

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat- Acerdoune (Algérie)

Etienne FROSSARD



TRACTEBEL Engineering
GDF SUEZ

Comportement actuel de l'ouvrage indissociable de son historique de construction

- 1. Contexte et projet original**
- 2. Difficultés géologiques rencontrées**
- 3. Reconfiguration du Projet**
- 4. Auscultation et comportement de l'ouvrage**



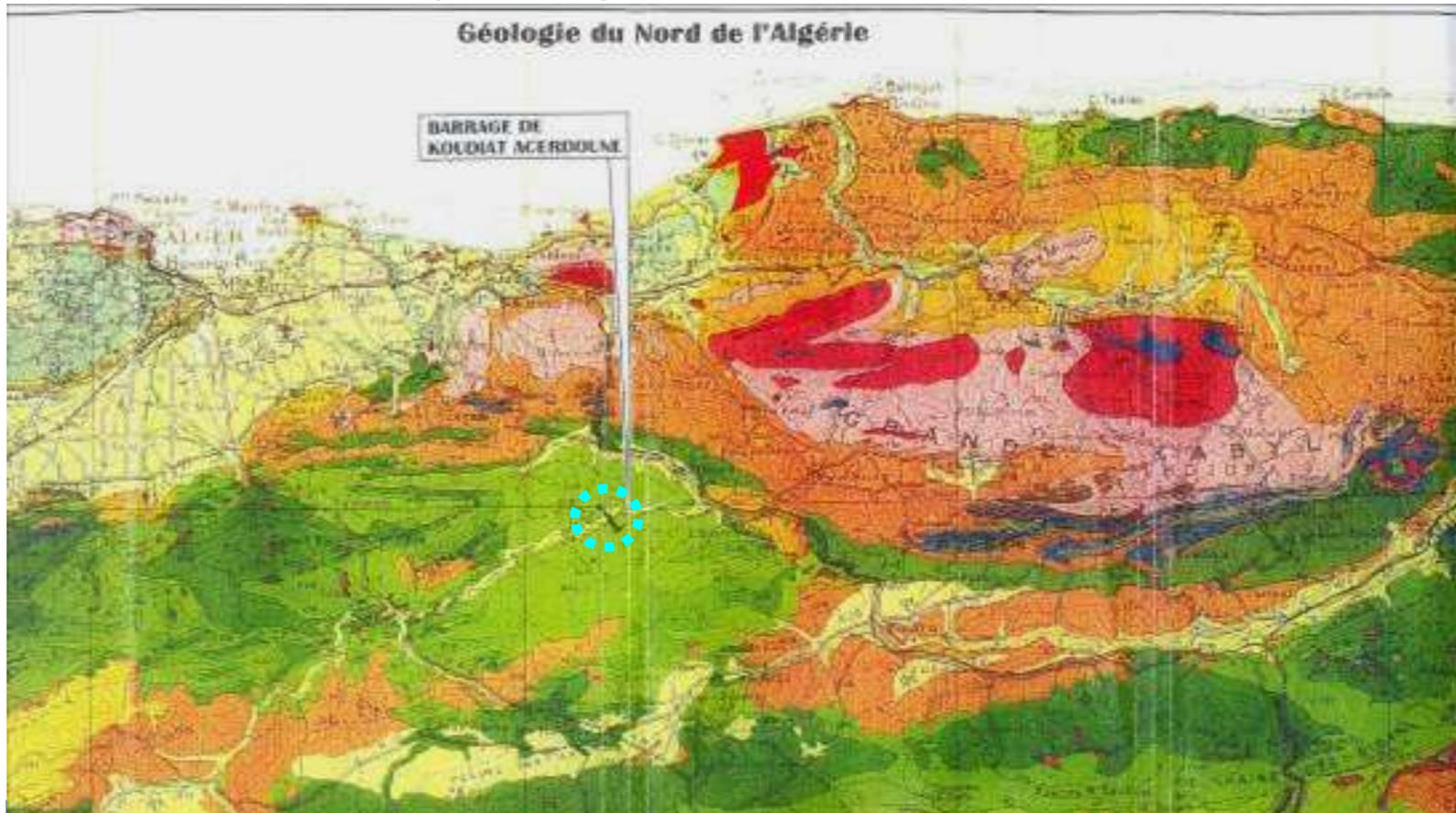
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

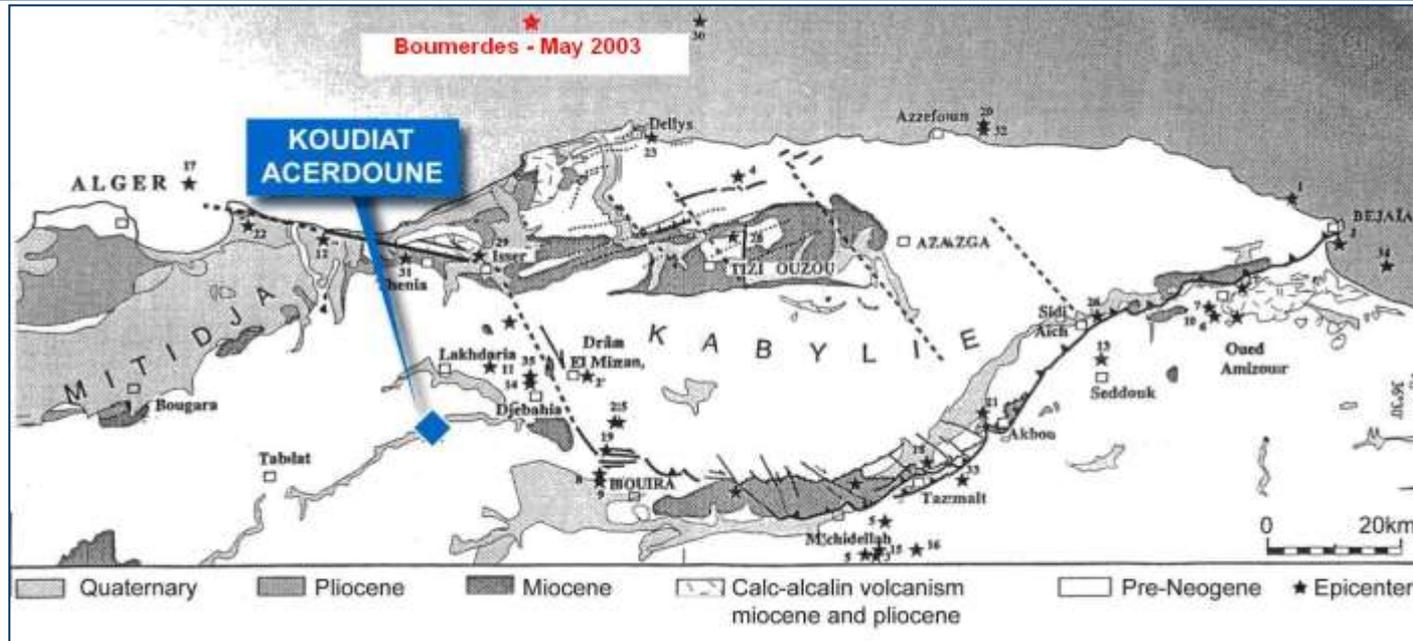


- Structure régionale: superposition de chevauchements d'âge Miocène, (convergence Afrique-Europe)
- Substratum rocheux: - schistes marno-calcaires (Crétacé moyen)
- calcaires, souvent stratifiés (Crétacé supérieur)

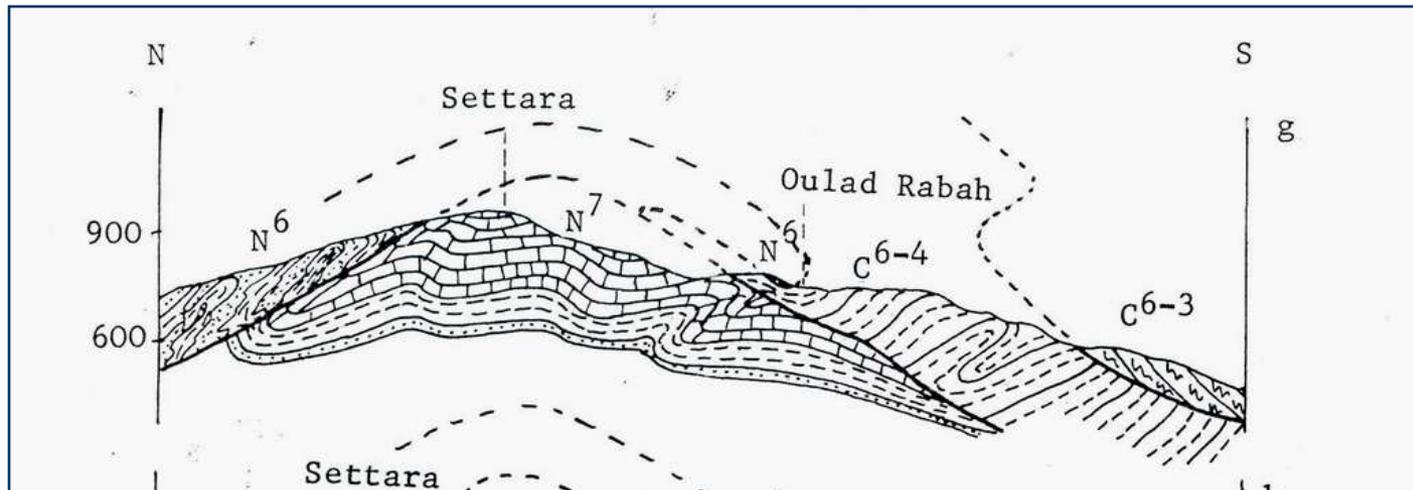
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

Contexte sismo-tectonique



Coupe structurale N-S



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

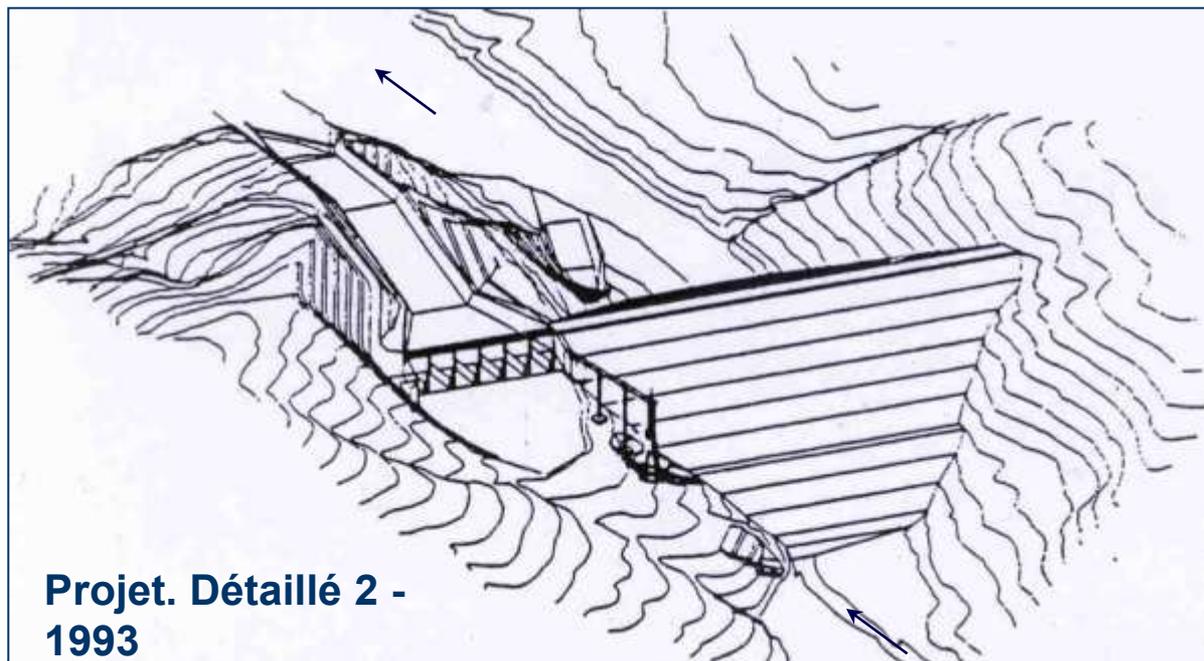


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original: une longue histoire...

- Site considéré dès 1955 par l'administration coloniale
- a) Etude préliminaire - 1967- *Sélection du type de barrage laissée ouverte*
- b) Factibilité - 1973- *Barrage en remblai-*
- c) Avant-Projet- 1983 - *Barrage en remblai-*
- d) Projet Détaillé 1 -1986 – *Barrage en remblai*
- e) Projet Détaillé 2- 1990/93- *Barrage en remblai- =>A.O.=> Début Constr.*
- f) Projet Détaillé 3 -1998/2001- *Barrage-poids en BCR=> Nouvel A.O.*

Nouvel Appel
d'Offres => à
notre charge:
conception et
exécution du
nouveau projet



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original



Barrage de 121m sur fondations L / H = 3,5 (~1,2 hm³ BCR + BCV)

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original



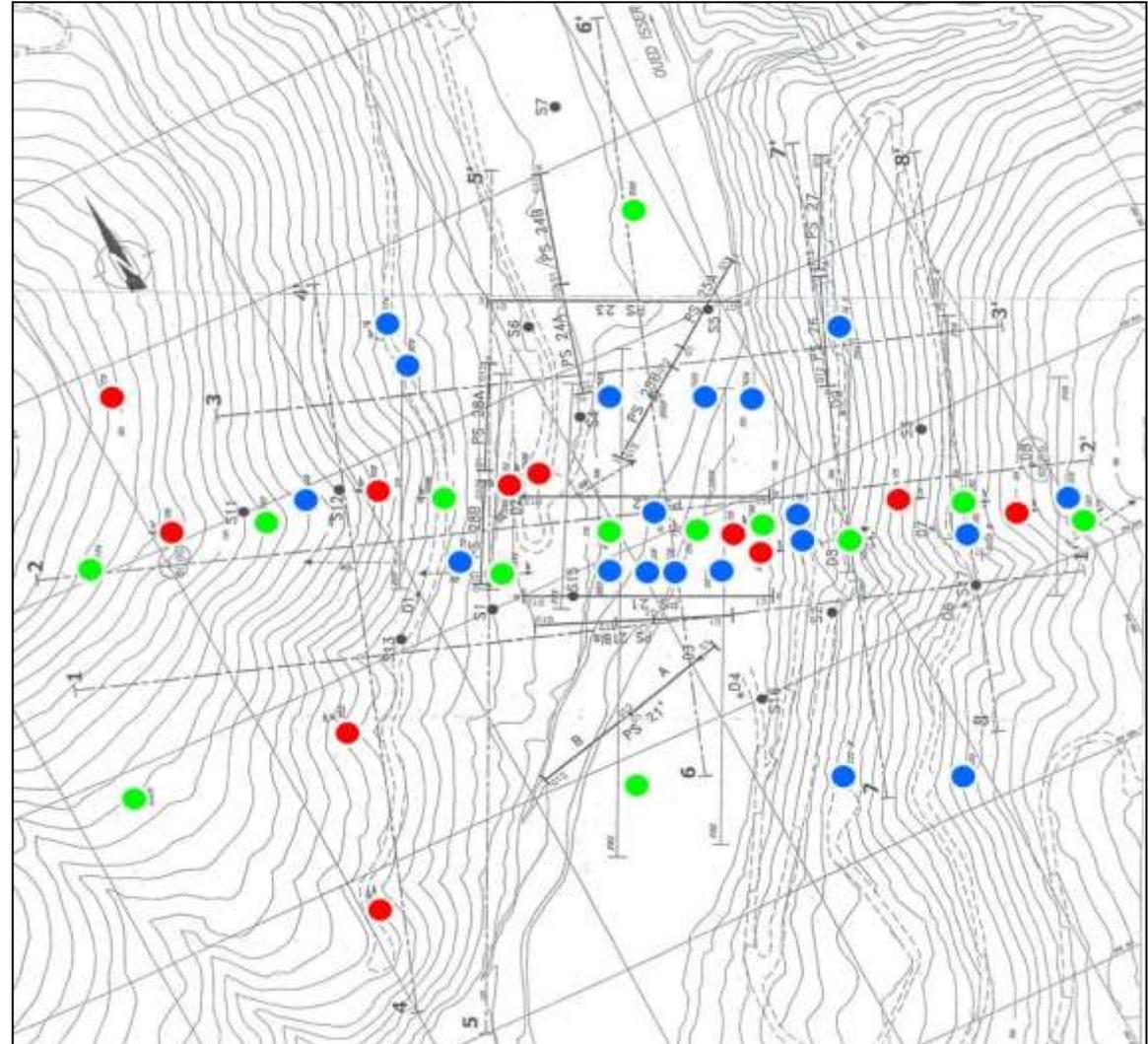
...pour un réservoir de 640 hm³, un des plus grands d'Algérie, destiné à garantir à long terme l'approvisionnement en eau pour toute la région d'Alger.

Apports annuels moyens à long terme : 205 hm³

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

Investigations



1954-55



1961-64



1986-87

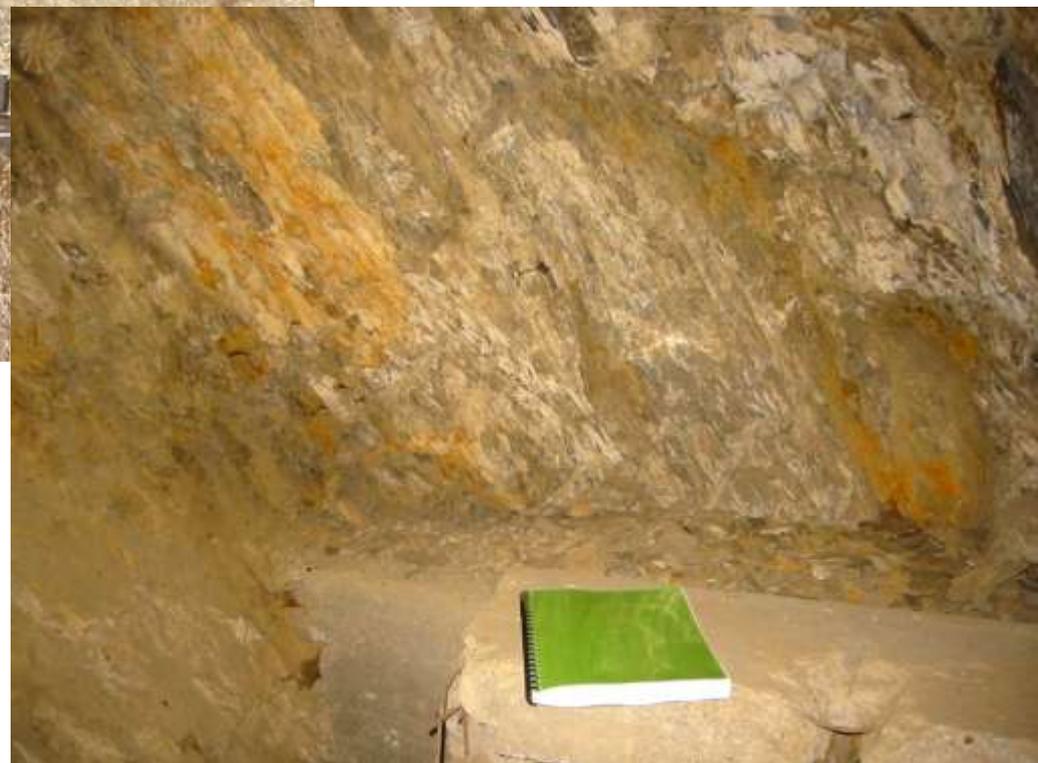


1989-90

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

**Formation du Crétacé
moyen**

Schistes marno-calcaires



*Vestiges de sondages
antérieurs (Juin 2002)*

*Ancienne galerie
d'investigation*



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

RESERVOIR

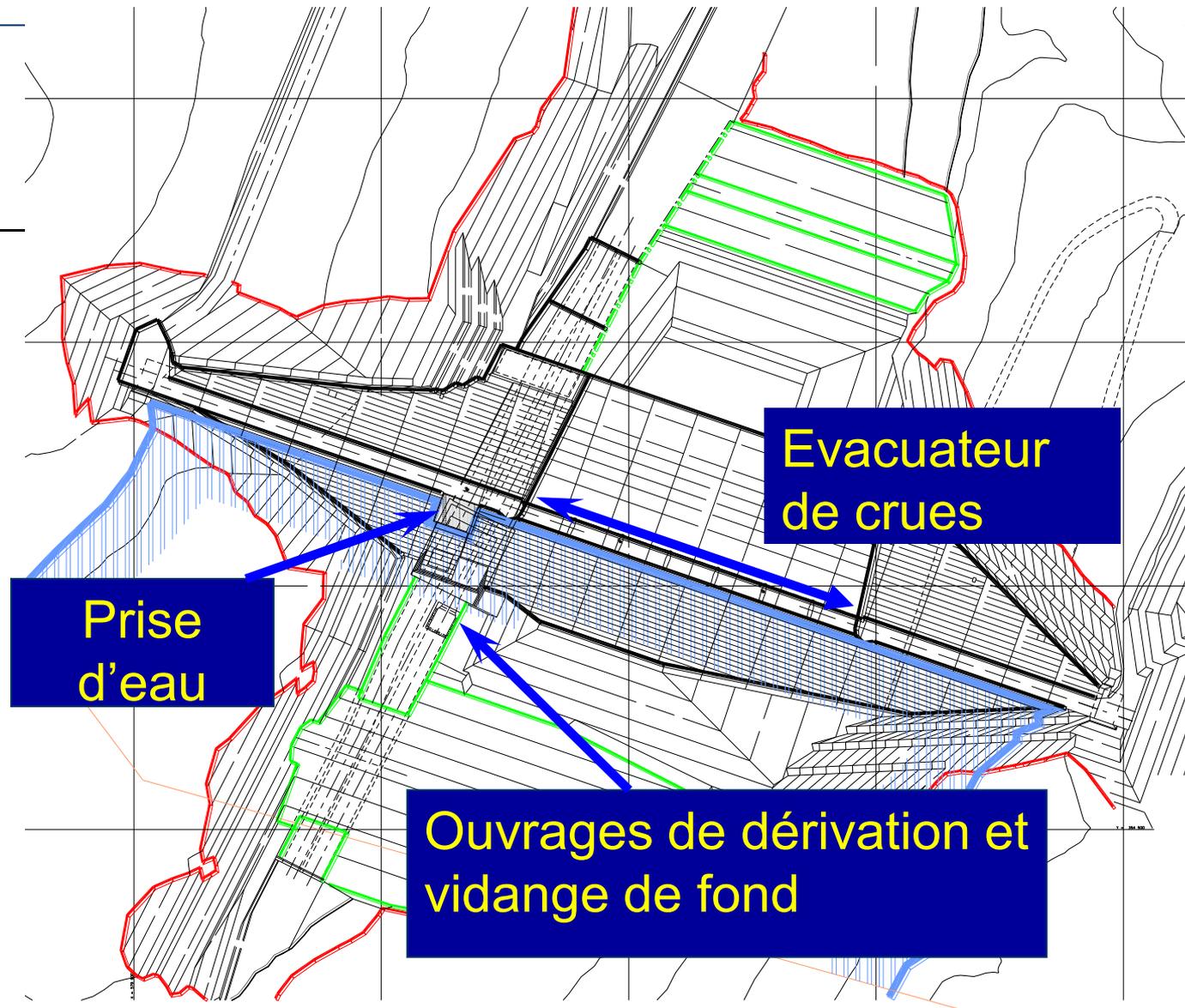
Niveau normal (NWL)	311
Niveau maximum exceptionnel (MWL)	319,64
Capacité totale (~3 fois l'apport annuel)	640 hm³
Capacité utile	450 hm³
Bassin-versant	2790 km²

BARRAGE-POIDS : Béton compacté au rouleau (BCR)

Hauteur maximum sur fondation	121 m
Longueur en crête	380 m
Fruit aval	0,4h/ 1v
Fruit amont	0,5h/ 1v
Niveau de crête	321
Volume de béton	1,2 hm³
Evacuateur de crues à seuil libre (sur le ba	7000 m³/s
Vidange de fond	470 m ³ /s

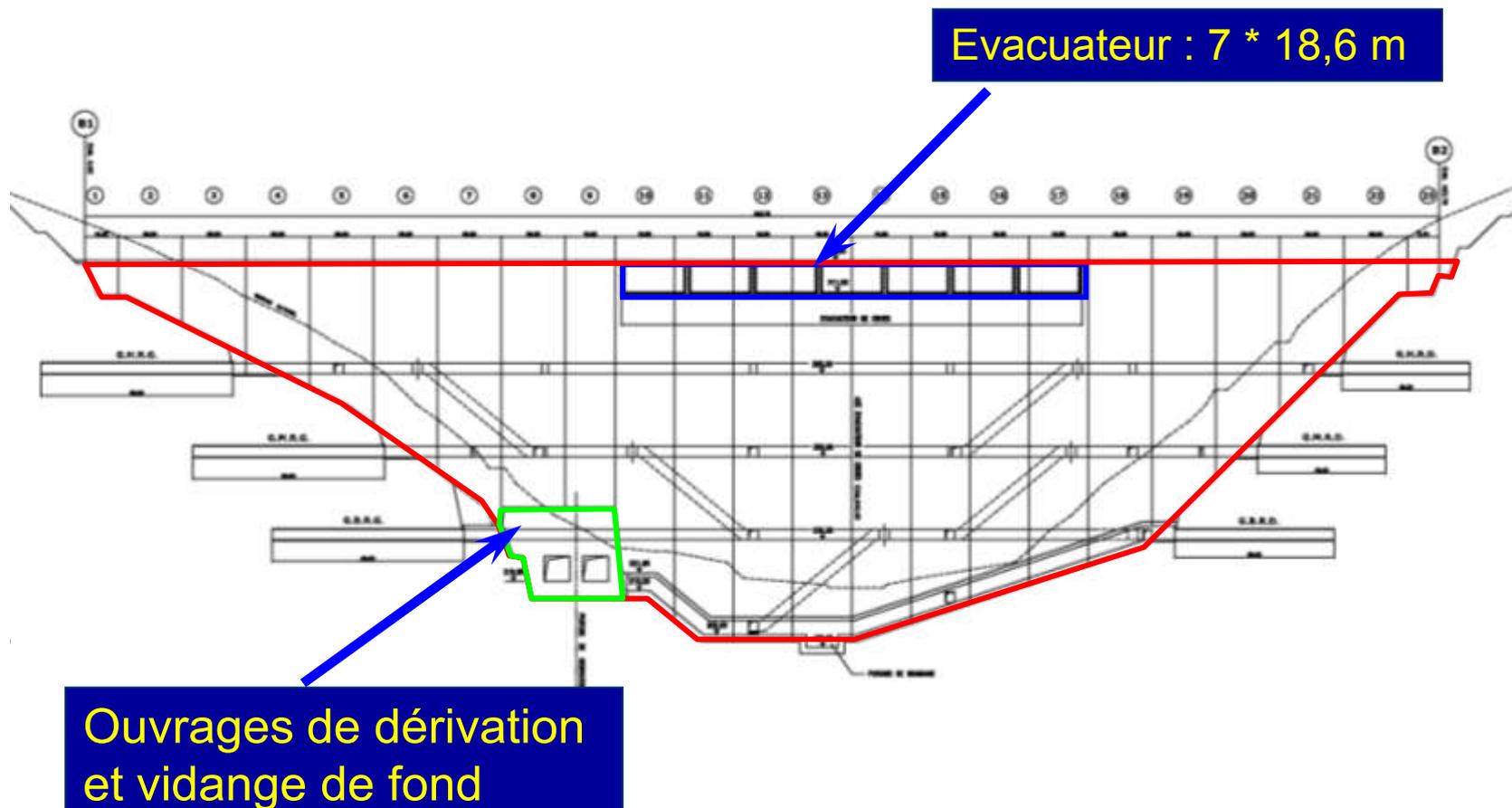


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

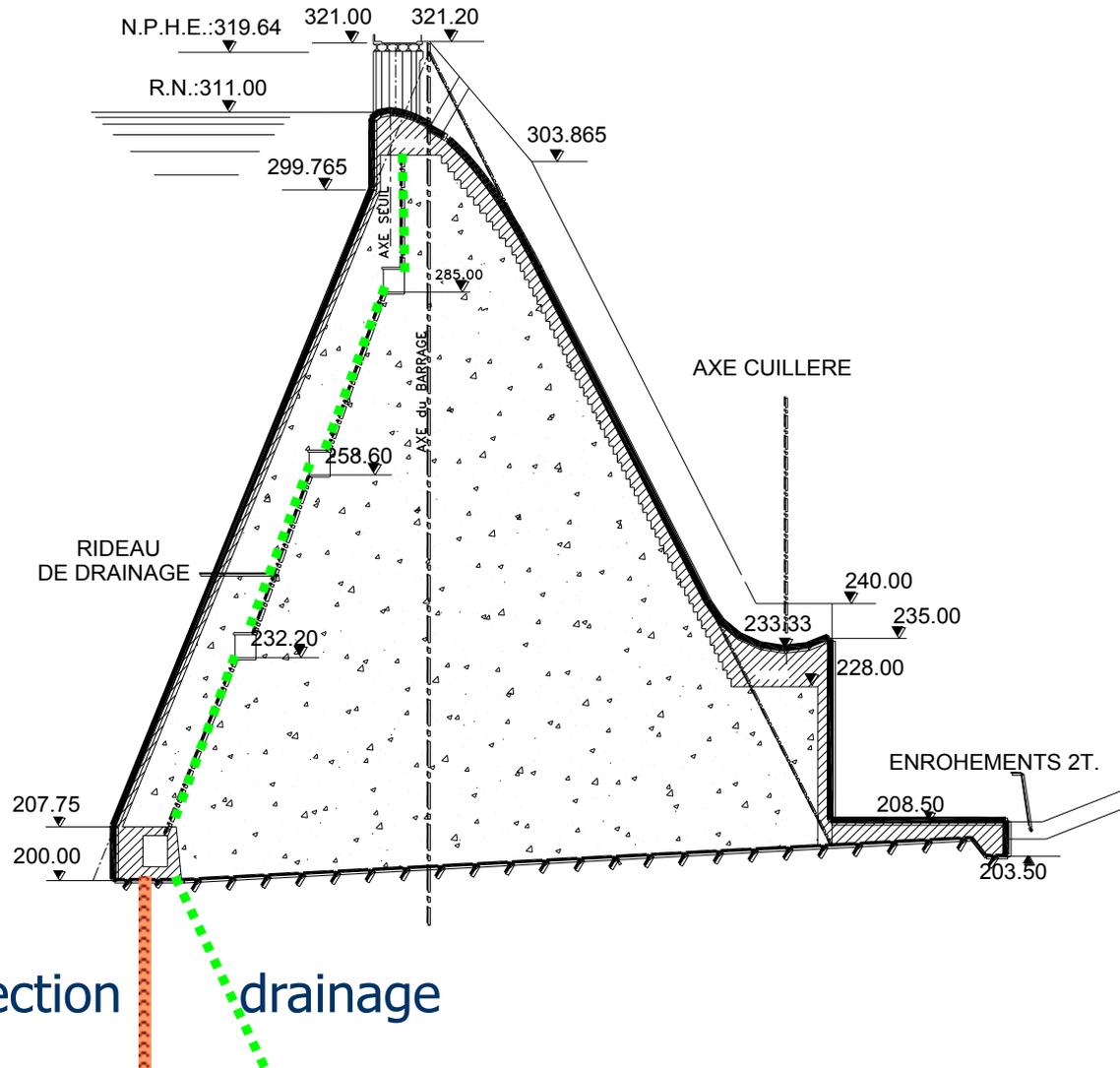
1. Contexte et projet original



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

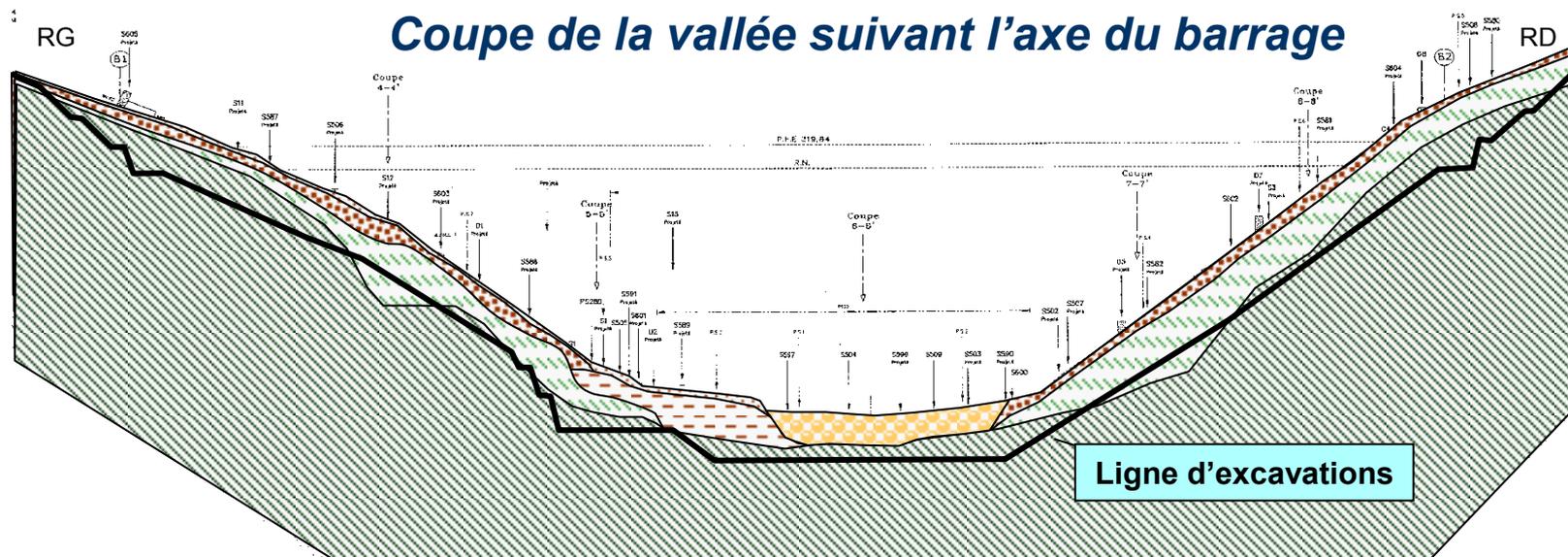
1. Contexte et projet original

Section typique sur l'évacuateur de crues



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original



-  Terre de couverture
-  Alluvions lit de l'Oued
-  Alluvions Terrasses récentes
-  Colluvions
-  Schistes momeux très fracturés et/ou déconsolidés
-  Schistes momeux fracturés et/ou altérés
-  Schistes momeux sains

$V < 1000 \text{ m/s}$

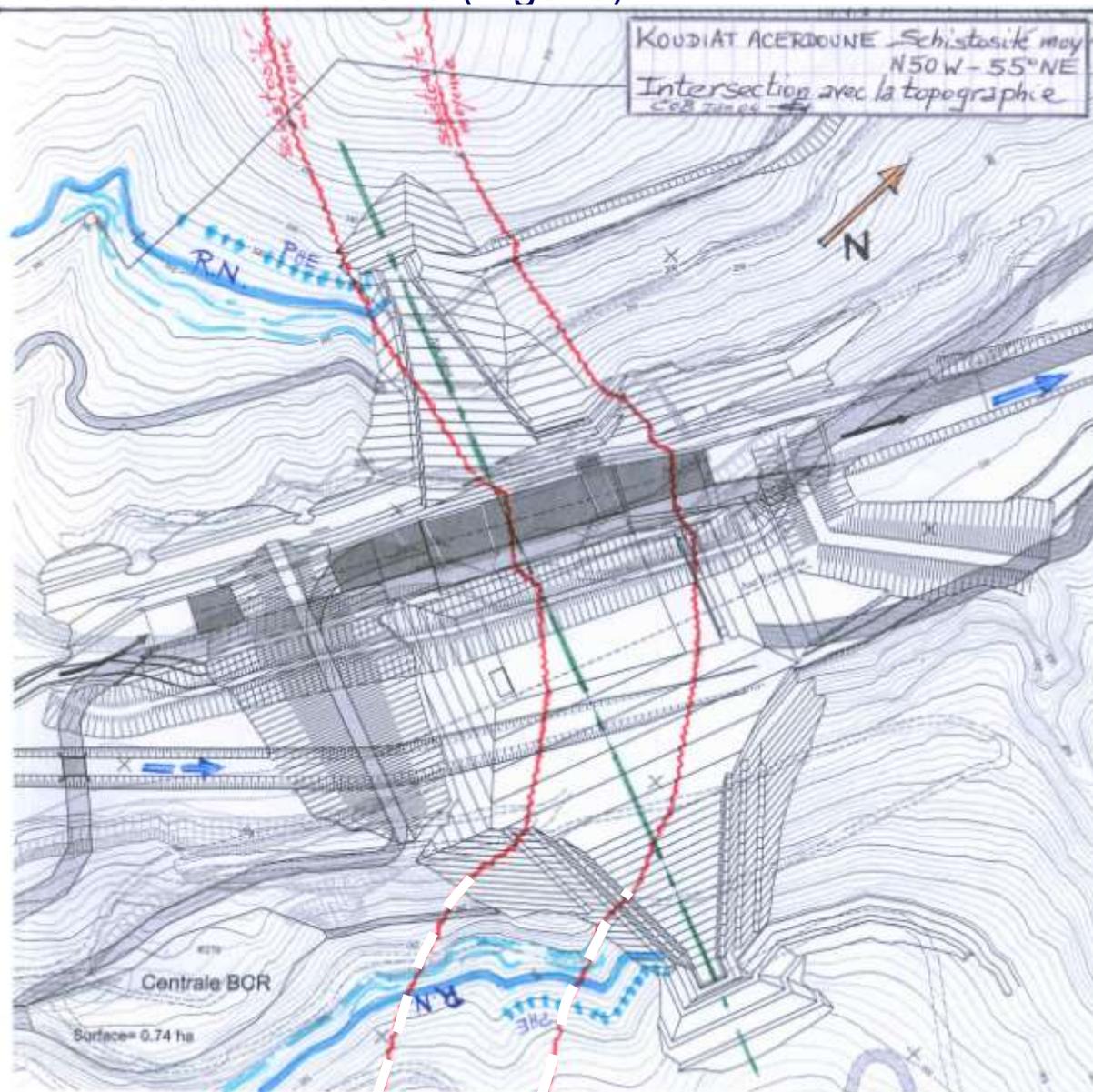
$V = 1500 \text{ à } 2500 \text{ m/s} \quad c = 0,4 \text{ MPa} / \varphi = 35^\circ$

$V = 3000 \text{ à } 3500 \text{ m/s} \quad c = 0,6 \text{ MPa} / \varphi = 39^\circ$

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

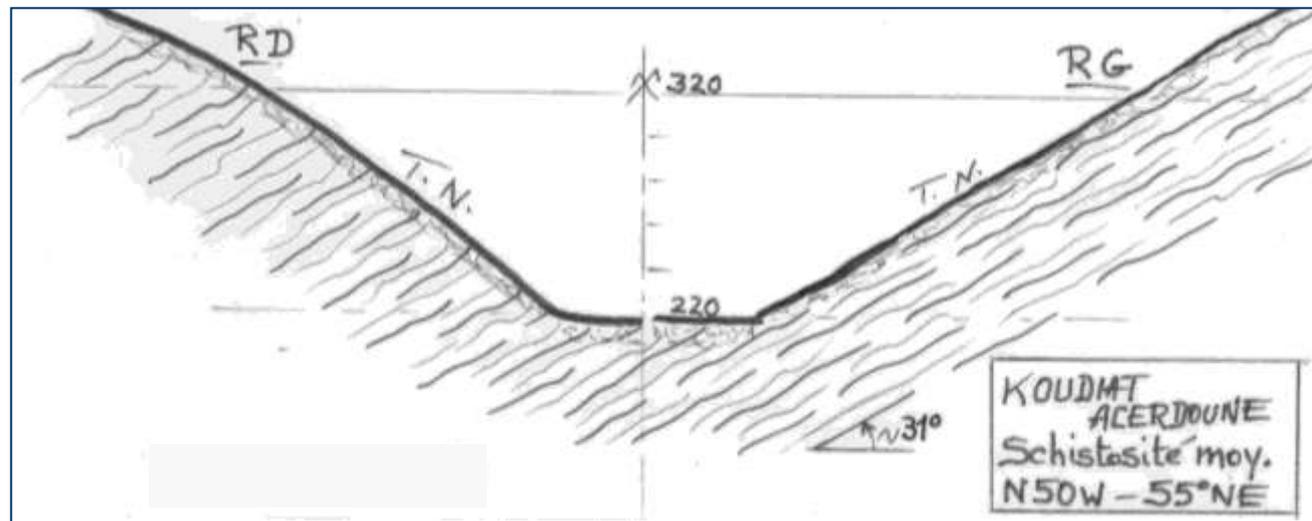
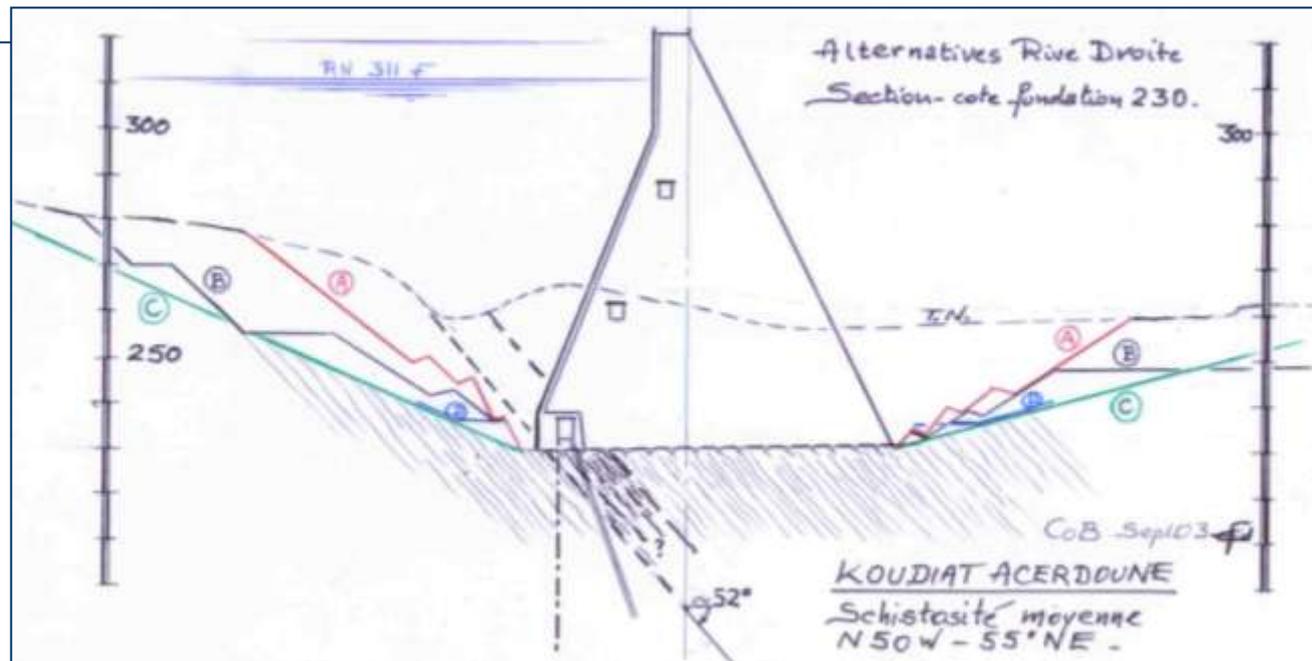
Disposition des ouvrages par rapport à la structure moyenne du massif rocheux



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original

Disposition des ouvrages par rapport à la structure moyenne du massif rocheux



2. Difficultés géologiques rencontrées à l'exécution

- *Premiers mouvements et investigations complémentaires*
- *Le glissement majeur et ses conséquences*

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées



Début des excavations,
moyens purement
mécaniques



2. Difficultés géologiques rencontrées

- **Début de la construction**

sur la base du Projet Détaillé

- **Glissements de terrains successifs en rive gauche**

- Amont, partie inférieure (avril et juin 2003)

- Sur l'axe, en partie supérieure (avril-mai 2003)

- Aval, partie inférieure (août 2003)

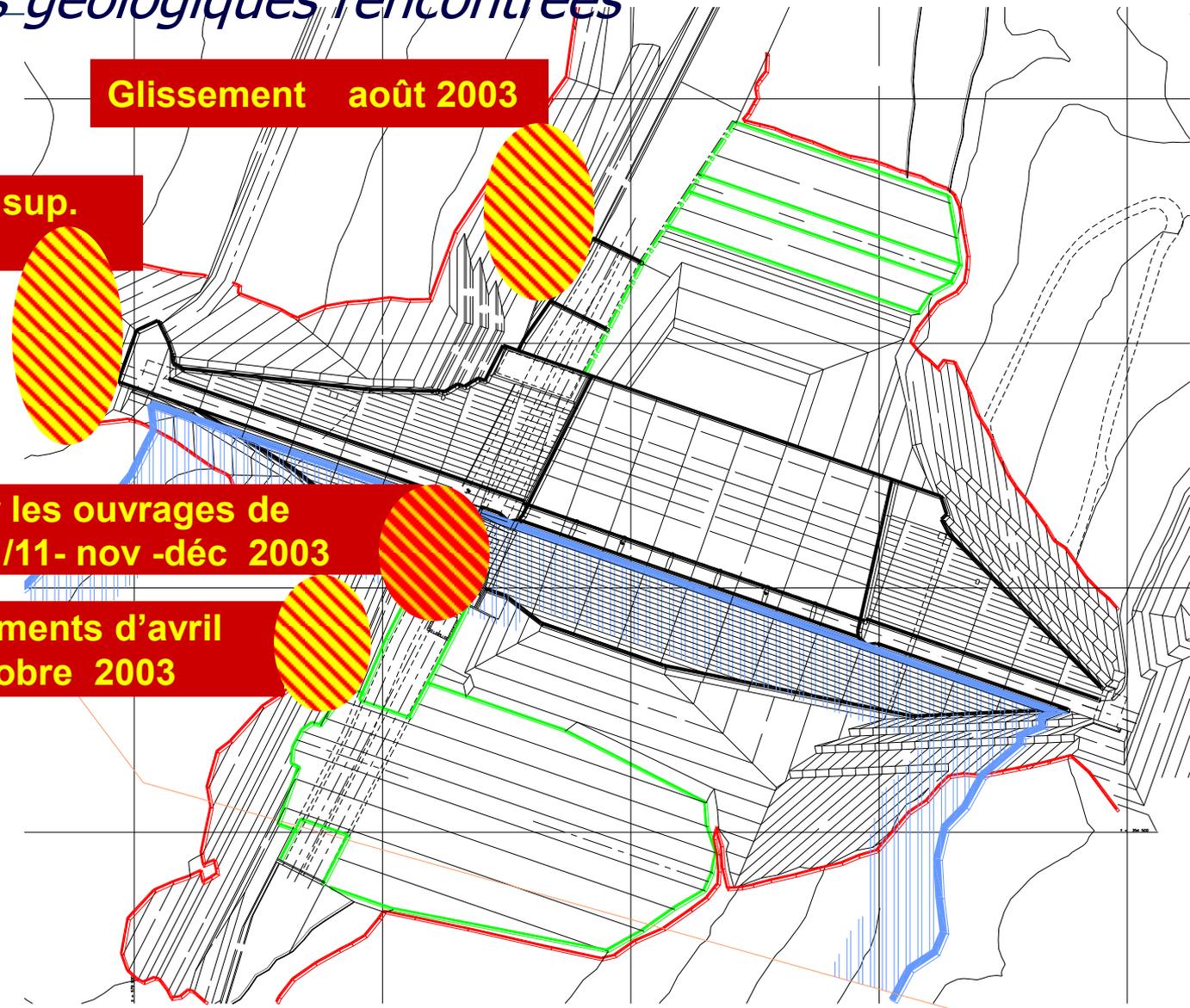
- Eboulements sur ouvrages de dérivation, blocs 10 et 11 (Nov. + Déc. 2003)

- **Mouvements généralisés en rive gauche** -
Diagnostiqués en juin 2004



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées



Glissement août 2003

Glissement RG sup.
avril à mai 2003

Eboulements sur les ouvrages de
dérivation, bl. 10 /11- nov -déc 2003

Glissements d'avril
et octobre 2003

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Glissement d'avril 2003



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

1^{er} ajustement du projet en partie supérieure de rive gauche

Glissement RG sup., avril-mai 2003



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Glissement RG aval,
août 2003



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Construction des ouvrages de dérivation / prises/ vidange de fond

Glissement au-dessus des ouvrages de dérivation, amont du barrage (oct. 2003)



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Construction des ouvrages de dérivation / prises/ vidange de fond



Préparation des bétons pour les blocs
ensuite incorporés au barrage
(partie définitive)
(oct - nov 2003)

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Construction des ouvrages de dérivation / prises/ vidange de fond



Eboulements sur bloc 10- nov. 2003

.. et sur bloc 11- déc. 2003

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

- Ajustement de la partie haute
- Ajustement rebord d'excav.
- Remblai stabilisateur d'urgence

- Reprofilage talus
- Stabilisation par blocs de béton en pied

- Ajustement du projet des galeries

- Réorganisation par tronçons des ouvrages de dérivation
- Modification du projet en partie aval

11 01 2004

Actions prises en rive gauche

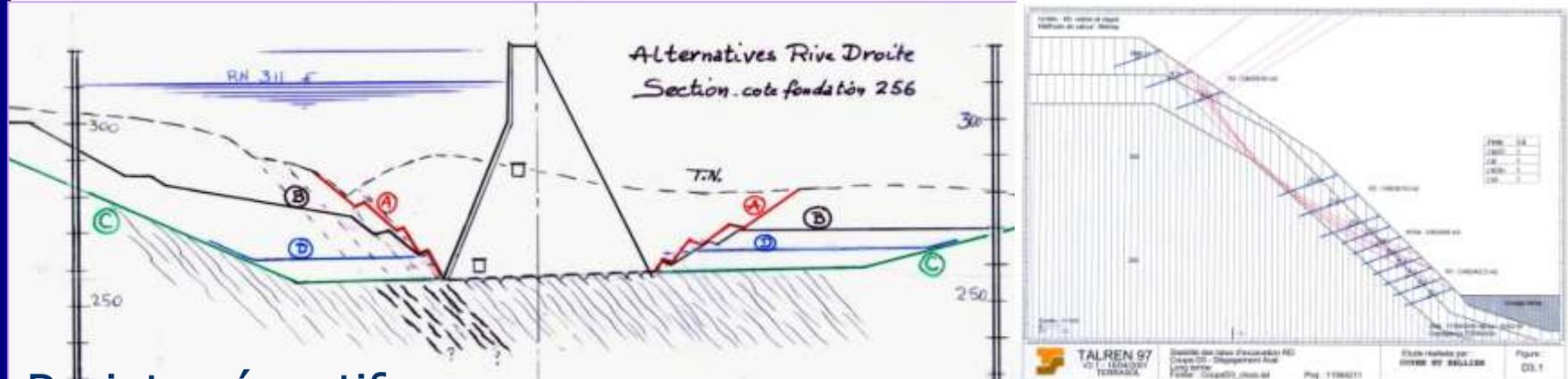
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques – Actions correctives en RG



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques – Actions **correctives** en RD

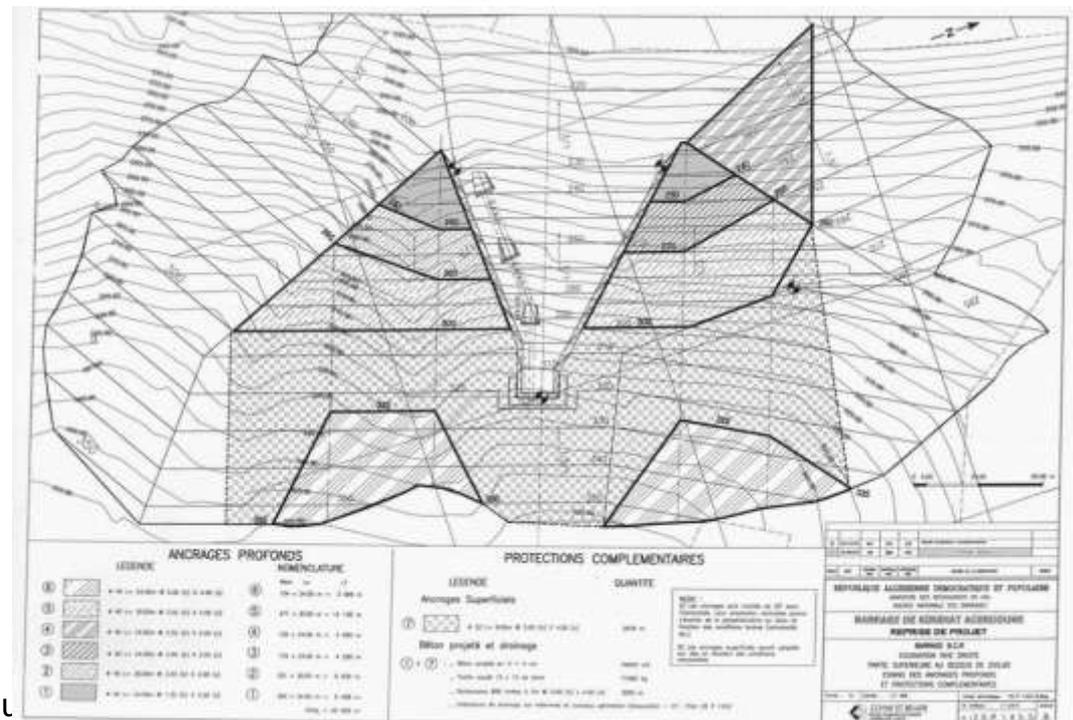


Projet préventif pour un arrangement de la rive droite:

Elargissement/adoucissement des excavations

-Renforcement et protection du massif (stabilisation)

-Ancrages profonds passifs dia. 40 + BP



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques – Actions préventives en RD



E.Frossard – Comité Français de Mécanique des Roches - 23 mai 2013

2.

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

Actions prises: nouvelle campagne d'investigations



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Evidence de mouvements généralisés de la rive gauche (juin 2004)



Construction of Koudiat-Acerdoune Dam (Algeria)

2. Difficultés géologiques rencontrées

Evidence de mouvements généralisés de la rive gauche (juin 2004)



3. Reconfiguration du Projet

- *Révision des paramètres géomécaniques*
- *Redimensionnement du barrage*
- *Reconfiguration de l'évacuateur de crues*

3. Reconfiguration du Projet

Révision des paramètres géomécaniques

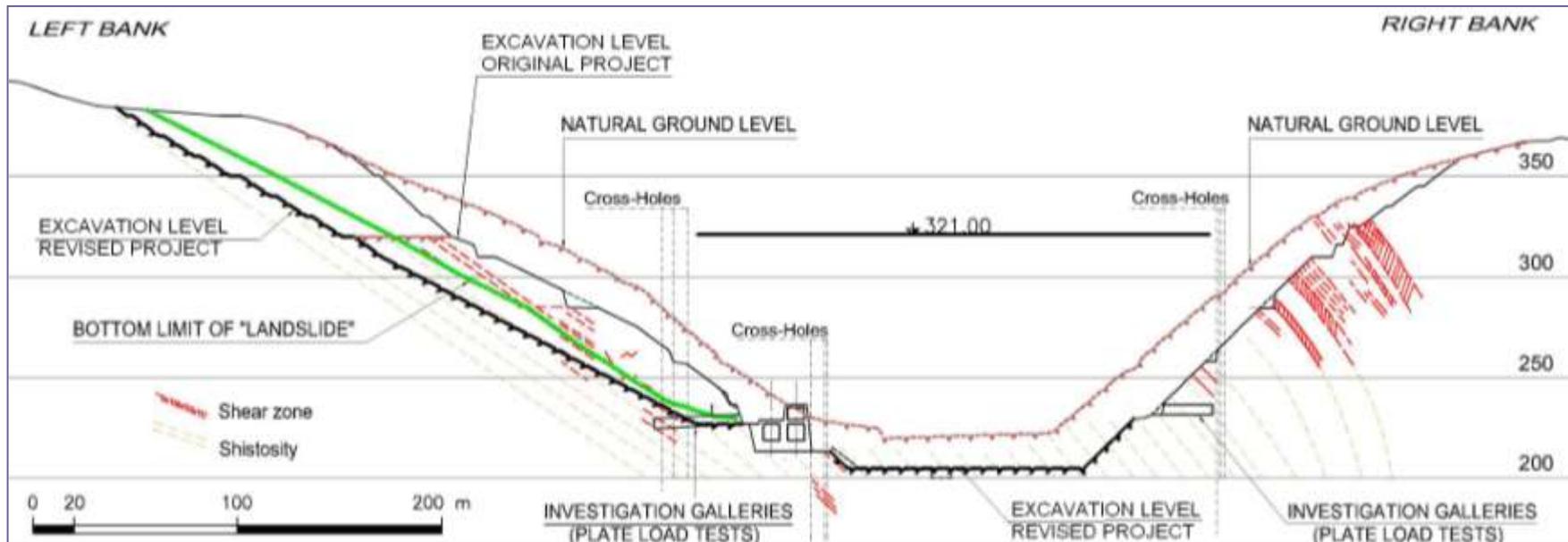
- Réduction significative de la résistance au cisaillement estimée dans les schistes marneux (typiquement trouvés avec 0,15 MPa de cohésion et 29° d'angle de frottement, au lieu de 0,5 MPa et 35°);
- Estimation du module statique de rigidité (premier cycle de charge) dans la fondation rocheuse, variant typiquement entre 1500 MPa au niveau de la fondation (au lieu de 3000 MPa) à environ 3000 MPa quelques 30m sous le niveau de la fondation. Le module dynamique a été estimé entre 3000 et 6000 MPa aux mêmes niveaux

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet

Révision des paramètres géomécaniques

- Ajustement de la profondeur d'excavation requise pour atteindre une fondation de nature adéquate pour le projet révisé, qui a consisté à l'approfondir de 30 m et à étendre les excavations 60 m à l'intérieur de la rive droite.



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet

Rive gauche à l'été 2005



Ancrages autoforeurs de 40mm de diamètre, 25 à 40m de long, plus de 20km cumulés dans chaque rive

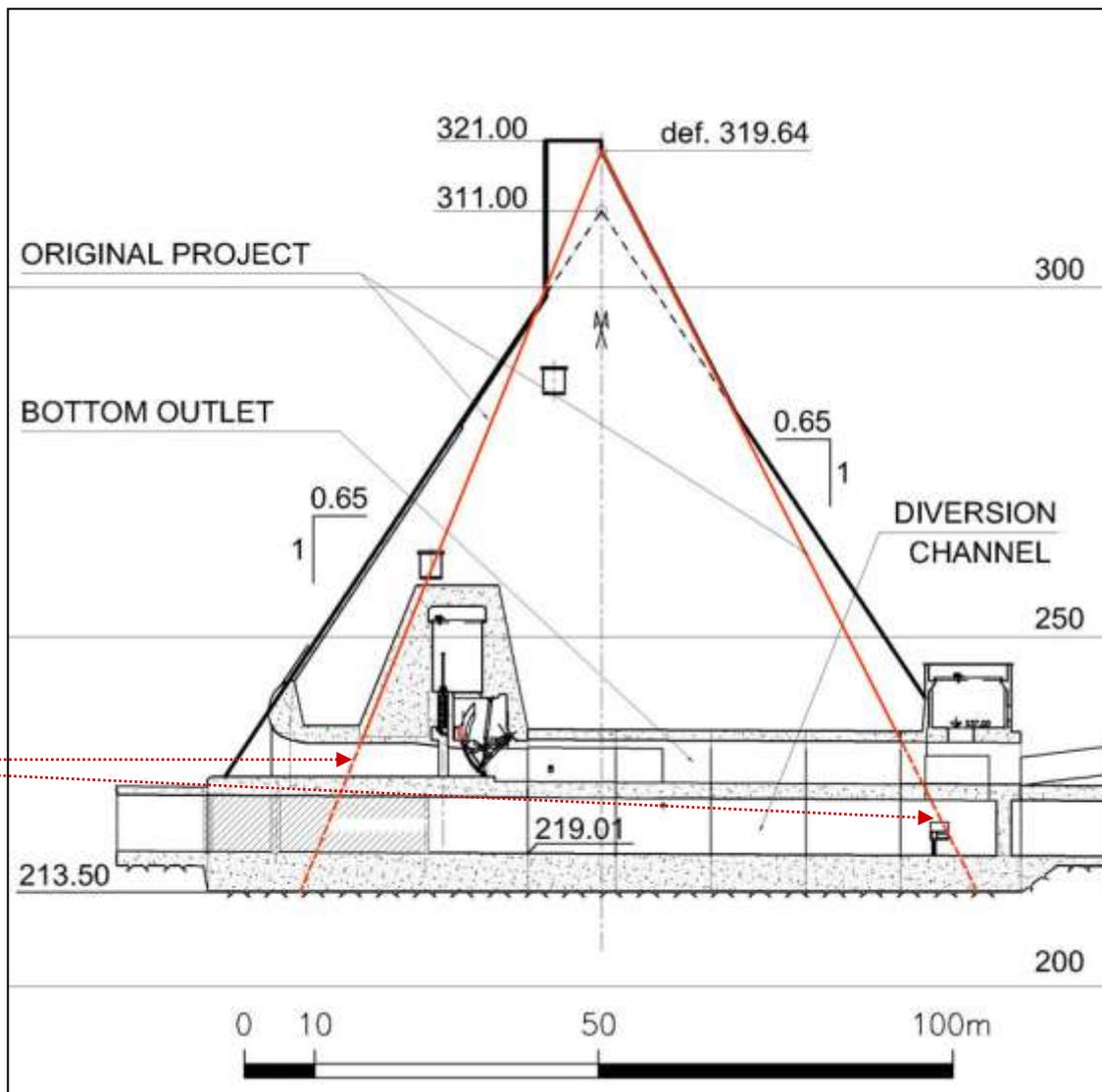


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet

Réajustement du profil du barrage en tenant compte des caractéristiques réelles de la fondation

Fruit total 1,3h/1v contre 0,9h/1v dans le projet précédent



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

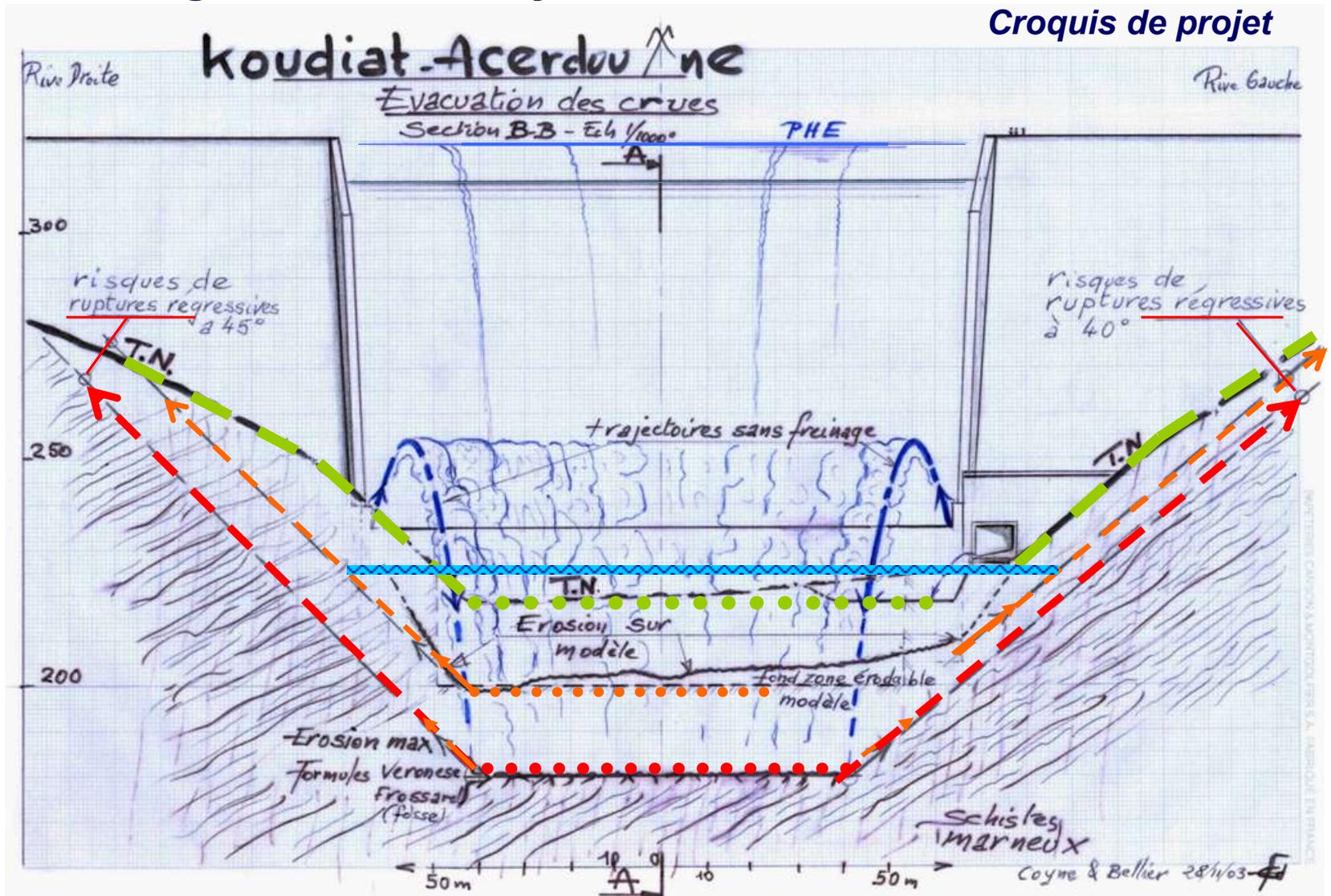
3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues

Configuration initiale de l'évacuateur – Risques d'érosion : dommages / déstabilisation du pied des rives



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

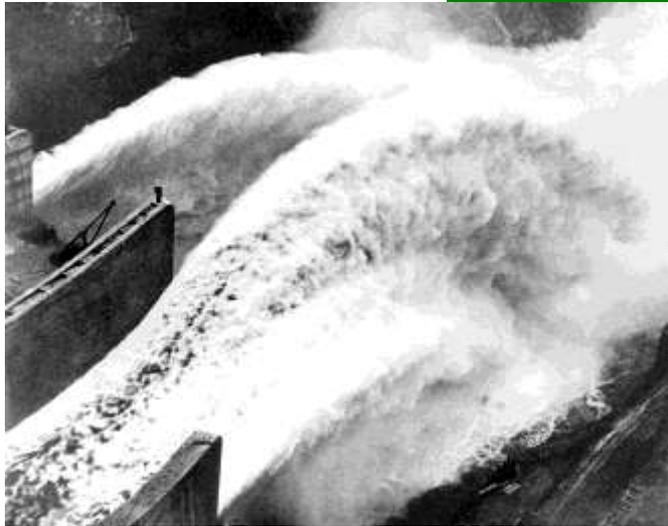
3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues

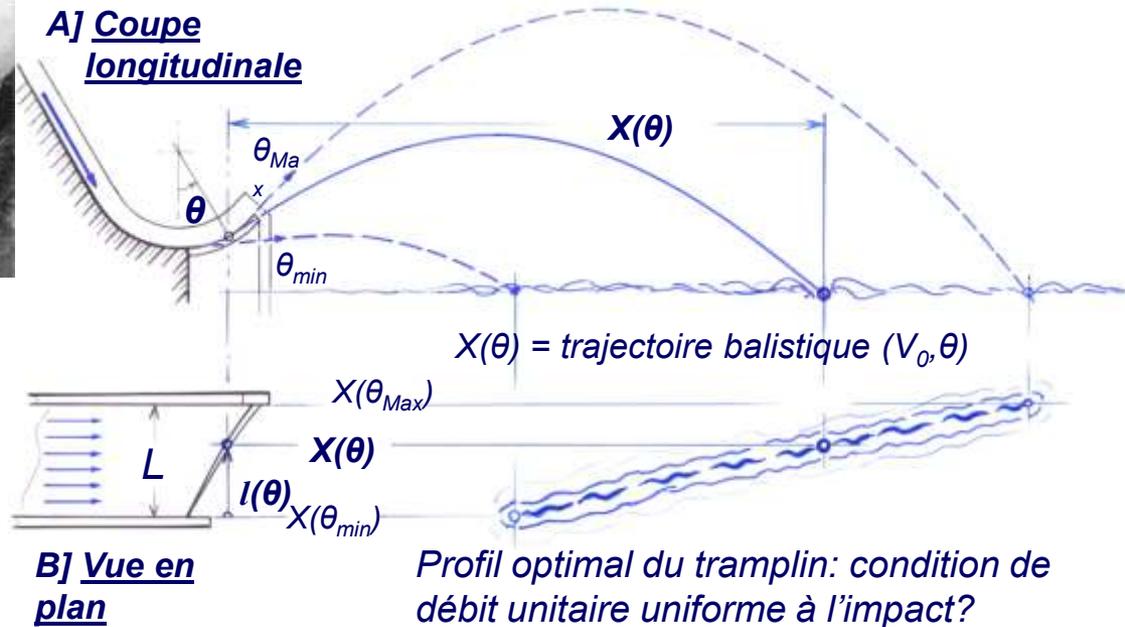
**Choix et dimensionnement des solutions :
Reconfiguration des ouvrages de restitution; tremplins distr. longitudinale**



1- Exemple

Barrage de l'Aigle (1941)

2- Principe

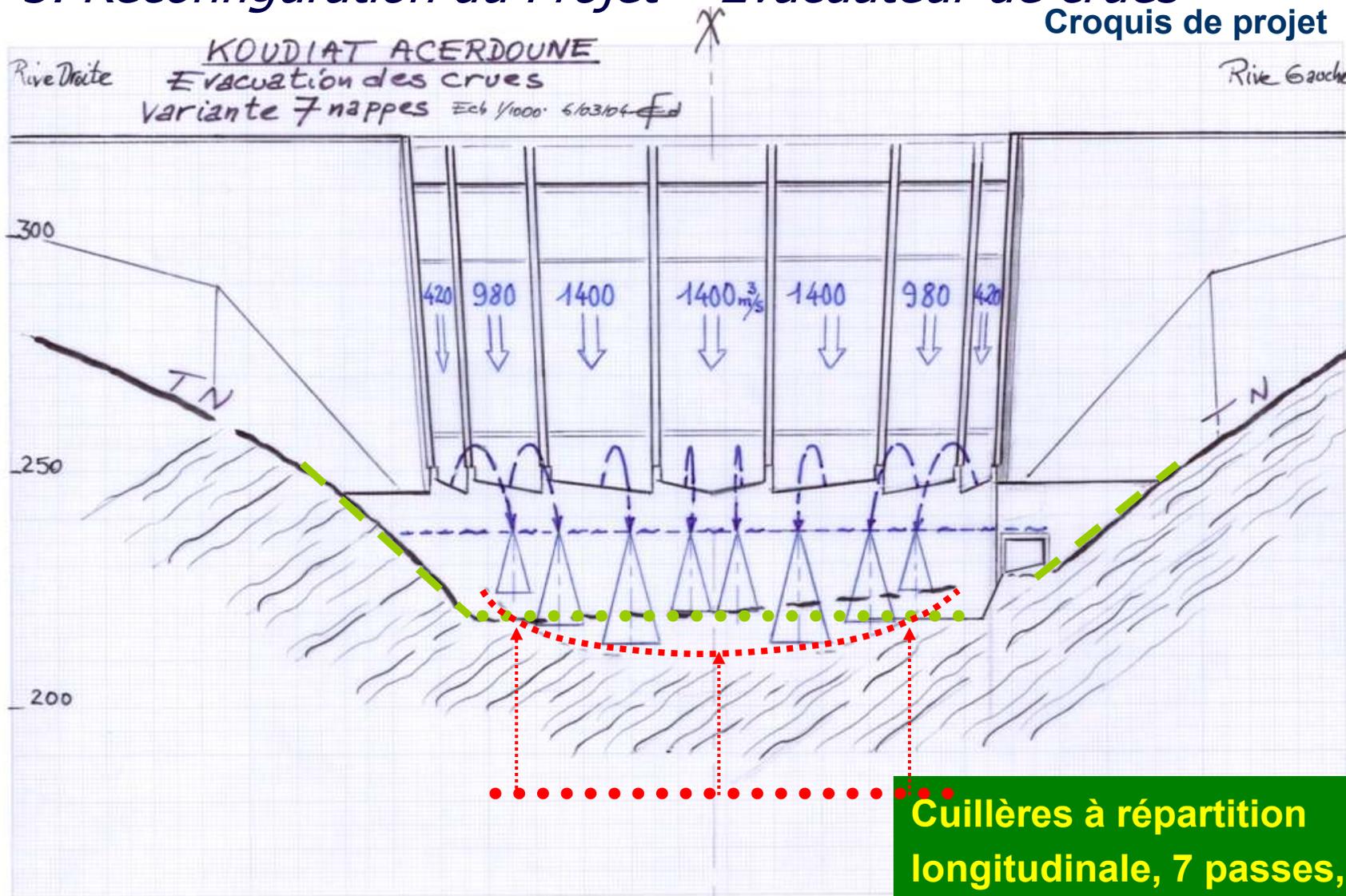


$$\frac{i(\theta)}{L} = \frac{[X(\theta) - X(\theta_{min})]}{[X(\theta_{Max}) - X(\theta_{min})]}$$

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues

Croquis de projet



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues

Modèle hydraulique - nov - déc 2005

Configuration des lignes d'impact



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

3. Reconfiguration du Projet



Photo © Nicolas VERCELLINO

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)



4. Auscultación y comportamiento de la obra

- *Instrumentación de la presa*
- *Comportamiento al llenado*

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

- **Auscultation et comportement de l'ouvrage**
- ***Auscultation du barrage***
- ***Comportement au remplissage***

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

4. Auscultation et comportement

Topographie +

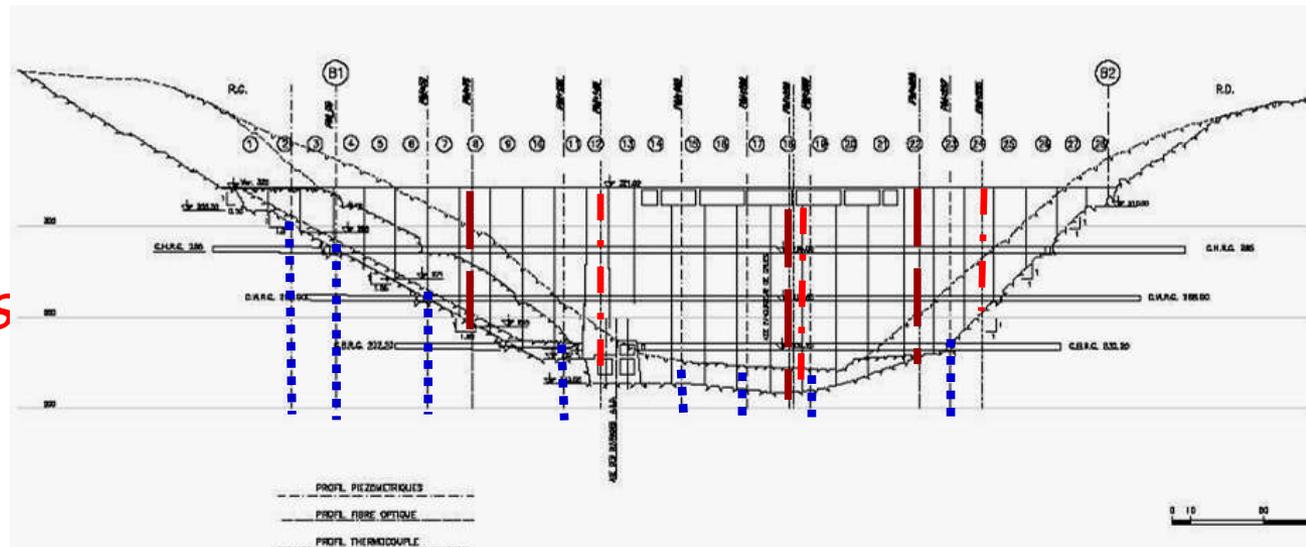
Pendules

directs et *inverses*



Profils dédiés, auscultés avec:

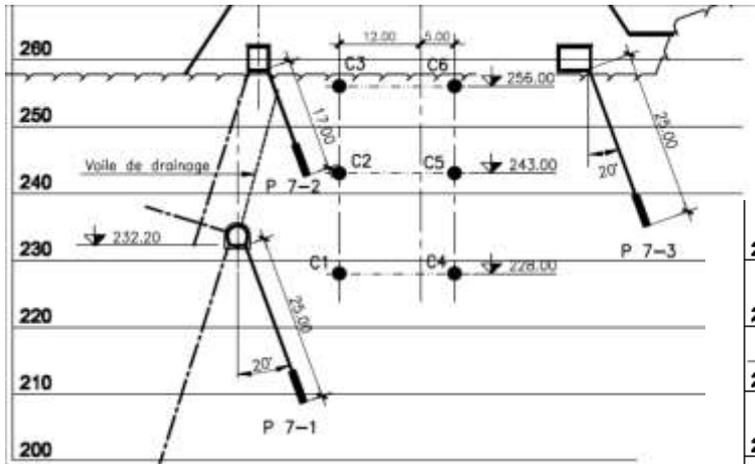
- *piézomètres*
- *fibres optiques*
- *thermomètres (classiques, ponctuels)*



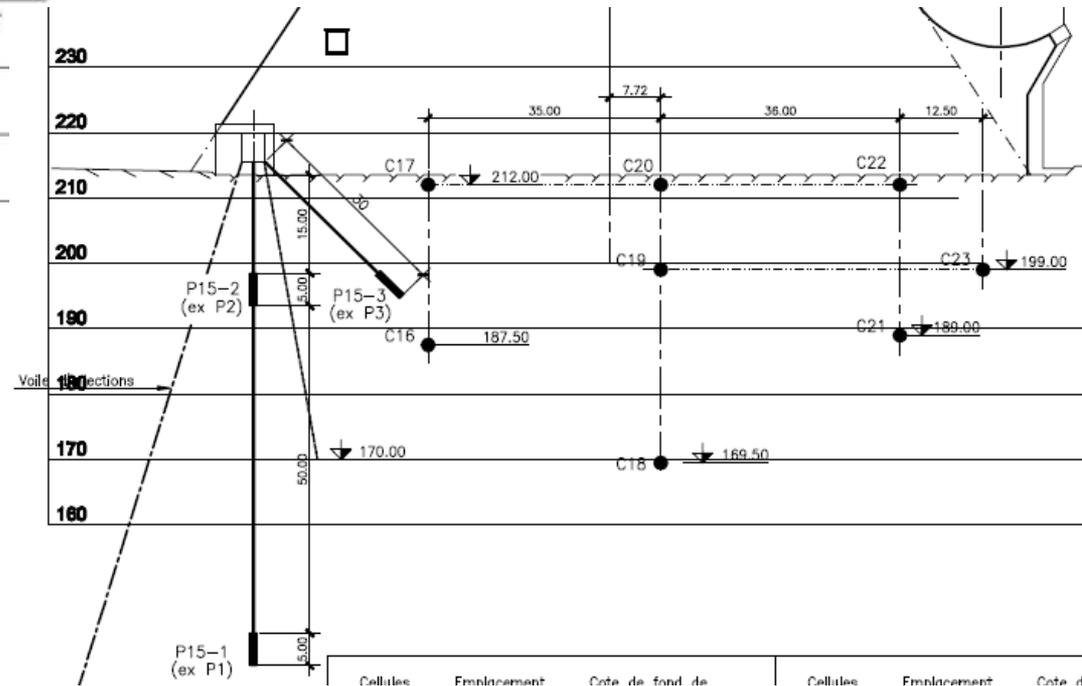
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

4. Auscultation et comportement

Profil piézométrique M I (bloc 7)



Profil piézométrique central (bloc 15)



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

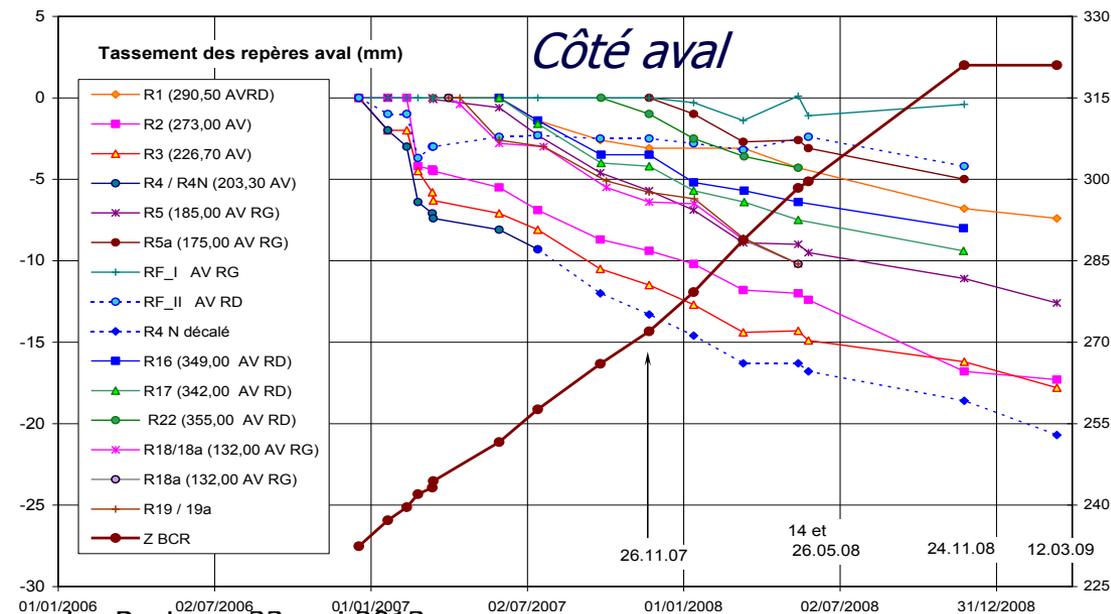
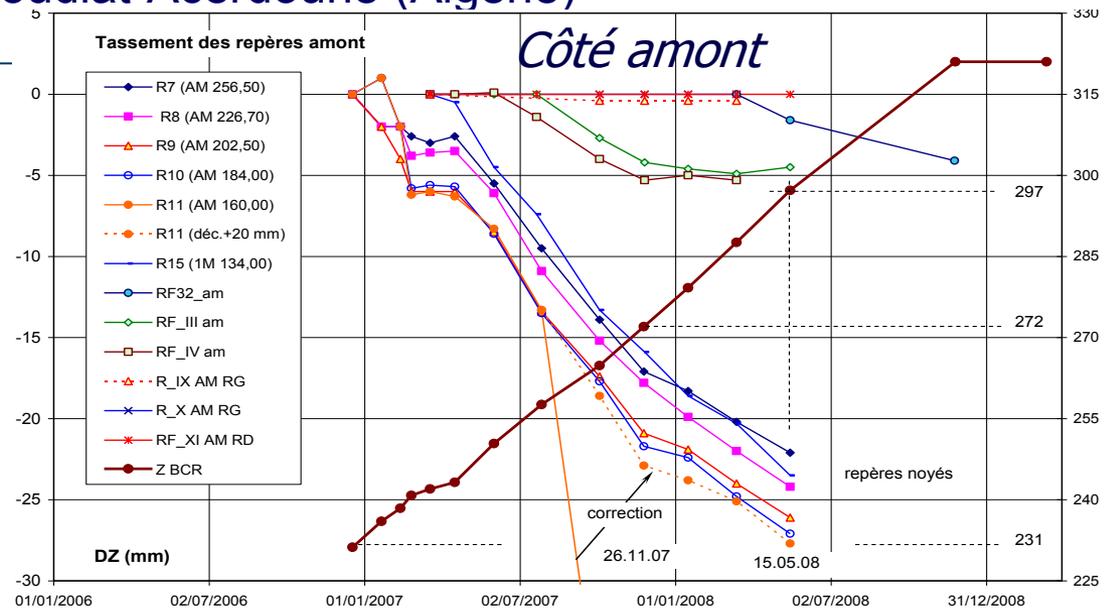
4. *Le système d'auscultation*

- Système centralisé d'acquisition et de transmission des données avec:
 - une **station météo**, and 3 **accélérographes** (Strong Motion Accelerographs - SMA).
 - Mesure du niveau du réservoir:
Echelles limnimétriques (mesure directe de la profondeur d'eau par détecteurs)
+2 capteurs pour mesure automatique du **niveau du réservoir**,
- Suivi topographique avec repères comme référence principale et un réseau de points X,Y,Z , ainsi qu'une série de points en galeries
- Une série d'**instruments** installés dans la masse du barrage :
 - 10 **pendules** (6 directs et 4 inverses),
 - 46 **piézomètres** ouverts à lecture directe
 - 37 **cellules de pression** en fondation (à corde vibrante),
 - 2 **extensomètres en forage en fondation**
 - 3 **extensomètres sur la face amont** (à corde vibrante),
 - 37 **fissuromètres 3D de mouvements des joints** (type "Vinchon"),
 - 32 **stations de mesure de débit pour mesure débit drainage ou de fuite**,
 - 72 capteurs de **température** (thermocouples), blocs 12, 18, 24,
 - Système de mesure continue de la température du béton du barrage **par fibres optique**.

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

4. Auscultation et comportement

Tassements durant la construction



Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

4. Auscultation et comportement

Interprétation des tassements par les formules de Vogt
ou les tables de Giroud, en mai 2008, module de rigidité
en retour:

$$**E \sim 5 GPa**$$

Une valeur un peu moins élevée est attendue pour les
tassements différés

4. *Auscultation et comportement*

Piézométrie: les pressions en fondation apparaissent bien contrôlées par les rideaux d'injection et de drainage. A l'aval, les pressions sont jusqu'à maintenant déconnectées du remplissage du réservoir.

Des infiltrations détectées sous le lit de la rivière ont été traitées avec succès.

Débits de fuite: valeurs raisonnables pour le moment, de l'ordre de $0,75 \text{ hm}^3$ par an (*soit environ 23 l/s, ~0,4% de l'apport annuel moyen*)

Vu le volume du réservoir (3 fois l'apport annuel moyen) le remplissage s'est effectué très progressivement, et le suivi de tous les paramètres se poursuit (remplissage complet presque atteint)

Stabilité des rives: deux glissements superficiels d'ampleur limitée ont eu lieu sans dommage dans la partie supérieure de la rive droite, suite à des événements climatiques exceptionnels

Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage
de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

Conclusions

Merci pour votre attention...

