

Opération de Recherche CADOROC  
Caractérisation et dimensionnement des ouvrages au rocher

Restitution des travaux – Aix-en-Provence, le 10 Octobre 2017

---

## FONDATION AU ROCHER DES BARRAGES-POIDS

---

# Effet d'échelle sur la résistance de l'interface rocher- béton

Marion Bost & Jean-Pierre Rajot - Ifsttar

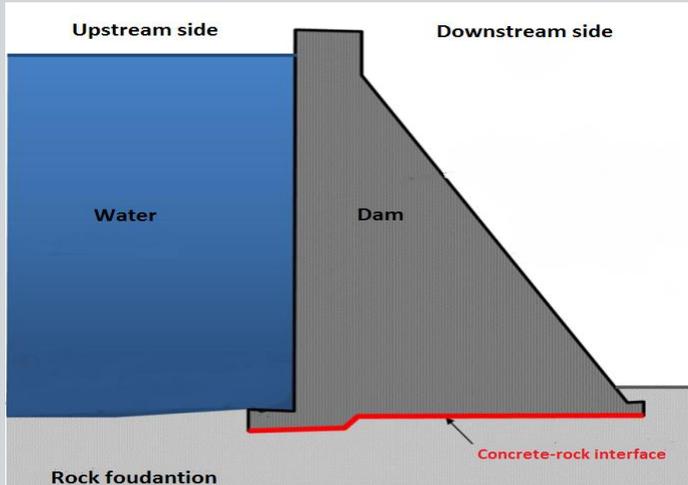
Crédits :

Doctorat de Hussein Mouzannar (2016)

Ifsttar, EDF



# Contexte



Coupe schématique d'un barrage poids.

**Les barrages-poids en béton doivent être justifiés aux modes de stabilité suivants :**

- Renversement ;
- Poinçonnement de la fondation ;
- Glissement aux interfaces :
  - Roche-roche (massifs latéraux et fondation)
  - Béton-béton aux reprises de bétonnage
  - **Béton – Roche à la base et sur les bords**

- Les charges appliquées sont connues, la géométrie relativement bien, mais **comment choisir la résistance au cisaillement de l'interface roche – béton ?**
- Dans la plupart des pays (France, Canada, USA, Norvège,...), cette résistance est représentée par le critère de rupture de Mohr-Coulomb.
- Les valeurs des paramètres du critère sont généralement déduites d'essais au laboratoire sur des échantillons de faibles dimensions (carottages) par rapport aux dimensions de la fondation du barrage.



# Problématique

Selon le Comité Français des Barrages et Réservoirs (2012),

- l'angle de frottement de l'interface roche – béton à grande échelle est plus élevé que l'angle de frottement mesuré au laboratoire et,
- la cohésion de l'interface roche - béton à grande échelle est plus faible que la cohésion mesurée au laboratoire.

En l'absence de méthodologie établie, dans la plupart des pays en pratique, la résistance de l'interface roche – béton pour justifier la stabilité au glissement des barrages poids en béton est choisie de manière sécuritaire. En particulier, la cohésion est supposée nulle.

Or avec :

- l'accroissement de la période de retour de crue pour le dimensionnement des barrages et,
- la révision des cartes sismiques en France,

la stabilité au glissement de barrages-poids existants n'est théoriquement plus vérifiée.

- Existe-t-il un effet d'échelle favorable sur la caractérisation de la résistance au cisaillement de l'interface roche-béton entre celle d'un échantillon en laboratoire et celle à la base d'un barrage ?



# Objectif et programme d'études

- Réaliser des essais de cisaillement direct à différentes échelles sur des interfaces identiques béton –roche et reproduisant les conditions à la base des barrages-poids fondés au rocher :
  - surface rocheuse naturelle saine et propre,
  - béton et plage de contraintes normales représentatifs.
- Maîtriser les conditions d'essai au laboratoire :
  - vitesse lente (0,1mm/min) et,
  - faire coïncider le plan moyen de l'interface avec le plan de cisaillement de la machine.
- Pour l'analyse des résultats et l'identification d'un potentiel rôle de l'effet d'échelle propre à la morphologie de la surface rocheuse, caractériser la surface de contact entre roche et béton de l'échantillon – de la rugosité (locale) aux ondulations (irrégularités géométriques hors plan).



# Campagne expérimentale

## Description

- Réalisation d'essais de cisaillement direct d'échantillons d'une même interface béton – roche à **trois échelles** :
  - ✓ À petite échelle : 8 carottes de diamètre 80 mm (EDF),
  - ✓ À échelle intermédiaire : 9 échantillons de section carrée 180x180 mm (Cerema Toulouse),
  - ✓ À grande échelle : 5 échantillons de section rectangulaire 1000x1500 mm (Cerema Lyon).
- Caractérisation de l'interface béton-roche :
  - ✓ essais mécaniques (compression simple, traction indirecte, triaxial) sur le béton et la roche (granite),
  - ✓ mesures de la surface morphologique par stéréocorrélation d'images avec projection de franges de lumière texturée,
  - ✓ essais de traction direct sur le contact béton – roche.



# Campagne expérimentale

## Caractérisation des matériaux

Carrière de granite de Bugeat (Corrèze)



	Résistance en compression <i>MPa</i>	Résistance à la traction <i>MPa</i>	Module d'Young <i>MPa</i>	Densité <i>kg/m<sup>3</sup></i>
Béton	43.4	3.75	38 000	2 370
Granite	133	10.21	-	2 608

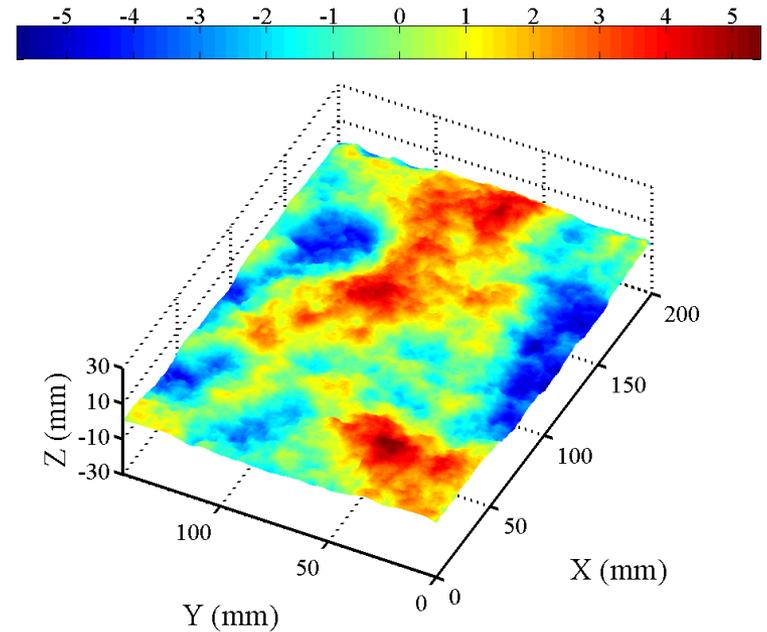
# Campagne expérimentale

## Morphologie de la surface du contact



Surface rocheuse en cours de digitalisation

- Définition du plan moyen de la surface rocheuse pour le positionner dans le plan de cisaillement
- Description de la morphologie de la surface rocheuse de la rugosité locale aux ondulations principales à l'échelle de l'éprouvette

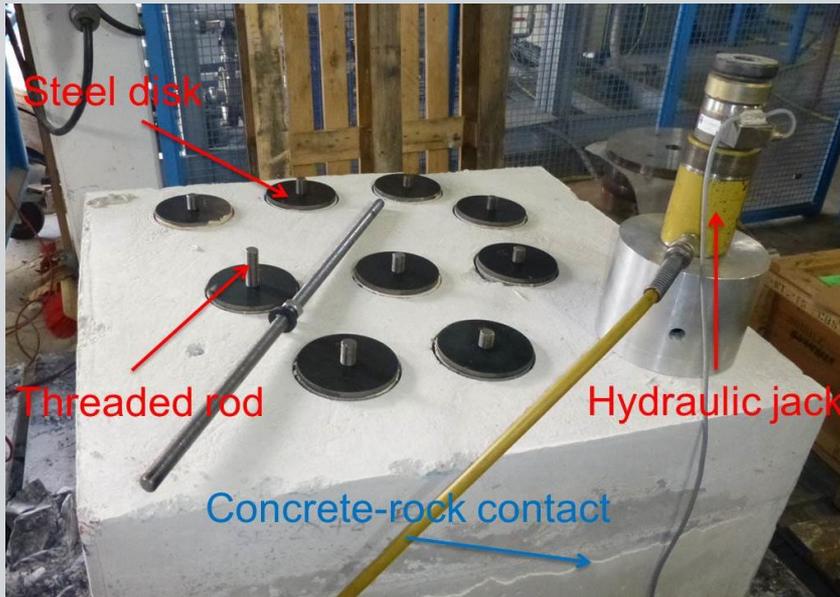


Surface rocheuse digitalisée

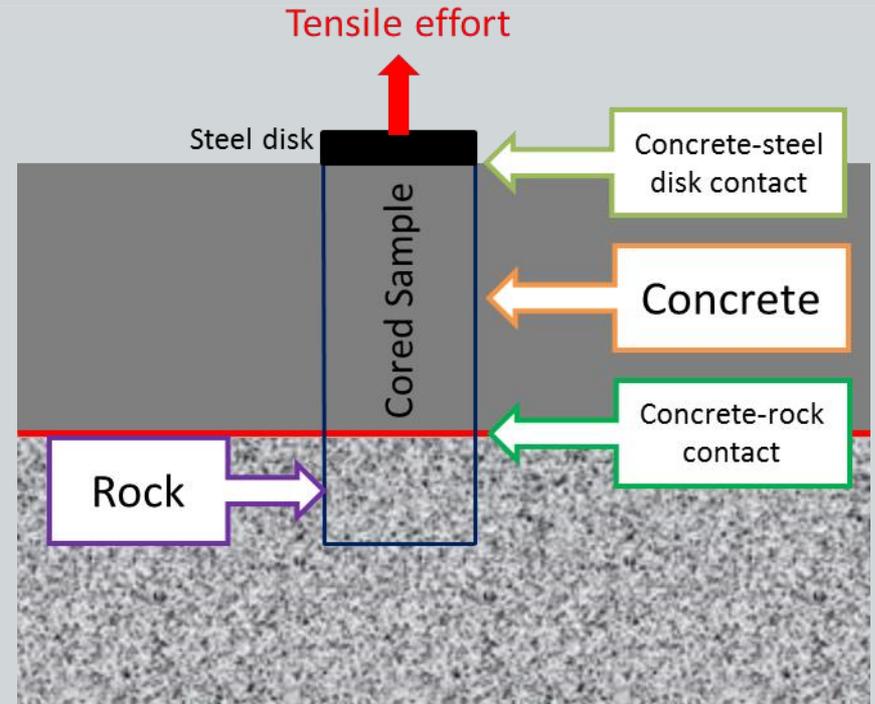


# Campagne expérimentale

## Traction directe du contact



Bloc de grandes dimensions préparé pour les essais de traction directe et dispositif d'essai



(a) Carottage en diamètre 148 mm,  
(b) Collage d'un disque acier épais, (3) Traction par vérin creux hydraulique jusqu'à la rupture

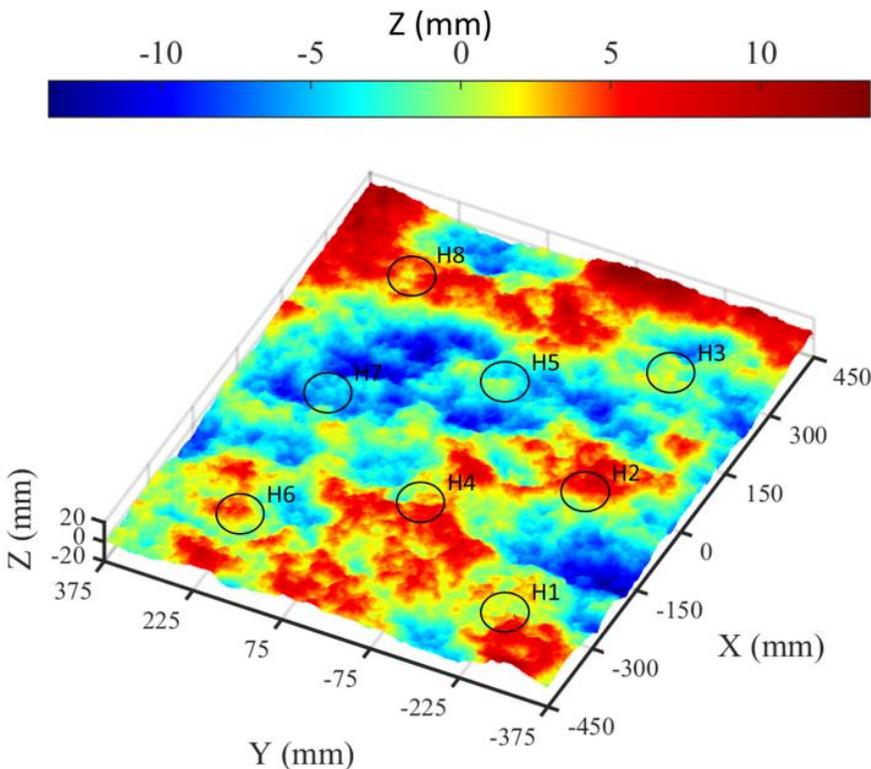
Résistance en traction du contact béton – granite = 1.22MPa ( $\pm 0.23$ )



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct à petite échelle ( $\phi$ 80 mm)

### Préparation des 8 éprouvettes



Photographie des huit carottes béton – roche après surfacage des extrémités (NF XP P94-424) (plan moyen parallèle et à mi-distance des extrémités)

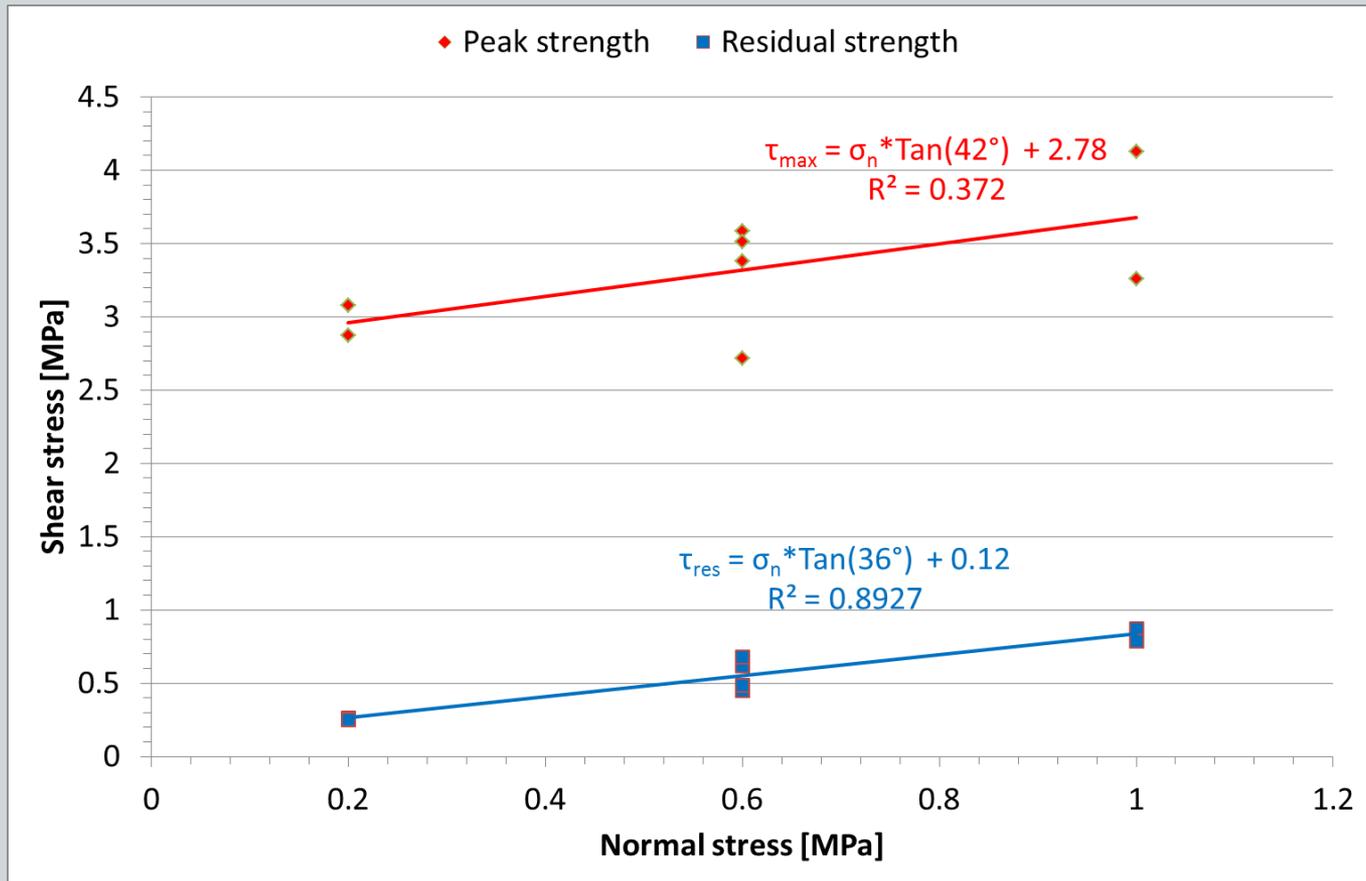
Prélèvement des éprouvettes par carottier double après coulage du béton en surface de bloc rocheux



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct à petite échelle ( $\phi$ 80 mm)

### Résultats



Résistances au cisaillement de pic et résiduelles observées sur les 8 éprouvettes



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

### Préparation des 9 éprouvettes



Découpage dans un grand bloc de roche de neuf échantillons de surface naturelle 180 x 180 mm

Repérage par rapport à un plan de référence, digitalisation, calcul et localisation du plan moyen par rapport à ce plan de référence



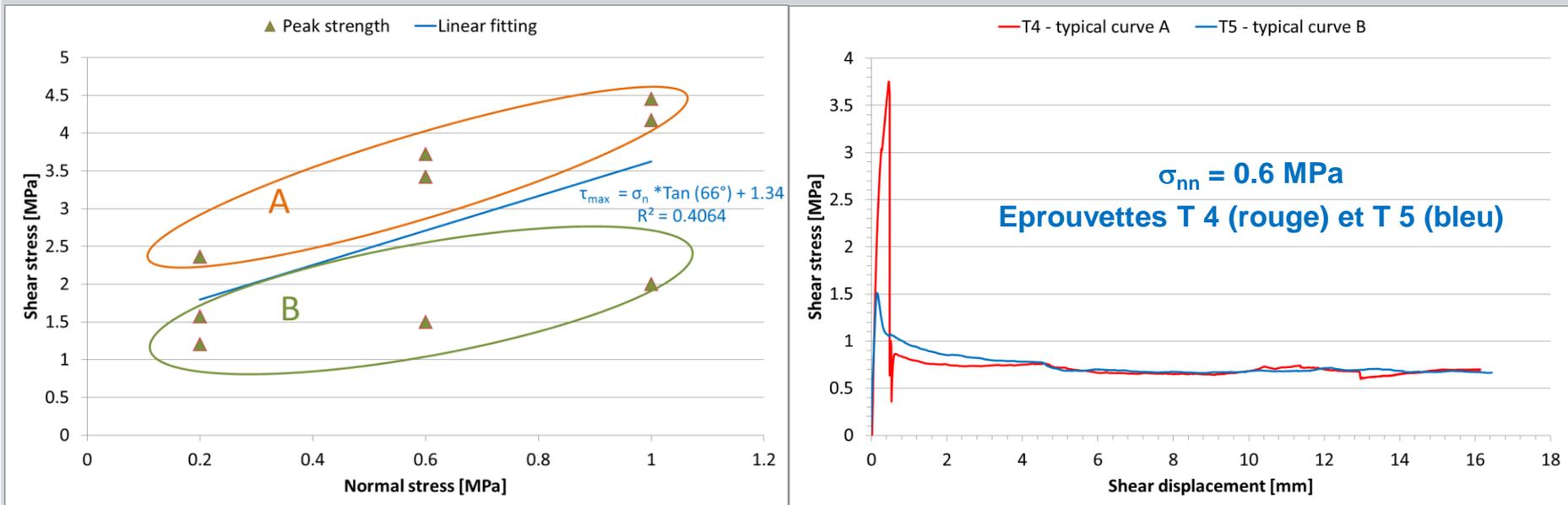
Calage horizontal du plan moyen, coffrage et coulage de 10 cm de béton au-dessus du plan



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

### Résultats



Contrainte de cisaillement au pic – contrainte normale des essais à échelle intermédiaire

Relation contrainte de cisaillement – déplacement

A échelle intermédiaire, deux familles de comportements sont observés :

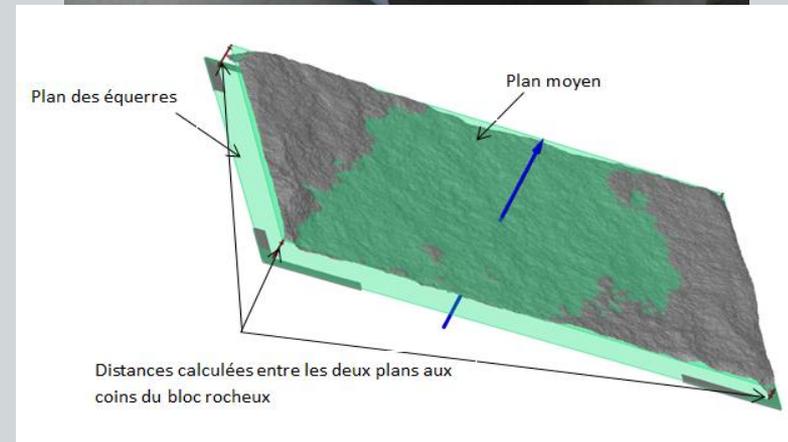
- Type A : pic très élevé, très fragile avec peu de radoucissement post pic
- Type B : pic plus faible, moins fragile avec radoucissement plus progressif



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Préparation des « éprouvettes », de plus de 5 tonnes



# Campagnes d'essais

## ❖ Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Préparation des « éprouvettes » - suite



# Campagnes d'essais

## ❖ Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Préparation des « éprouvettes » - suite



# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Journée d'essai !

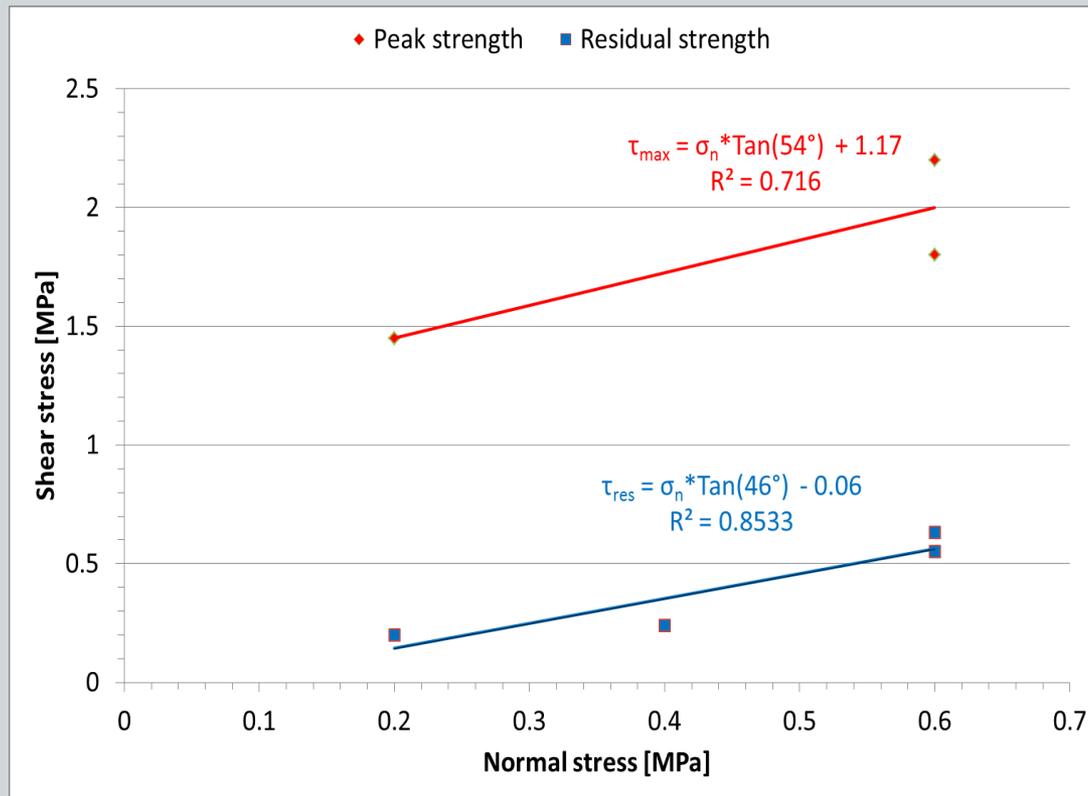


Effort vertical: deux vérins de 1000 kN chacun  
Effort horizontal: deux vérins de 2500 kN chacun

# Campagnes d'essais

## Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

### Résultats

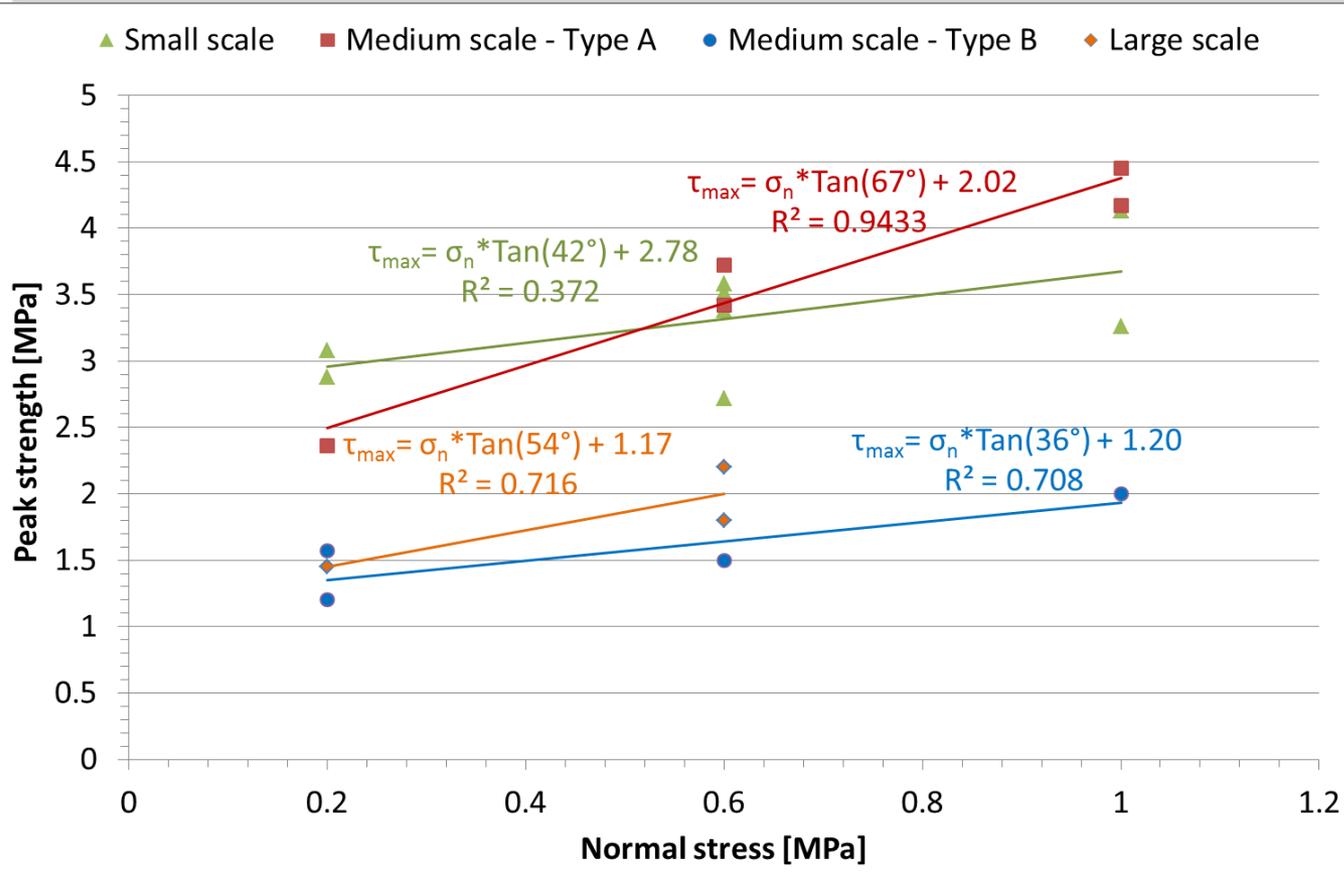


Contrainte de cisaillement versus contrainte normale



# Synthèse et interprétation des résultats

## Effet d'échelle sur le critère de rupture



Critère de Mohr-Coulomb  
 $\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$

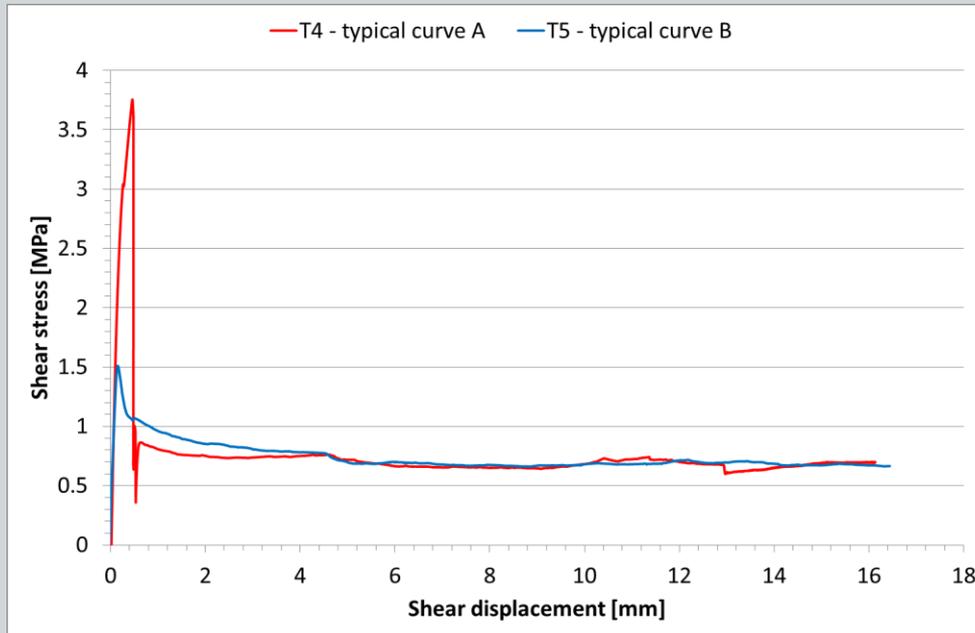
- Effet d'échelle négatif sur la cohésion
- Effet d'échelle positif sur l'angle de frottement
- Cohésion non négligeable, minorée par résistance en traction du contact et majorée par deux fois cette même valeur

➤ Pour cette surface rocheuse, les essais à échelle intermédiaire semblent appropriés pour caractériser la résistance au cisaillement de l'interface roche – béton : la résistance à échelle métrique semble être une combinaison des comportements locaux de type A ou B observés à échelle intermédiaire.



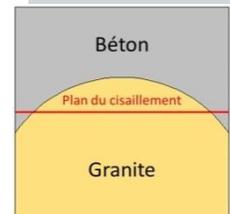
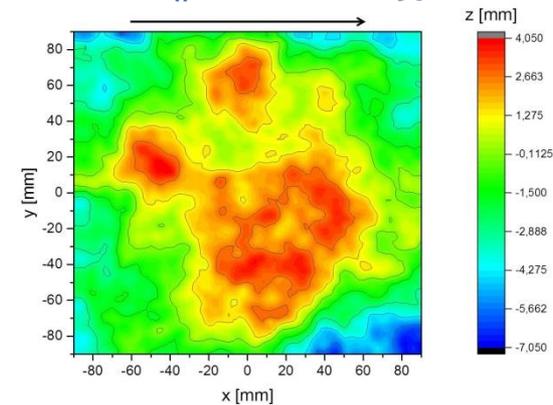
# Synthèse et interprétation des résultats

## Deux comportements différents à l'échelle intermédiaire

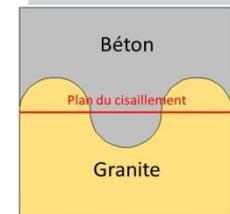
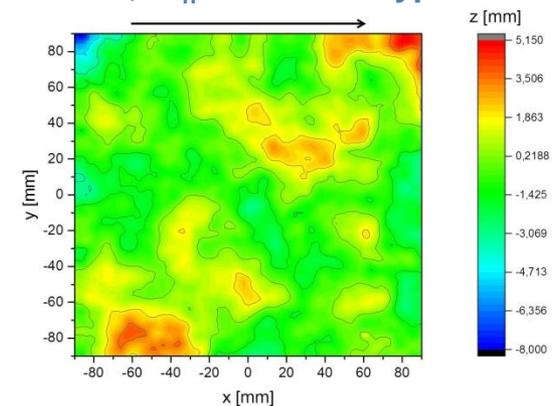


Sous faible contrainte normale ( $\sigma_n \leq 0.6\text{MPa}$ ), observation de deux comportements au cisaillement différents selon le type de morphologie.

T4,  $\sigma_n = 0.6\text{MPa}$  / Type A



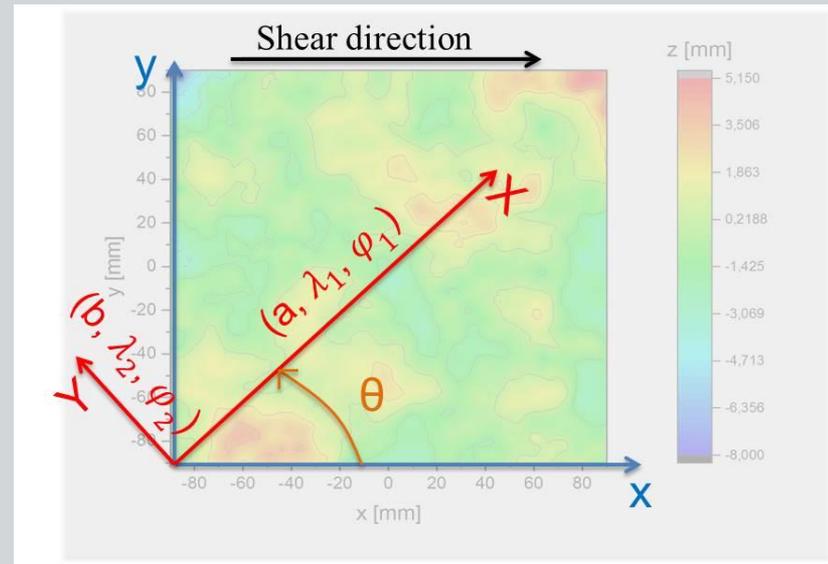
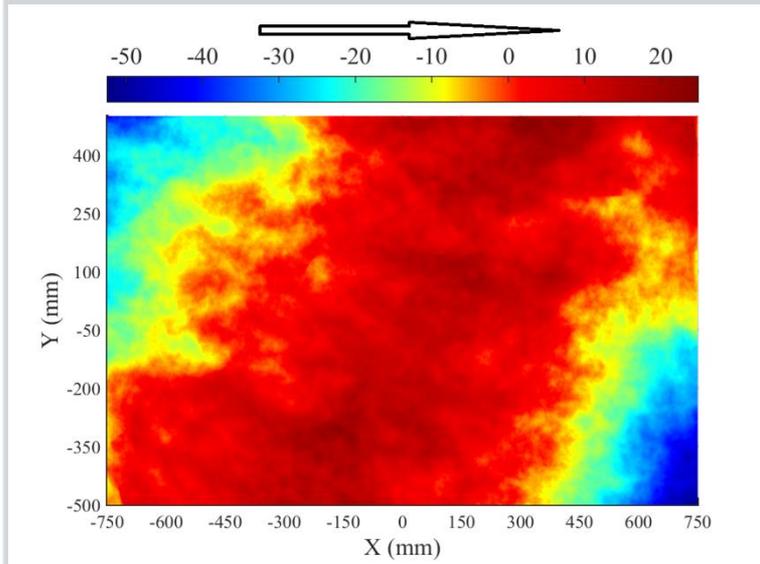
T5,  $\sigma_n = 0.6\text{MPa}$  / Type B



# Synthèse et interprétation des résultats

## Nouvelle caractérisation de la surface rocheuse

Définition d'une méthode objective, applicable à toute échelle, pour caractériser la surface



1 - Digitalisation des surfaces rocheuses à haute résolution et haute précision

2 - Détermination de la longueur d'onde maximale représentant au mieux la surface réelle caractérisée par sa distance au plan moyen Z

$$Z = f(x, y, \beta)$$

$$= a * \cos(2\pi X / \lambda_1 + \varphi_1) + b * \cos(2\pi Y / \lambda_2 + \varphi_2)$$

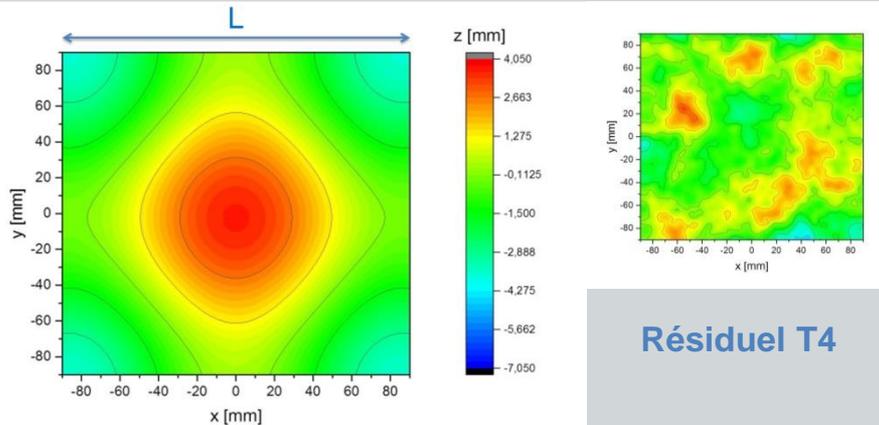
$$X = x * \cos(\theta) + y * \sin(\theta)$$

$$Y = -x * \sin(\theta) + y * \cos(\theta)$$



# Synthèse et interprétation des résultats

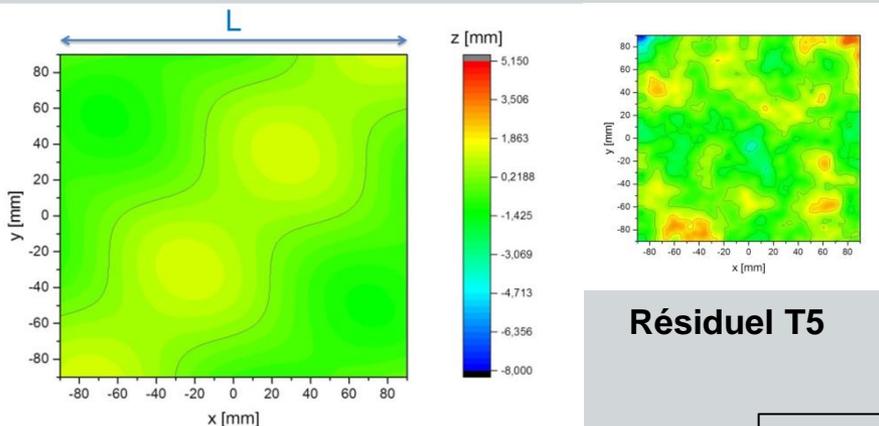
## Nouvelle caractérisation de la surface rocheuse - résultats



Résiduel T4

Surface T4 ajustée,  $\sigma_n = 0.6\text{MPa}$  / Type A

✓ Si  $\lambda_1 = L \pm 10\%$  et  $\theta = 0^\circ$ ,  
Comportement au cisaillement de type A

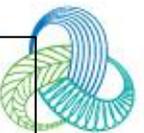


Résiduel T5

Surface T5 ajustée,  $\sigma_n = 0.6\text{MPa}$  / Type B

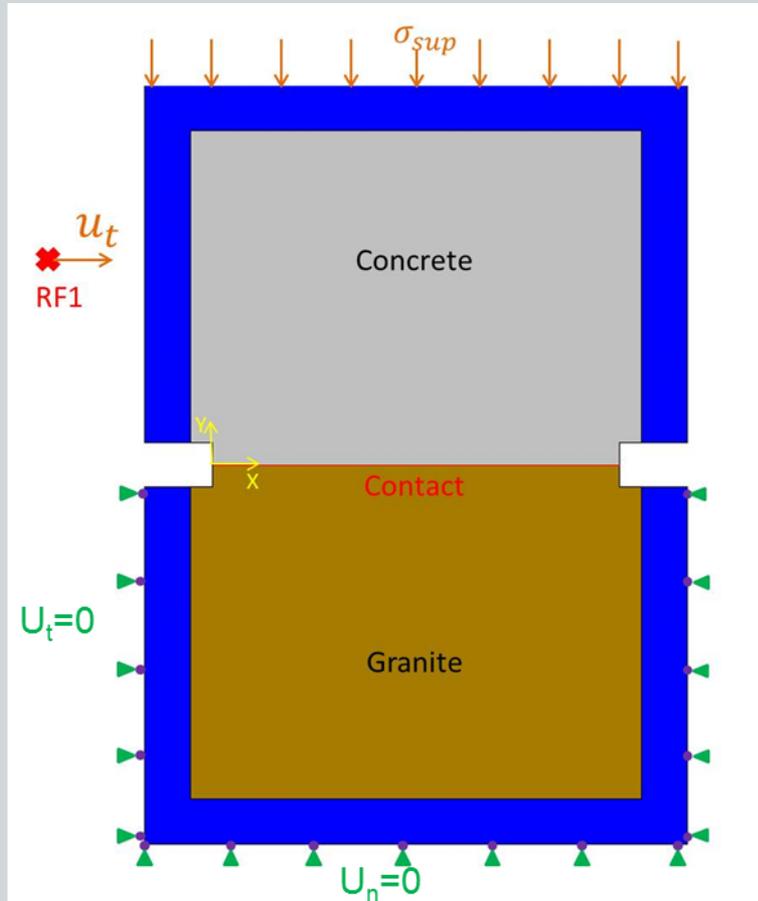
✓ Si  $L/2 \leq \lambda_1 \leq L/3$  et  $\theta \neq 0^\circ$ ,  
Comportement au cisaillement de type B

MOUZANNAR H., BOST M., LEROUX M., VIRELY D., Experimental study of the shear strength of bonded/rock interfaces: surface roughness and scale effect, Rock Mechanics and Rock engineering, 2017, 50(10), 2601-2625, DOI 10.1007/s00603-017-1259-2



# Approche numérique

## Modélisation numérique 2D à l'échelle intermédiaire

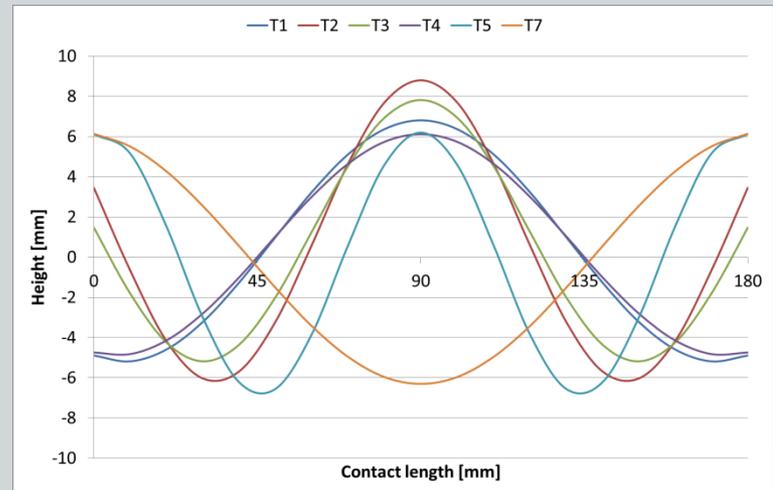


Géométrie du modèle et conditions-limites

La géométrie du contact est décrite par la relation suivante :

$$Y = \frac{k}{2} * \cos(2\pi X / \lambda_1)$$

avec  $k = z_{max} - z_{min} \approx 12\text{mm}$



Profils de contact béton-roche étudiés



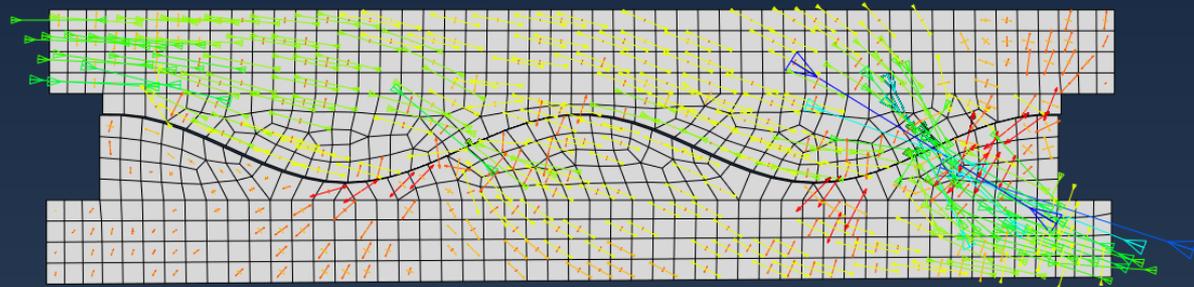
# Approche numérique

Simulation du contact cohésif avec dégradation puis frottant entre deux solides de comportement fragile avec plasticité localisée (modèle CDP)

Contrainte normale: 0.6 MPa  
Déplacement tangentiel: 0.15 mm

S, Max. In-Plane Principal  
S, Min. In-Plane Principal  
S, Out-of-Plane Principal

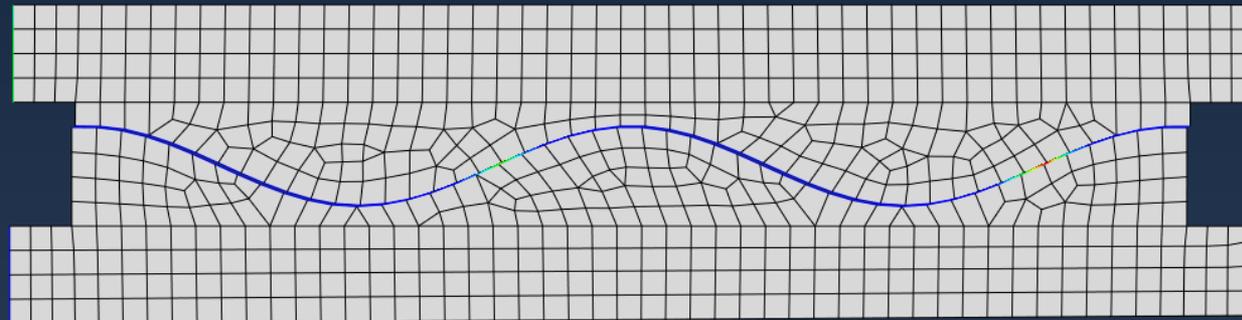
+6.149e+00  
+3.102e+00  
+5.429e-02  
-2.993e+00  
-6.040e+00  
-9.088e+00  
-1.214e+01  
-1.518e+01  
-1.823e+01  
-2.128e+01  
-2.432e+01  
-2.737e+01  
-3.042e+01



Contraintes principales dans les solides

CPRESS

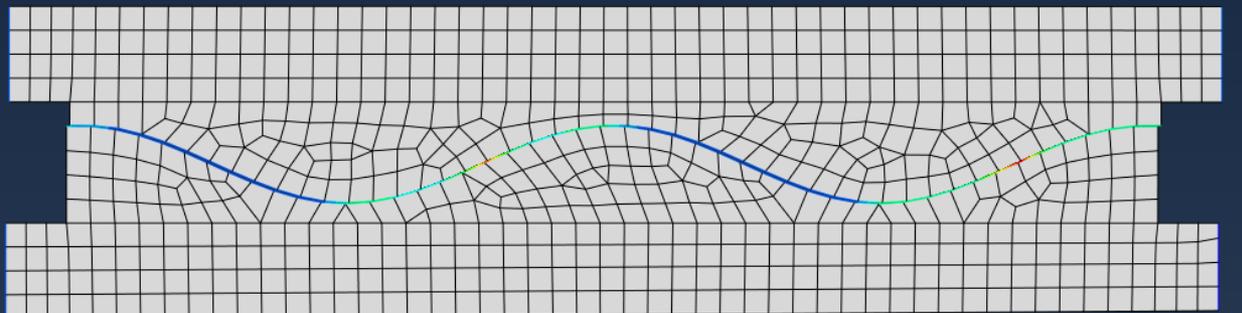
+2.514e+01  
+2.295e+01  
+2.077e+01  
+1.858e+01  
+1.639e+01  
+1.421e+01  
+1.202e+01  
+9.834e+00  
+7.648e+00  
+5.461e+00  
+3.274e+00  
+1.088e+00  
-1.099e+00



Contrainte normale le long du contact

CSHEAR1

+8.163e+00  
+7.386e+00  
+6.608e+00  
+5.830e+00  
+5.052e+00  
+4.274e+00  
+3.497e+00  
+2.719e+00  
+1.941e+00  
+1.163e+00  
+3.853e-01  
-3.925e-01  
-1.170e+00



Contrainte tangentielle le long du contact

# Approche numérique

## Modélisation numérique 2D à l'échelle intermédiaire -résultats

Eprouvette de comportement de type A

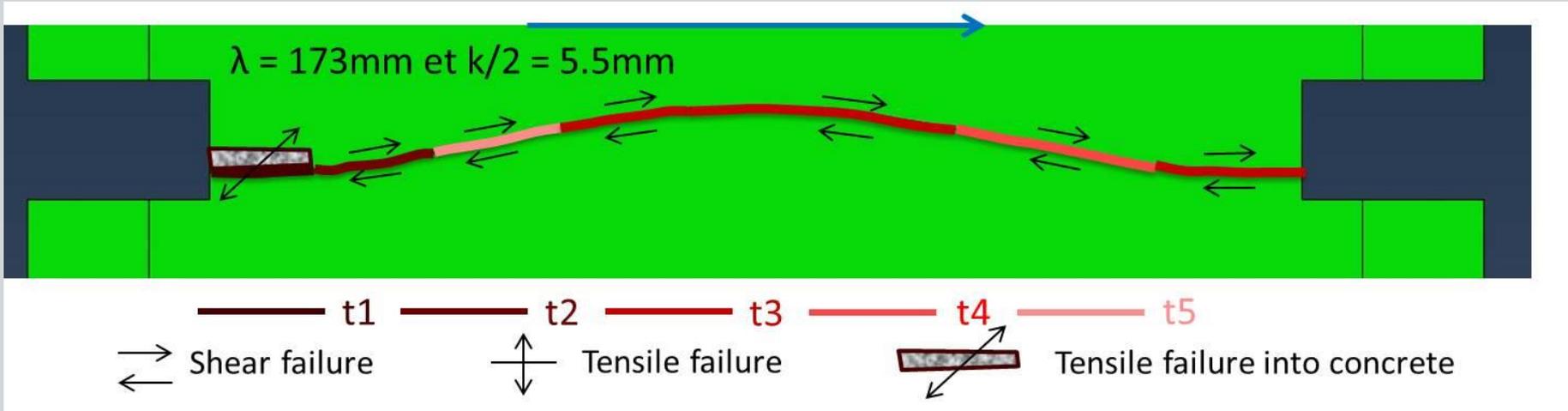


Schéma récapitulatif de la rupture progressive le long de l'interface



# Approche numérique

## Modélisation numérique 2D à l'échelle intermédiaire - résultats

Eprouvette de comportement de type B

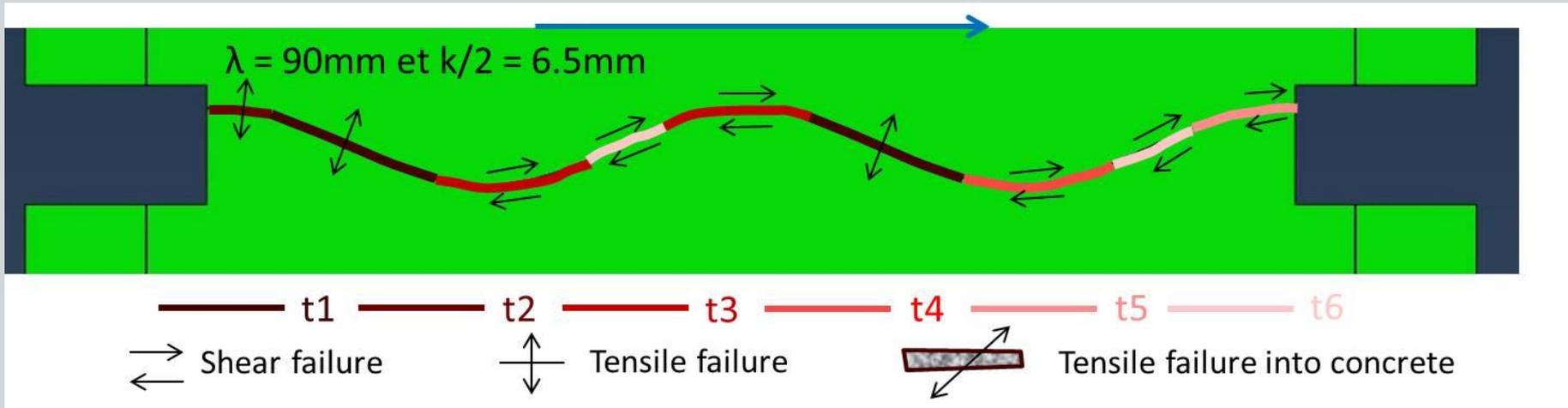


Schéma récapitulatif de la rupture progressive le long de l'interface



# Approche numérique

## Approche analytique simplifiée du changement d'échelle

### Hypothèse:

Lorsque l'effet de la topographie de l'interface sur la résistance au cisaillement a été caractérisée à une échelle intermédiaire, il est raisonnablement possible de prédire la résistance à plus grande échelle,

sous réserve que :

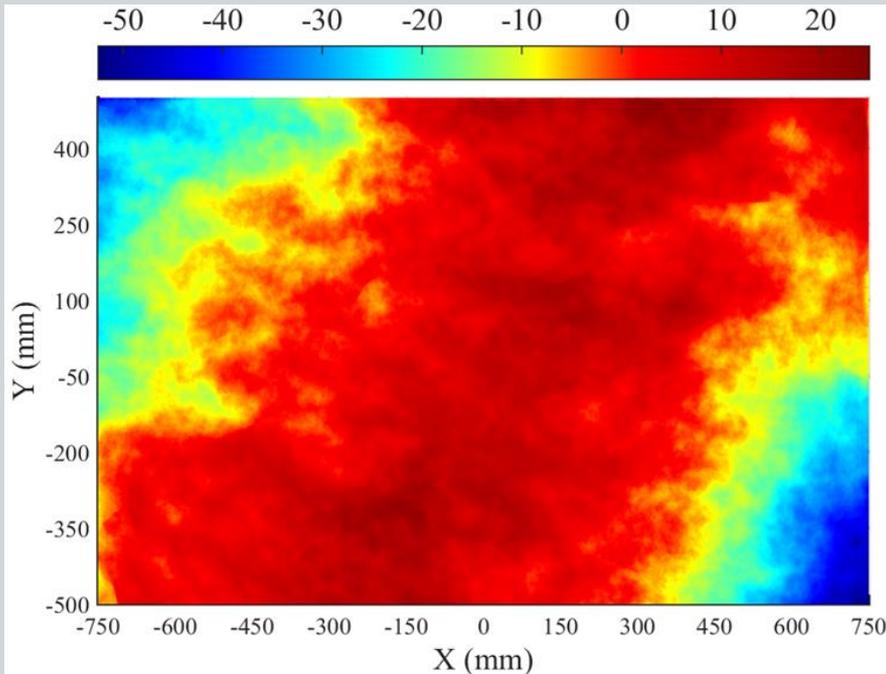
- la surface d'ensemble ne présente pas d'irrégularité marquée de longueur d'onde supérieure à celle observée sur les éprouvettes testées et
- le plan de cisaillement à l'échelle de l'ouvrage coïncide avec celui testé sur les éprouvettes.



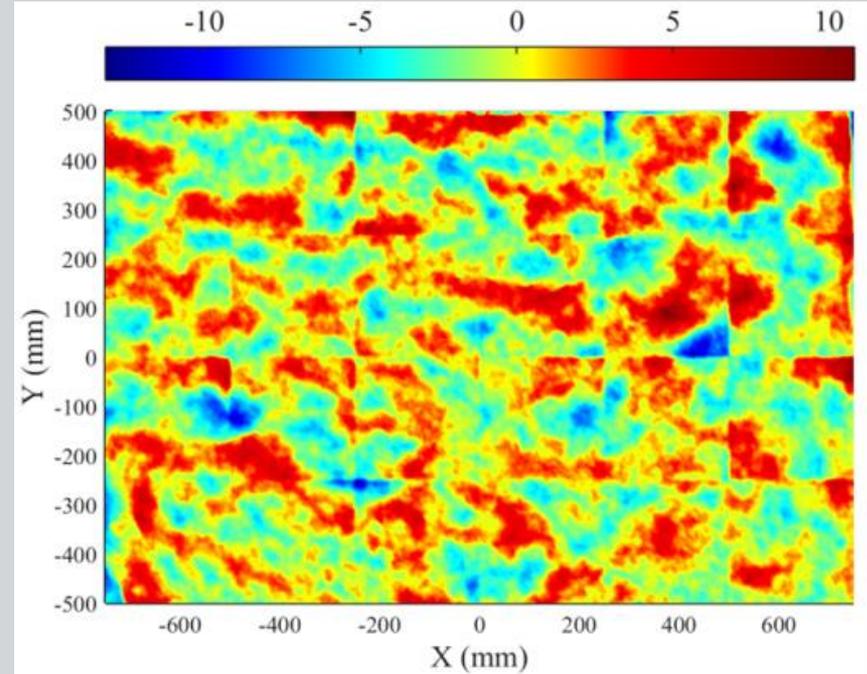
# Approche numérique

## Approche analytique simplifiée du changement d'échelle

Illustration pour le bloc I2



Surface du bloc I2 – Distance au plan moyen



Bloc I2 décomposé à l'échelle intermédiaire

Une crête majeure, mais d'amplitude peu marquée, justifiant la décomposition et l'analyse de surfaces de dimensions intermédiaires (de l'ordre de 180 x 180 mm)



# Approche numérique

## Approche analytique simplifiée du changement d'échelle

$$\tau_p = \Omega \times \tau_{pA} + (1 - \Omega) \times \tau_{pB}$$

où  $\Omega$  représente le taux de surfaces élémentaires intermédiaires dont le comportement est de type A, selon l'analyse de la topographie (longueur d'onde principale, ou  $k/\lambda_{\max}$ )

Application de l'approche analytique aux blocs de grandes dimensions testés :

Surface	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau_p$ experimental (MPa)	$\Omega$ (-)	$\tau_{pA}$ (MPa)	$\tau_{pB}$ (MPa)	$\tau_p$ analytique (MPa)	Variation (%)
I7	0.6	2.2	0.29	3.40	1.64	2.15	2.30
I2	0.6	1.8	0.25	3.40	1.64	2.08	14.43
I8	0.4	1.48	0.33	2.94	1.49	1.97	28.40
I9	0.2	1.45	0.29	2.47	1.34	1.67	14.10



# Conclusion

## Principaux enseignements pratiques

- 1) La résistance au cisaillement de l'interface béton-roche est sensible :
  - au plan de cisaillement considéré,
  - à la qualité de la surface rocheuse et,
  - aux sollicitations successives.
  
- 2) Il existe un effet d'échelle lié à la morphologie de la surface rocheuse sur la résistance au cisaillement de pic des interfaces béton-roche.
  
- 3) Le collage entre la roche et le béton contribue de manière significative à la résistance au cisaillement.



# Conclusion

## Principaux enseignements pratiques (suite)

- 4) Si on considère le critère de Mohr-coulomb pour caractériser l'interface béton-roche :
- la cohésion est non négligeable,
  - l'effet d'échelle est positif sur l'angle de frottement et négatif sur la cohésion.
- 5) Première approximation de la résistance au pic de l'interface béton-roche à grande échelle
- Critère de Mohr-Coulomb avec :
- cohésion = résistance en traction du contact béton-roche
  - angle de frottement = angle de frottement évalué en laboratoire sur des carottes prélevées ou réalisées



# Conclusion

## Perspectives

- I. Effets tridimensionnels ?
- II. Méthode de définition d'une échelle intermédiaire représentative (cf. piste sur l'analyse du rapport  $k/\lambda_{max}$  à différentes échelles) ?
- III. Rôle positif ou négatif des bûches dans les fondations au rocher ?

---

**Merci pour votre attention !**

