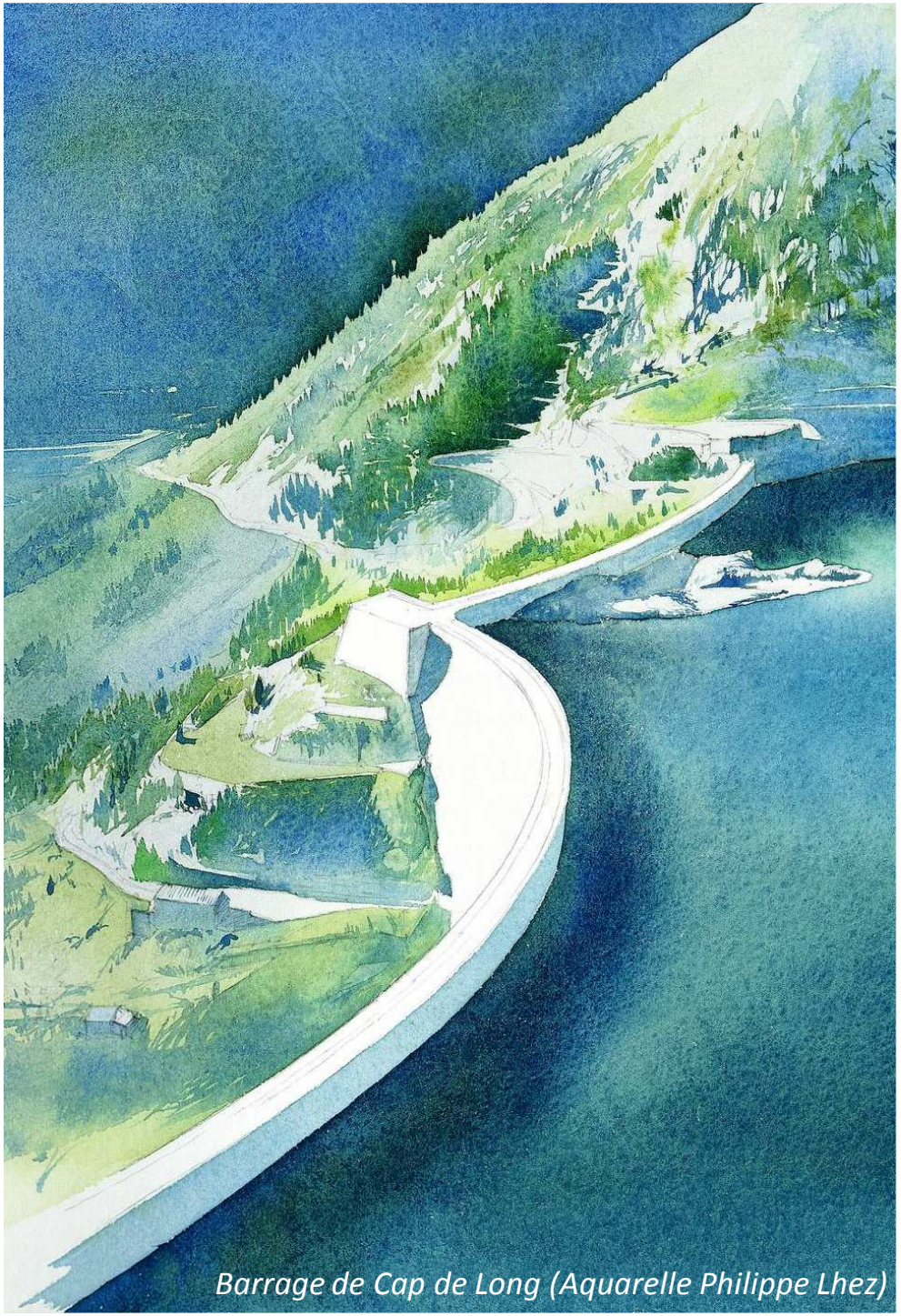
Thème : Géologie et nature des fondations

IMPACT DES IMPREVUS DE LA FONDATION: GIBE III (ETHIOPIE)

VIBERT Christophe, FERARU Dan, MINE Edouard, IANOS Silviu

Colloque CFBR – Fondations des Barrages
8 et 9 avril 2015 – Chambéry



Barrage de Cap de Long (Aquarelle Philippe Lhez)

SOMMAIRE

1. LE PROJET ET LE MODELE GEOTECHNIQUE DE LA FONDATION DU BARRAGE

Présentation du projet et du contexte contractuel
Géologie et caractéristiques géotechniques des fondations déduites des investigations

2. EXCAVATIONS ET REVISION DU MODELE GEOTECHNIQUE

Indices d'une altération plus forte que prévue par le modèle géotechnique initial de la fondation
Observations faites lors de l'excavations des fondations

3. SPECIFICITES DU SITE ET MODIFICATIONS APPORTEES AU PROJET

L'étanchéité de la fondation
Adaptations du projet initial de traitement des fondations

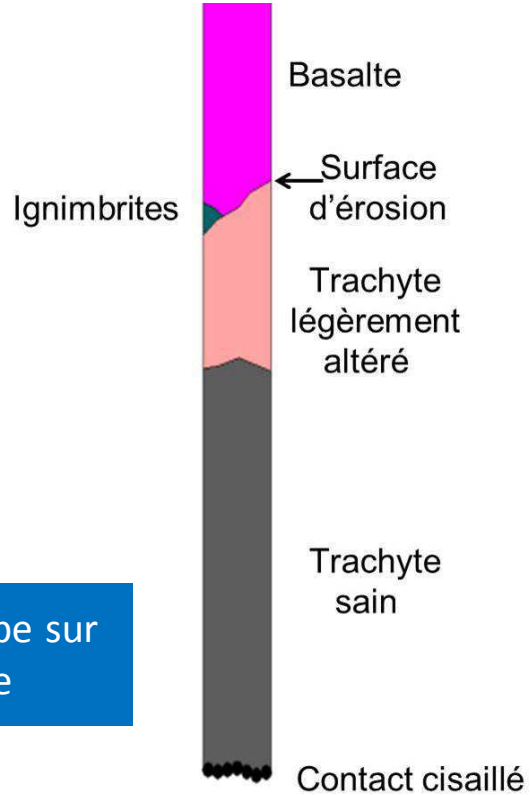
LE PROJET

- **Projet hydroélectrique de 1.870 MW**
  - Barrage BCR de 246m de hauteur
  - Usine de surface, 10 unités
  - Autres travaux d'excavation
    - ❖ Trois tunnels de dérivation (Ø14m, 8m)
    - ❖ Ouvrages de prise d'eau
    - ❖ Deux conduites d'amenée
- **Contexte contractuel**
  - Début de construction en 2007
    - ❖ Contrat EPC
    - ❖ Revue du projet par TEF/COB pour le compte du Client
  - Absence d'investigations du site avant le contrat

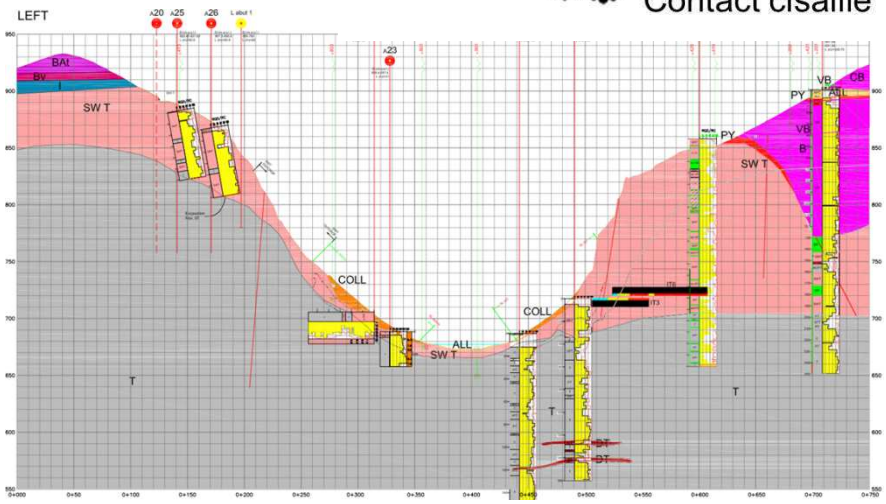
Localisation et vue du site (vers l'aval)

CONTEXTE GEOLOGIQUE

- **Roches volcaniques**
  - Trachyte formant l'essentiel de la fondation
    - ❖ Définition de deux catégories de trachyte
    - ❖ Trachyte sain en profondeur
    - ❖ Trachyte légèrement altéré au-dessus
  - Autres roches
    - ❖ Surface d'érosion au contact supérieur des trachytes
    - ❖ Formation volcaniques plus récentes déposées par la suite (ignimbrites, puis coulées de basalte)

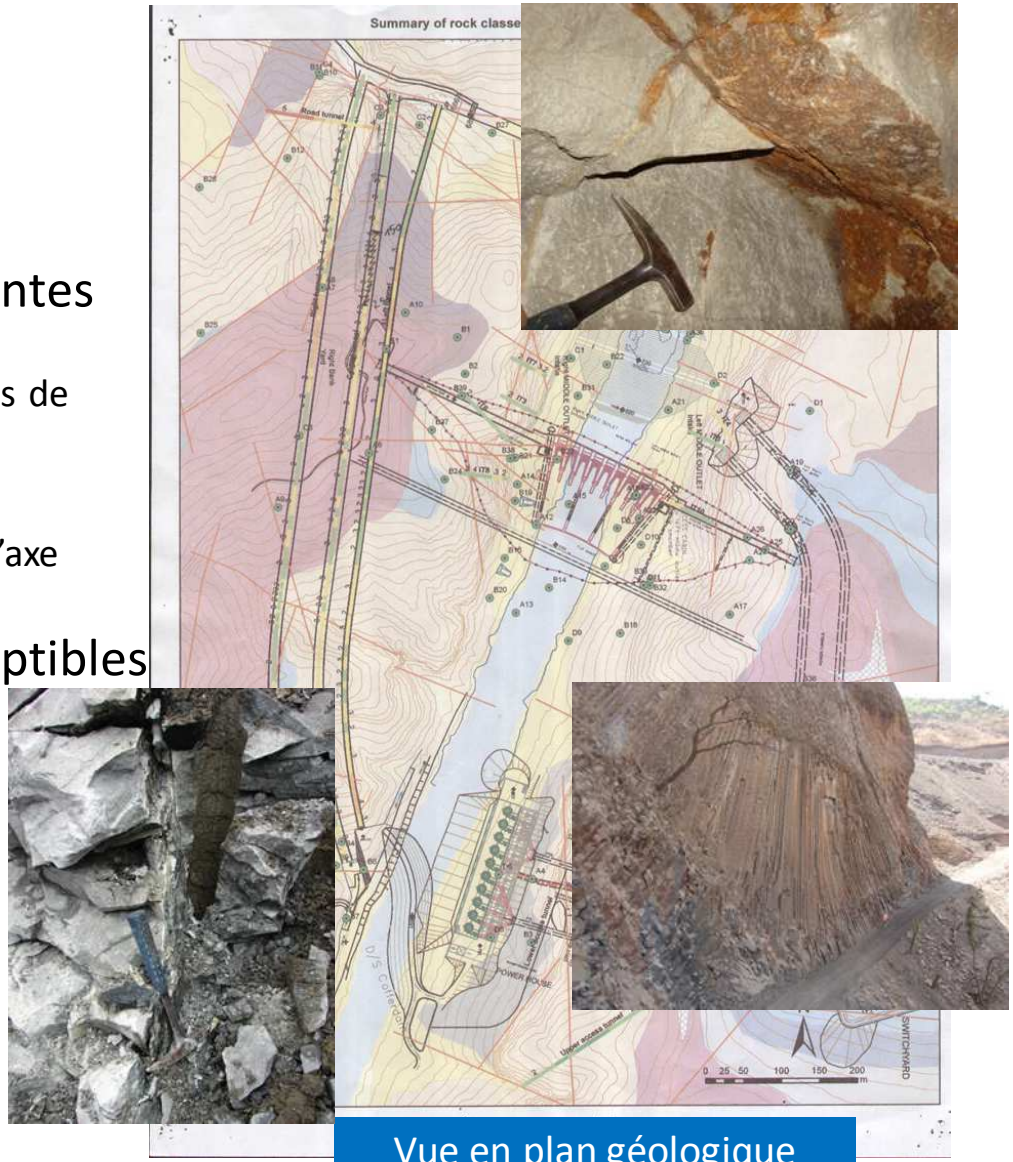


Stratigraphie et coupe sur l'axe du barrage



GEOTECHNIQUE

- **Deux familles de discontinuités principales**
  - Discontinuités nord-sud persistantes
    - ❖ Ces discontinuités se trouvent donc subparallèles à la rivière et aux tunnels de dérivation
  - Discontinuités est-ouest
    - ❖ Faible espacement en rive droite sur l'axe du barrage (10-50 cm)
  - Absence de discontinuités susceptibles de délimiter des coins rocheux
- **Sur affleurements**
  - Trachyte légèrement altéré
    - ❖ Remplissage d'oxydes de fer indurés
  - Trachyte sains
    - ❖ Joints le plus souvent fermés
  - Orgues basaltiques



Vue en plan géologique

CARACTERISTIQUES DU MASSIF

- **Modèle géotechnique de l'Entrepreneur**
  - Définition d'un critère de rupture de type Hoek -Brown
    - ❖ Essais réalisés sur échantillons secs
    - ❖ Mais excluant de fait les tronçons altérés rencontrés dans les sondages
  - Déformabilité in-situ
    - ❖ Dilatomètre, vérin plat, essais à la plaque
    - ❖ Valeurs retenues

      Trachyte sain 15 MPa

      Trachyte altéré 10 Mpa

      (12 et 8 MPa pour D=0,5)

	Basalte	Trachyte sain	Trachyte légèrement altéré
Résistance à la compression uniaxiale (échantillons secs)			
Nombre de tests	17	14	26
Min-Max (MPa)	264-382	77-167	32-134
Moyenne (MPa)	319	98 (*)	67
Critère de rupture du massif rocheux (Hoek-Brown)			
GSI	65	60	55
mi	25	14	20
(*) Valeur moyenne pour trachyte gris-clair			

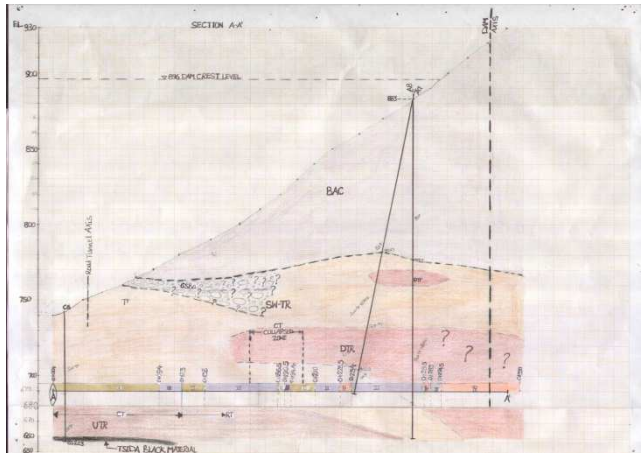
Massif rocheux	Trachyte sain			Trachyte légèrement altéré		
	DT	FJT	PLT	DT	FJT	PLT
Nombre de tests	8	-	2	13	41	3
Valeurs min-max (GPa)	2.1-7.6	-	3.5-20.5	0.1-6.8	0.3-21.0	4.0-35.0
Min-Max 90% (GPa)	4.5-7.0	-	-	1.6-3.6	6.4-8.5	-
Valeur moyenne (MPa)	**5.8**	**-**	**9.5**	**2.6**	**7.4**	**16.5**
Ecart-type (Gpa)	2.1	-	-	2.2	3.8	-
Légende						
DT: dilatomètre membrane souple						
FJT: Vérin plat (largeur 345 mm, profondeur 250 mm, 4 mm d'épaisseur)						
PLT: Essais à la plaque (mesure des déformations en profondeur par extensomètres)						

UN MODELE PARFAIT?

- **Observation d'auréoles de diffusion de fluides**
  - En affleurement et en galerie
    - ❖ Témoignent visiblement d'une altération, progressant depuis les fractures
    - ❖ Une unité de trachyte altéré ajoutée au modèle de l'Entrepreneur (R_c 32 MPa)
- **Cavités plurimétriques dans les rives**
    - ❖ Apparaissent comme des cavités lessivées de leur contenu par la rivière
- **Effritement de carottes sorties intactes**
  - Altération en sable verdâtre
    - ❖ Visiblement conséquence d'une altération hydrothermale ayant progressé depuis les fissures du massif

INITIATION DE LA CONSTRUCTION

- **Eboulement dans tunnel de dérivation central**
  - ❖ 6.000 m³ de sable-silteux verdâtre pratiquement sec s'écoulent dans le tunnel
- **Le rôle de l'altération hydrothermale se précise**
  - ❖ L'Entrepreneur et son concepteur prennent rapidement conscience de l'importance de cette altération pour la fondation
  - ❖ L'image d'une fondation profonde contenant du matériau altéré, en quantité variable suivant l'importance et la densité des fractures du massif s'impose peu à peu



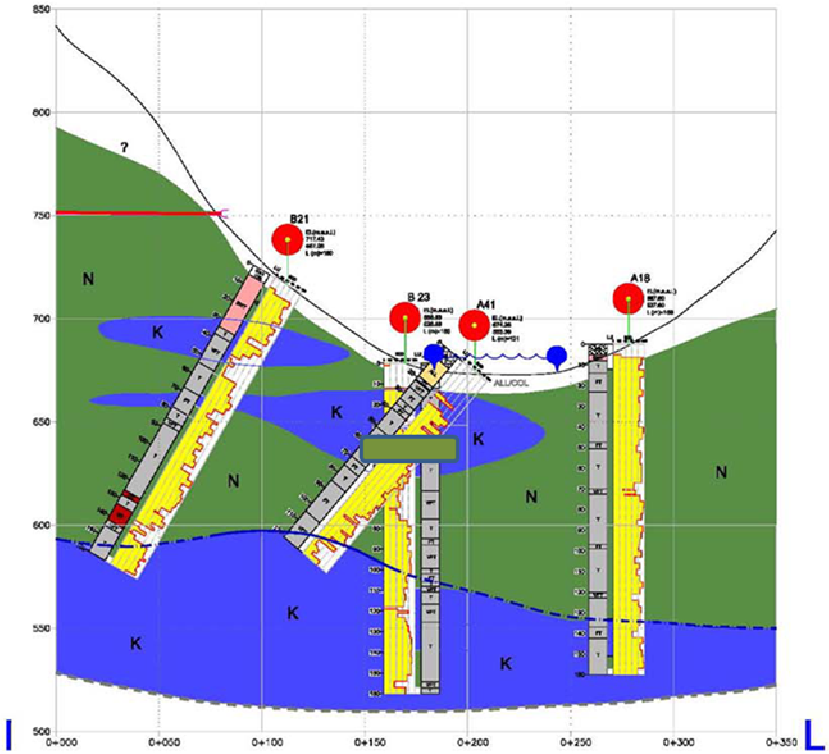
EXCAVATIONS DU BARRAGE

- **Au-dessus du niveau de la nappe**
  - Le matériau d'altération est le plus souvent oxydé
    - ❖ Couleur brun-clair du trachyte superficiel
- **Sous le niveau de la nappe**
  - Absence d'oxydation
    - ❖ Matrice rocheuse au voisinage des fissures diversement affectée par l'exposition à l'air ou en présence d'eau
    - ❖ Remplissage de fissures et « karsts » par les matériaux d'altération: sable silteux ou matériaux prenant cette forme en présence d'eau
    - ❖ Couleur du massif: blanc à gris-vert
- **La qualité de la fondation ne s'améliore pas toujours avec la profondeur!**

Excavations rive droite

ETANCHEITE DE LA FONDATION

- **Dans les rives**
  - Niveau de la nappe phréatique s'élevant peu au-dessus de la rivière
- **Contraste de perméabilité marqué en fondation**
  - Partie supérieure quasiment imperméable
  - Aquifère « profond »
    - ❖ Profondeur variable de 70 à 130 m environ sous la fondation (base de l'aquifère vers 160 m, argiles volcano-sédimentaires)
    - ❖ Identifié par des sources en amont et dans les fouilles du barrage (T 33°C, contenu relativement élevé de Na et Ca)
    - ❖ Remontées locales le long de fissures subverticales

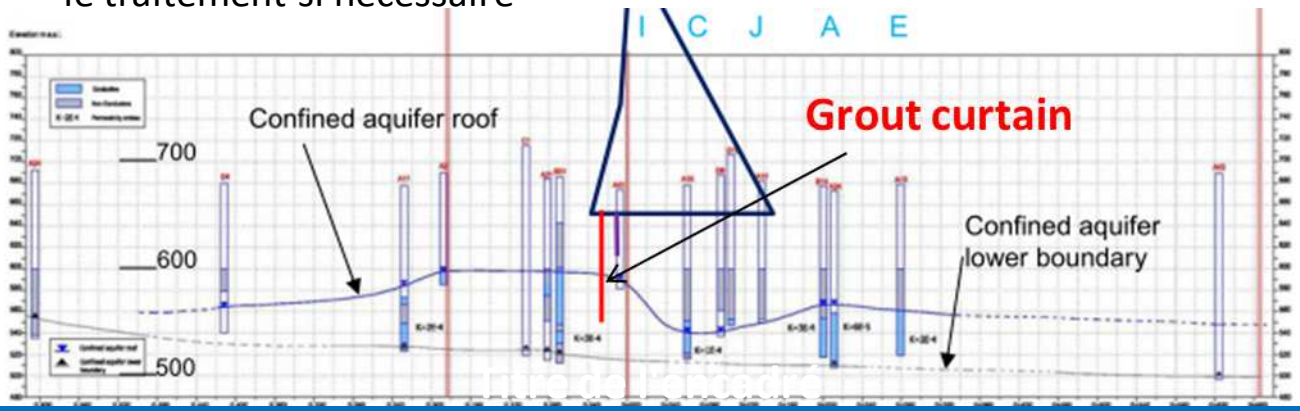


Moins de 8 unités-Lugeon (3 à 5)
8 à 15 unités-Lugeon ou plus

Coupe sur l'axe du barrage

IMPACTS SUR LE PROJET

- **Recommandations de reconnaissances complémentaires**
  - Attention de l'Entrepreneur attirée sur la nécessité d'une surveillance précise de l'aquifère profond
    - ❖ Zones d'alimentation et débouchés à préciser
    - ❖ Moyens de drainage augmentés au droit des sources chaudes de la fondation, pour surveillance et détection de tout débourrage potentiel
- **Profondeur du voile d'injection**
  - L'Entrepreneur a fait le choix de conserver la géométrie initiale du voile
    - ❖ Le voile s'arrête dans l'aquifère profond; les galeries doivent permettre de compléter le traitement si nécessaire



Géométrie approximative de l'aquifère profond (coup le long de la rivière)

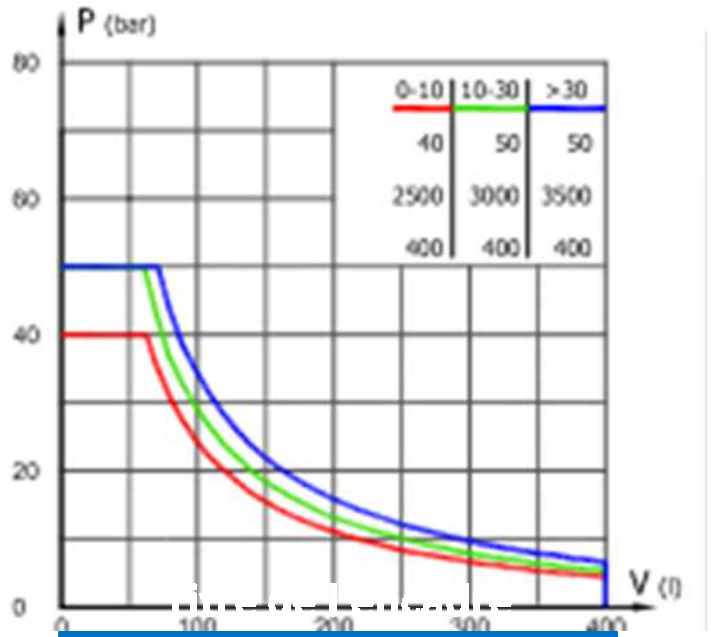
TRAITEMENT DE SURFACE

- **Traitement de surface classique**
  - Nettoyage et curage de toutes les zones altérées de l'emprise de la fondation
    - ❖ Discontinuités les plus importantes de la fondation
    - ❖ « Poches » de matériau altéré dans les zones de fracturation dense
  - Remplissage par du béton

Traitement systématique des zones altérées

VOILE D'INJECTION

- **Traitement de la partie courante du voile**
  - ❖ Hors zones altérées (zones de fracturation dense comportant une proportion notable de matériau altéré)

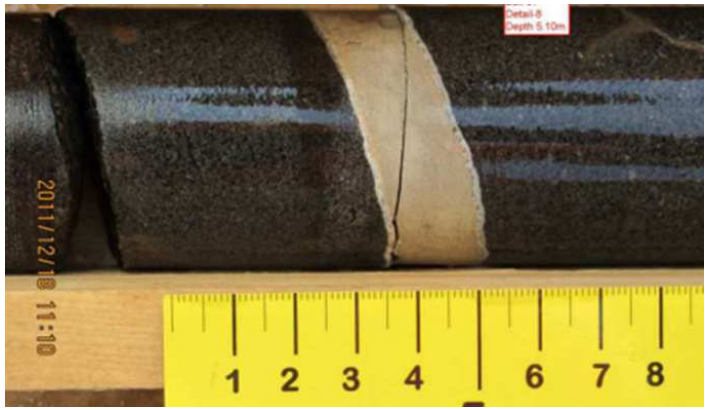


Critère GIN: P.V = Constante

- **Exécution d'injections classiques**
  - Application d'un critère GIN de 300-350 MPa.l/m, objectif 3 unités-Lugeon
  - Difficultés rencontrées dans l'aquifère « profond », captif
    - ❖ Venues d'eau artésiennes, problème de stabilité de certains trous, prises plus élevées
    - ❖ Absence d'effet de serrage notable
    - ❖ Objectif en terme de perméabilité difficile à réaliser
    - ❖ Un critère de réduction des prises de coulis a été adopté (quaternaires si >100l/m, quinaires si >50l/m)

VOILE: ZONES ALTEREES

- **Traitement des zones altérées de la fondation**
  - Conception de la méthode « lessivage haute pression », puis injection
    - ❖ Objectif: retirer le plus de matériel altéré possible
    - ❖ Utilisation d'un outil de jet-grouting (sans coulis), pour lavage haute pression des trous, dans le but d'évacuer le matériel altéré
    - ❖ Opération suivie par des injections classiques
  - La méthode n'a pas démontré son efficacité
    - ❖ Quantité de matériel altéré remontée avec les eaux de lavage non significative
- **Les galeries permettent de venir compléter les injections sur tout le voile si nécessaire**



Zone altérée de la rive droite: fracture injectée

CONCLUSIONS

- **Altération hydrothermale**
  - ❖ Susceptible d'impacter notablement un projet si non identifiée à temps
  - ❖ Les roches altérées doivent être prises en compte, même s'il n'est pas possible d'en tirer des échantillons pour essais de laboratoire
  - Le massif peut être de moindre qualité en profondeur!
- **Etudes des aquifères**
  - ❖ Le comportement de l'aquifère « profond » et le débit des drains, est à surveiller durant le remplissage
- **L'impact sur la conception du voile d'injection est significatif**
  - ❖ Si les recommandations d'injection à forte pression des joints sont suivies, le matériel altéré est chassé et repoussé à l'intérieur du massif
  - ❖ L'Entrepreneur et son concepteur ont sans conteste déployé de gros efforts en ce sens

Auréoles d'altération
(zone oxydée, en surface)

MERCI!