



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

Centre d'Ingénierie Hydraulique



Historique des « *CFRD* » avant 1960

Caractéristiques techniques spécifiques

Comportements caractéristiques et pathologies

Modélisation et prédiction

Justification sur ouvrages

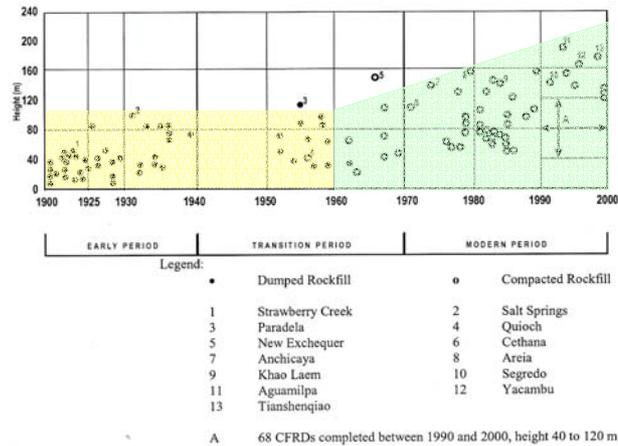


Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Historique des « CFRD » avant 1960



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



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)

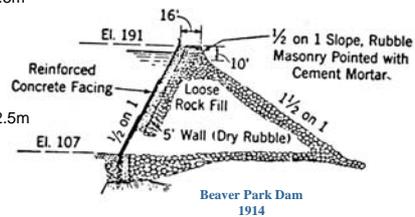
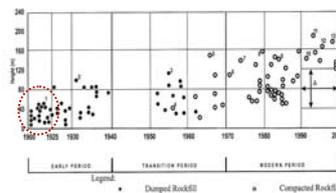
Hauteur: 23m
Fruits amont/aval: 0.5/1.25-1.0
 Masque d'étanchéité amont: Bois
 Enrochement interne : *enrochement lâche*
 Perré amont en **maçonnerie sèche**: épaisseur: 4.6m à 1.5m

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



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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





BOWMAN DAM

Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Historique des « CFRD » avant 1960

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... »

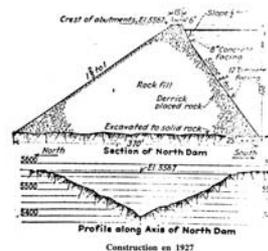
Ruptures par submersions

- Walnut Grove Dam

h=33 m:
 1888 → février 1890

- Lower Otay Dam

h=40 m:
 1905 → Janvier 1927



Centre d'Ingénierie Hydraulique

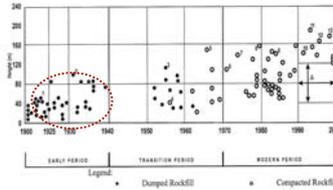
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



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

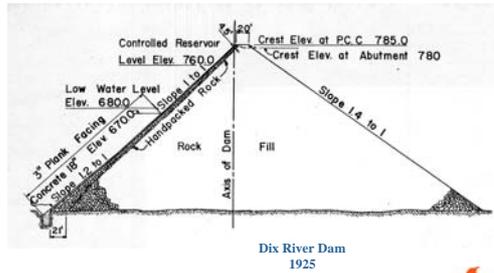


Dix River Dam (1923-1925)

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

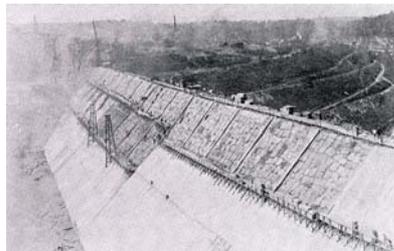


Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Historique des « CFRD » avant 1960



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



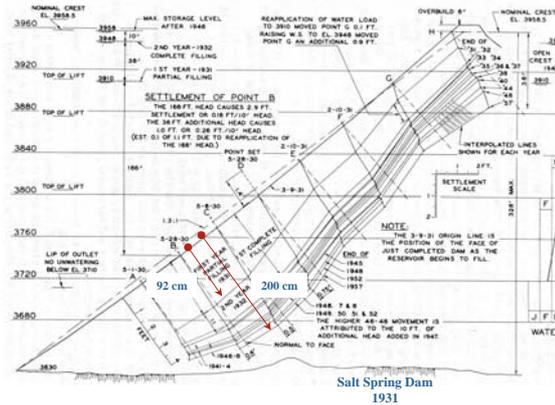
Historique des « CFRD » avant 1960

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

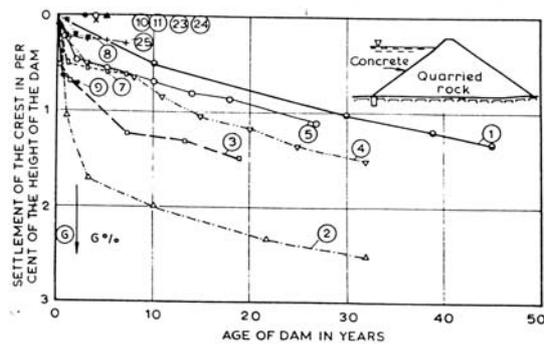


Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Historique des « CFRD » avant 1960



- | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------|
| ① Bowmann | ⑥ San Gabriel no. 2 | ⑪ The Quaoich |
| 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 | |

Centre d'Ingénierie Hydraulique

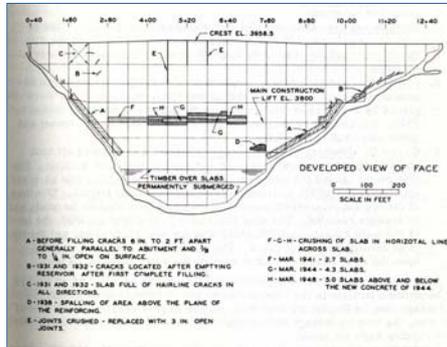
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Historique des « CFRD » avant 1960

Dégradation du masque

Fuites



Hauteur limite ≈ 100 m

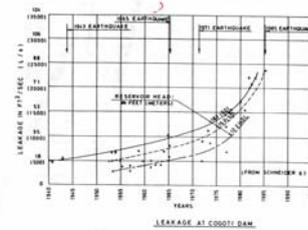
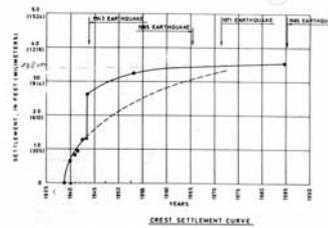
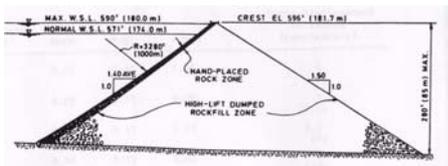
Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Historique des « CFRD » avant 1960

Barrage de Cogoti Chili
1938



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



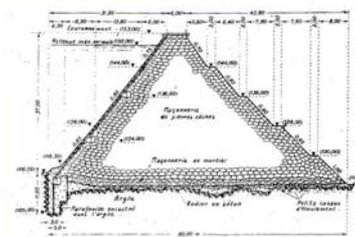
Barrage en maçonnerie sèche

→ Italie

(17 ouvrages en 1949)

30m < h < 50m

- Belice
- La Gela
- Mont Cavalli



→ Afrique du Nord

(1930 → 1937)

- Bakhadda (45 m)
- Bou-Hanifia (54 m)
- Foug-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



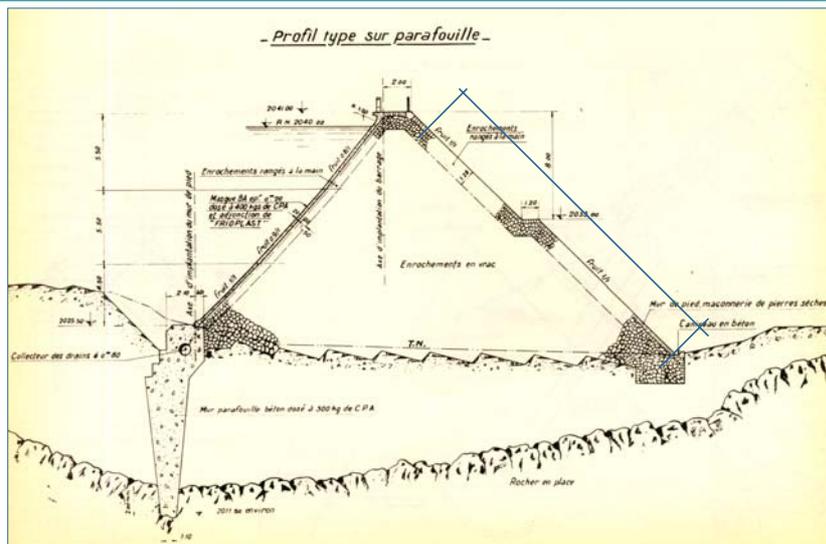
Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Caractéristiques techniques spécifiques

GEOMETRIE



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Caractéristiques techniques spécifiques

GEOMETRIE

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	1.0-0.8
8.	Escoubous	1953	1.0	0.8

Angle de frottement des enrochements ↔ fruit

9.	La Sassièrè	1959	1.4	1.4
----	-------------	------	-----	-----



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Caractéristiques techniques spécifiques

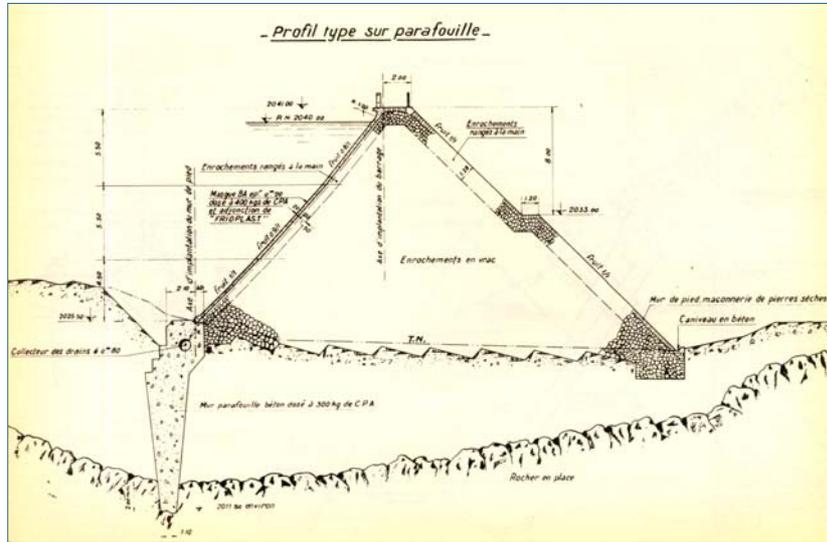
GEOMETRIE



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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





Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Forte épaisseur de levées

Granulométrie étroite

Nature géologique

Forte porosité



Ségrégation des enrochements

Pas de compactage

Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



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

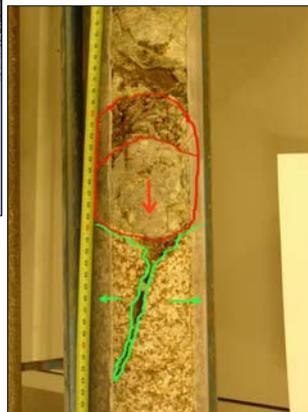
- Granodiorites
- Schistes
- Granites et gneiss





Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



F.01 - Enrochement		S.01 - Structure	
Description		Références	
1	Enrochement en pierre naturelle	1	Structure en pierre naturelle
2	Enrochement en pierre artificielle	2	Structure en pierre artificielle
3	Enrochement en béton	3	Structure en béton
4	Enrochement en mortier	4	Structure en mortier
5	Enrochement en ciment	5	Structure en ciment
6	Enrochement en ciment et mortier	6	Structure en ciment et mortier
7	Enrochement en ciment et mortier et ciment	7	Structure en ciment et mortier et ciment
8	Enrochement en ciment et mortier et ciment et mortier	8	Structure en ciment et mortier et ciment et mortier
9	Enrochement en ciment et mortier et ciment et mortier et ciment	9	Structure en ciment et mortier et ciment et mortier et ciment
10	Enrochement en ciment et mortier et ciment et mortier et ciment et mortier	10	Structure en ciment et mortier et ciment et mortier et ciment et mortier

Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Granulométrie étroite

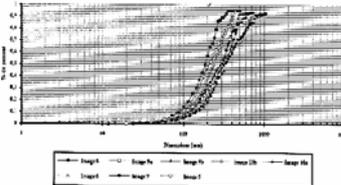
Document interne EDF 1954

- 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
Cu < 10

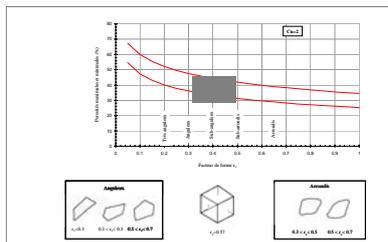


Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Forte porosité



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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

Gratignon
Barrage de Grandes-Pâtures
Enrochement grossièrement rangé : n=40%
Rangé à la main et partiellement maçonné côté parement amont : n=20%

Barrage de Chamoux
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%.

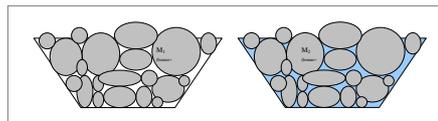
Barrage de la Gêze (Contessin US1)
=> 3 échantillons de maçonnerie sèche
-> beaucoup de soin avec un personnel spécialisé... 17%
-> même personnel sans soins particuliers... 26%
-> personnel inexpérimenté avec des pierres quelconques... 32%

Villems (2004)
-> murs en pierres sèches
-> calcaire... déchets de taille... 23% à 27%
-> schistes... de formes élançées... 24% à 32%

Manual of the Use of Rock in Coastal Shoreline Engineering
-> blocs de gros diamètres diversés 40% à 47%

Barrage de Salt Spring (1931)
-> Diversé : 29%

Barrage de Quoiich (1931)
-> Diversé en carrière : 41%



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



Mode de mise en œuvre

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

Granulométrie

- Étroite
- Étalée

Forme

- Arrondis
- Anguleux
- ...

Porosité

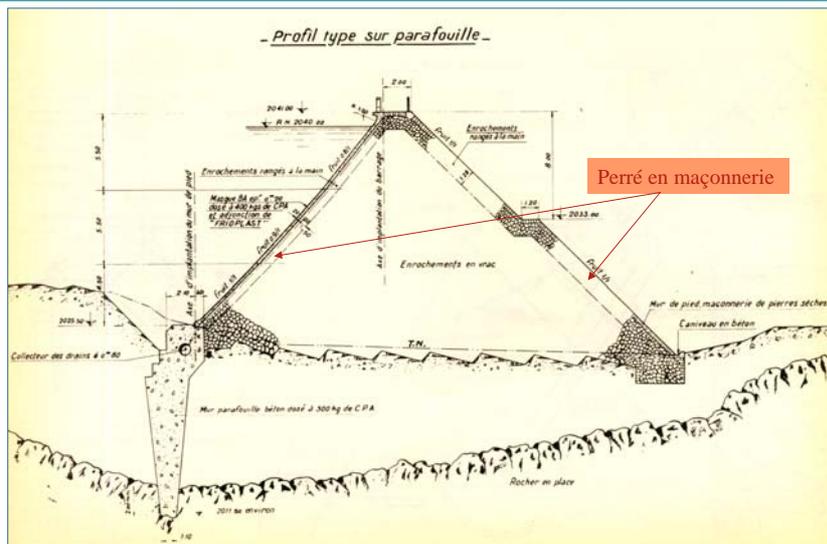
20% - 25%



28% - 32%



40% - 45%





Centre d'Ingénierie Hydraulique

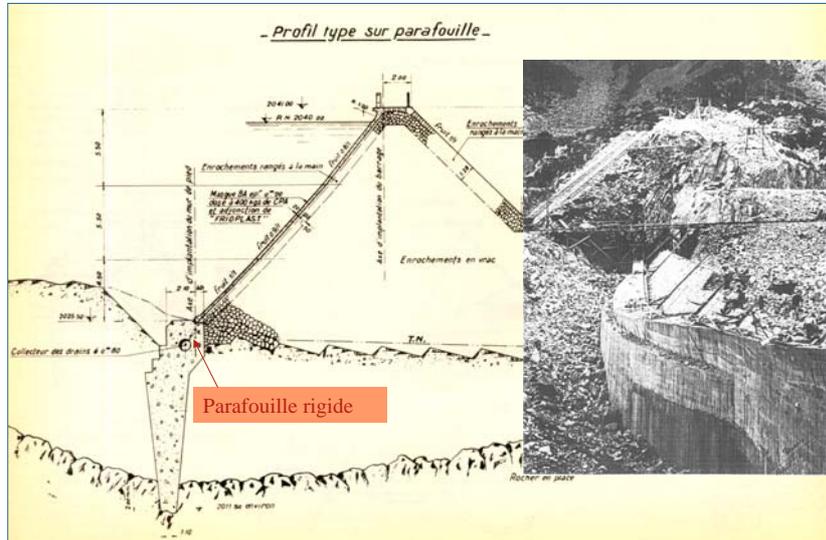
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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





Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



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
 Pathologies | spécifiques

Centre d'Ingénierie Hydraulique

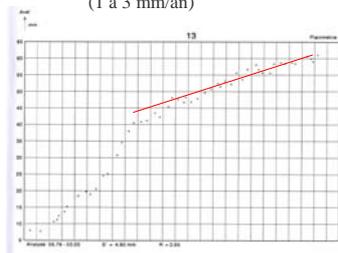
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Tassements

-1^{ère} mise en eau
0.7% à 1.2%
(20 – 30 cm)

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



Centre d'Ingénierie Hydraulique



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



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

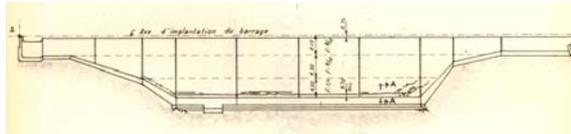


Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Conséquences de ces tassements

Dégradation de l'étanchéité
et
Augmentation progressive des fuites



Centre d'Ingénierie Hydraulique

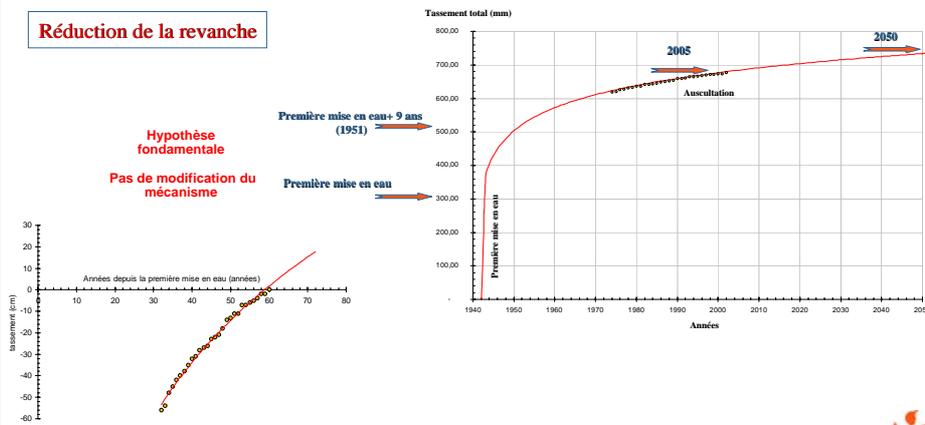
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Conséquences de ces tassements

Réduction de la revanche

Hypothèse fondamentale
Pas de modification du mécanisme



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



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)

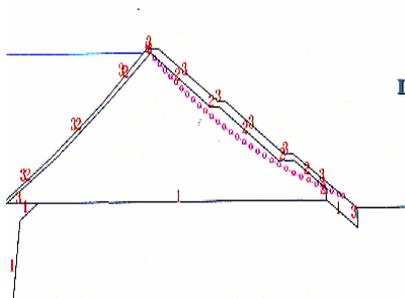
ACABECE
(EDF)

Calculs de stabilité limite

Cercles et surfaces de glissement

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

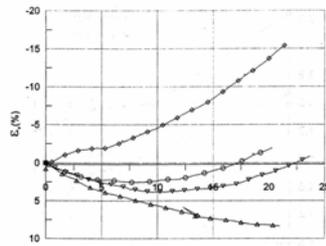
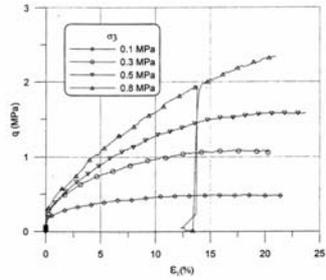
→ Démarche d'interprétation ↔ Critères « usuels »



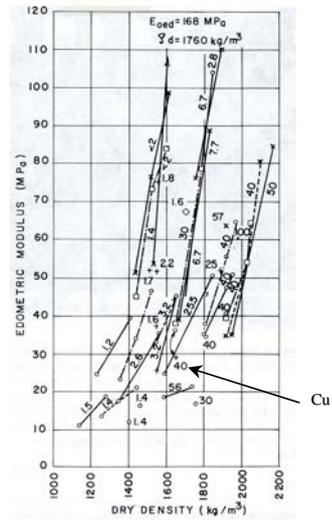
Cette approche ne prend pas en compte

Le mode de fonctionnement réel et le rôle du perré

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



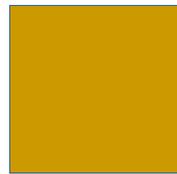
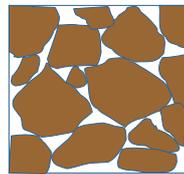
Centre d'Ingénierie Hydraulique



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

Centre d'Ingénierie Hydraulique

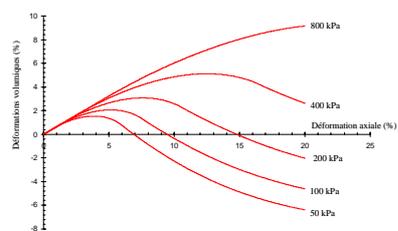
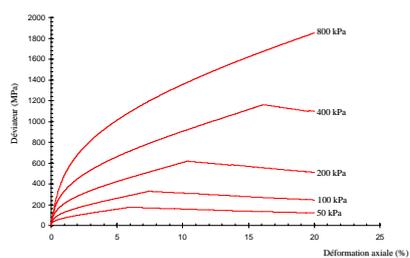
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



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



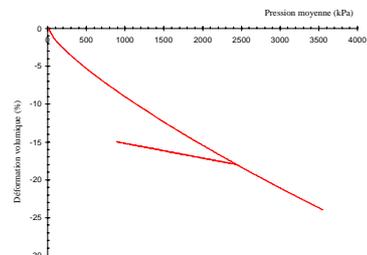
Critère de cisaillement non linéaire fonction de l'état des contraintes

Grande déformabilité irréversible

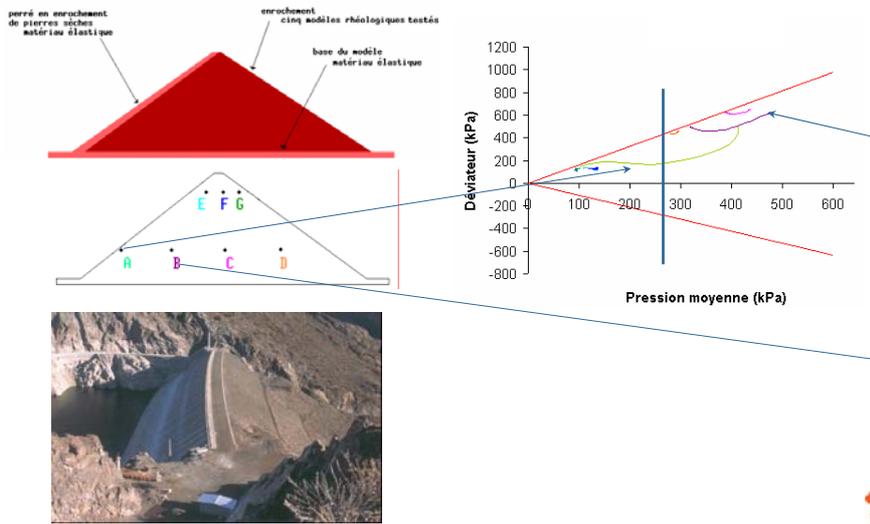
Contractance-dilatance dépendant de l'état des contraintes

Etat critique

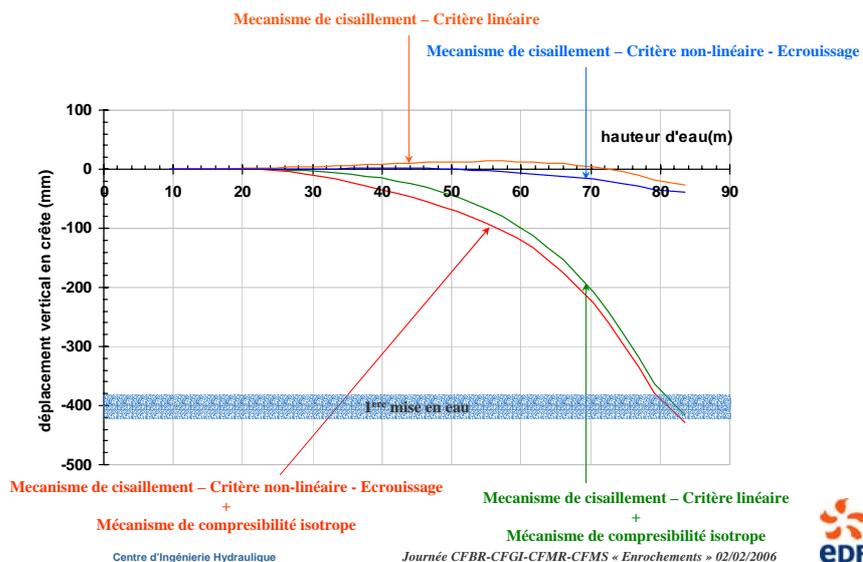
Mécanisme de compressibilité isotrope



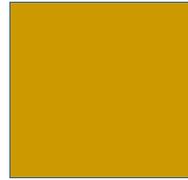
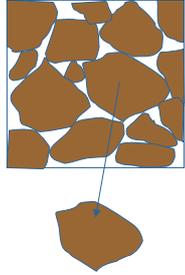
Compréhension – Modélisation - Prédiction



Compréhension – Modélisation - Prédiction



Identification des propriétés « Macro »



*Paramètres indépendants
géométrie de l'arrangement*

- Forme
- Dimension
- Résistance
- Altérabilité
- Nature géologique
-

*Paramètres décrivant la
géométrie de l'arrangement*



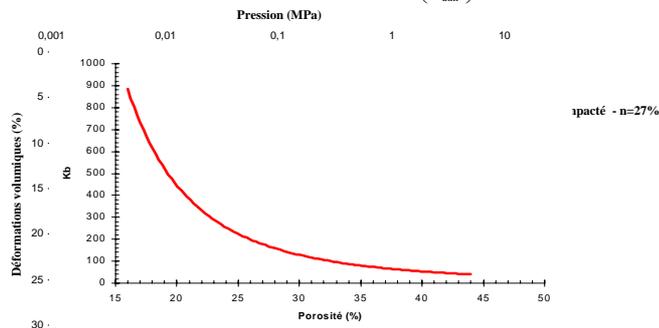
Densité - Porosité

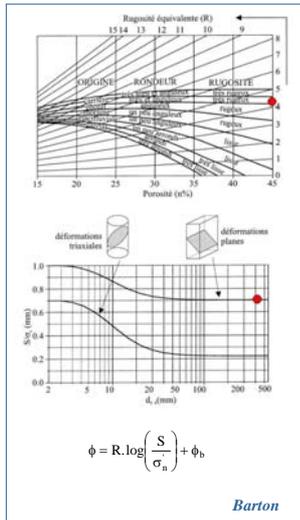
Paramètres macroscopiques

- Angle de frottement
- Compressibilité
- Module de déformation
-

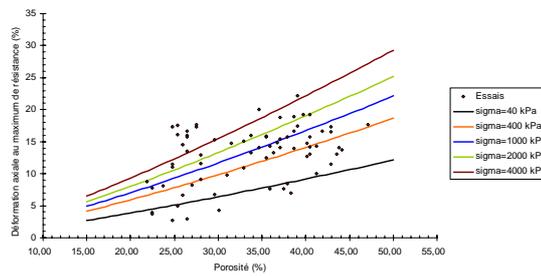
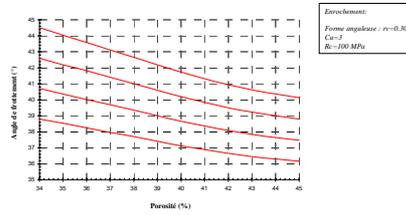
Analyse en retour du comportement des CFRD

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

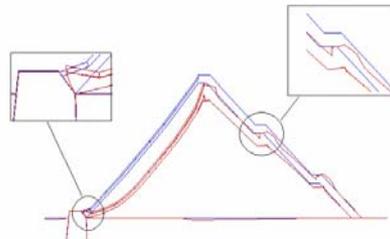
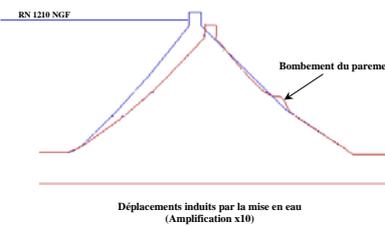




Centre d'Ingénierie Hydraulique



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



Centre d'Ingénierie Hydraulique

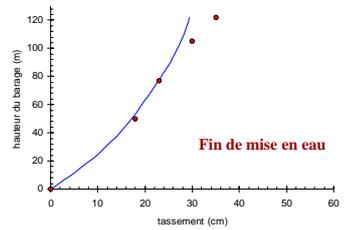
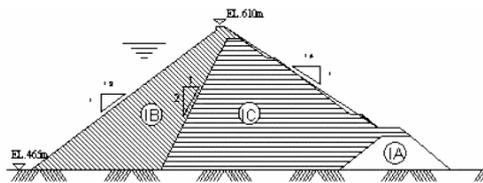
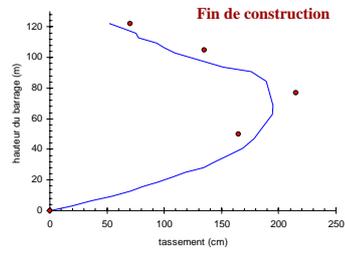
Journée CFBR-CFGI-CFMR-CFMS « Enrochements » 02/02/2006



Justification sur Ouvrages



Segredo (Brésil 1993)



Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



Conclusions

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

Centre d'Ingénierie Hydraulique

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



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

