

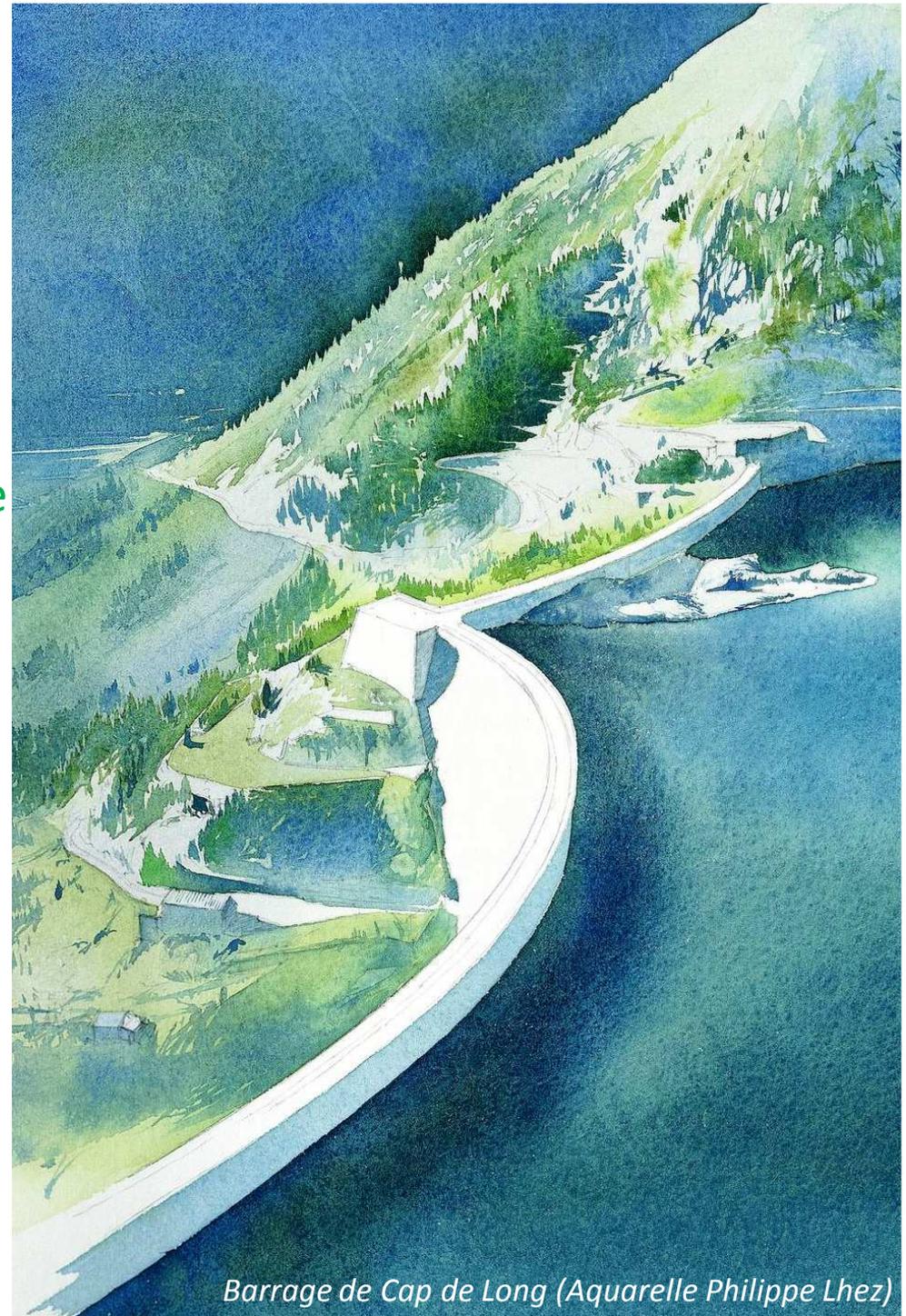


Thème A : Géologie et nature des fondations :
reconnaitances, interprétation et caractérisation

Barrage de St Michel – Campagne de reconnaissances géologiques et géotechniques Paramètres de calcul de stabilité

ANDRAL Bertrand, EDF-CEIDRE-TEGG
bertrand.andral@edf.fr

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



Barrage de Cap de Long (Aquarelle Philippe Lhez)

SOMMAIRE

1.Présentation

Particularités de l'ouvrage
Contenu et objectifs de la campagne de reconnaissances

2.Résultats des sondages carottés

Épaisseur d'altération
Origine des passées sableuses

3.Paramètres de résistance au cisaillement

Joints rocheux – interface béton / rocher – approche d'homogénéisation de la masse rocheuse
Cinématiques de rupture potentielle et critères de résistance associés

4.Conclusion

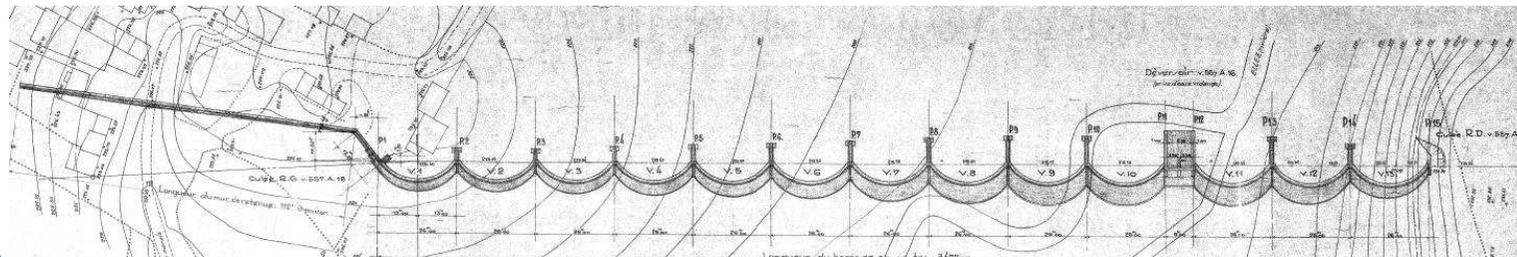
Présentation de l'ouvrage - particularités

■ Barrage à voutes multiples sur l'Ellez (Finistère)

- Hauteur = 10,8 m / terrain naturel
- Retenue de 13.355.000 m³
- 13 voûtes de 26 m s'appuyant sur 15 contreforts tirantés + mur RG (112 m)

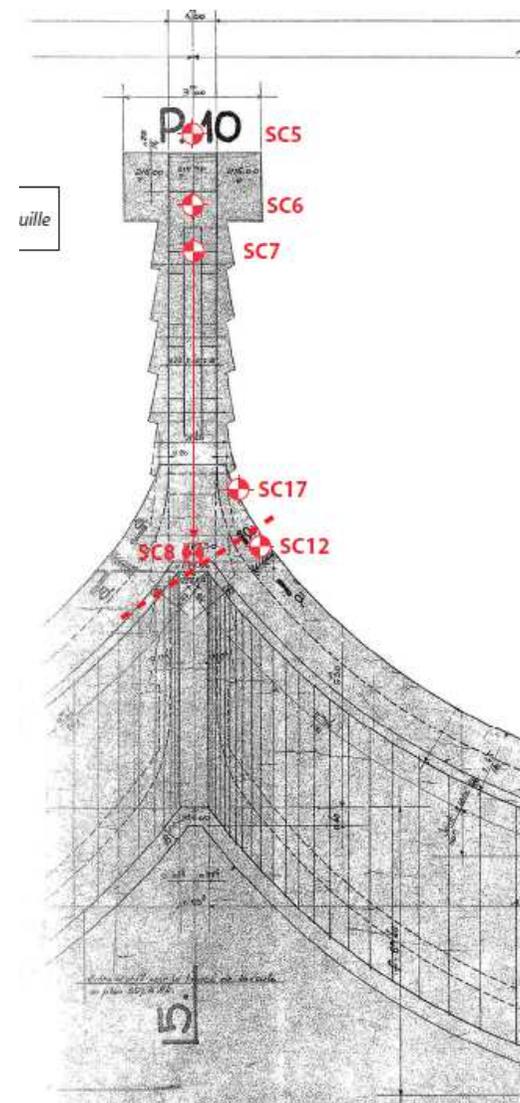
■ Contraintes liées à l'ouvrage

- Accès difficile pour réalisation des sondages
 - ❖ Caniveau en pied, crête, tirants
- Problèmes de représentativité :
 - ❖ Choix initial de caractériser 2 contreforts (C7-C10), campagne étendue en cours de réalisation à l'ensemble de la zone centrale



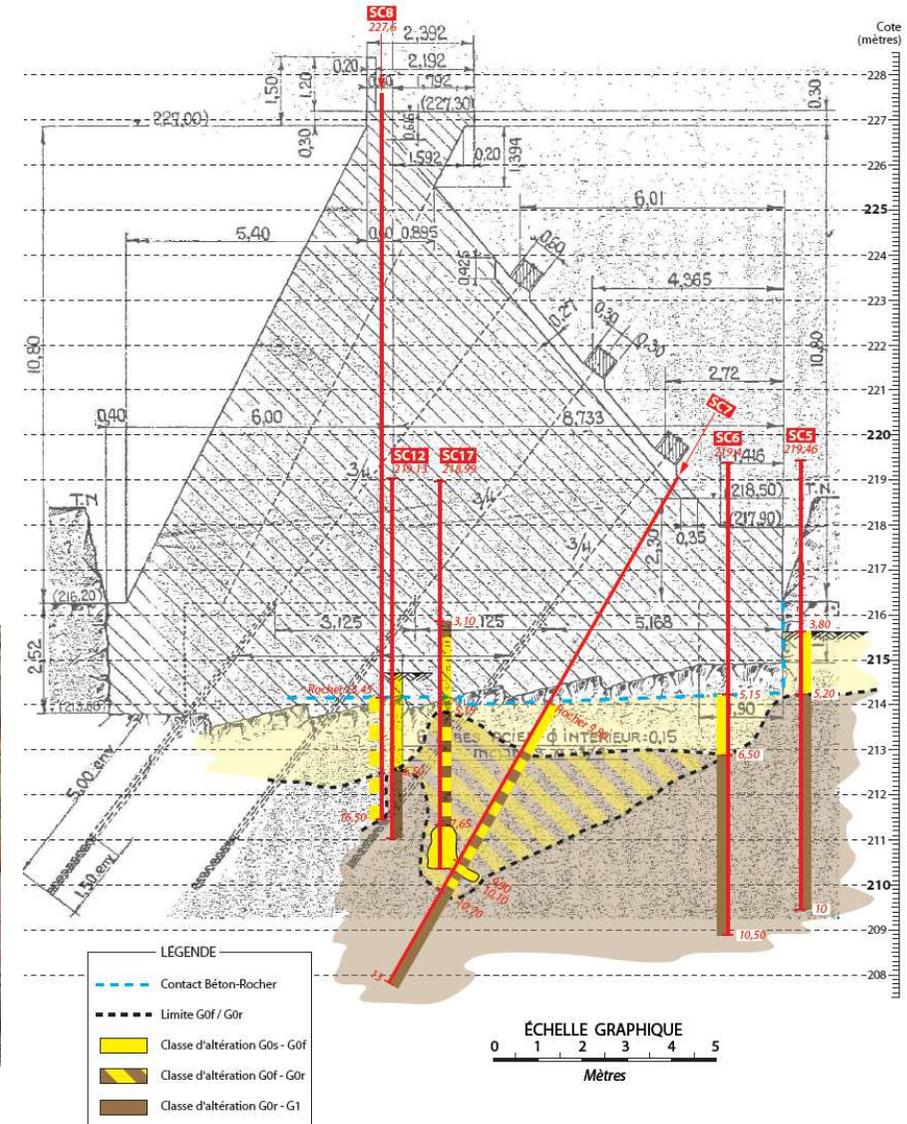
Contenu et objectifs de la campagne de reconnaissances

- **Objectif :**
 - Établir le modèle géologique et les paramètres géomécaniques nécessaires au calcul de stabilité (réalisé par EDF-CIH)
- **Sondages carottés (SAM)**
 - Caractérisation qualitative
 - ❖ Modèle géologique : nature du rocher – altération
 - ❖ Failles et discontinuités
 - Réalisée en 2 phases :
 - ❖ 8 sondages sur C7 et C10, dans l'axe (93 mm carotte, profondeur jusqu'à 18,3 m, pénétration de de 3 à 8 m dans le rocher)
 - ❖ 7 sondages complémentaires étendus à l'ensemble de la zone centrale (C7 à C10)
- **Essais de laboratoire**
 - Caractérisation quantitative
 - ❖ Densité, Rc, Rtb, porosité (Ginger)
 - ❖ Essai de cisaillement roche, micro Deval (laboratoire EDF-CEMETE)



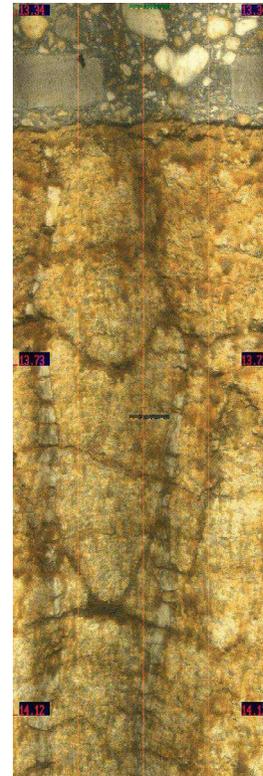
Résultats des sondages carottés

- Forte épaisseur de granite altéré en fondation
 - sondages depuis couronnement
 - ❖ Ne rencontrent pas le granite « dur »
 - ❖ Niveaux sableux (SC8 crête de C10)
 - Autres sondages
 - ❖ Alternances granite altéré (« friable », G0f) et granite plus sain



Origine des passées sableuses (SC8 – contrefort C10)

- **Déstructuration du rocher friable à la foration : présence de sable sur toute la passe carottée dans la fondation (2,7 m)**
 - Conditions difficiles de réalisation
 - ❖ Machine de faible dimensions (opérant depuis le couronnement)
 - ❖ Faible taux de récupération
 - Présence du substratum rocheux néanmoins confirmée au contact :
 - ❖ Imagerie de paroi du contact (joints 15° amont)
 - ❖ Cristaux de feldspath désagrégés - éléments anguleux (loupe binoculaire)
 - ❖ Essai Micro-Deval (64 % de perte de masse : passant à 1,6 mm après endommagement de fraction 10-14 mm par des billes d'acier) : rocher « friable » (G0f)
 - ❖ Cisaillement (Casagrande) sable $\phi' = 44^\circ$
- **Barrage bien fondé au substratum (altéré)**

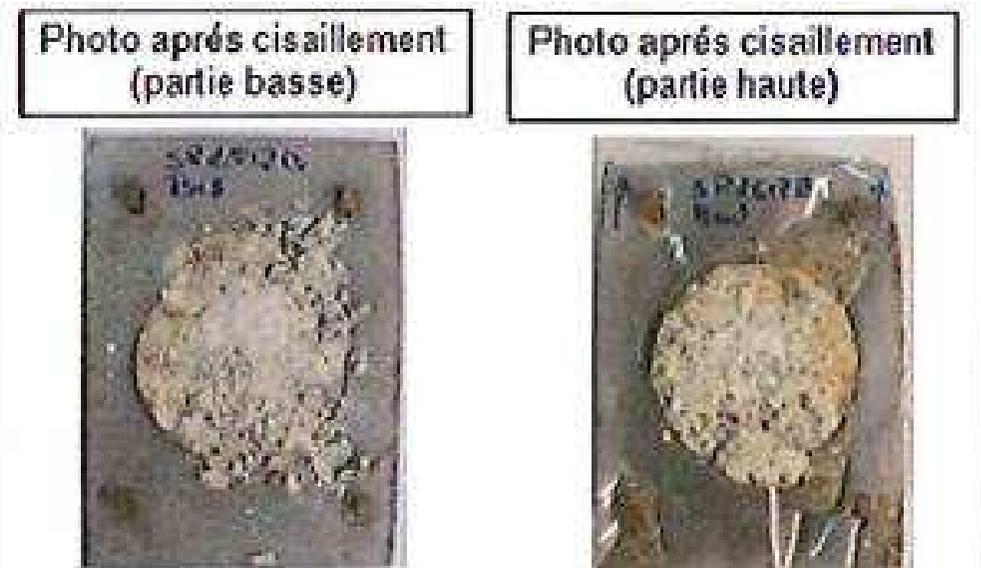


Paramètres de résistance au cisaillement

1. Joints rocheux

■ Essais de cisaillement sur joints rocheux

- Échantillon réduit (4 essais G0f) testés à 2 paliers (375 - 500 kPa)
- Interprétation sur une plage resserrée de σ_n :
 - ❖ Minimiser la dispersion en faisant varier uniquement les échantillons, pas les 2 paramètres (éch. + σ_n)

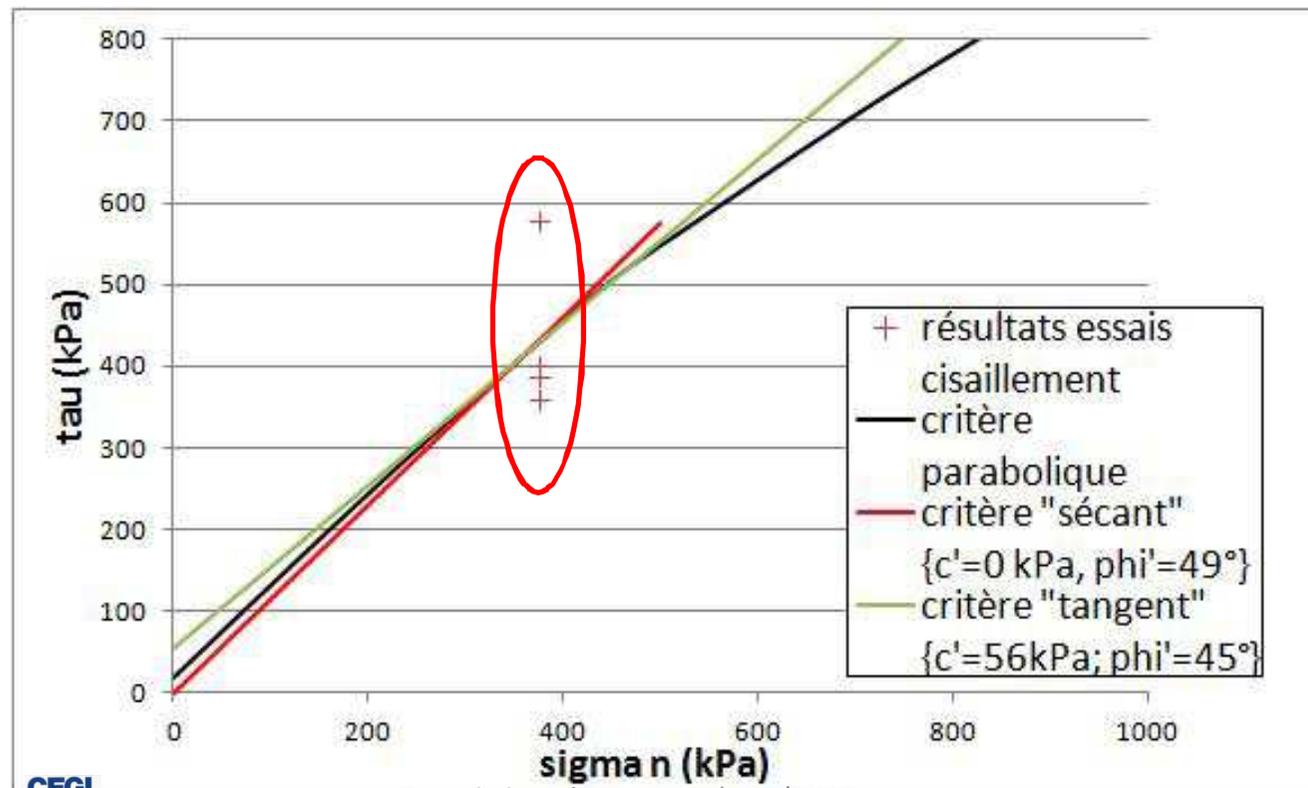


Paramètres de résistance au cisaillement

1. Joints rocheux

■ Résultats (joints rocheux)

- 2 critères équivalents dans le domaine de contrainte :
- Critère sécant : $\{ c' = 0 ; \phi' = 49^\circ \}$
- Critère tangent $\{ c' = 56 \text{ kPa} ; \phi' = 45^\circ \}$



Paramètres de résistance au cisaillement

2. interface Béton - Rocher

- **Un seul contact béton – rocher a pu être testé**
 - En moyenne 30 % seulement des contacts carottés peuvent être testés (ex SC8, non testable) : d'où l'approche à σ_n constant (adaptée pour un faible nombre d'essais)
 - Conditions d'essai :
 - ❖ Premier palier à $\sigma_n = 375$ kPa (pic) puis palier à 500 kPa (résiduel)
- **Résultats (interface béton - rocher)**
 - Critère au pic basé sur un seul point, valable au voisinage de σ_n donné :
 - ❖ { $c' = 395$ kPa ; $\phi' = 50^\circ$ }
 - ❖ Traduit une part de cohésion matricielle, en partie mobilisée à l'échelle de l'éprouvette, mais difficile à justifier à l'échelle de la fondation

Paramètres de résistance au cisaillement

3. Approche d'homogénéisation de la masse rocheuse (Hoek & Brown)

- **Conditions d'application de l'approche d'homogénéisation**

- Justifiée à l'échelle des contreforts :
 - ❖ Nombre de sondages (jugée acceptable pour C7-C10 – approche jugée non représentative pour C8-C9)
 - ❖ Rocher homogène – discontinuités de dimensions réduites / contrefort
- Ne couvre pas la cinématique d'un joint rocheux continu à l'échelle du massif : étude spécifique : cas des joints inclinés de 15° vers l'amont)

- **Résultats : résistance au cisaillement (surface de rupture au sein de la masse rocheuse)**

- Plages de valeurs (estimations pessimiste / optimiste)

Contrefort		C7	C8*	C9*	C10
Faciès		G0f	G1-G0r	G1-G0r	G0f
GSI		30-42	45	50-54	30-49
Min	c'_{\min} (kPa)	128		286	128
	ϕ'_{\min} (°)	40		55	40
Max	c'_{\max} (kPa)	214	252	320	258
	ϕ'_{\max} (°)	51	54	57	54

Résultat de l'étude : cinématiques de rupture potentielle et leur critère de résistance au cisaillement

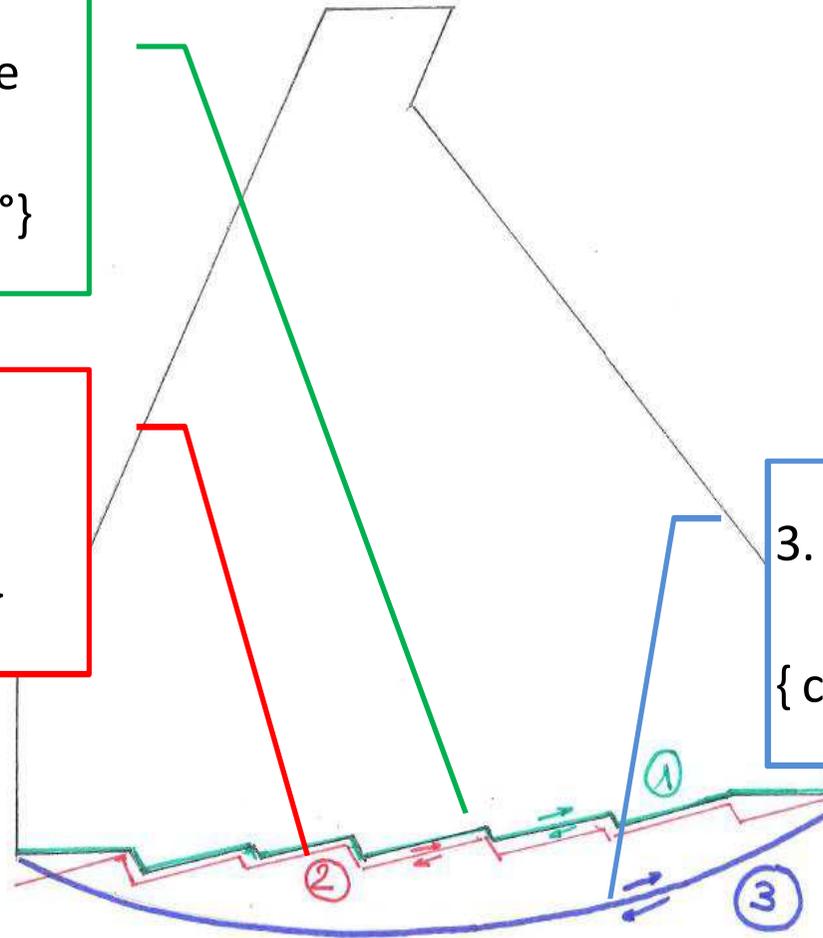
Type de rupture	Interface béton – rocher (1)	Relais de joints rocheux existants (2)	Dans la masse rocheuse (3)
Position de la surface de rupture	A l'interface	Dans le rocher, immédiatement sous l'interface	Dans la masse rocheuse, au-delà des redans
Géométrie de la surface de rupture	Segments inclinés à 15° vers l'amont		Surface non prédéfinie
Paramètres de résistance au cisaillement	{c'=0 kPa ; φ'=66°} Ou {c'=395 kPa ; φ'=50°}	{c'=0 kPa ; φ'=49°} Ou {c'=56 kPa ; φ'=45°}	{c'=150 kPa ; φ'=45°} contreforts 7-10 / {c'=250kPa ; φ'=56°} contreforts 8-9
Justification	Essais de cisaillement (résistance au pic)		Homogénéisation de la masse rocheuse
Domaine de validité	Au voisinage de $\sigma_n = 375$ kPa		$\sigma_n = [0-500$ kPa]
Dilatance macroscopique (traduit l'inclinaison de la surface de rupture) *	10-15°		0

Résultat de l'étude : cinématiques de rupture potentielle et leur critère de résistance au cisaillement

1. Rupture à l'interface
béton / rocher
{ $c' = 395 \text{ kPa}$; $\phi' = 50^\circ$ }

2. Rupture sur joints
rocheux
{ $c' = 56 \text{ kPa}$; $\phi' = 50^\circ$ }

3. Rupture dans la masse
rocheuse
{ $c' = 150 \text{ kPa}$; $\phi' = 45^\circ$ }



Conclusion : définition de la résistance au cisaillement

- **Multiplier les approches et les essais pour pallier un échantillonnage souvent limité - rechercher des valeurs convergentes**
 - Essais sur contacts B/R, sur joints rocheux (sondages prolongés 3-4 m au-delà du contact, imagerie de paroi)
 - Approche d'homogénéisation de la masse rocheuse (critères d'applicabilité – non applicable si mouvements potentiels contrôlés par joints rocheux)
- **Prudence sur les résultats**
 - Les essais peuvent mettre en évidence des marges de sécurité importantes (mobilisation partielle de la cohésion matricielle) difficiles à justifier, à l'échelle de la fondation

MERCI