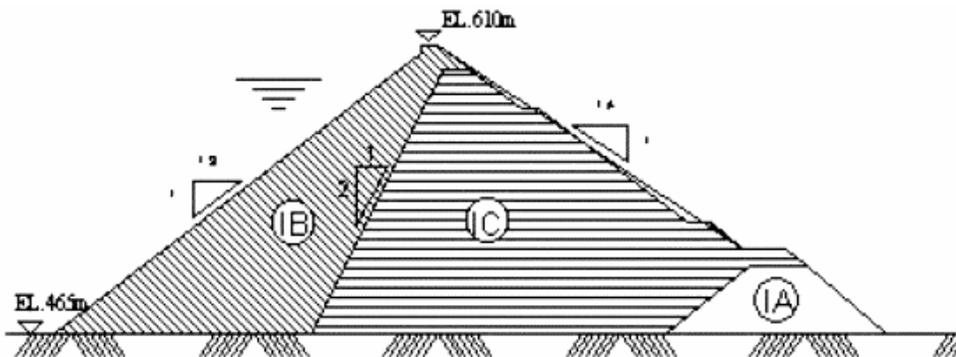
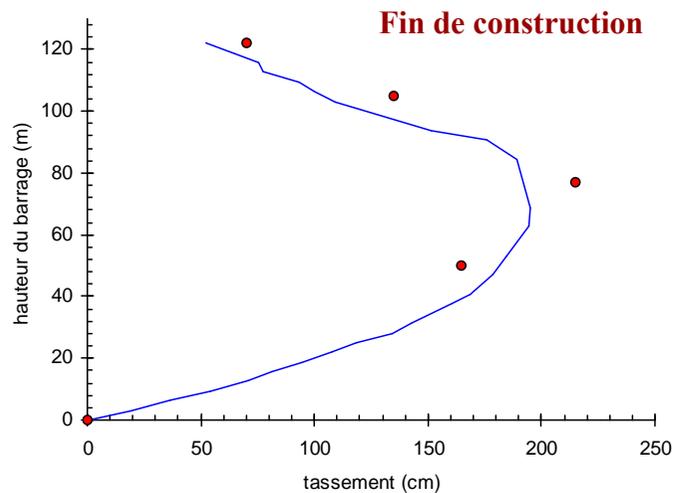
Déplacements induits par la mise en eau  
(Amplification x10)



# Justification sur Ouvrages



Segredo(Brésil 1993)



## Ouvrages « *audacieux* »

Justification actuelle de leur comportement « *complexe* »

Rhéologie des matériaux  
Mode de fonctionnement  
Sollicitations dans l'ouvrage

.....

Amélioration/développement/justification de démarches de calcul et d'analyse

Amélioration  
de la sécurité

Amélioration de la  
performance des  
installations

Optimisation de la  
conception



CFRD

## Rhéologie de l'enrochement

- Rotation des contraintes
- Sollicitation cyclique
- Prise en compte du comportement différé
- .....

## Perrés en maçonnerie

- Caractérisation morphologique
- Caractérisation mécanique
- Critères de stabilité
  
- Applications

Ouvrages hydrauliques (Barrages, quais, ouvrages fluviaux et maritimes...)  
Ouvrages de soutènement en maçonnerie  
Rénovation et réévaluation d'ouvrages anciens

