

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

Etienne FROSSARD



TRACTEBEL Engineering
GDF SUEZ

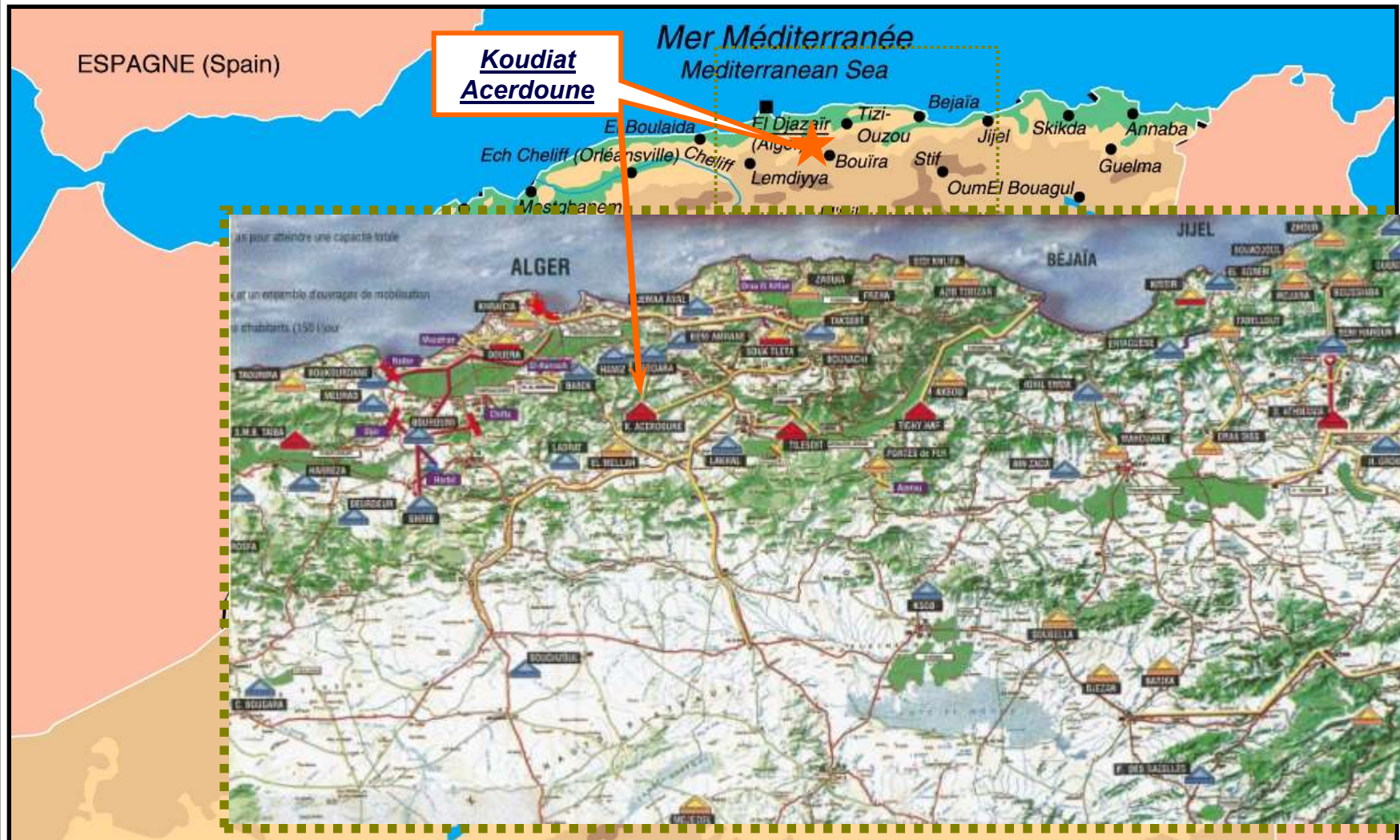
Comportement actuel de l'ouvrage indissociable de son historique de construction

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



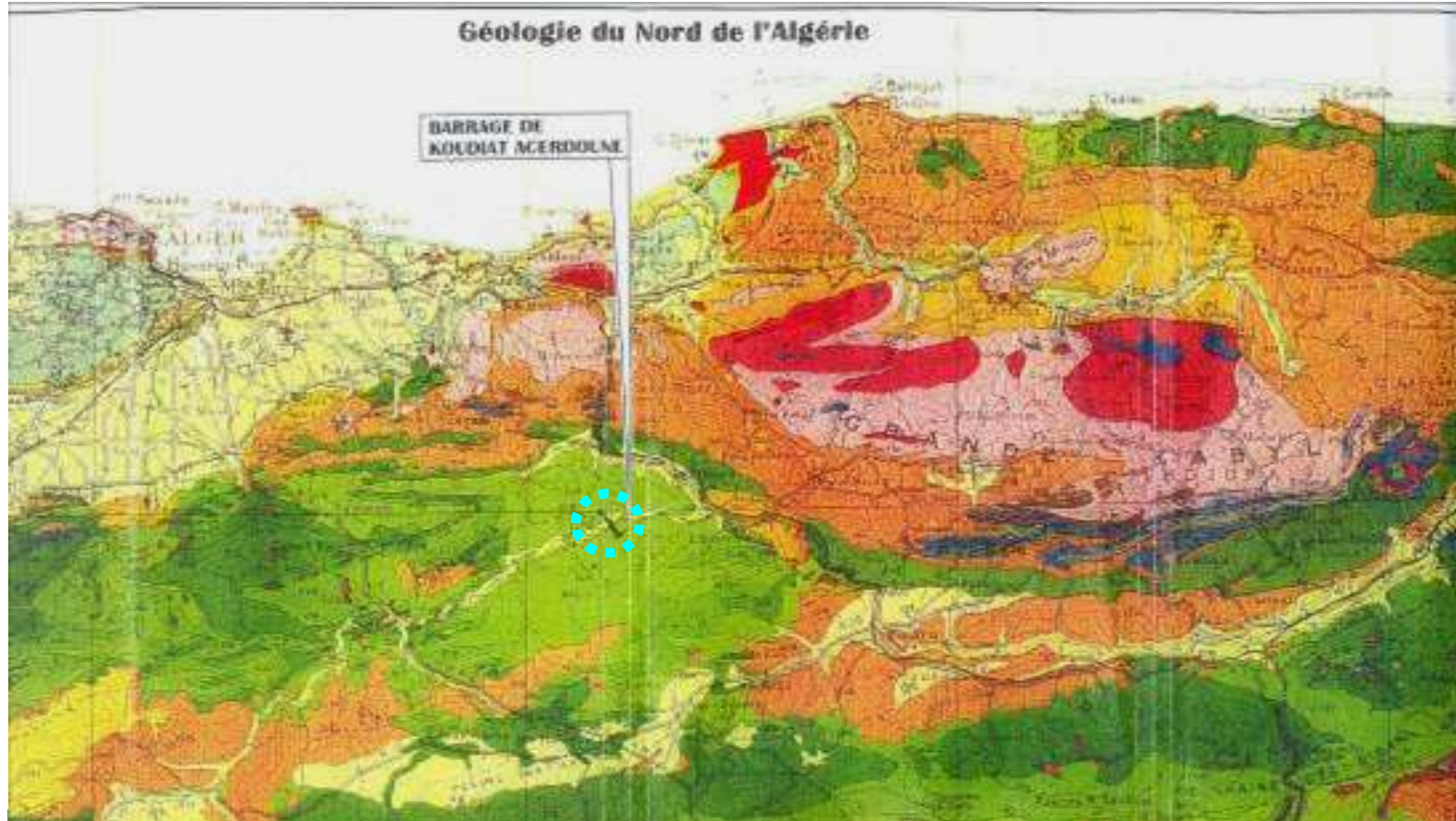
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

1. Contexte et projet original



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

1. Contexte et projet original

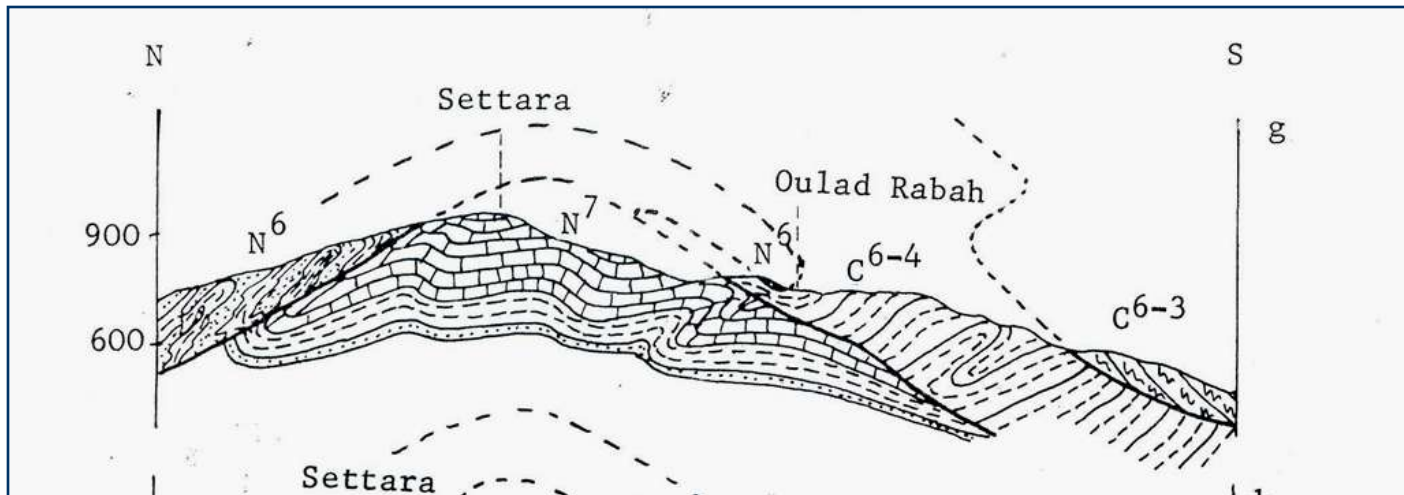
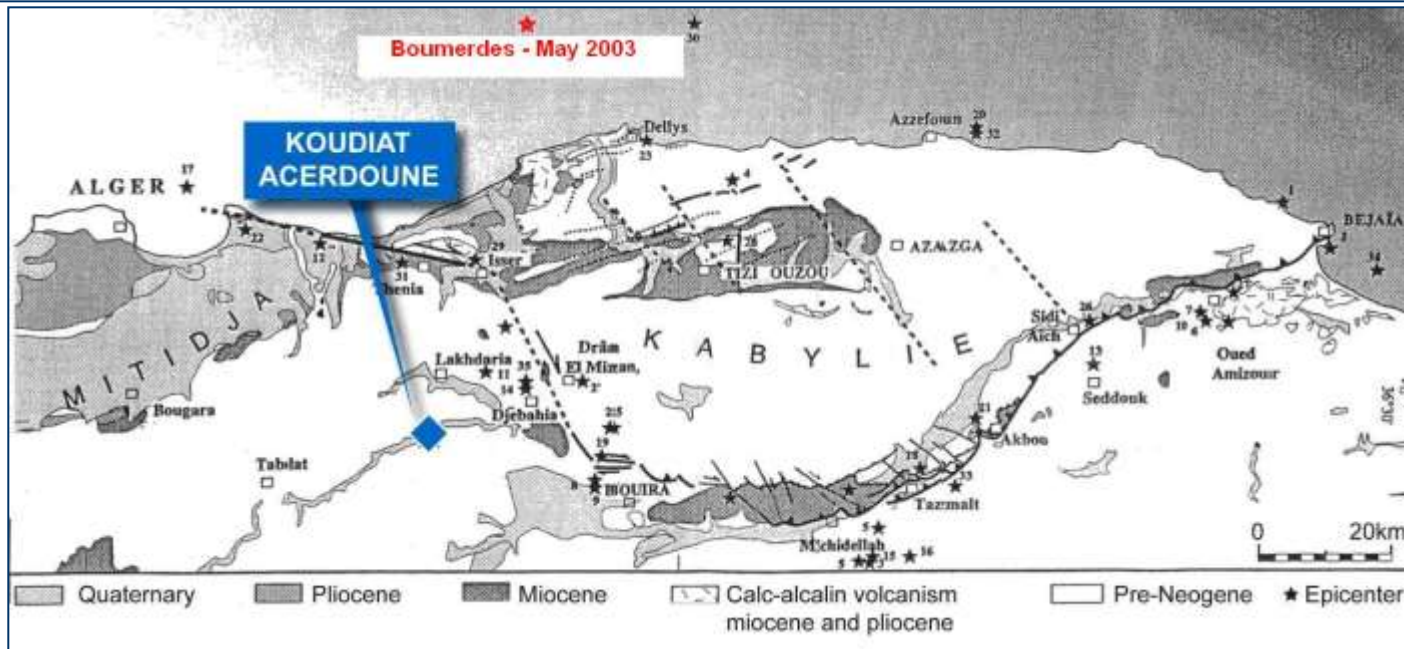


- Structure régionale: superposition de chevauchements d'âge Miocène, (convergence Afrique-Europe)
- Substratum rocheux: - schistes marno-calcaires (Crétacé moyen)
- calcaires, souvent stratifiés (Crétacé supérieur)

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

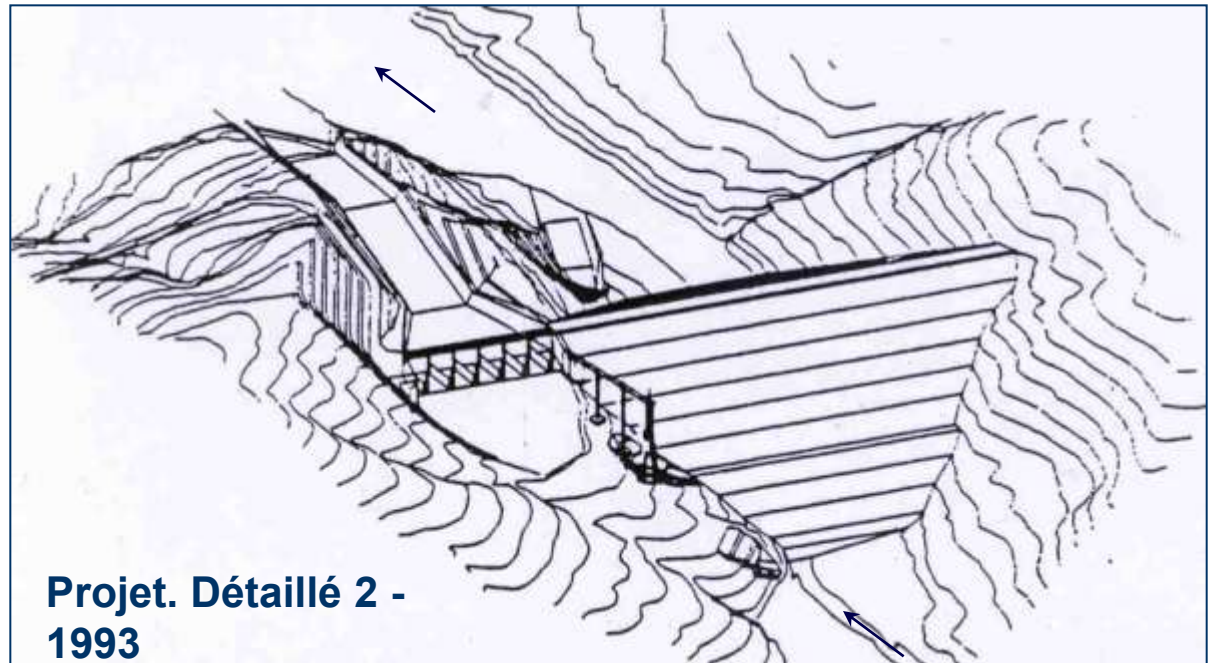


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

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



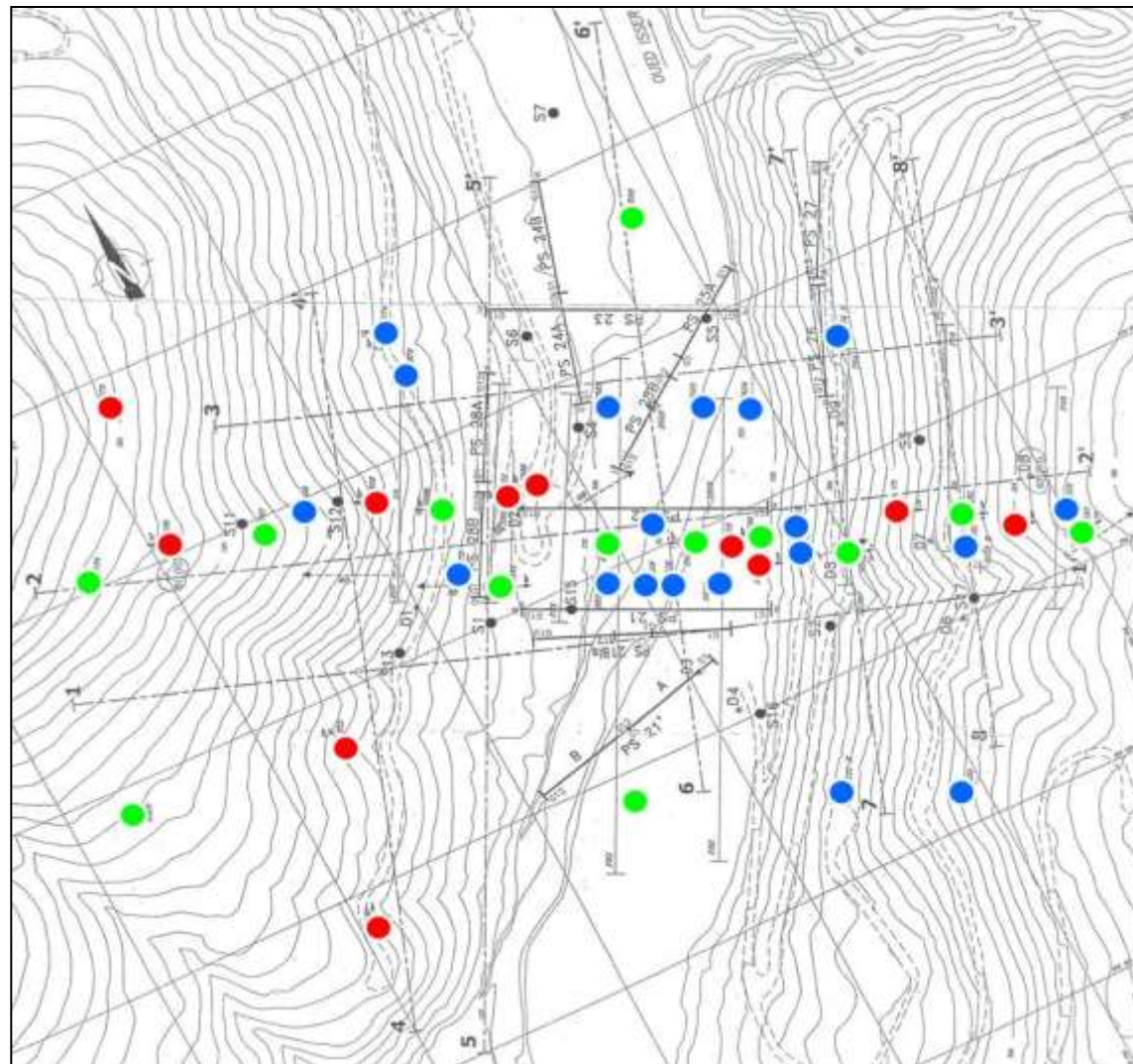
...pour un réservoir de 640 hm³, un des plus grands d'Algérie, destiné à garantir à long terme l'approvisionnement en eau pour toute la région d'Alger.

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

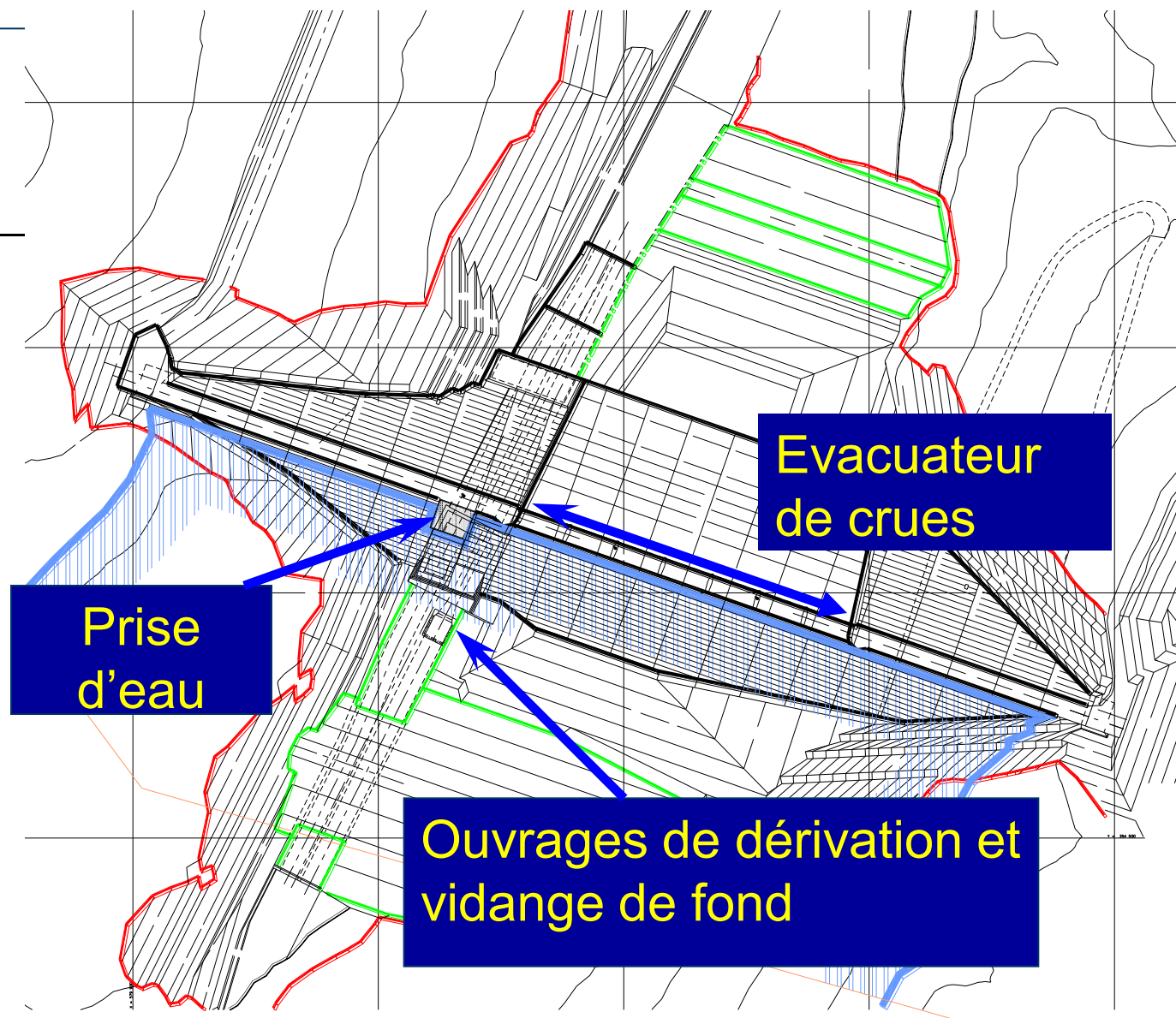
Niveau normal (NWL)	311
Niveau maximum exceptionnel (MWL)	319,64
Capacité totale (~3 fois l'apport annuel)	640 hm³
Capacité utile	450 hm³
Bassin-versant	2790 km²

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

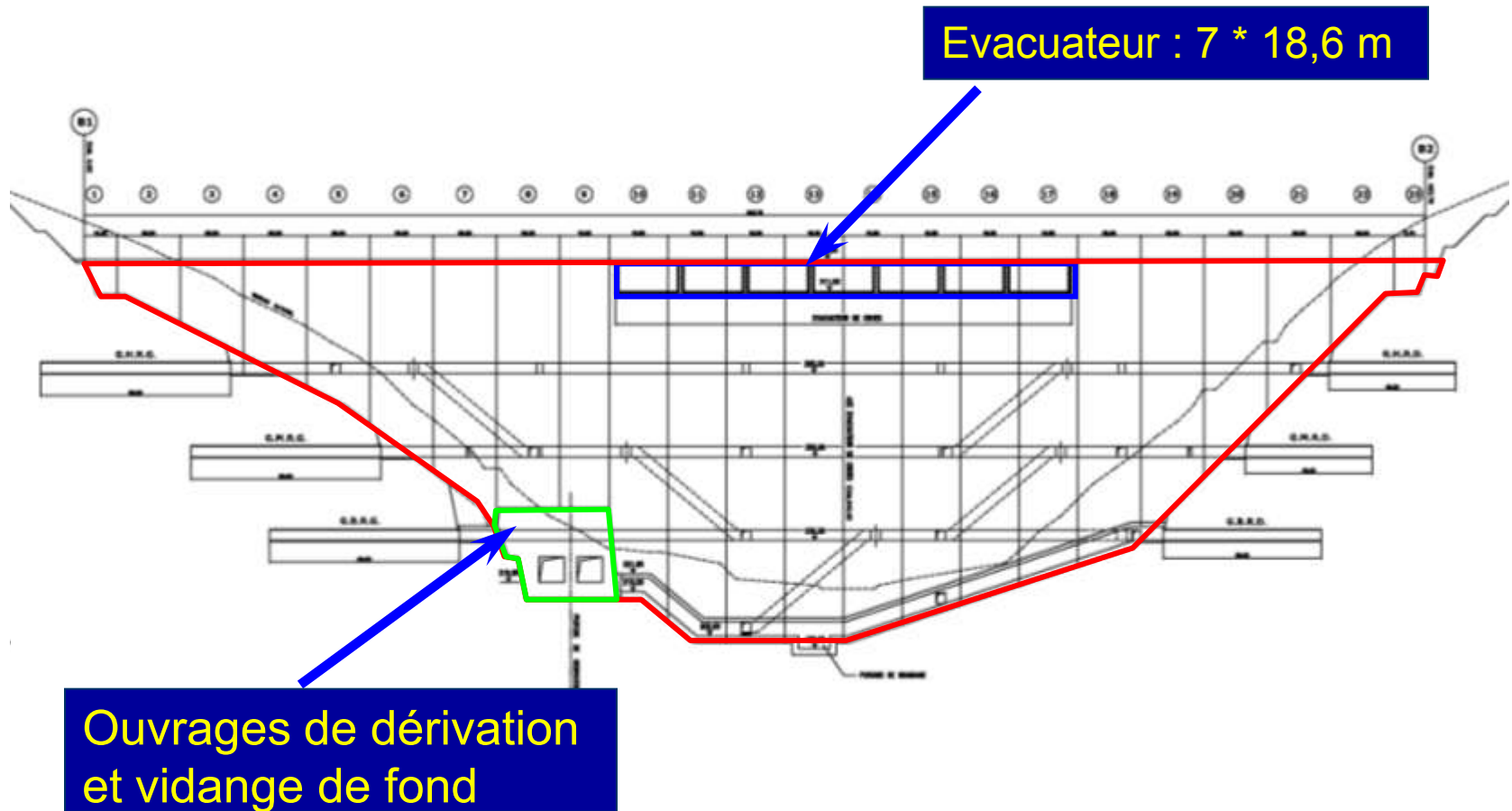


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)



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

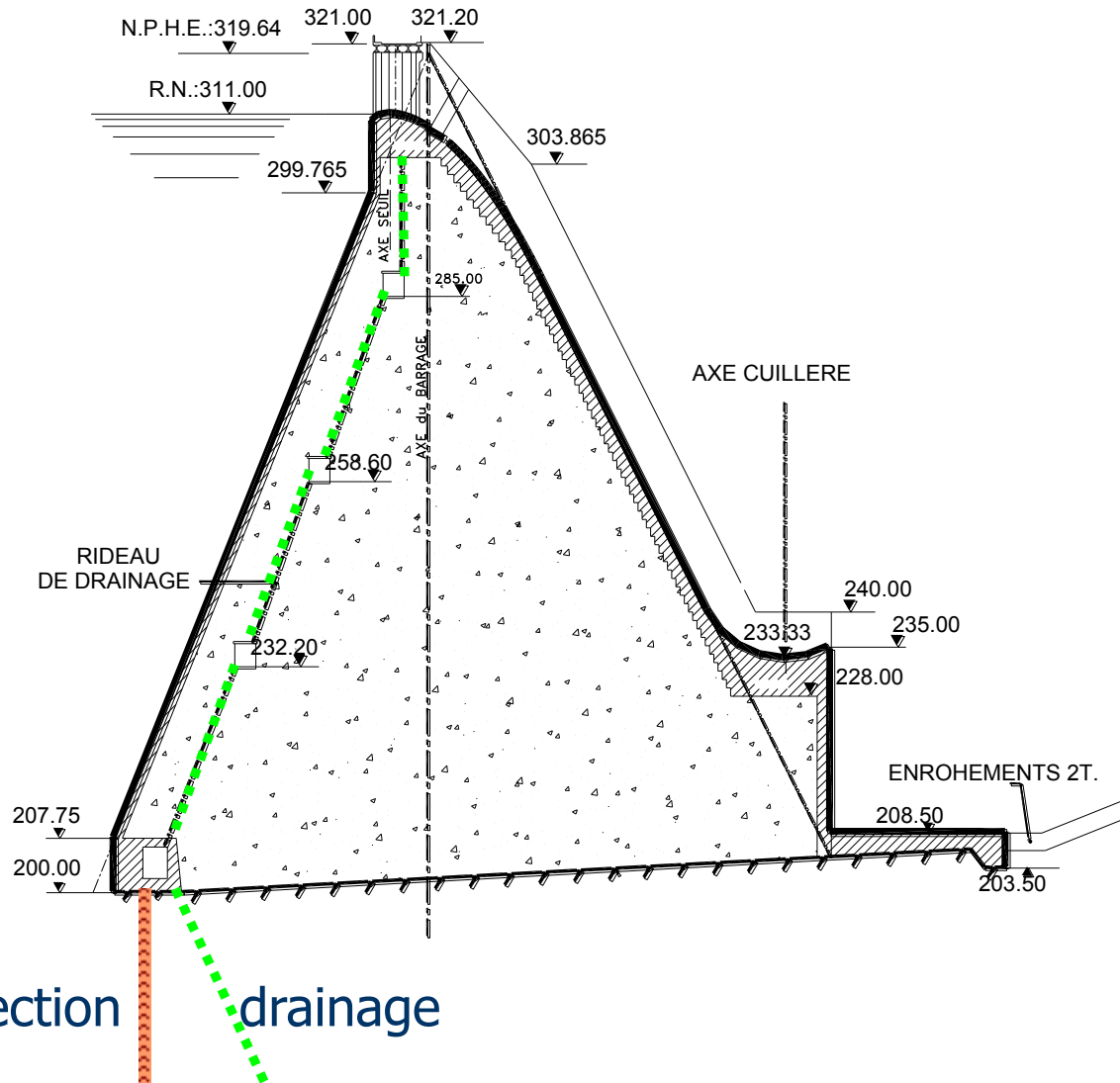
1. Contexte et projet original



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

1. Contexte et projet original

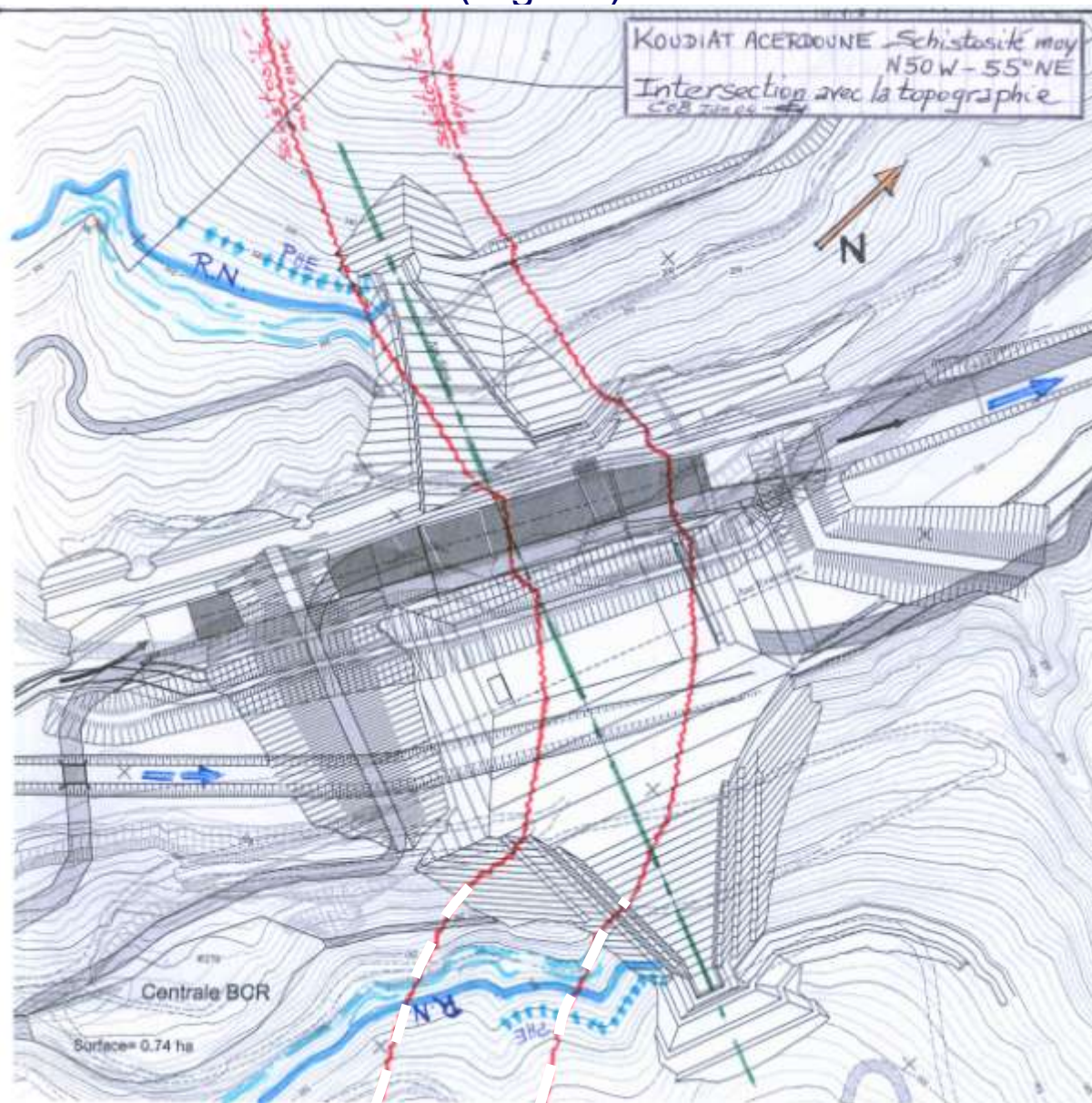
Section typique sur l'évacuateur de crues



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

1. Contexte et projet original

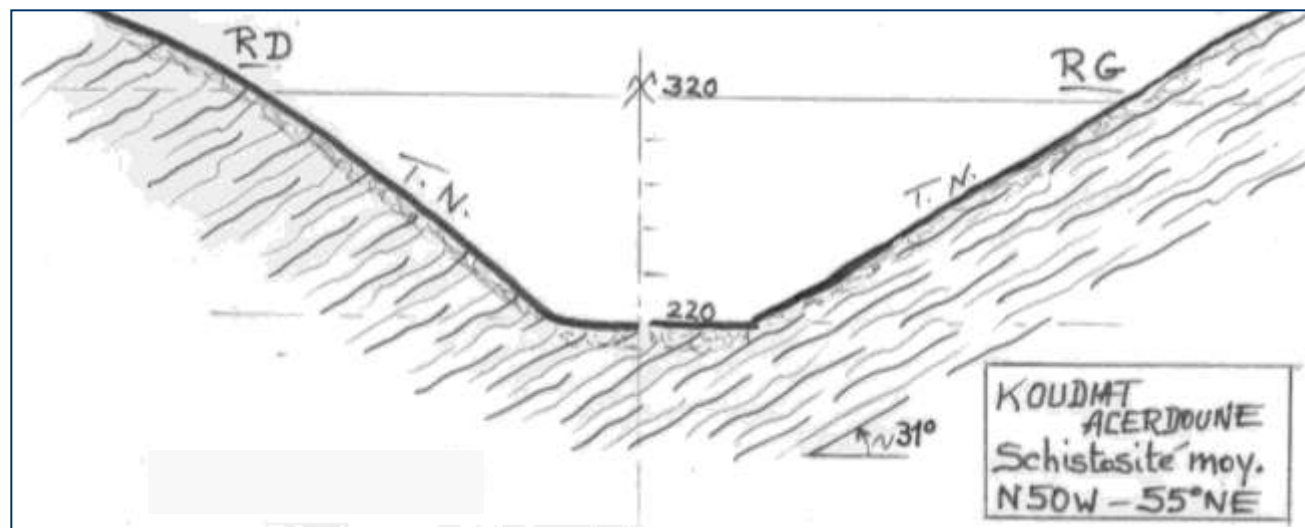
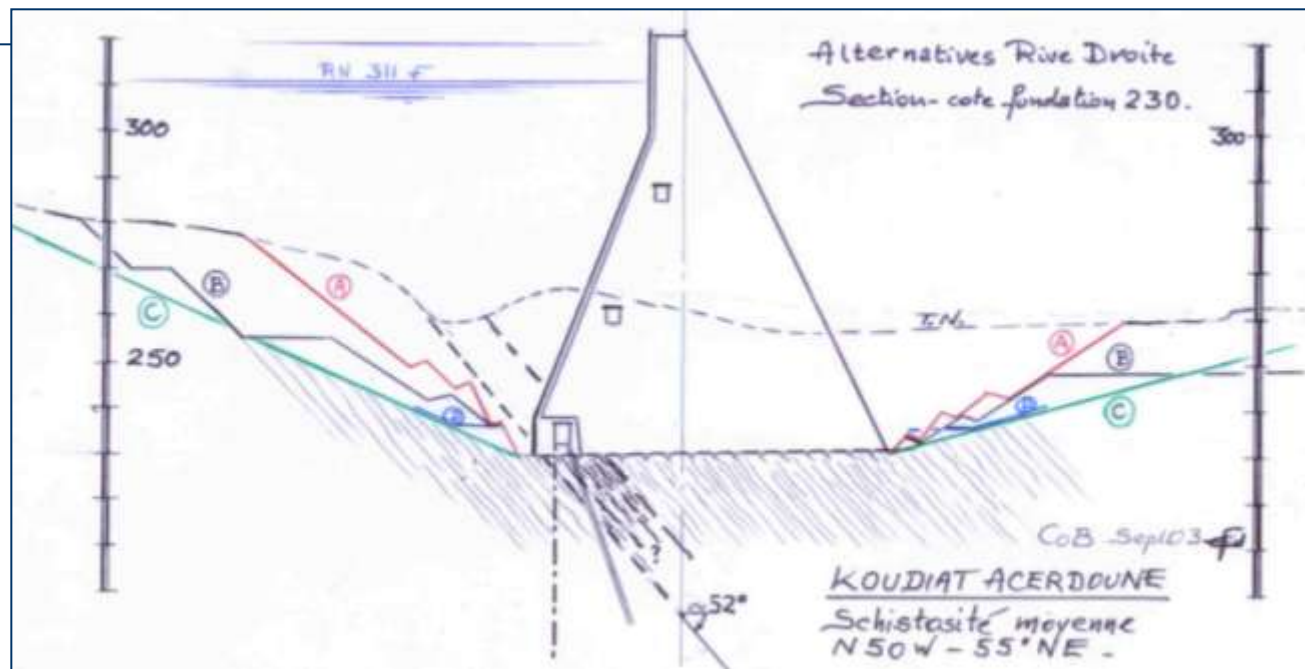
Disposition des ouvrages par rapport à la structure moyenne du massif rocheux



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

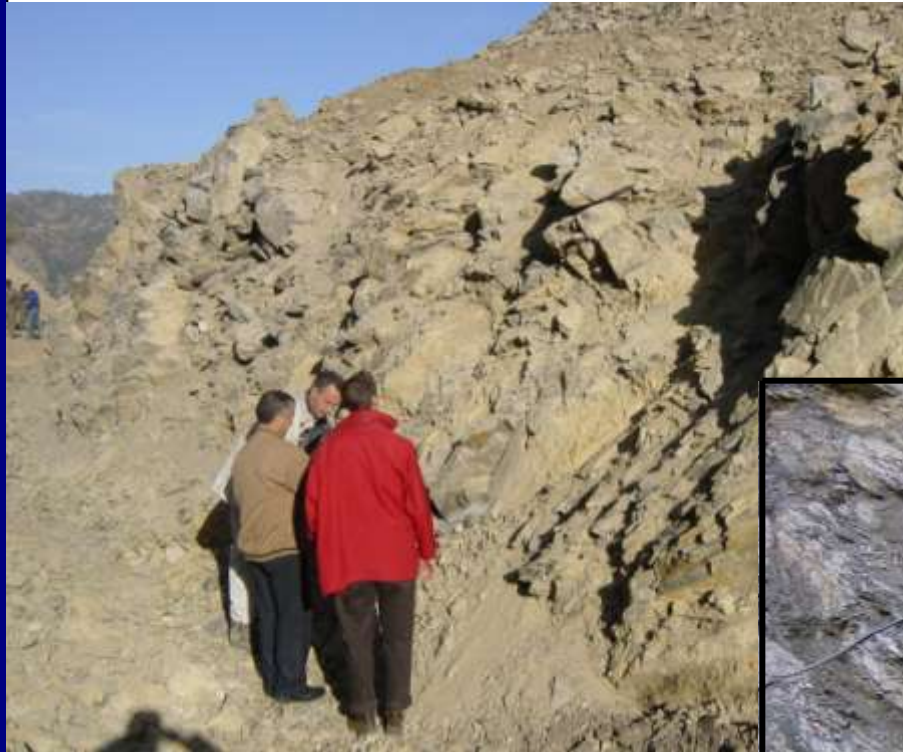


2. Difficultés géologiques rencontrées à l'exécution

- *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)

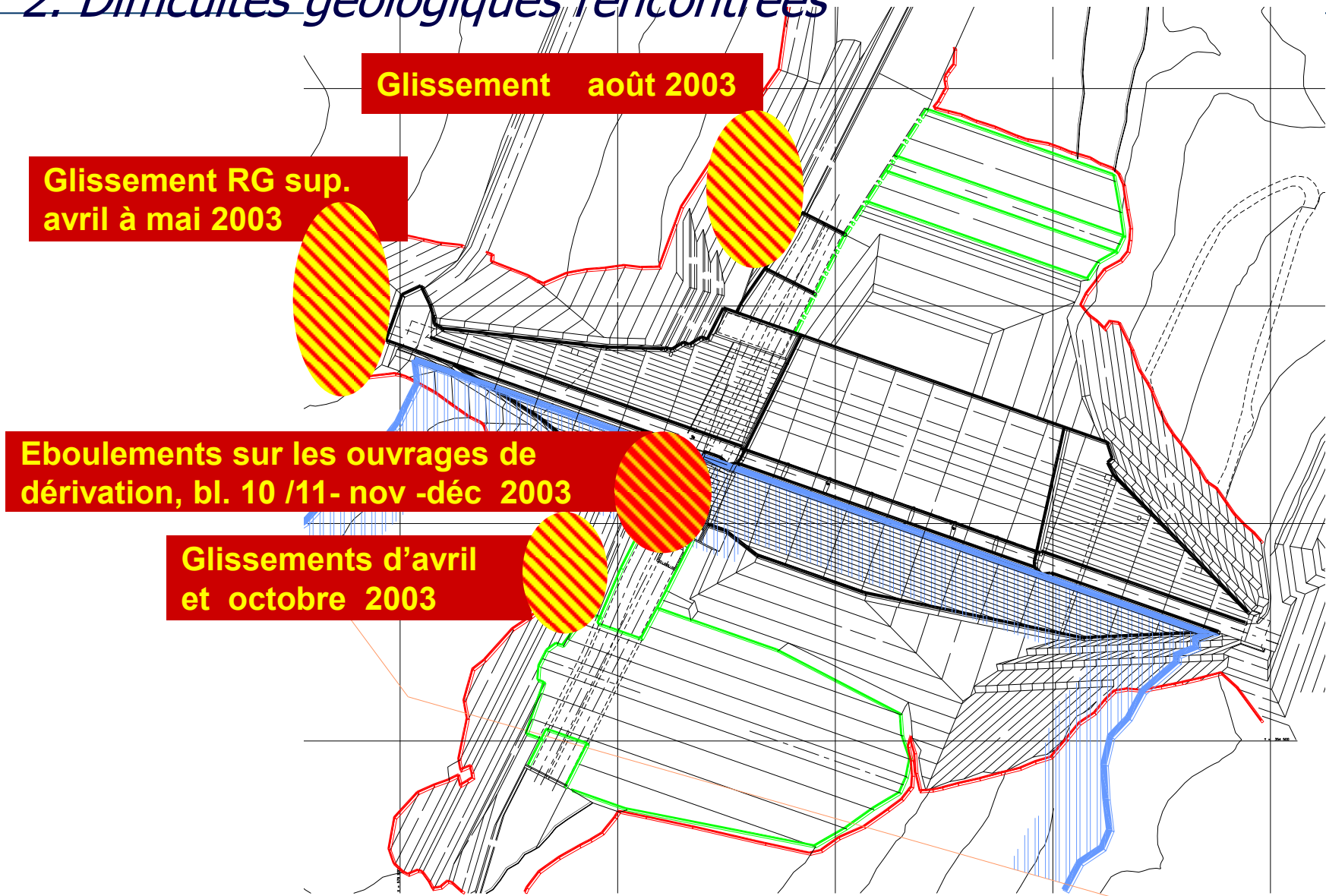
- Aval, partie inférieure (août 2003)

- 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



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

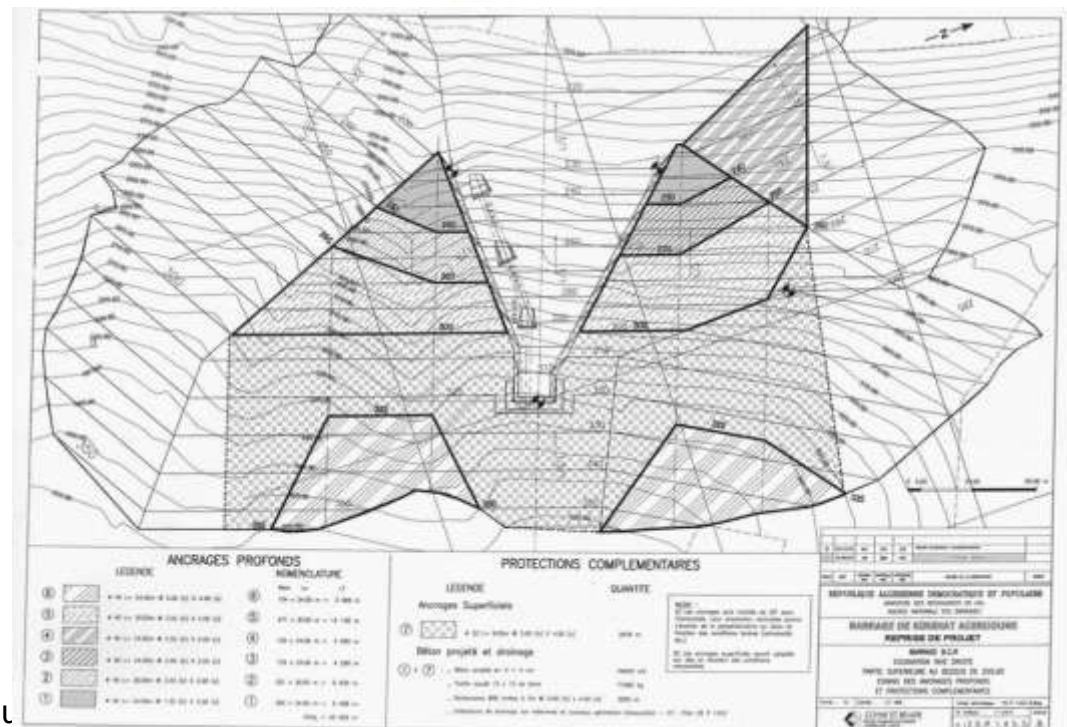


Projet préventif pour un arrangement de la rive droite:

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

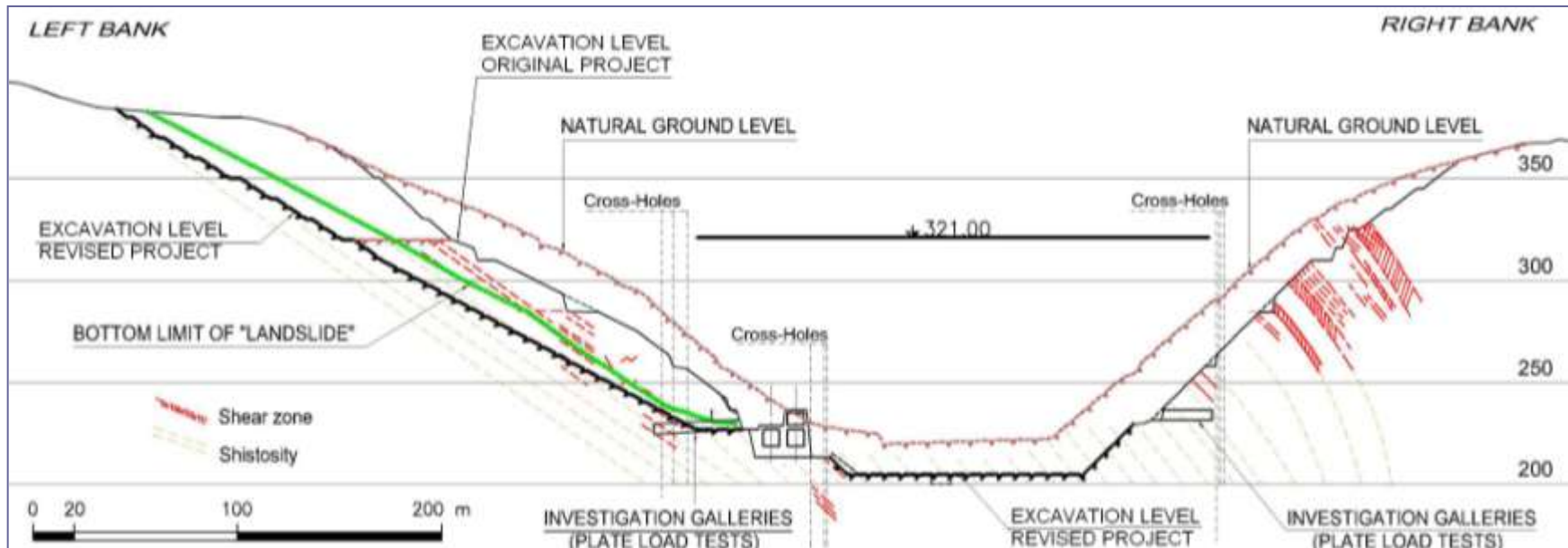
- Réduction significative de la résistance au cisaillement estimée dans les schistes marneux (typiquement trouvés avec 0,15 MPa de cohésion et 29° d'angle de frottement, au lieu de 0,5 MPa et 35°);
- Estimation du module statique de rigidité (premier cycle de charge) dans la fondation rocheuse, variant 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

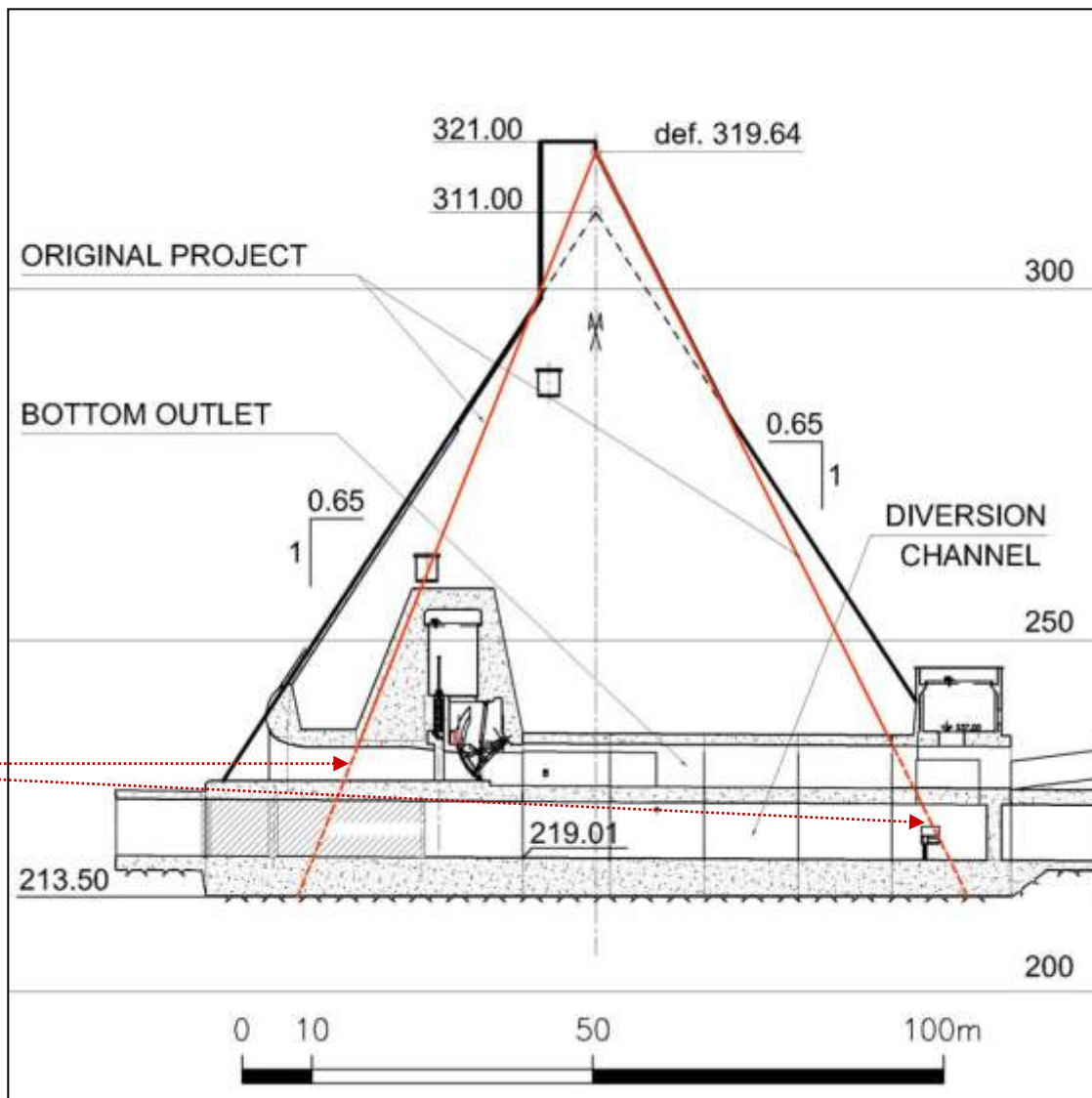


Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

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)

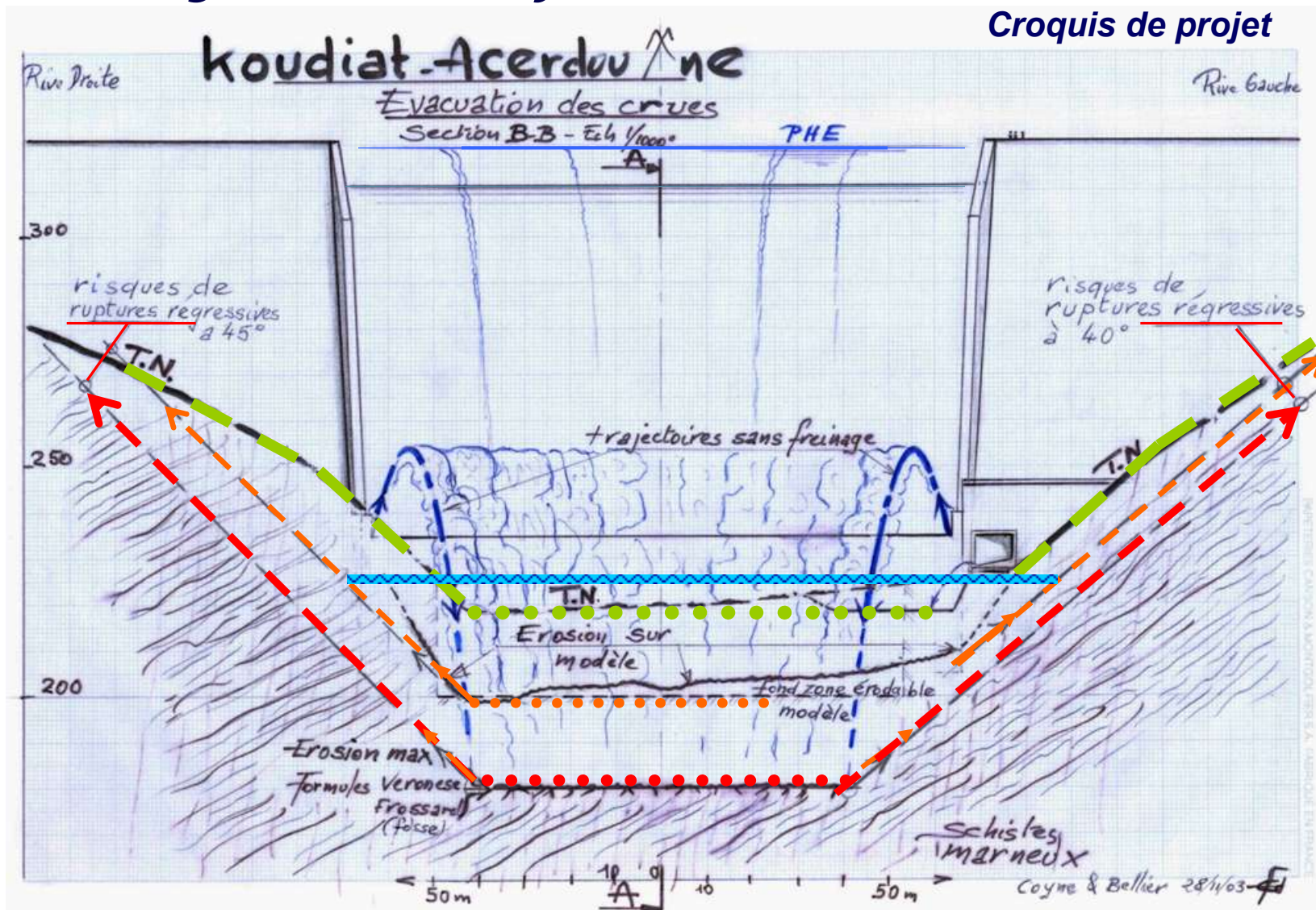
3. Reconfiguration du Projet – Evacuateur de crues

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

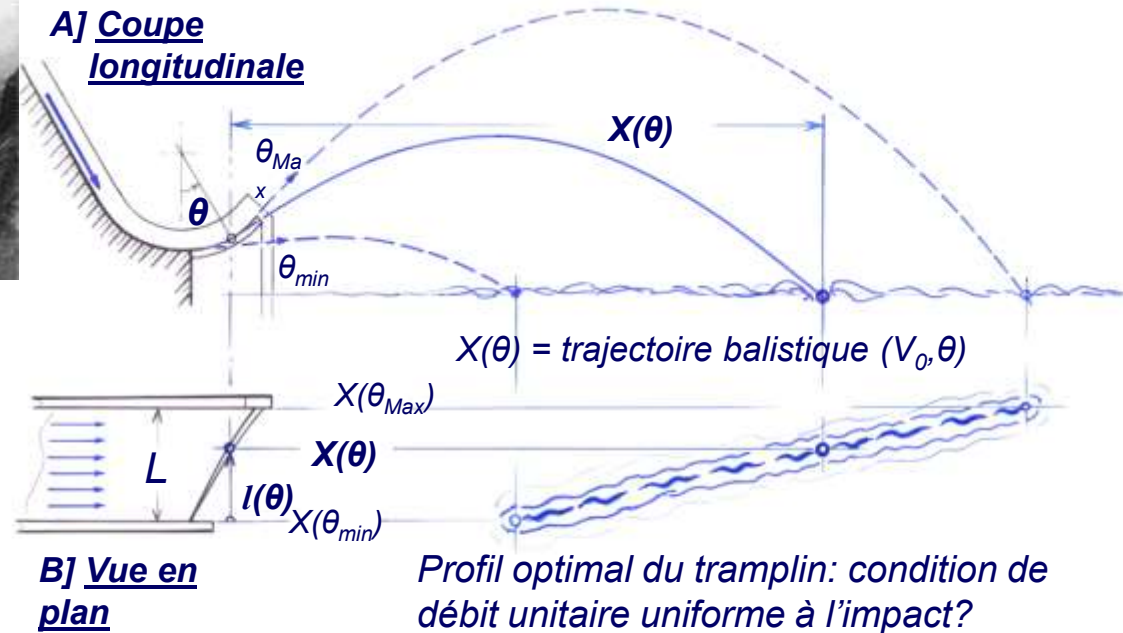
**Choix et dimensionnement des solutions :
Reconfiguration des ouvrages de restitution; tremplins distr. longitudinale**



1- Exemple

Barrage de l'Aigle (1941)

2- Principe

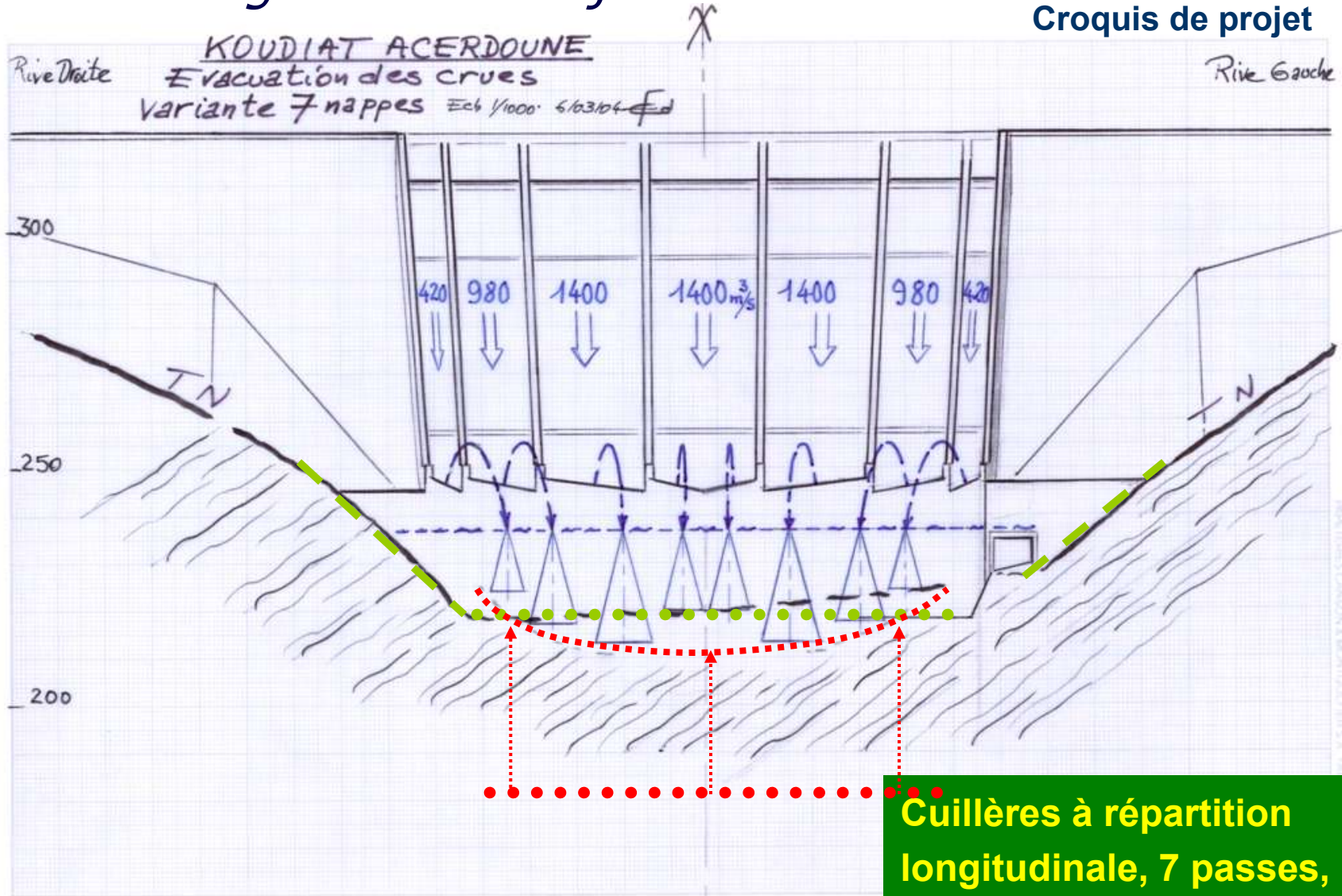


$$\frac{I(\theta)}{L} = \frac{[X(\theta) - X(\theta_{min})]}{[X(\theta_{Max}) - X(\theta_{min})]}$$

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***

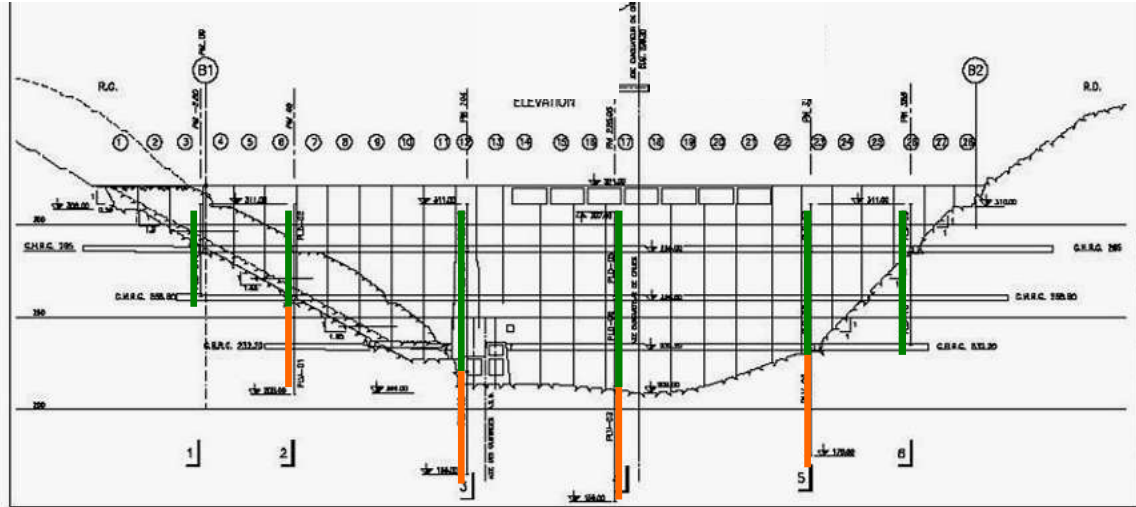
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

4. Auscultation et comportement

Topographie +

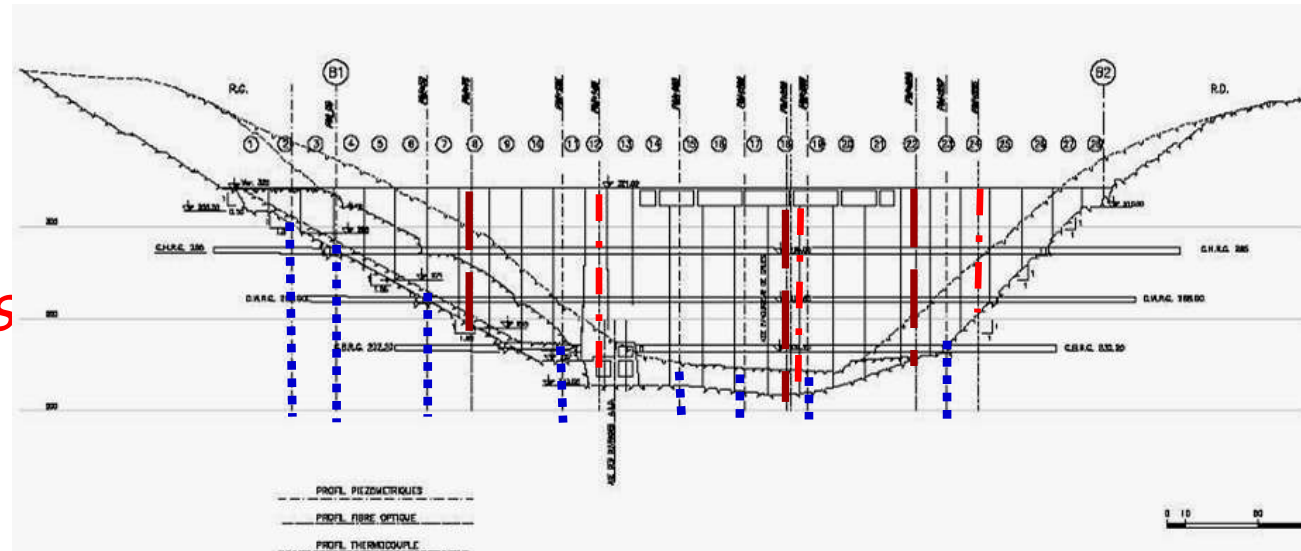
Pendules

directs et *inverses*



Profils dédiés, auscultés avec:

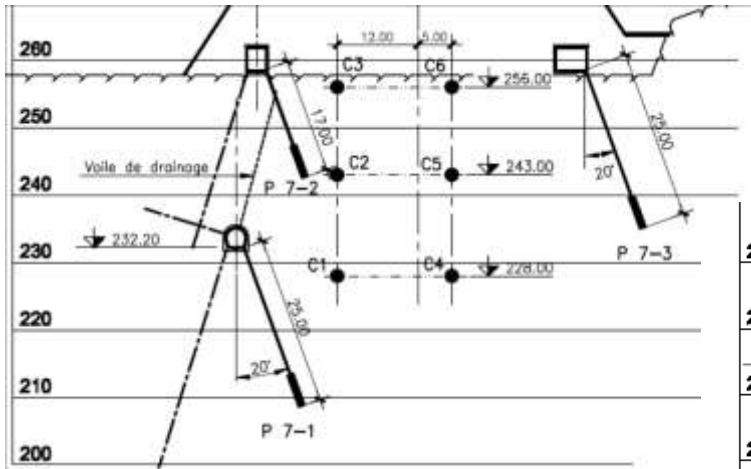
- *piézomètres*
- *fibres optiques*
- *thermomètres (classiques, ponctuels)*



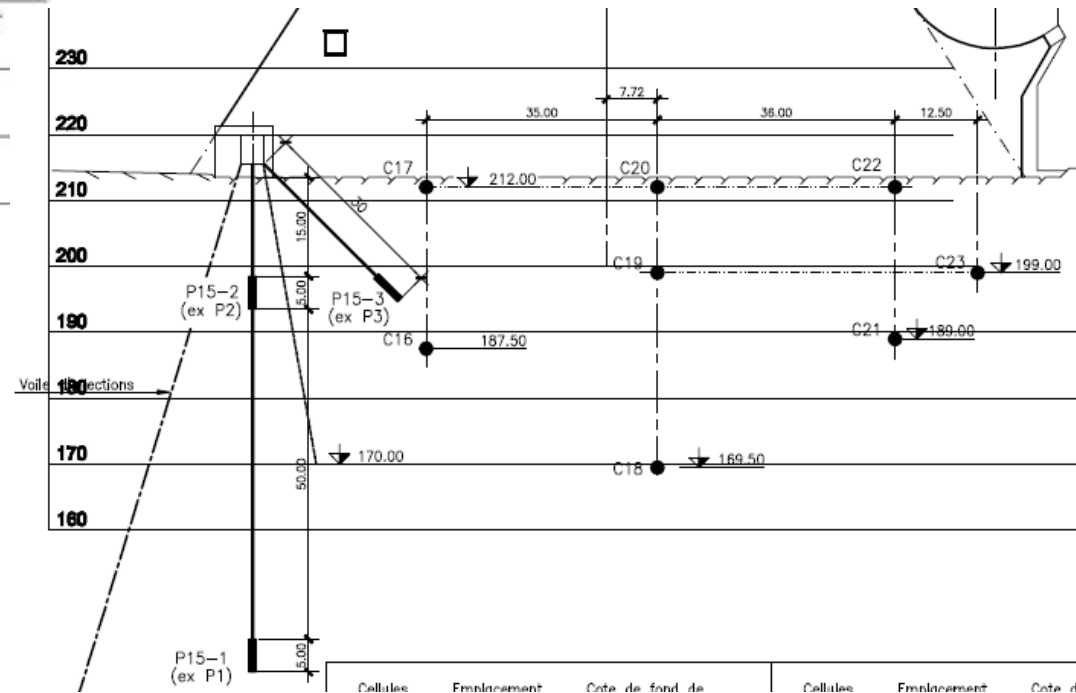
Problèmes exceptionnels de mécanique des roches posés par le barrage de Koudiat-Acerdoune (Algérie)

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)

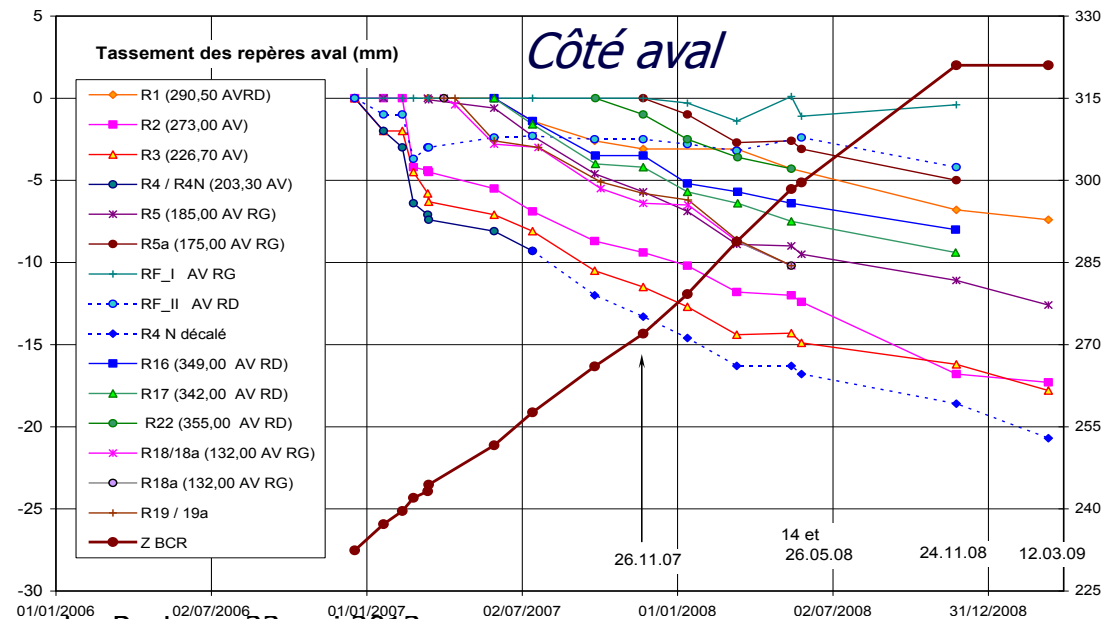
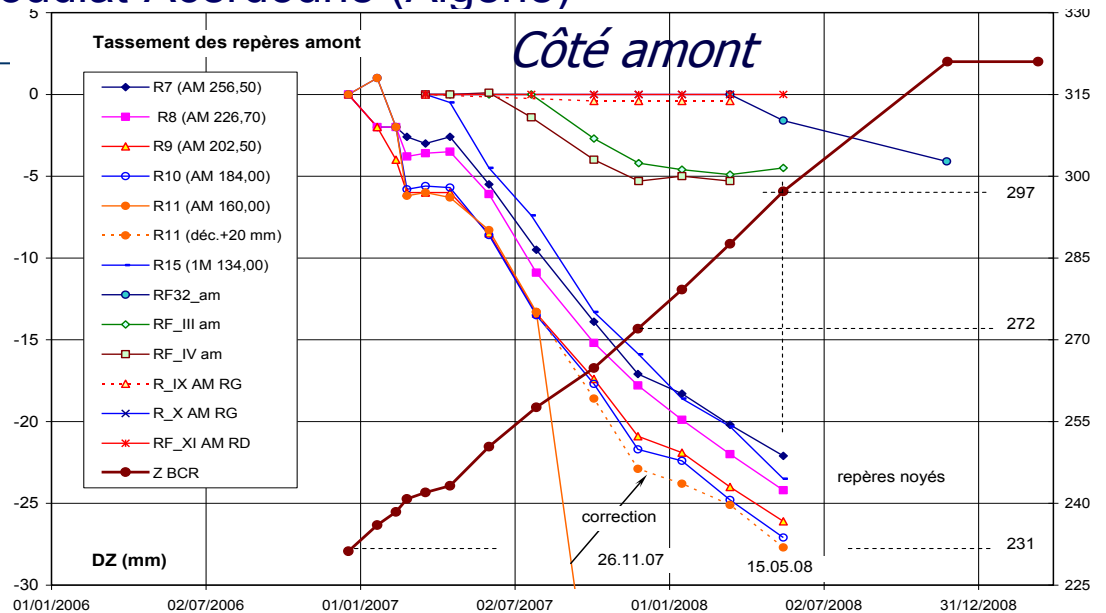
4. *Le système d'auscultation*

- 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



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...

