

Société Belge de Géologie de l'Ingénieur et de Mécanique des Roches

**Assemblée Générale du 29 Mars 2017
Université de Liège**

Caractérisation de la résistance au cisaillement et comportement de l'interface entre béton et roche

Jean-Pierre Rajot

Crédits

**Doctorat de Hussein Mouzannar (2016)
Co-direction Marion Bost (Ifsttar)**



IFSTTAR

Plan de la conférence

- **Contexte et intention**
- **Approches antérieures**
- **Objectif et programme d'études**
- **Présentation des campagnes d'essais**
- **Synthèse et interprétation des résultats**
- **Développement d'une approche numérique**
- **Préconisations pratiques et perspectives**



Contexte et intention



Barrage poids en béton de Sarrans, France (<http://structurae.info/>)



Contexte et intention

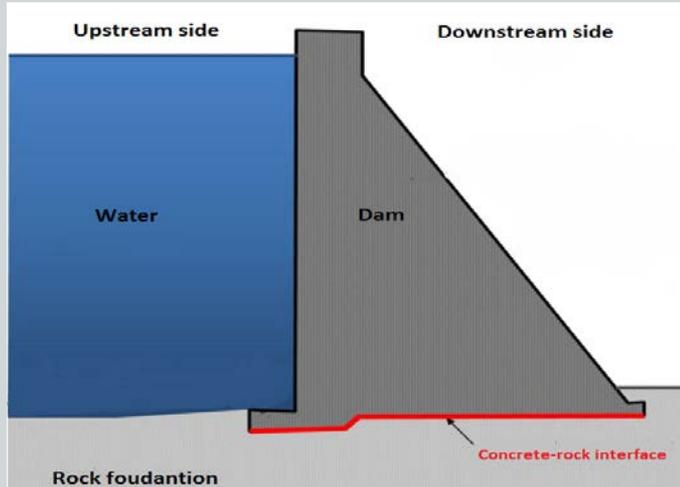


Schéma d'un barrage poids

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

- Renversement ;
- Poinçonnement de la fondation ;
- Glissement aux interfaces :
 - o Roche-roche (massifs latéraux et fondation)
 - o Béton-béton aux reprises de bétonnage
 - o **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.**



Contexte et intention

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 fait, en l'absence de méthodologie établie, dans le 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 consensuelle et sécuritaire. En particulier, la cohésion est supposée nulle.

...

Cependant avec les récentes révision des cartes sismiques et augmentation de la durée de la période de retour de crue en France, sur la base de cette estimation sécuritaire de la résistance de l'interface, plusieurs barrages poids en France sont théoriquement devenus instables au glissement !



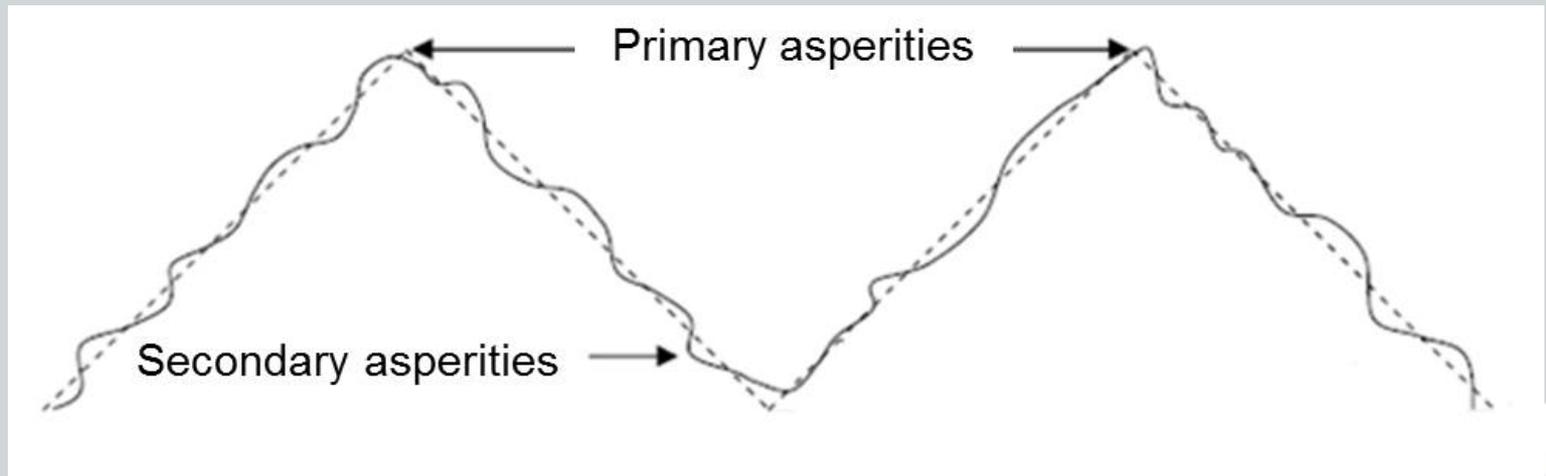
Contexte et intention



La caractérisation de la résistance au cisaillement de l'interface entre roche et béton coulé en place doit être améliorée.

Une des pistes est la prise en compte de l'effet d'échelle (cf. Jing et al. (1992)), entre l'échantillon testé au laboratoire et l'ouvrage.

(plus précisément, entre l'échantillon testé et la représentation de la géométrie de l'ouvrage dans le schéma ou modèle de calcul)



Représentation de la morphologie à différentes échelles (Jing et al. (1992))

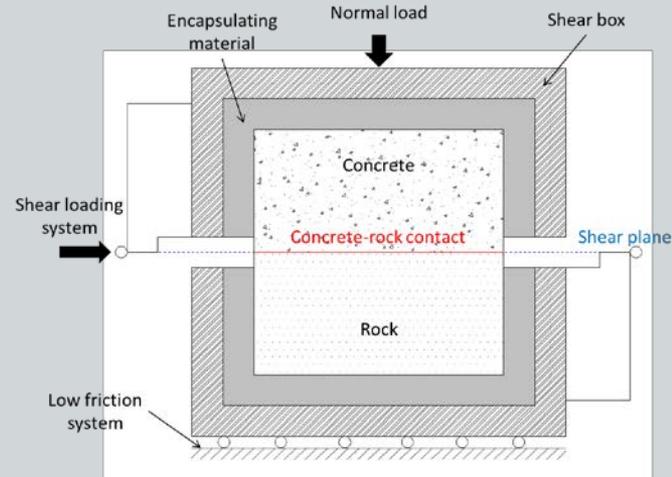


Approches antérieures

❖ Etudes expérimentales de l'interface roche - béton

- La plupart des études sont basées sur l'essai de cisaillement direct

Représentation schématique d'un essai de cisaillement direct au laboratoire



- Conditions d'essai ayant une influence démontrée sur les résultats :

- Vitesse de cisaillement (Crawford and Currant (1981), Armand (2000))
- Inclinaison de l'interface par rapport au plan de cisaillement de la machine (Armand, 2000).

- La résistance au cisaillement de l'interface roche – béton dépend :

- Du collage initial entre la roche et le béton (Lo et al. (1990), Moradian et al. (2012))
- De la rugosité de la surface rocheuse (Saiang et al. (2005), Gutiérrez (2013))
- Des propriétés mécaniques de la roche et du béton (EPRI (1992))
- De la contrainte normale appliquée (Moradian et al. (2012), Tian et al. (2015))



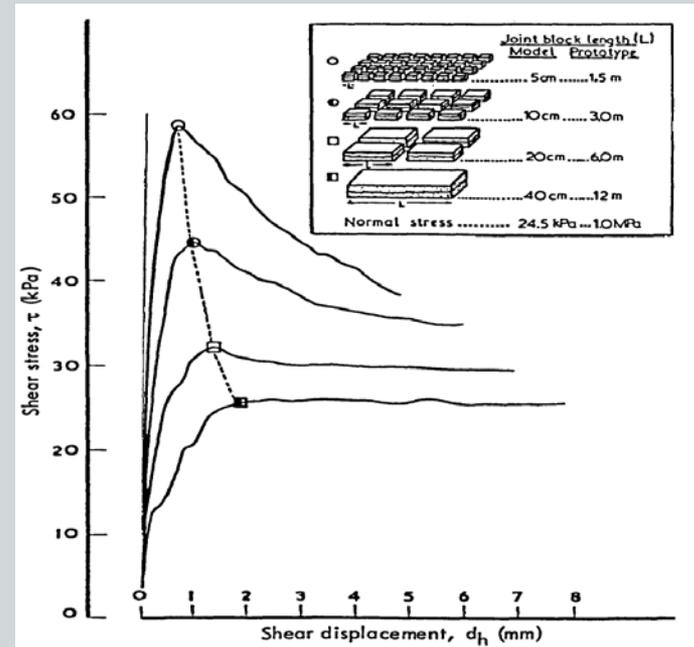
Approches antérieures

❖ Effet d'échelle sur la résistance au cisaillement

- La plupart des études ont été réalisées sur des interfaces roche – roche

Exemple d'effet d'échelle sur la résistance des interface roche – roche (Bandis (1980))

Essais sur répliques en plâtre de surfaces rocheuses, dimension 5, 10, 20 et 40 cm dans la direction de cisaillement



Pour les interfaces roche – béton, pas d'information concernant l'influence de l'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement et le comportement.

Considérant la différence de rigidité et de résistance des matériaux, interrogation en particulier concernant l'influence de l'effet d'échelle sur la mobilisation du collage initial (ou de la cohésion) entre roche et béton.



Approches antérieures

❖ Expression du critère de rupture

- En mécanique des roches, différents critères de rupture en cisaillement ont été proposés pour les interfaces rocheuses, parmi lesquels :

Critère	Expression du critère	Cohésion	Morphologie ou rugosité	Rigidité matériaux
Mohr-Coulomb	$\tau_p = c + \sigma_n \tan \varphi$	✓	-	-
Patton (1966)	$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_b + i)$ if $\sigma_n < \sigma_t$ $\tau_p = c_a + \sigma_n \tan(\varphi_r)$ if $\sigma_n > \sigma_t$	- ✓	✓	-
Barton (1977)	$\tau_p = \sigma_n \tan \left(JRC \cdot \log \left(JCS / \sigma_n \right) + \varphi_b \right)$	-	✓	-
Maksimovic (1996)	$\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi_b + d_n + s_n)$	-	✓	-
Grasselli (2001)	$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \left(\frac{\theta_{max}^*}{C} \right)^{1,18 \cos \alpha} \right]$ $\times \left[1 + e^{-\left(\theta_{max}^* / 9A_0 C \right) (\sigma_n / \sigma_t)} \right]$	-	✓	-

Objectif et programme d'études

Quelle est l'influence de l'échelle des essais de cisaillement directs sur la caractérisation de la résistance au cisaillement de l'interface entre roche et béton à la base des barrages poids ?



- Réaliser des essais de cisaillement direct à différentes échelles reproduisant les conditions à la base des barrages poids fondés au rocher : surface rocheuse naturelle saine et propre, béton spécifique et plage de contraintes normales.
- Maîtriser les conditions d'essai au laboratoire : vitesse lente (0.1 mm/minute) et faire coïncider le plan moyen de l'interface avec le plan de cisaillement de la machine.
- Pour l'analyse des résultats, caractériser la surface de contact entre roche et béton de l'échantillon – de la rugosité (locale) aux aspérités (irrégularités géométriques hors plan).



Objectif et programme d'études

❖ Approche et programme

1. **Choix d'une roche, sélection de blocs rocheux de grandes dimensions et mesure de la morphologie de la future interface roche – béton.**
2. **Caractérisation des propriétés mécaniques de la roche et du béton: essais triaxiaux et essais de traction indirecte sur ces matériaux.**
3. **Résistance en traction de l'interface roche – béton: 19 essais de traction directe sur éprouvettes (diamètre 148 mm), obtenues par carottage dans des échantillons de grandes dimensions.**
4. **Essais de cisaillement direct de l'interface roche – béton sur éprouvettes de différentes dimensions, petite, intermédiaire et grande :**
 - A petite échelle : **huit échantillons de diamètre 80 mm**, obtenus par carottage dans des échantillons de grandes dimensions (cf. pratique usuelle en ingénierie).
 - A échelle intermédiaire : **neuf échantillons de surface carrée de 180 mm de côté**, obtenus par sciage de blocs rocheux, puis préparation comme les grands échantillons.
 - A grande échelle : **cinq échantillons de surface rectangulaire, 1 m de large par 1.5 m** dans la direction de cisaillement (échelle métrique, du même ordre que les barrages).



Objectif et programme d'études

❖ Choix de la roche

Choix d'un granite présentant des surfaces naturelles relativement planes de grandes dimensions. Découpe de blocs parallélépipédiques rectangles, de surface 1.5 m x 1 m (une face naturelle) et d'épaisseur de l'ordre de 30 cm.



Carrière de granite de Bugeat (Corrèze, France), photo M. Bost

Densité (kg/m ³)	Module d'Young (MPa)	Résistance en compression simple, R _c (MPa)	Résistance en traction, R _t (MPa)
2608	(V _p = 3692 m/s) (V _s = 2555 m/s)	133	10.21

Objectif et programme d'études

❖ Morphologie de la future interface

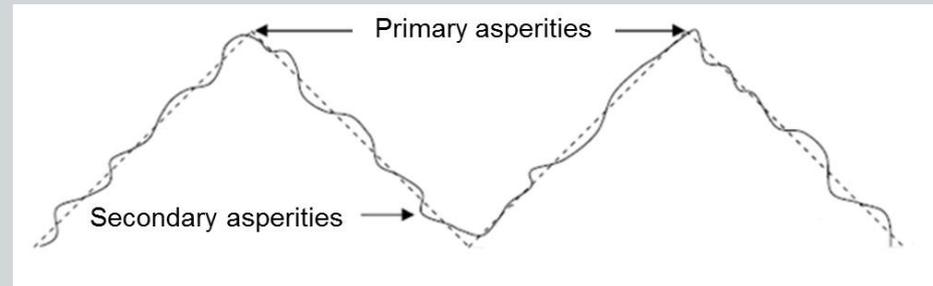
Mesure et caractérisation de la surface des grands blocs



Stéréoscopie avec projection de franges de lumière texturée (appareil ATOS)

Choix de la méthode:

- Haute résolution (0.25 mm) et forte précision (0.1 mm)
- Possibilité de caractériser de grandes surfaces, y compris in-situ



Représentation de la morphologie à différentes échelles (Jing et al. (1992))

Paramètres usuels de caractérisation :

- Statistiques
- Empiriques (cf. JRC)
- Tridimensionnels ou non
- Approches fractales
- Géostatistiques

Influence de l'effet d'échelle – Seule référence objective: le plan moyen de la surface



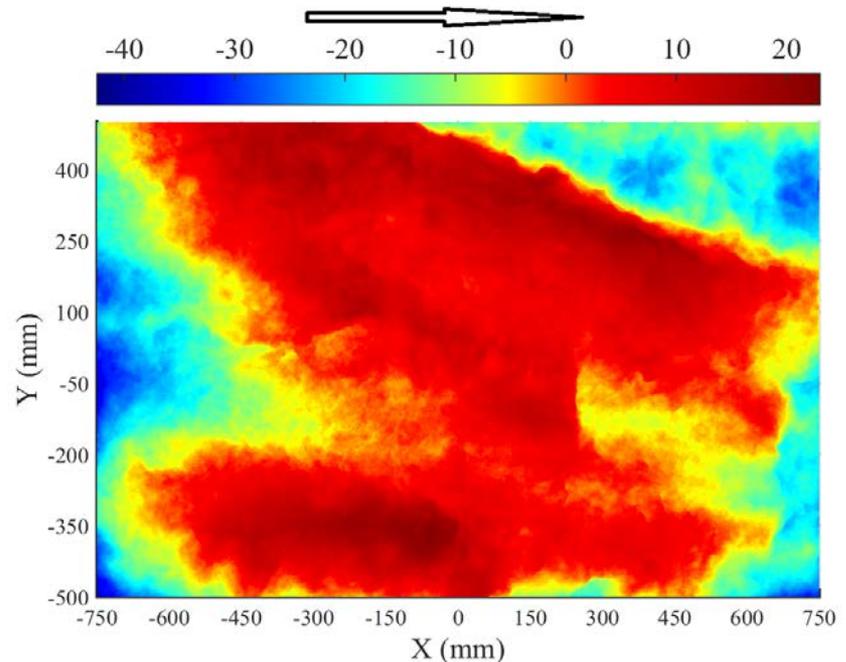
Objectif et programme d'études

❖ Morphologie de la future interface

Illustration pour le bloc I9, de surface 1 m x 1.5 m



Aspect du bloc



Surface du bloc digitalisée – Calcul du plan moyen et représentation de la distance au plan

Une morphologie d'ensemble, des variations plus locales de demi-longueur d'onde de l'ordre de 10 cm, et une rugosité à échelle inférieure.



Objectif et programme d'études

❖ Béton

La formulation du béton a été définie par EDF, sur la base de l'analyse des bétons utilisés pour construire les barrages poids existants en France:

- Résistance en compression simple de l'ordre de 30 MPa
- Dosage en ciment de 250 à 300 kg/m³
- Rapport poids d'eau / ciment : 0.5 à 0.55 (C/E 1.82 à 2)
- Fraction granulaire limitée à $D_{\max} = 30$ mm ;
- Classe de consistance : S4 (« béton fluide », affaissement cône d'Abrams 160 à 200 mm).

Composant	Ratio (kg/m ³)
Ciment CEM I 52,5R	280
Sable 0/4 mm	650
Sable lavé 0/2 mm	150
Concassé 11.2/22.4 mm	780
Concassé 4/11 mm	330
Adjuvant – OPT 203	2.80
Eau	157

Pour la fabrication des éprouvettes instrumentées, le béton était commandé en centrale de béton prêt à l'emploi certifiée, préparé avec la formulation demandée.

Densité (kg/m ³)	Module d'Young (MPa)	Résistance en compression simple, R_c (MPa)	Résistance en traction, R_t (MPa)
2370	38 000	43.4	3.75

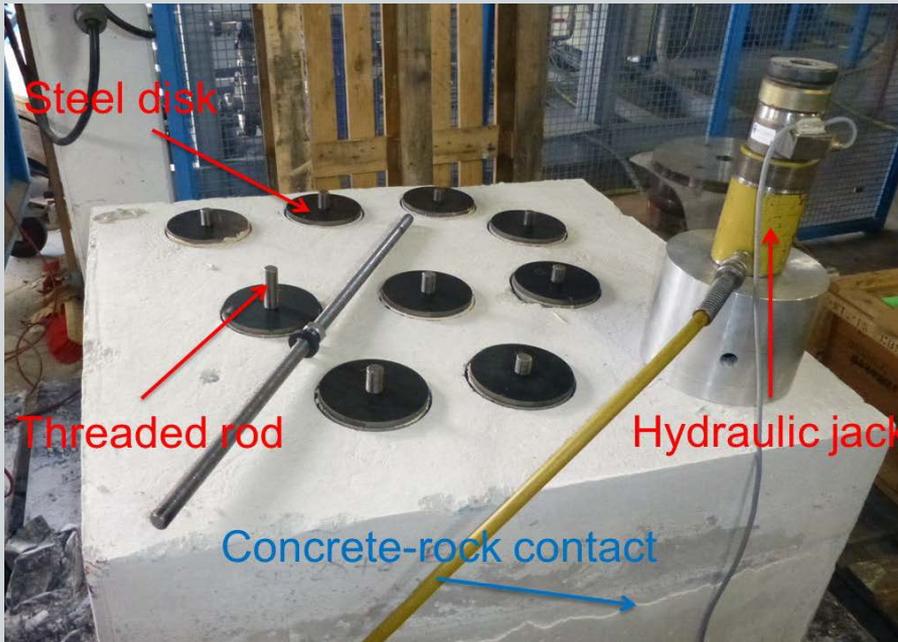
Propriétés à 28 jours du béton utilisé pour la fabrication des éprouvettes



Campagnes d'essais

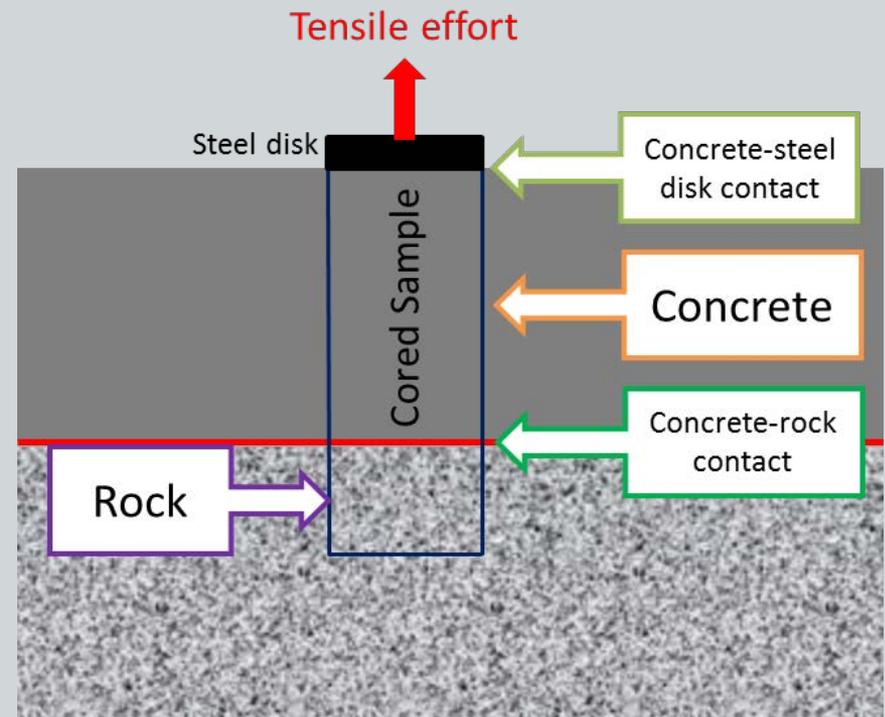
❖ Traction directe

Principe de l'essai



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

(Fabrication présentée en détail par la suite)



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



Campagnes d'essais

❖ Traction directe

Résultats

Carotte	Contrainte à la rupture (MPa)	Localisation de la rupture
A	0.87	Contact roche – béton
B	1.05	Contact roche – béton
C	1.18	Contact roche – béton
D	1.53	Contact roche – béton
E	1.48	Contact roche – béton
F	1.05	Contact roche – béton
G	0.48	Dans le béton
H	0.97	Dans le béton
I	1	Contact disque d'acier – béton
J	0.93	Contact disque d'acier – béton
K	1.41	Contact roche – béton

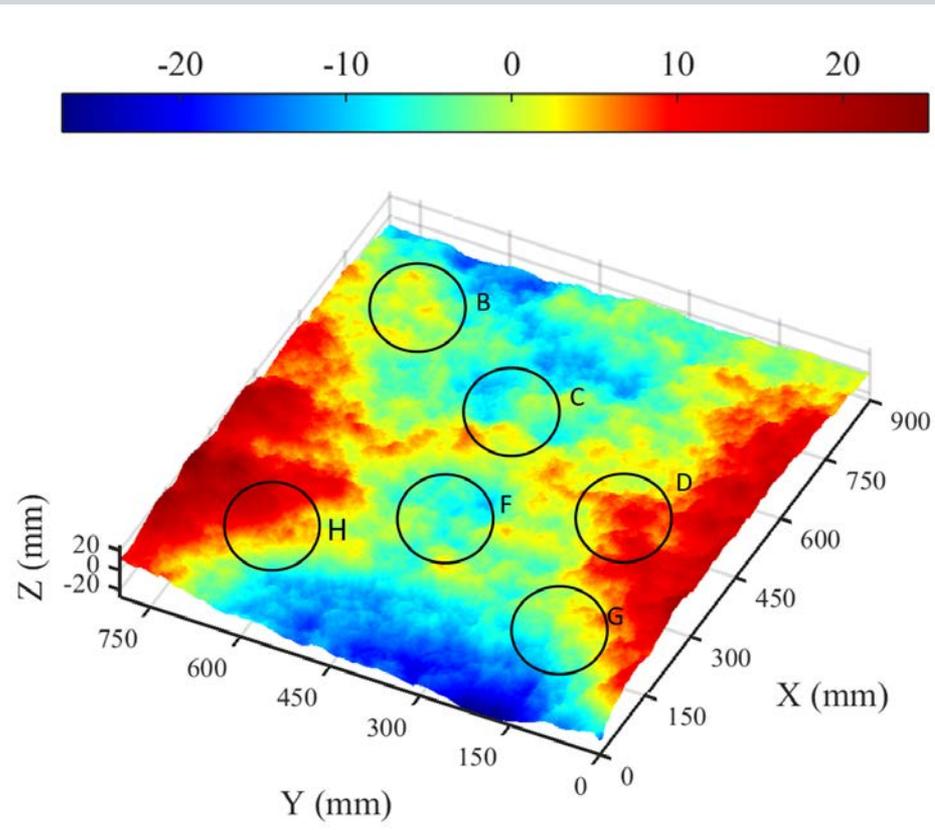
La résistance en traction (ou collage initial) de l'interface roche – béton est de l'ordre de 1.22 MPa (déviatoin standard 0.23 MPa, soit 19%)



Campagnes d'essais

❖ Traction directe

Conclusions



Topographie de la surface rocheuse

- **Résistance en traction 1.22 MPa**
- **La résistance en traction semble indépendante de la topographie**
- **Sur la surface rompue, on observe que le collage est uniforme**
- **La résistance en traction dépend de la composition du béton (une seconde composition a été testée)**



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct

Conditions d'essai communes à toutes les échelles

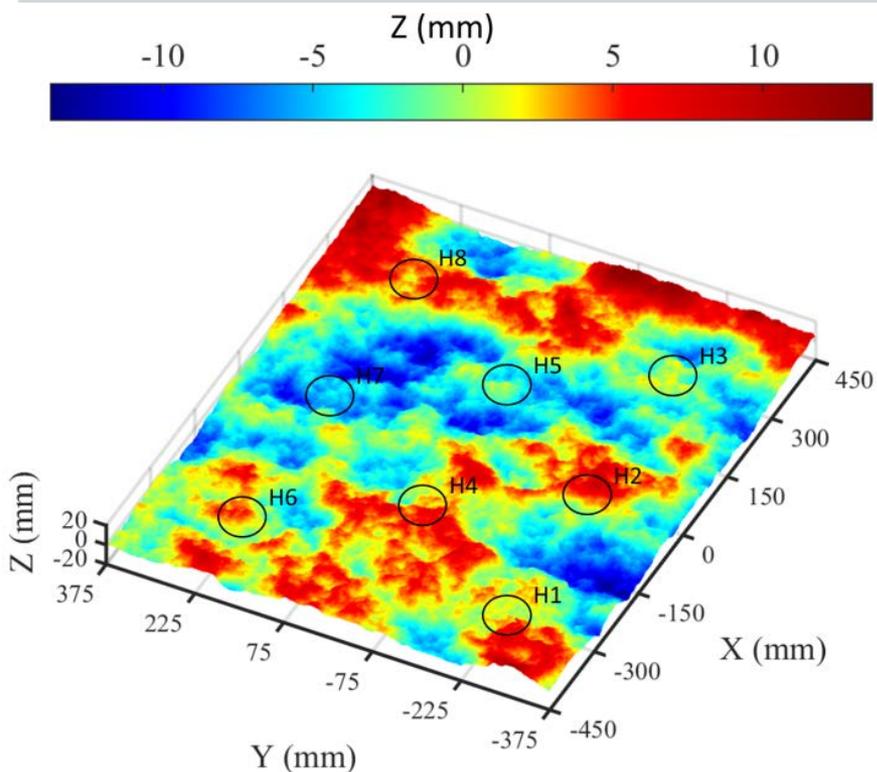
- Quelle que soit l'échelle, l'éprouvette est installée de manière à faire coïncider le plan moyen de l'interface roche – béton avec le plan de cisaillement imposé par la machine de cisaillement.
- La contrainte normale des essais est faible, inférieure à 1 MPa. Cette plage de contraintes normales correspond aux valeurs appliquées à la base des barrages poids.
- La vitesse de cisaillement est constante, égale à 0.1 mm/minute, respectant la recommandation de l'ISRM (Muralha et al. (2014)).
- Pendant l'essai, le comportement global de l'interface est piloté ou observé au minimum par des capteurs de force et des capteurs de déplacements verticaux et horizontaux (une instrumentation complémentaire sera utilisée pour valoriser et interpréter les essais à échelle métrique).



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct à petite échelle (ϕ 80 mm)

Préparation des éprouvettes



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

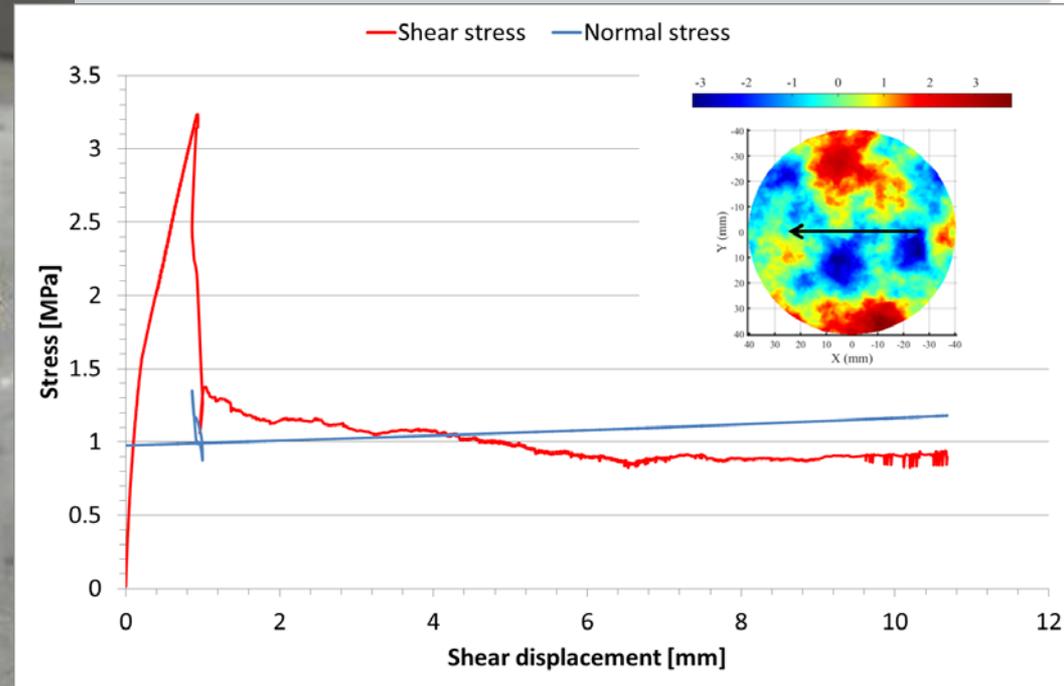
Prélèvement des éprouvettes par carottier double après coulage du béton en surface de bloc rocheux



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct à petite échelle (ϕ 80 mm)

Réalisation des essais et mesures



Installation de l'éprouvette dans le mortier de scellement aux dimensions de la boîte:

- Section 200 x 148 mm; hauteur 260 mm
- Espace libre entre demi-boîtes 15 mm

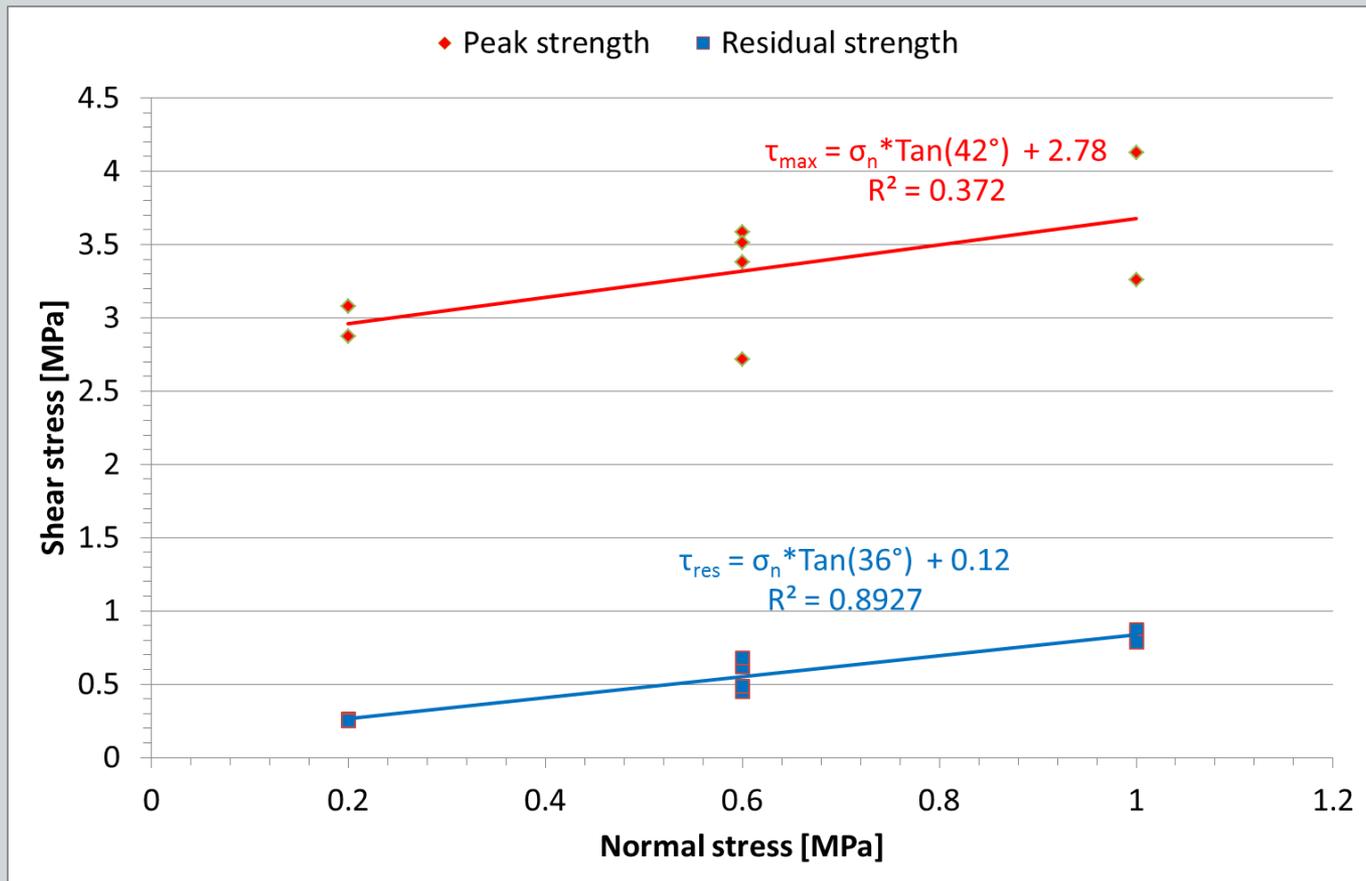
Contraintes normale et tangentielle pour l'échantillon H8
- Exemple de courbes obtenues



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct à petite échelle (ϕ 80 mm)

Dépouillement et représentation des résultats



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

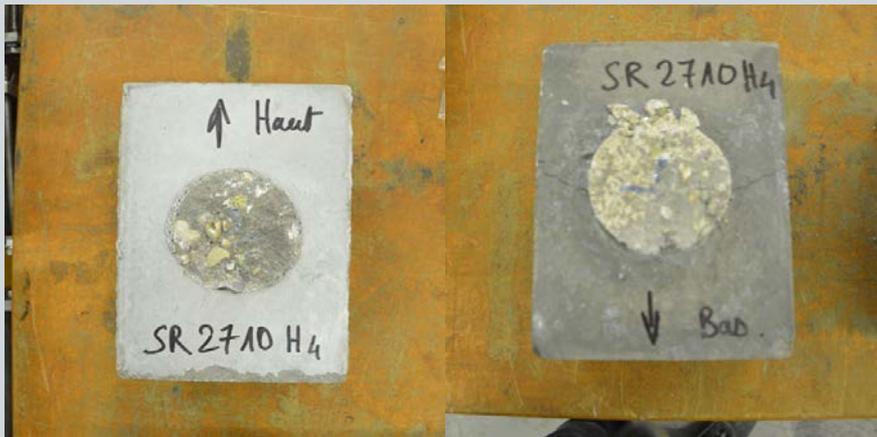


Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct à petite échelle (ϕ 80 mm)

Conclusions

- La résistance est indépendante de la morphologie de l'interface
- Importante dispersion des résultats, notamment au pic ($R^2 = 0.37$), car:
 - Le plan moyen roche – béton est tout de même difficile à faire coïncider avec le plan de cisaillement de la machine
 - Le mode de rupture mécaniquement dépendent du rapport entre espacement libre de mortier de scellement et diamètre de carotte (Bost, M. (2015)) (*)



H4: rupture dans le mortier de scellement, puis en partie dans la roche et en partie dans le béton (Ruptures hors plan: roche, roche et béton ou béton, éventuellement à l'interface !)



Espacement 30 mm entre demi-boîtes
(*) NB: D'autres facteurs influent



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

Préparation des neuf éprouvettes



Equerre pour matérialiser un plan-repère

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



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

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



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

Réalisation des essais



Intérieur de la cellule montrant la boîte de cisaillement utilisée au CEREMA Sud-Ouest (Modèle MTS 816 - Intérieur de la boîte: 200 mm x 200 mm x hauteur 340 mm)

- Calage de l'éprouvette dans la boîte (plan moyen)
- Scellement au mortier BETEC 804 (30 MPa à 24h),
- Entretoise 20 mm entre demi-boîtes et
- Scellement demi-boîte supérieure



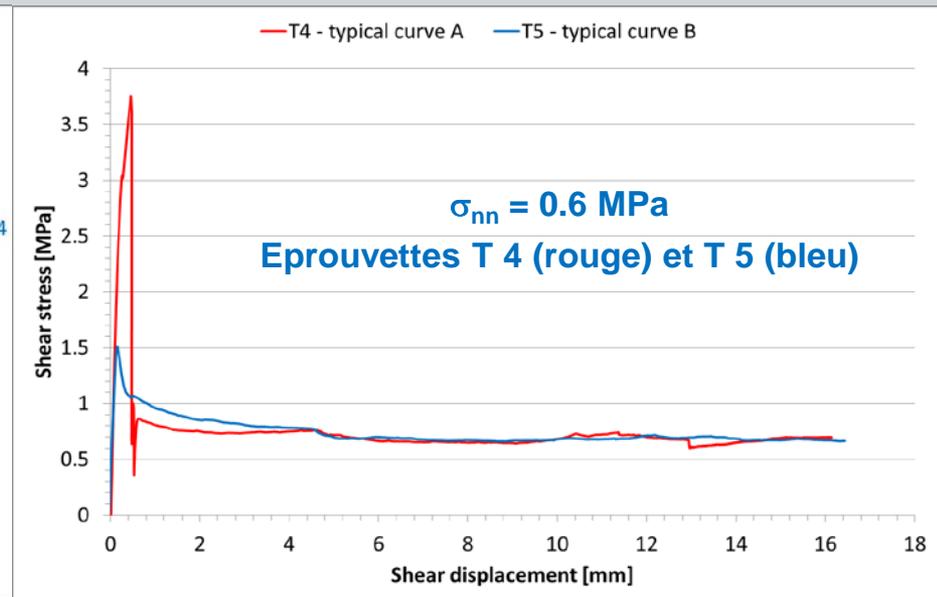
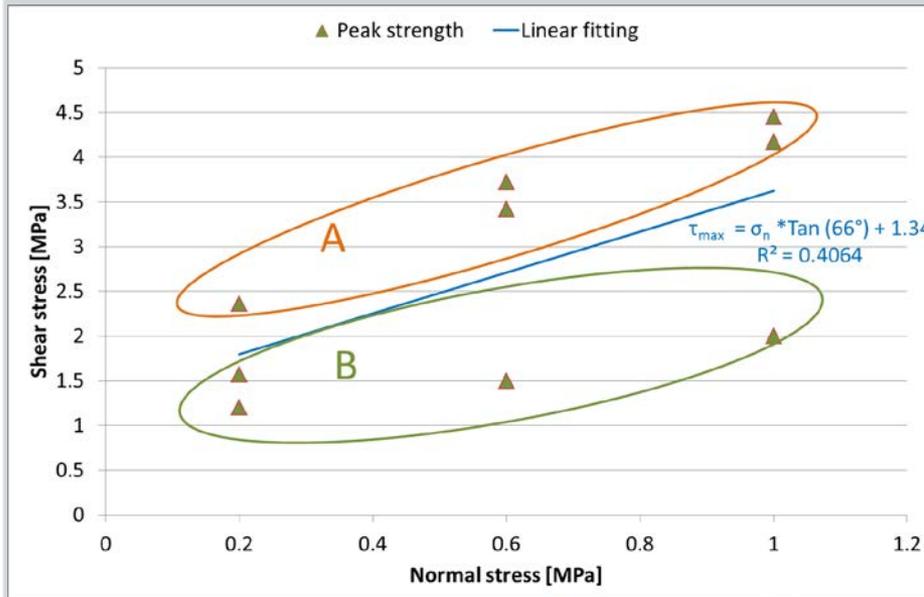
Exemple d'état des surfaces après rupture (Essai T4)



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

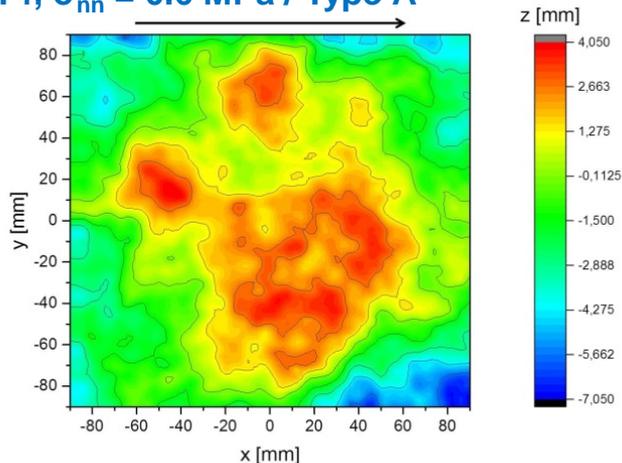


Campagnes d'essais

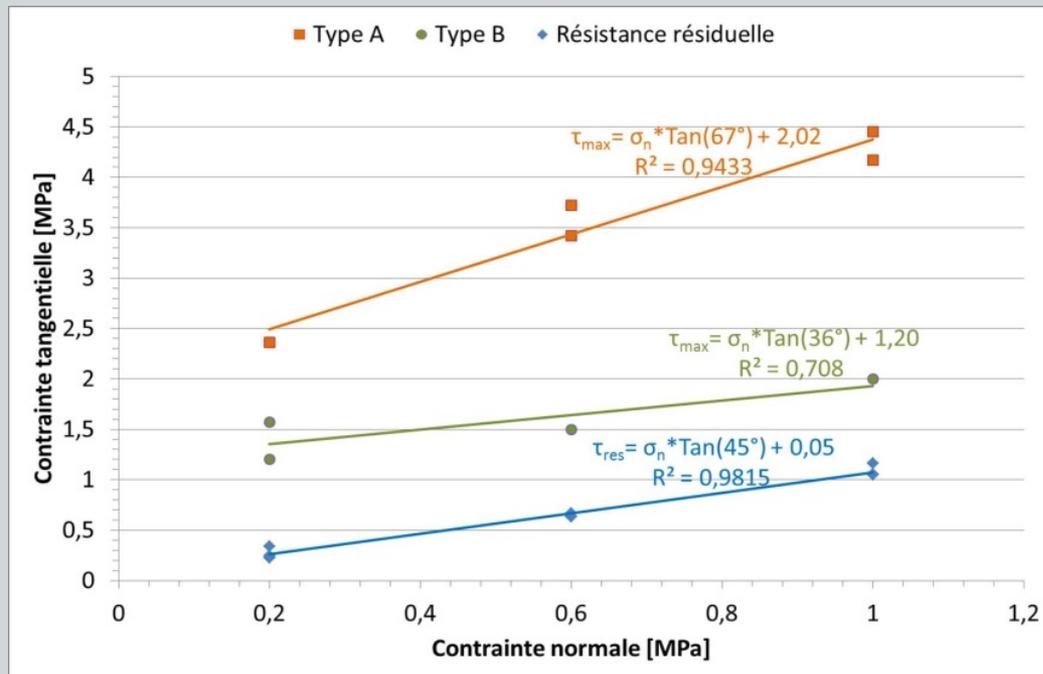
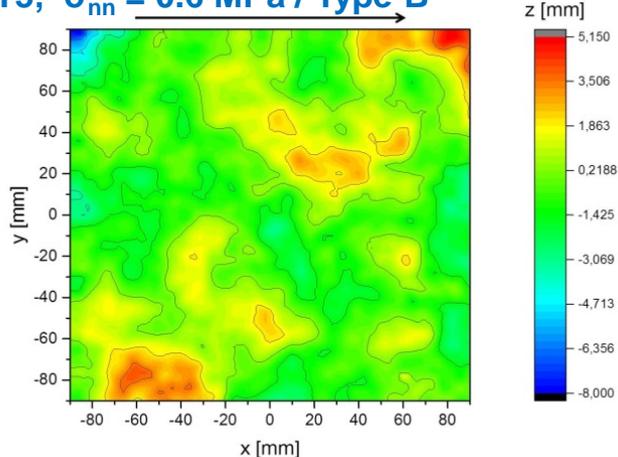
❖ Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

Interprétation

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



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



Adhésion uniforme : Oui --- Faible contrainte : Oui

Alors, effet de la morphologie de la surface de l'échantillon :

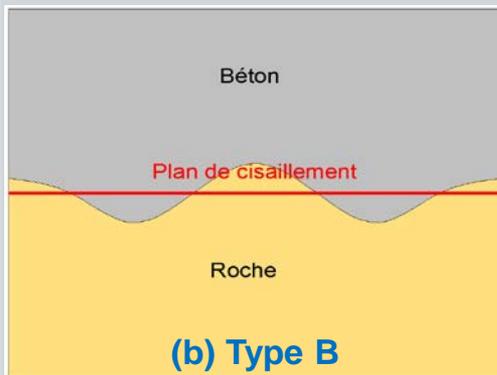
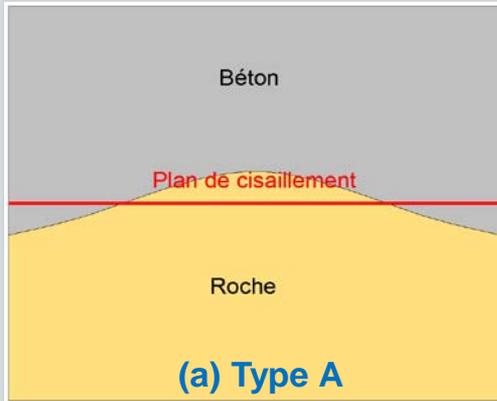
- Une seule crête : type A (pic élevé)
- Plusieurs ondulations : type B (pic faible, radoucissement)



Campagnes d'essais

❖ Cisaillement direct échelle intermédiaire (180 x 180 mm)

Interprétation



Profils 2D schématiques correspondant aux deux comportements observés

Eprouvette	Comportement	Z_2	K (mm)	θ^+ (°)	R_L	R_s	$\frac{\theta_{max}^*}{(C+1)}$
T1	A	0,2193	12	9	1,0219	1,0343	6,9275
T2	B	0,1594	15	7,11	1,0125	1,0225	6,0540
T3	B	0,6170	13	5,96	1,0301	1,0184	6,1320
T4	A	0,2646	11	6,16	1,0159	1,0180	5,5426
T5	B	0,4723	13	6,15	1,0245	1,0183	5,9312
T6	A	0,6693	14,5	8,58	1,0374	1,0275	7,1276
T7	A	0,1923	12,5	7,48	1,0180	1,0298	8,5221
T8	B	0,1410	12	6,33	1,0099	1,0189	6,0958
T9	A	0,3699	12,5	6,98	1,0232	1,0257	7,0350
Moyenne	-	0,3450	12,80	7,08	1,0215	1,0	6,5964
Ecart-type (%)	-	57,76	9,74	15,51	0,6	0,57	13,77

Quelques paramètres de morphologie des surfaces des éprouvettes

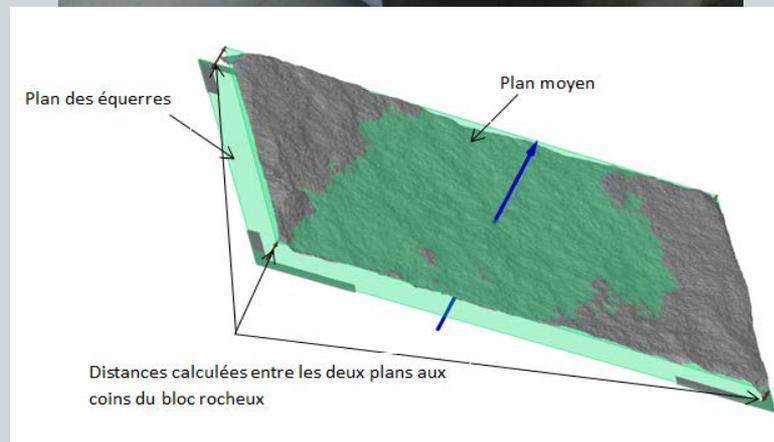
Pas de paramètre discriminant pour prédire le type de comportement



Campagnes d'essais

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

Préparation des « éprouvettes », de plus de 5 tonnes



(d) Calcul du plan moyen et localisation par rapport au plan de référence (équerres)



Campagnes d'essais

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

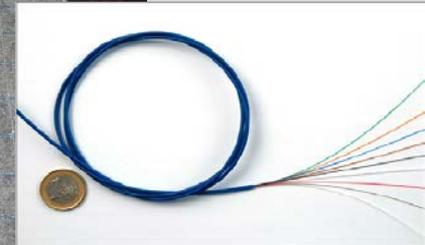
Préparation des « éprouvettes »



Campagnes d'essais

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

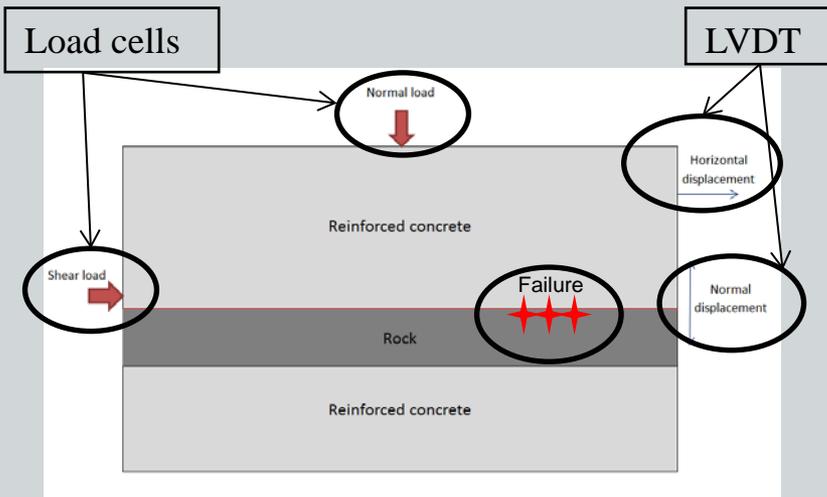
Préparation des « éprouvettes »



Campagnes d'essais

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

Préparation des « éprouvettes »



Mesures usuelles pour les essais à la boîte de cisaillement direct



Campagnes d'essais

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

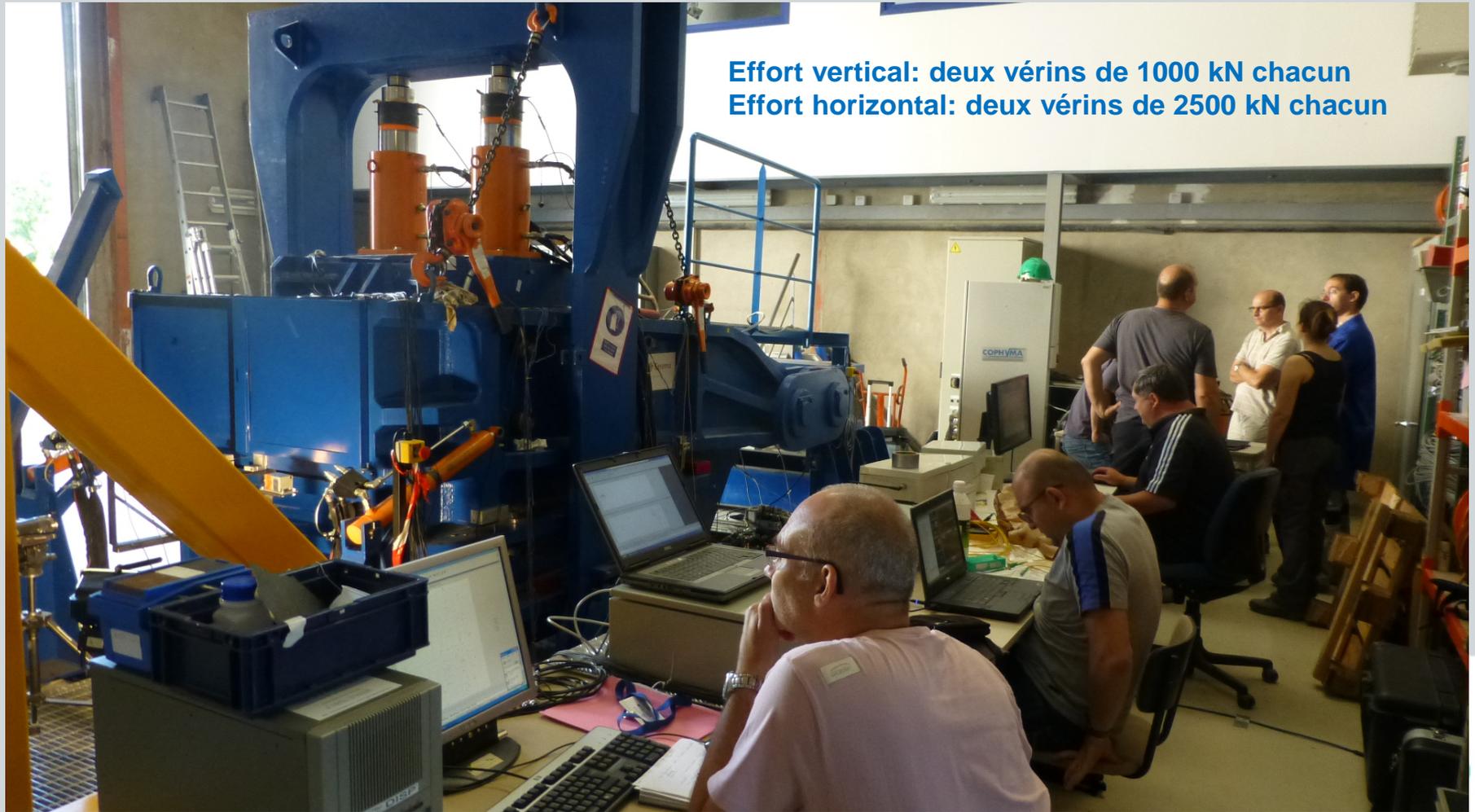
Mise en place de l'éprouvette dans la grande boîte du Cerema



Campagnes d'essais

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

Journée d'essai !



Campagnes d'essais

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

Exemple de résultats : Eprouvette I7 – Essai de faisabilité

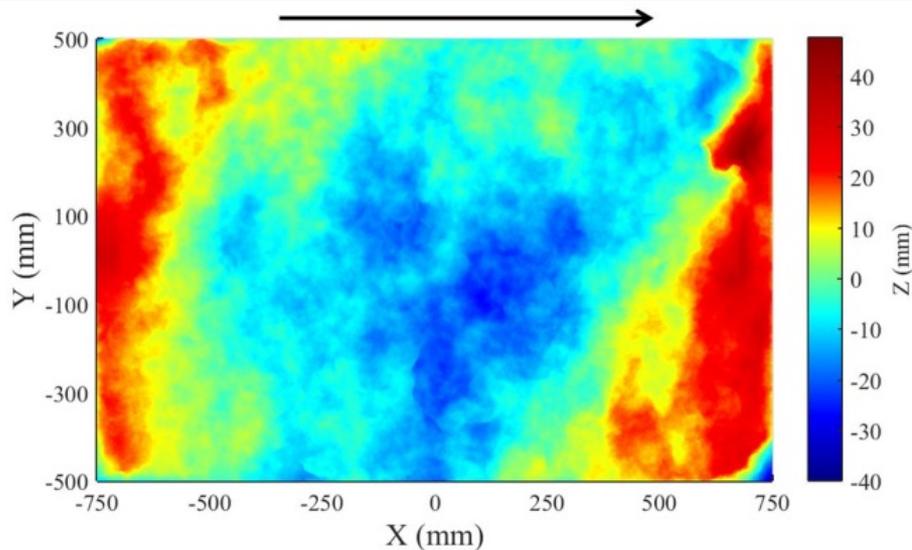
- **Chaque essai nécessite une analyse de toutes les observations pour comprendre le mécanisme de rupture progressif spécifique à l'éprouvette.**
- Pour I7, la rupture n'a pas touché l'instrumentation, ce qui permet de facilement comprendre le mécanisme général.
- Toutefois, la position de la fibre optique, déplacée par le coulage du béton, a dû de nouveau être déterminée après essai pour interpréter les mesures.



Campagnes d'essais

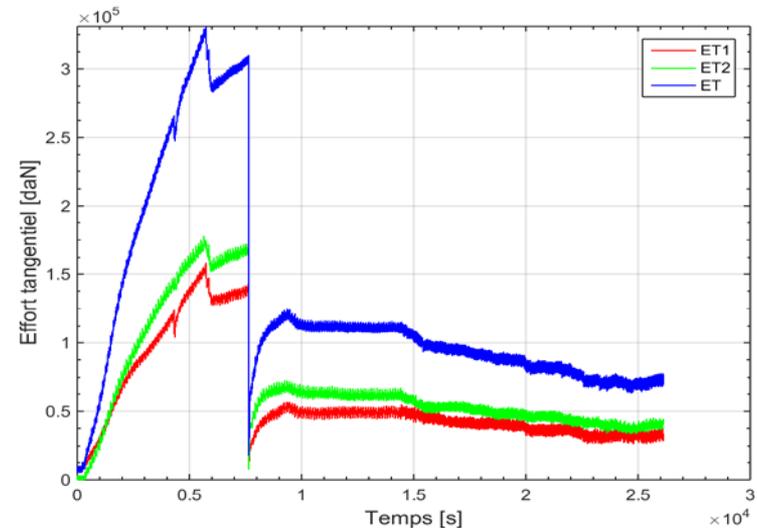
❖ Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Exemple de résultats : Epreuve I7



Topographie de l'éprouvette I7

- Surface faiblement convexe,
- Assez homogène dans la direction transversale



Efforts dans les deux vérins tangentiels (capacité 2.5 MN chacun)

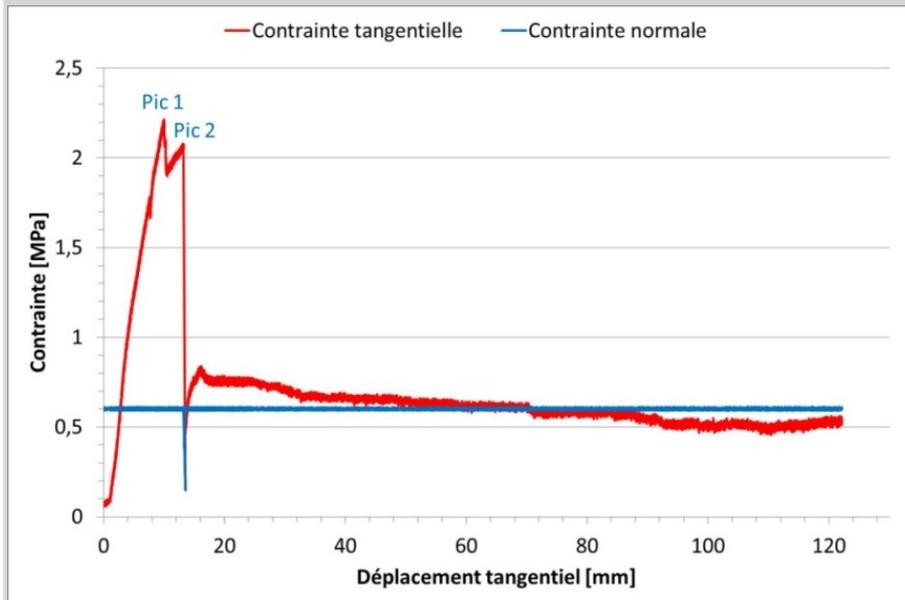
- Faible dissymétrie des efforts entre vérins (ce qui est rarement le cas: effets 3D)
- Plusieurs « pics. »



Campagnes d'essais

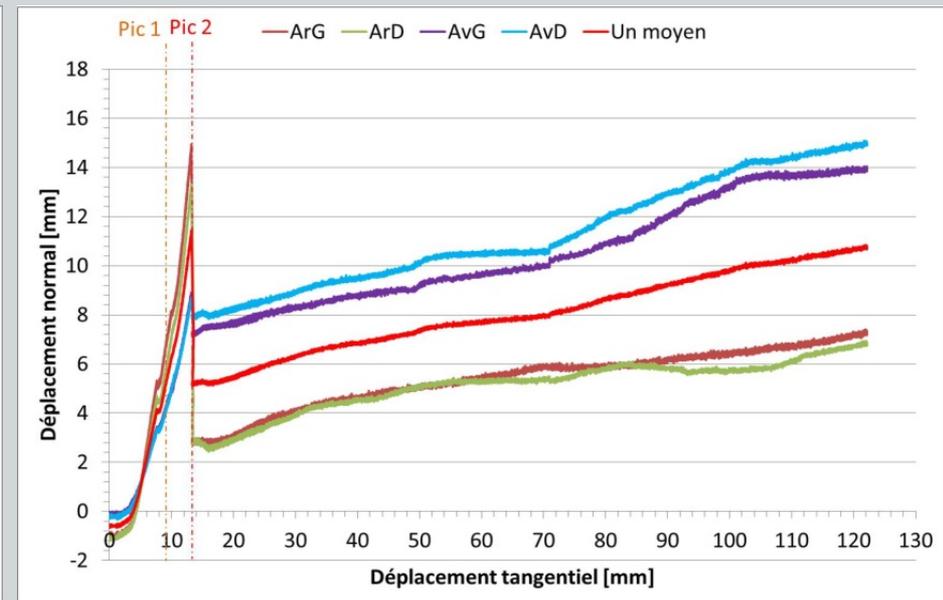
❖ Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Éprouvette I7 : Observations courantes d'essai de cisaillement direct



Contraintes normale et tangentielle moyennes en fonction du déplacement tangentiel

- Un premier pic ignoré, puis deux pics nets



Déplacements normaux au sommet de l'éprouvette

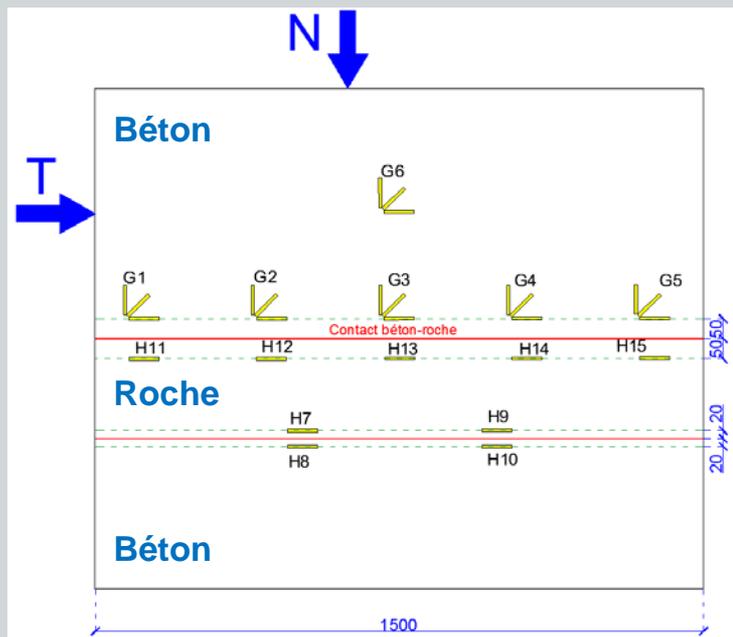
- Importante dilatance initiale, notamment arrière
- Rupture avec davantage de tassement à l'arrière,
- Dilatance en résiduel post-pic



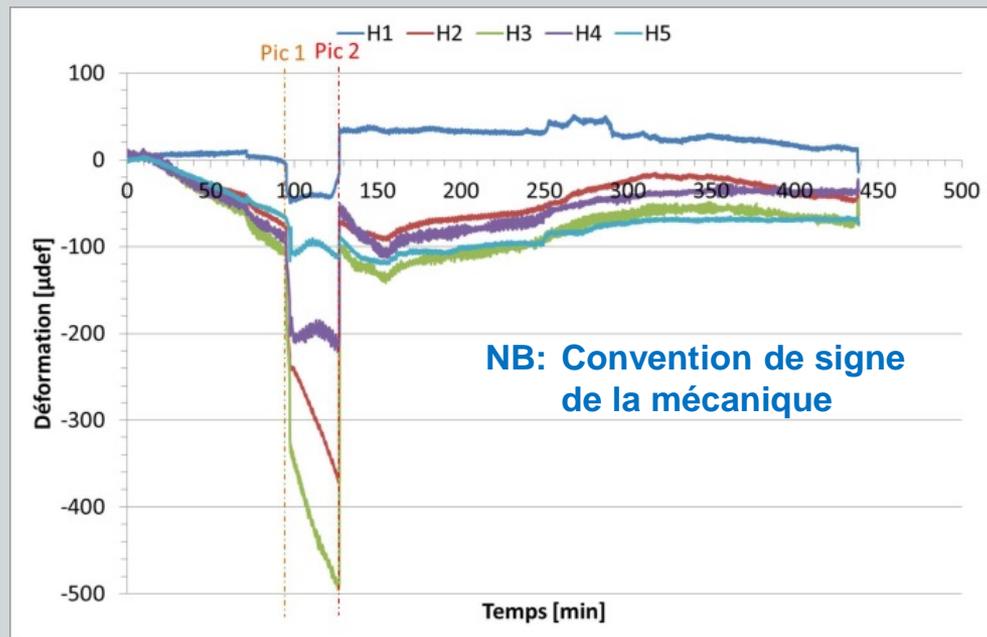
Campagnes d'essais

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

Eprouvette I7 : Jauges de déformation



Localisation des jauges de déformation



Déformations horizontales dans le béton à proximité du plan de cisaillement (rosettes G1 à G5)

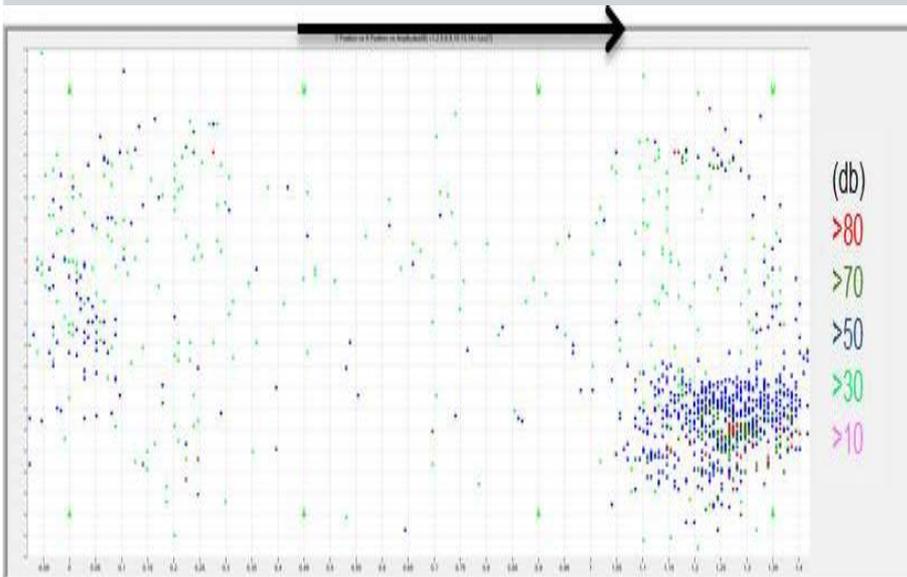
- Après le pic 1, les jauges 1, 4 et 5 sont constantes alors que 2 et 3 (partie centrale) continuent à croître,
- Après le pic 2, rupture totale de l'interface, compression uniforme dans le béton (hors jauge 1)



Campagnes d'essais

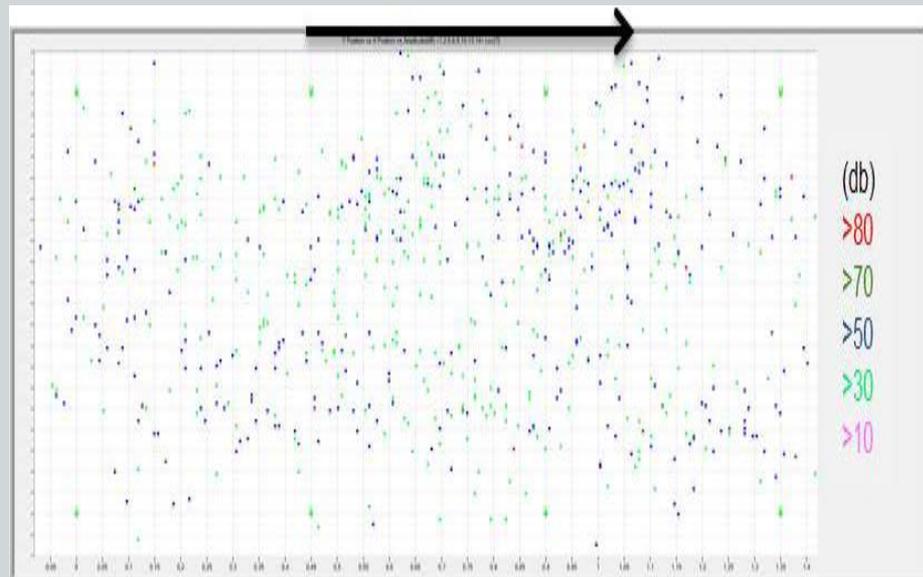
❖ Cisaillement direct à grande échelle (1500 x 1000 mm)

Eprouvette I7 : Emission acoustique



Localisation des évènements acoustiques projetés dans le plan de cisaillement

Cumul des évènements avant le pic 1



Localisation des évènements acoustiques projetés dans le plan de cisaillement

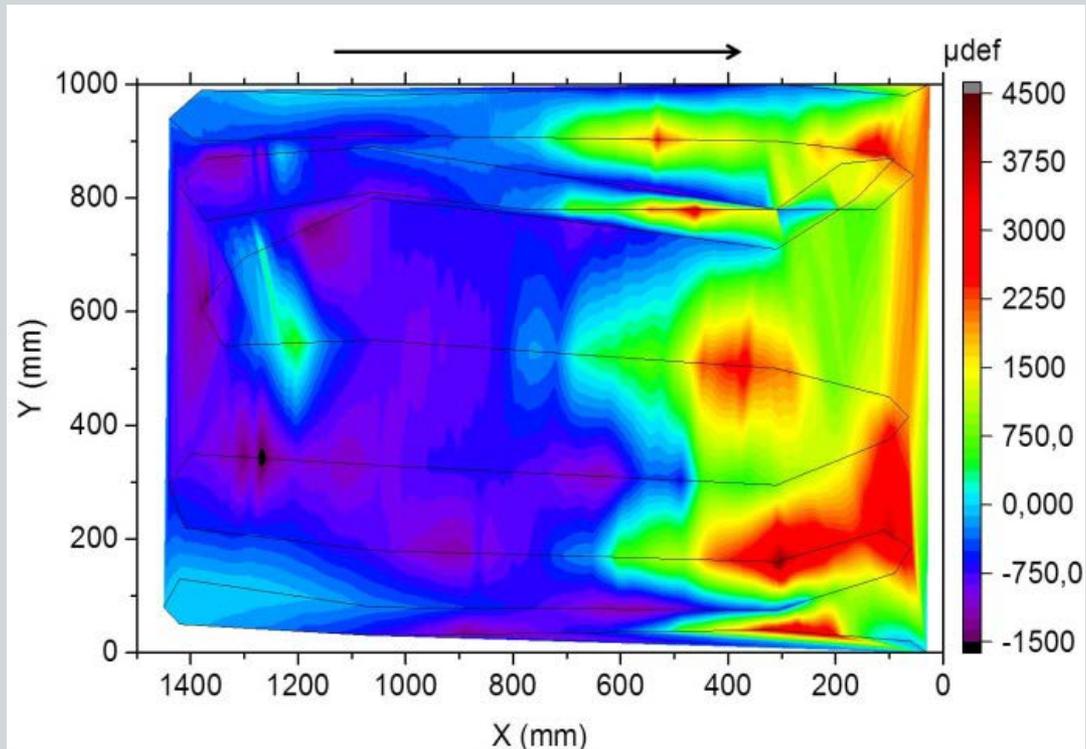
Evènements entre le pic 1 et le pic 2



Campagnes d'essais

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

Eprouvette I7 : Fibre optique (résolution millimétrique)



Distribution des déformations horizontales dans la direction de cisaillement dans le béton à proximité du plan de cisaillement

Distribution juste avant le pic 2, contrainte de cisaillement 2 MPa (compression côté amont et traction côté aval)

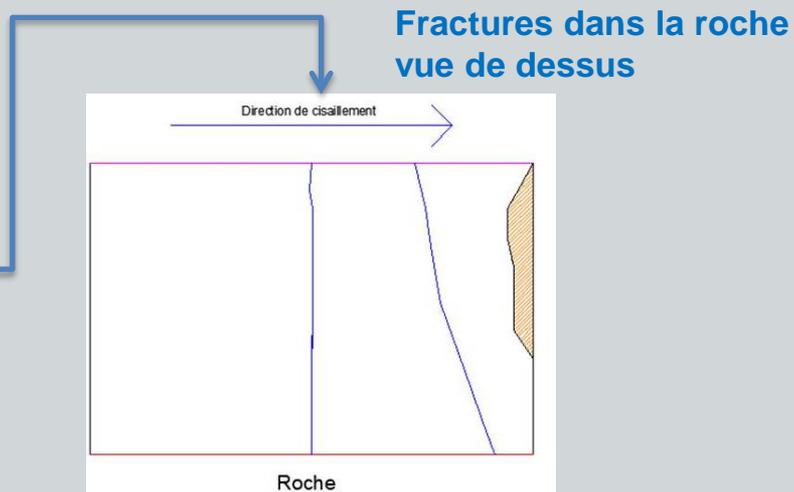
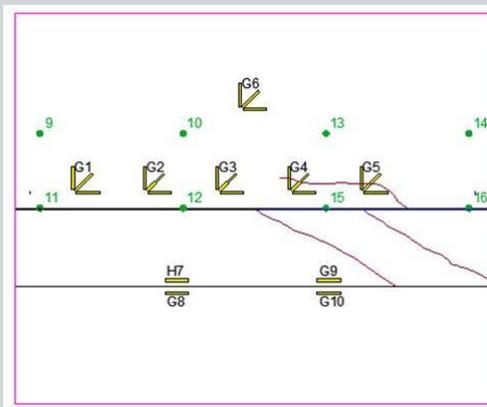


Campagnes d'essais

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

Eprouvette I7 : Observation des ruptures

Fractures face latérale
côté jauges (à gauche
sens du cisaillement)



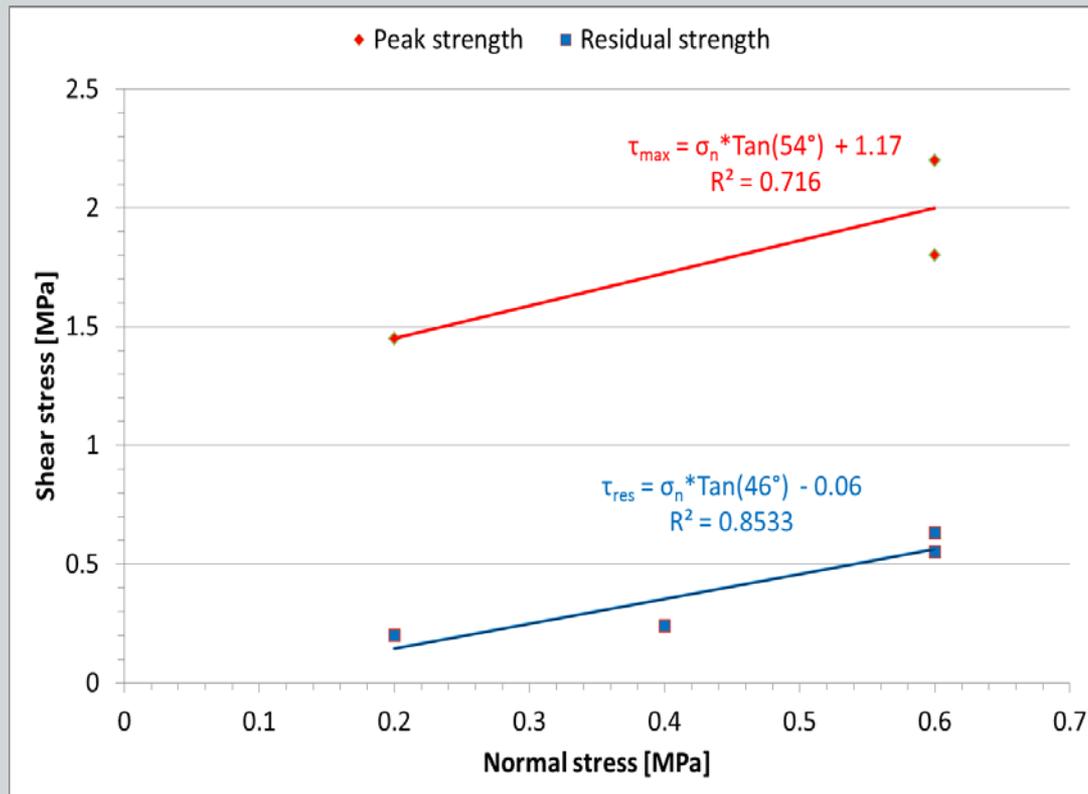
Aspect de l'interface cisailée: (a) Béton, (b) Roche



Campagnes d'essais

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

Interprétation des essais grande échelle dans le plan de Mohr



Contrainte de cisaillement versus contrainte normale



Campagnes d'essais

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

Interprétation des essais grande échelle

Les essais à grande échelle instrumentés montrent que le mode de rupture en cisaillement direct dépend :

- De la topographie de la surface cisailée,
- Corrélativement à la valeur de la contrainte normale
- Et à la cohésion, liée à une adhésion non négligeable.

La topographie peut induire des concentrations d'efforts, entraînant torsion dans le plan ou basculement

La déformabilité différente des matériaux peut entraîner des efforts de traction dans un des matériaux à proximité de l'interface

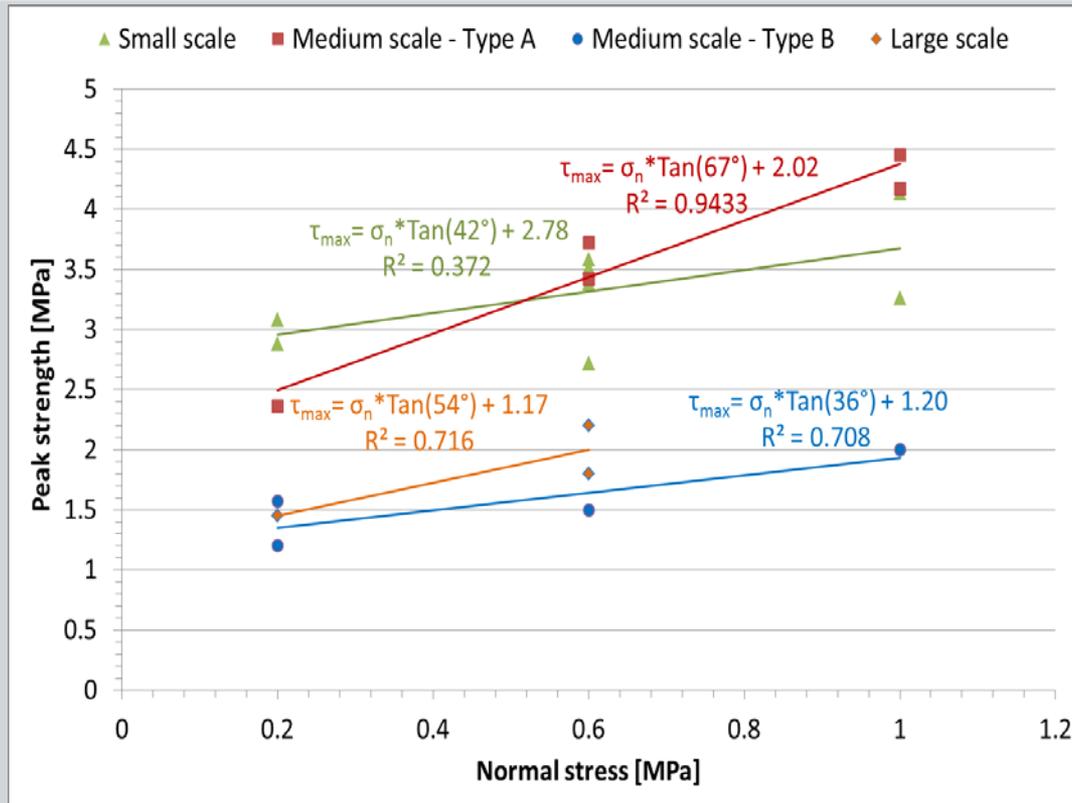
Autres facteurs identifiés:

- Propreté de la surface (purgé d'éléments écaillés),
- Effet des cycles de chargement-rechargement à étudier.



Synthèse et interprétation des résultats

❖ Effet d'échelle sur le critère de rupture



Résistances de pic en fonction de la contrainte normale observées à différentes échelles

Pour cette surface rocheuse, des 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

❖ Effet d'échelle sur le critère de rupture

Angles de frottement de pic observés à différentes échelles, comparés aux valeurs données par différentes théories, pour le contact roche – roche

Petite échelle						
	Expérimental		Patton(*) (1966)	Barton (**) (1977)	Maksimovic (1996)	Grasselli (2001)
$\varphi(^{\circ})$	42		41	57.4	54.0	56.4
Echelle intermédiaire						
	Expérimental – Type A	Expérimental – Type B	Patton(*) (1966)	Barton(**) (1977)	Maksimovic (1996)	Grasselli (2001)
$\varphi(^{\circ})$	67	36	37	50.8	48.9	51.8
Grande échelle						
	Expérimental		Patton(*) (1966)	Barton(**) (1977)	Maksimovic (1996)	Grasselli (2001)
$\varphi(^{\circ})$	54		42	40.5	40	58.5

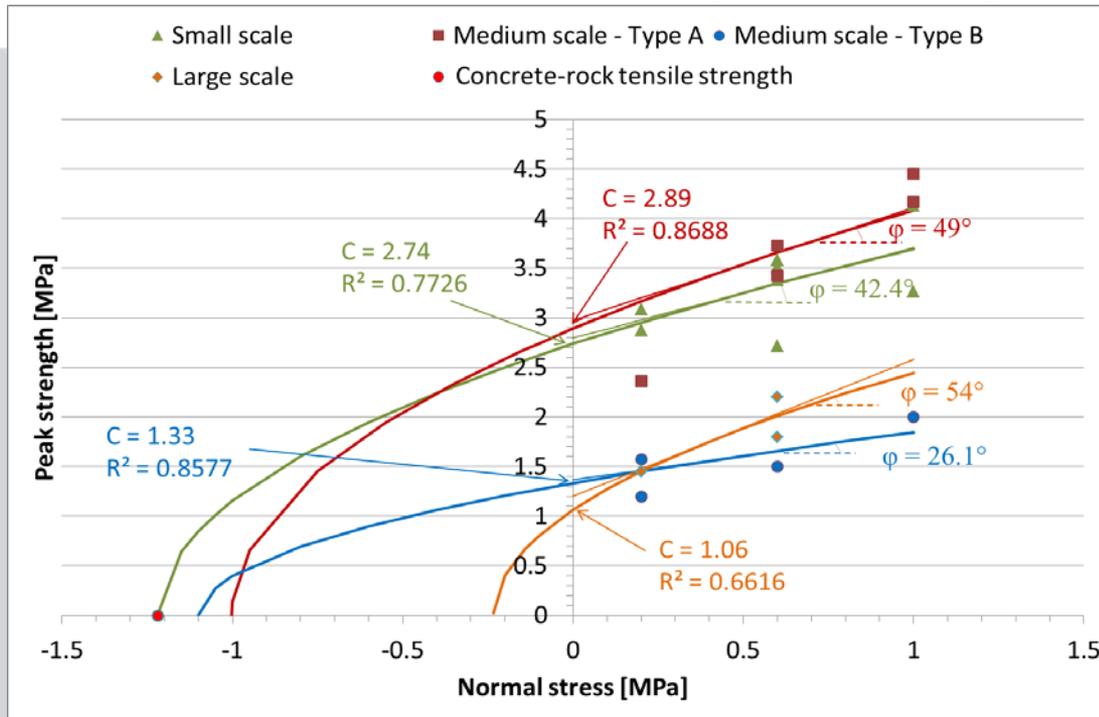
(*) Angle de dilatace à faible contrainte (i) pris égal à la moyenne, sur les surfaces des échantillons, des angles θ^* , mesurés à l'échelle micro (Grasselli (2001)), positifs (opposés au déplacement).

(**) Effet d'échelle sur le coefficient JCS selon Barton et Choubey (1977).



Synthèse et interprétation des résultats

❖ Pertinence d'un critère parabolique à faible contrainte



Critère (Griffith 1921):

$$\tau = \sqrt{a * \sigma_n^2 + b}$$

Enveloppes paraboliques calées sur les essais

NB : La résistance en traction ignorée pour l'enveloppe des essais à grande échelle

Echelle essai	Enveloppe linéaire		Enveloppe parabolique	
	c (MPa)	φ (°)	c (MPa)	φ (°)
Petite	2.78	42	2.74	42.40
Intermédiaire – Type A	2	67	2.89	49
Intermédiaire – Type B	1.20	36	1.33	26.1
Grande	1.17	54	1.06	54



Approche numérique

❖ Modéliser numériquement l'influence de la topographie

Supposant connu le comportement du contact à une échelle locale, considérer, à plus grande échelle, l'effet de la géométrie hors plan moyen

- Représenter l'interface à une échelle compatible avec celle des essais
- Deux solides au comportement fragile avec plasticité localisée: effet d'échelle des essais sur la caractérisation les paramètres du modèle (« longueurs caractéristiques ») et influence de la finesse du maillage
- Contact local: collage et cohésion dégradables puis frottant
- Gestion numérique maître-esclave du contact en 3D
- ... Implémenté sous Abaqus, explicite: convergence en 3D non obtenue...

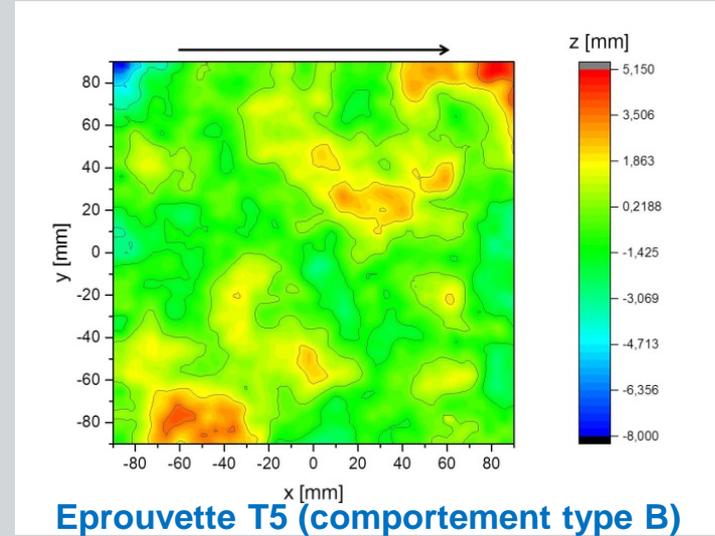
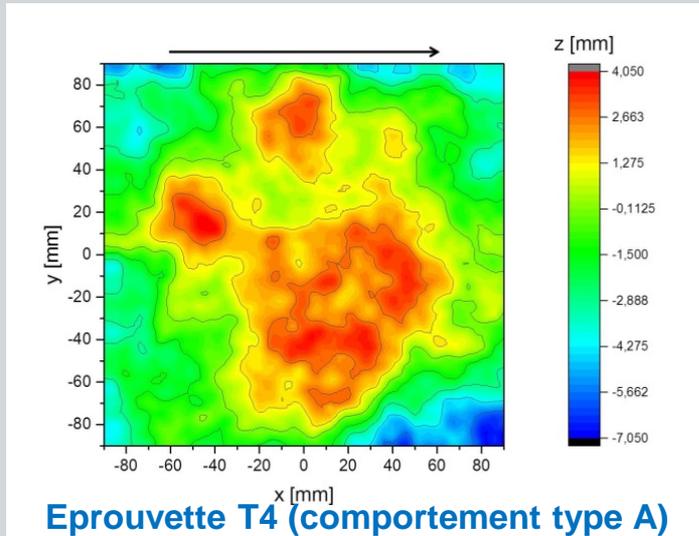


Simulation 2D des essais à échelle intermédiaire, présentant les comportements contrastés de type A ou B



Approche numérique

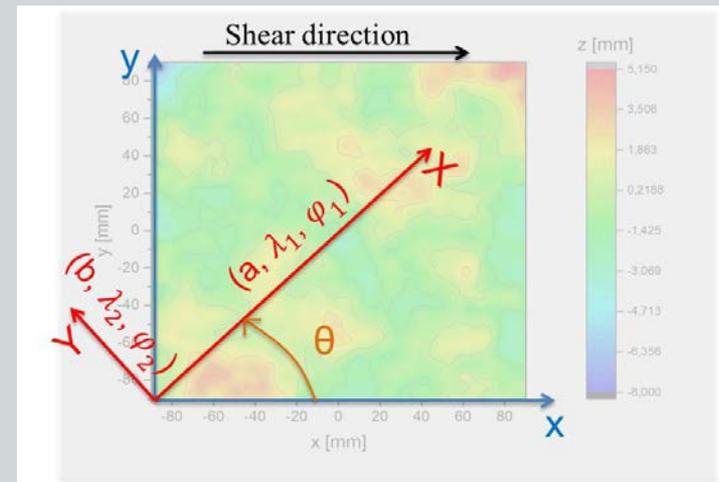
❖ Représentation approchée de la morphologie



Détermination de la longueur d'onde maximale représentant au mieux la surface réelle :

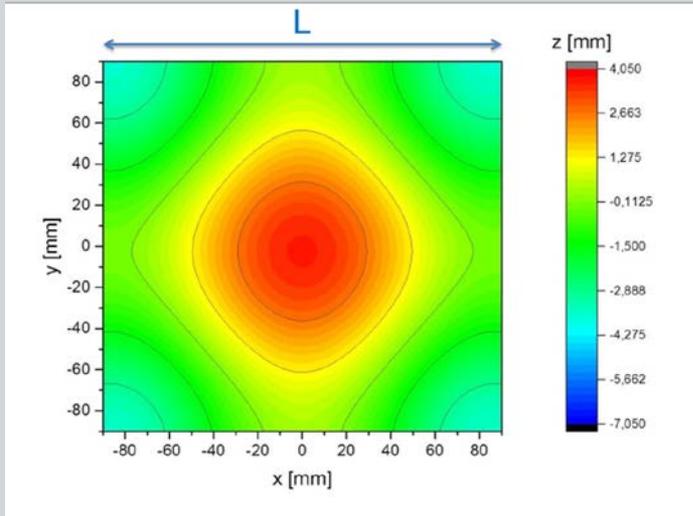
$$z(x, y, \theta, \alpha, \beta, \lambda_1, \lambda_2 \leq \lambda_1, \varphi_1, \varphi_2)$$

$$\approx \alpha \times \cos\left(\frac{2\pi X}{\lambda_1} + \varphi_1\right) + \beta \times \cos\left(\frac{2\pi Y}{\lambda_2} + \varphi_2\right)$$

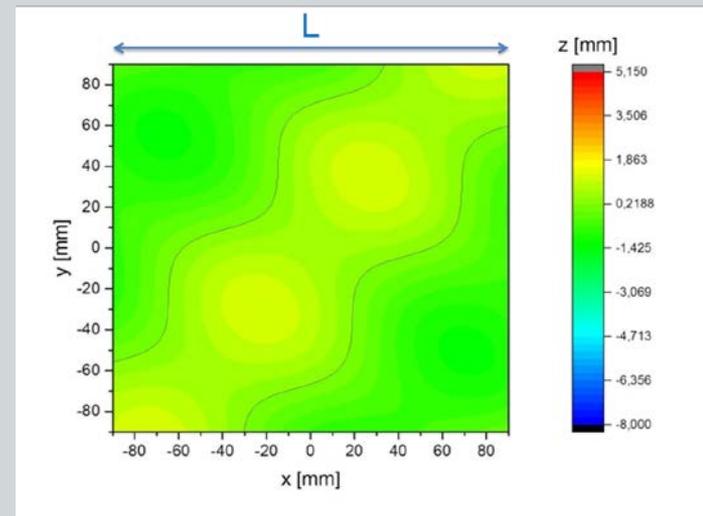


Approche numérique

❖ Représentation approchée de la morphologie



T4 (type A), surface approchée



T5 (type B), surface approchée

Surface	T1	T2	T3	T4	T5	T7
λ_1 (mm)	163	113	120	173	82	192
k (mm)	12	15	13	11	13	12,5

Si $\lambda_1 \approx L \pm 10\%$ et $\theta \approx 0$
 alors, l'interface roche béton présente un comportement à la rupture de **type A**

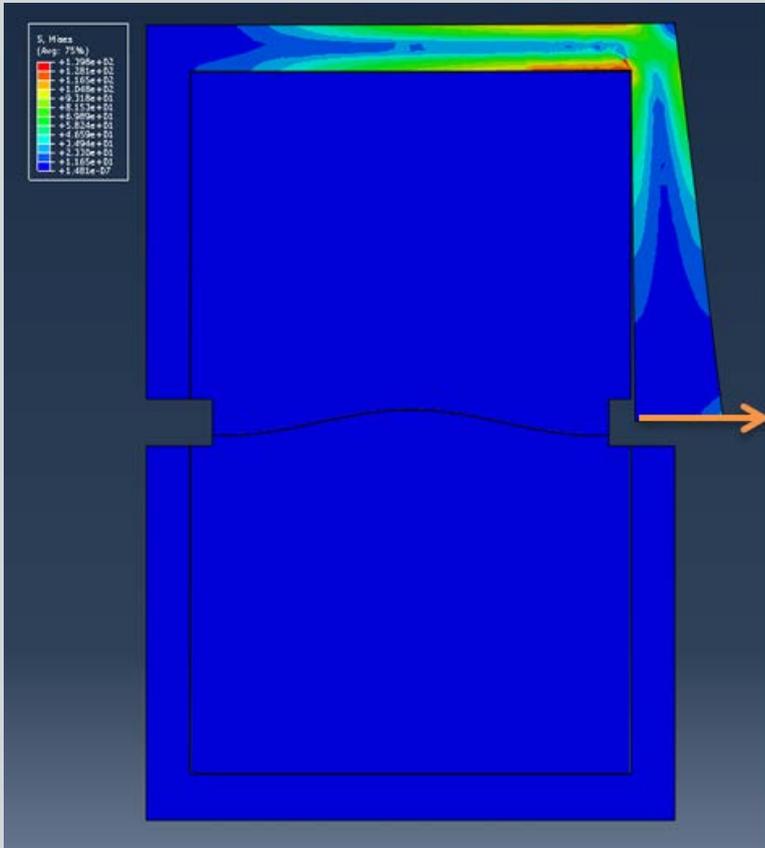
Si $L/2 \leq \lambda_1 \leq 2L/3$ et $\theta \neq 0$
 Alors, l'interface roche béton présente un comportement à la rupture de **type B**

NB: Sous faible contrainte normale ($\sigma_{nn} \leq 0.6\text{MPa}$)

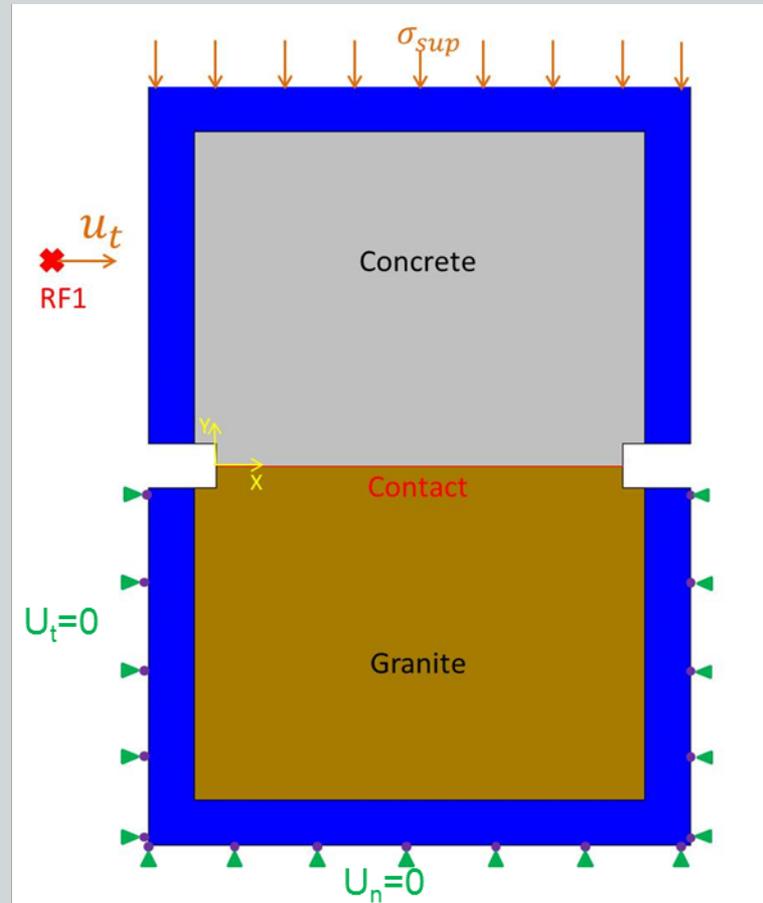


Approche numérique

❖ Modèle et conditions limites



Effort appliqué dans le plan moyen de l'interface par la demi-boîte supérieure

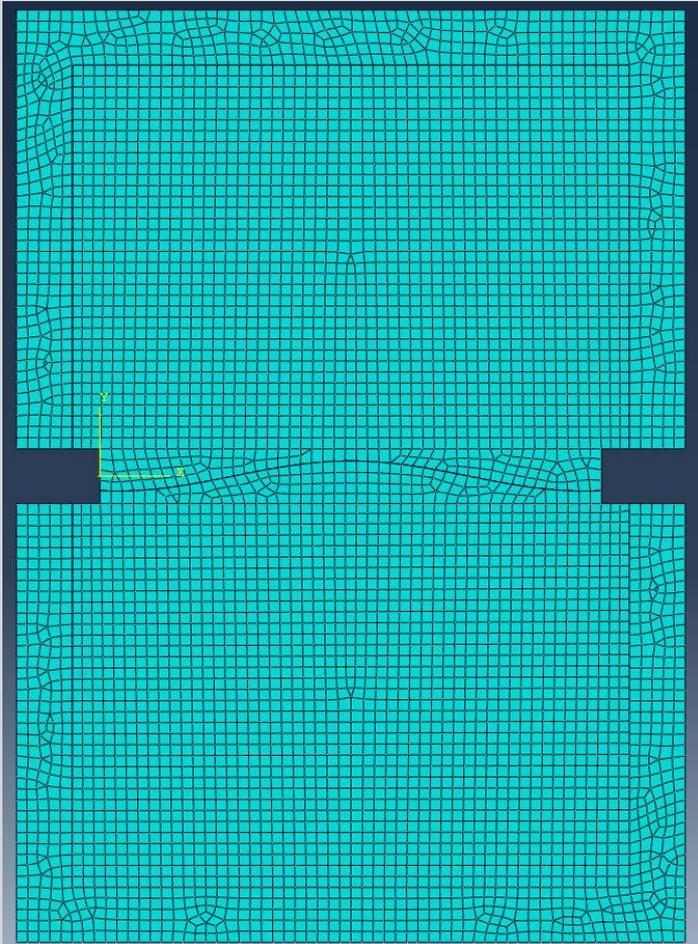


Déplacement horizontal de la paroi amont de la demi-boîte supérieure imposé



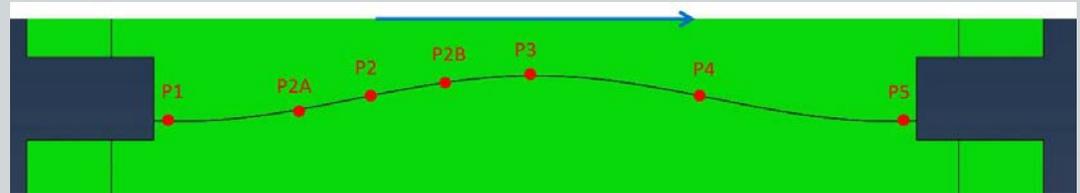
Approche numérique

❖ Géométrie et maillage

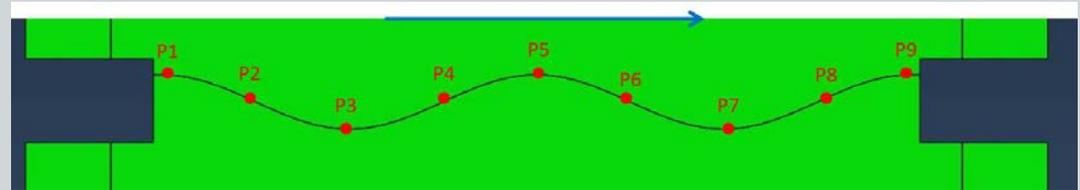


Maillage pour l'éprouvette T4

- Modélisation de la boîte, du béton en partie supérieure et de la roche en partie inférieure
- Deux géométries de contact (T4 et T5) :



Longueur d'onde 180 mm – Profil T4 : 173 mm



Longueur d'onde 90 mm – Profil T5 : 82 mm

Choix, pour les deux profils, de l'amplitude z :

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



Approche numérique

❖ Comportement et propriétés des matériaux

Le comportement du matériau constituant la boîte de cisaillement, en acier, a été représenté par un modèle élastique linéaire, de module d'Young 210 GPa et de coefficient de Poisson 0.29

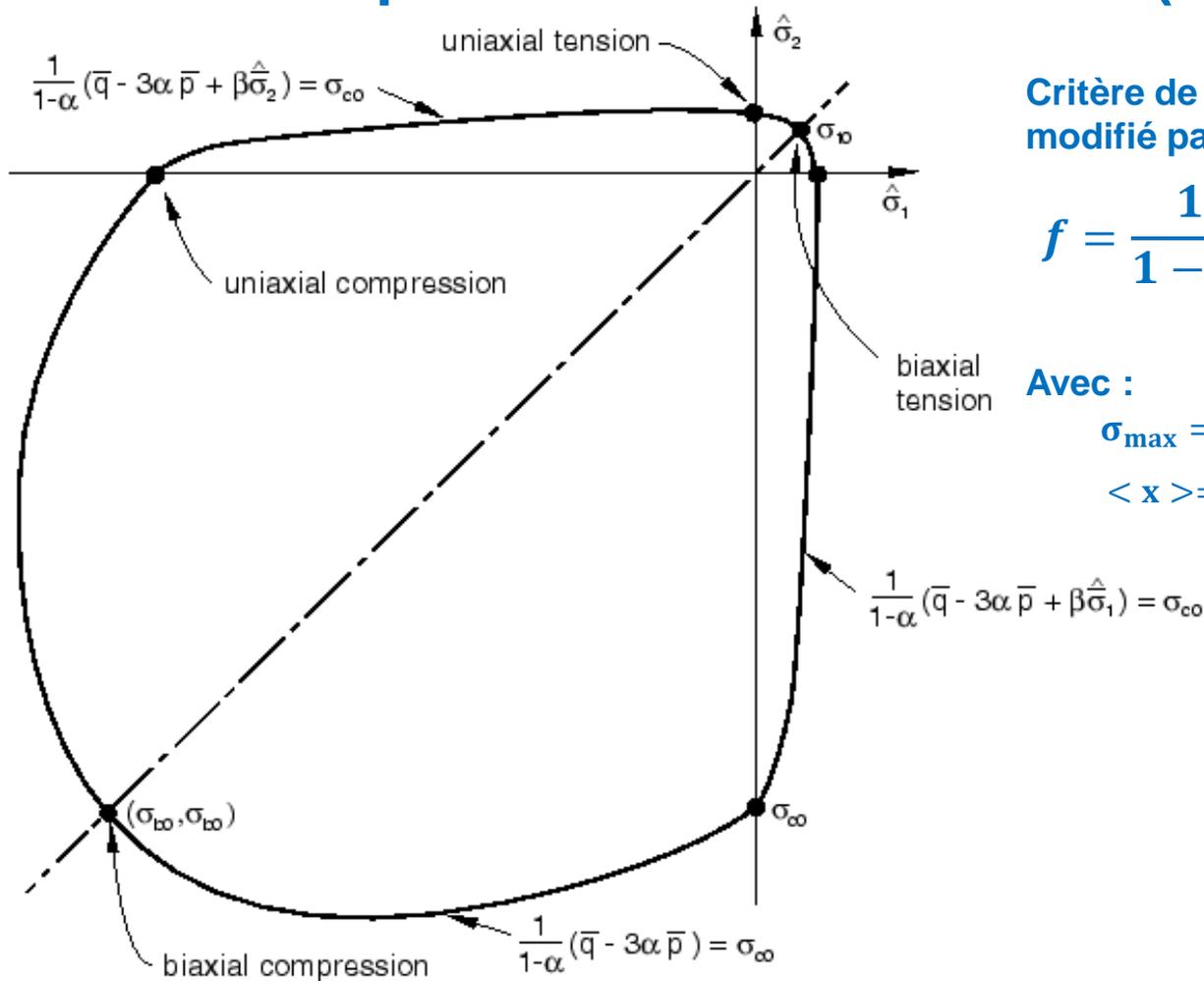
Les comportements de la roche et du béton ont été représentés par un modèle élastoplastique avec endommagement :

- **Ce modèle, appelé « Concrete Damage Plasticity model » (CDP), développé pour le béton par Lubliner et al. (1989) et modifié par Lee and Fenves (1998), est disponible dans Abaqus.**
- **Il est basé sur la représentation de deux mécanismes de rupture: (a) la génération de fissures en traction et (b) la fracturation fragile en compression**
- **Les valeurs des paramètres ont été, pour partie, déduits d'essais de traction et d'essais en compression simple sur la roche et le béton et, pour partie, tirés de la littérature (pour les bétons).**
- **Des essais triaxiaux à différentes pression de confinement ont également été réalisés pour caractériser le comportement de la roche.**



Approche numérique

❖ Surface de plasticité du modèle CDP (Abaqus, 2012)



Critère de plasticité (Lubliner et al. (1989) modifié par Lee and Fenves (1998)) :

$$f = \frac{1}{1-\alpha} (q - 3\alpha \cdot p + \beta(\epsilon^p) \langle \sigma_{max} \rangle - \gamma \langle -\sigma_{max} \rangle) - \sigma_{écr}(\epsilon^p)$$

Avec :

$$\sigma_{max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \text{ convention MMC}$$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{2} (|x| + x)$$

Où :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1}{2 \left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right) - 1}$$

$$\beta = (1 - \alpha) \left(\frac{\sigma_c(\epsilon^p)}{\sigma_t(\epsilon^p)}\right) - (1 + \alpha)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}$$

Représentation du critère en contraintes planes (documentation Abaqus)



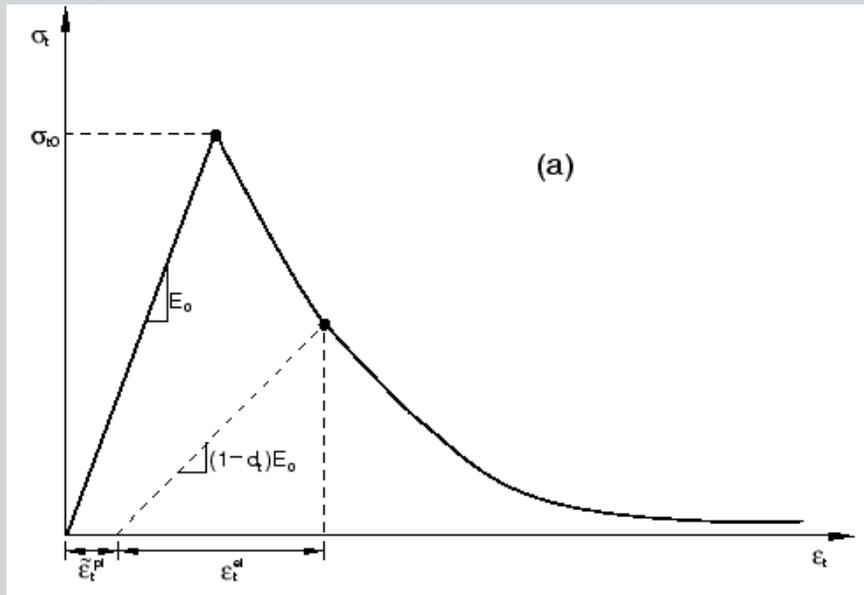
Approche numérique

❖ Endommagement dans le modèle CDP (Abaqus, 2012)

Essai de traction (a)



- Ouverture de fissure transformée en déformation (sur une épaisseur non nulle : **longueur**) et
- Conservation de l'énergie.

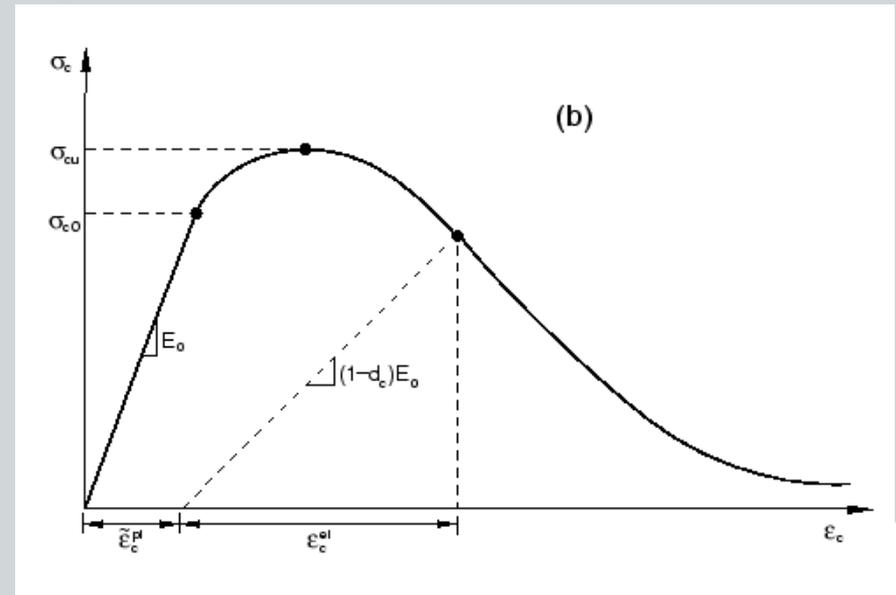


$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\epsilon_t - \epsilon_t^p)$$

Essai de compression (b)



- Fractures locales transformées en déformation en divisant par une **longueur** caractéristique (hauteur de l'éprouvette, ou la longueur bielle, ...) et
- Conservation de l'énergie



$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\epsilon_c - \epsilon_c^p)$$



Approche numérique

❖ Fonction potentielle d'écoulement plastique de CDP

Dans le modèle CDP implémenté sous Abaqus, la fonction potentielle décrivant la direction de l'écoulement plastique est la fonction hyperbolique de Druker-Prager

$$G = \sqrt{(\epsilon \times \sigma_{t0} \times \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi$$

Où :

- ψ est l'angle de dilatance dans le plan p-q, compris entre 0 et l'angle de frottement du matériau
- ϵ est un paramètre, « l'excentricité, » décrivant la dilatance à faible pression.



Approche numérique

❖ Modélisation du contact roche – béton

Les différents matériaux ont été considérés comme des solides distincts : décollement possible, non pénétration, respect de conditions de contact normal et tangentiel.

Représentation du contact roche – béton :

- Phase élastique

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_n \\ \Delta\tau_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n^c & 0 \\ 0 & K_s^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\delta_n \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} = K^c \Delta\delta \quad \text{où } \delta \text{ représente le déplacement relatif entre solides}$$

- Dégradation de la liaison : $\tau = \tau^c + \tau^f$ (contributions respectives cohésion et frottement)

$$K^c = \begin{bmatrix} K_n^c & 0 \\ 0 & (1 - D)K_s^c \end{bmatrix} \quad K^f = \begin{bmatrix} K_n^f & 0 \\ 0 & DK_s^f \end{bmatrix}$$

→ Initiation de l'endommagement si $\max \left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1$

→ Le coefficient d'endommagement (D) augmente linéairement de 0 à 1 pour $\delta_s = 0.1 \text{ mm}$

- Frottement (D = 1) : $\tau = \tau^f = K_s^f \times \Delta\delta_s = \mu \times \sigma_n$

Choix des paramètres :

- Résistance en traction : 1.2 MPa (t_n^0)
- Cohésion : $c = 2.8 \text{ MPa}$ (t_s^0)
- Coefficient de frottement : $\mu = 0.9$ ($\varphi = 42^\circ$)

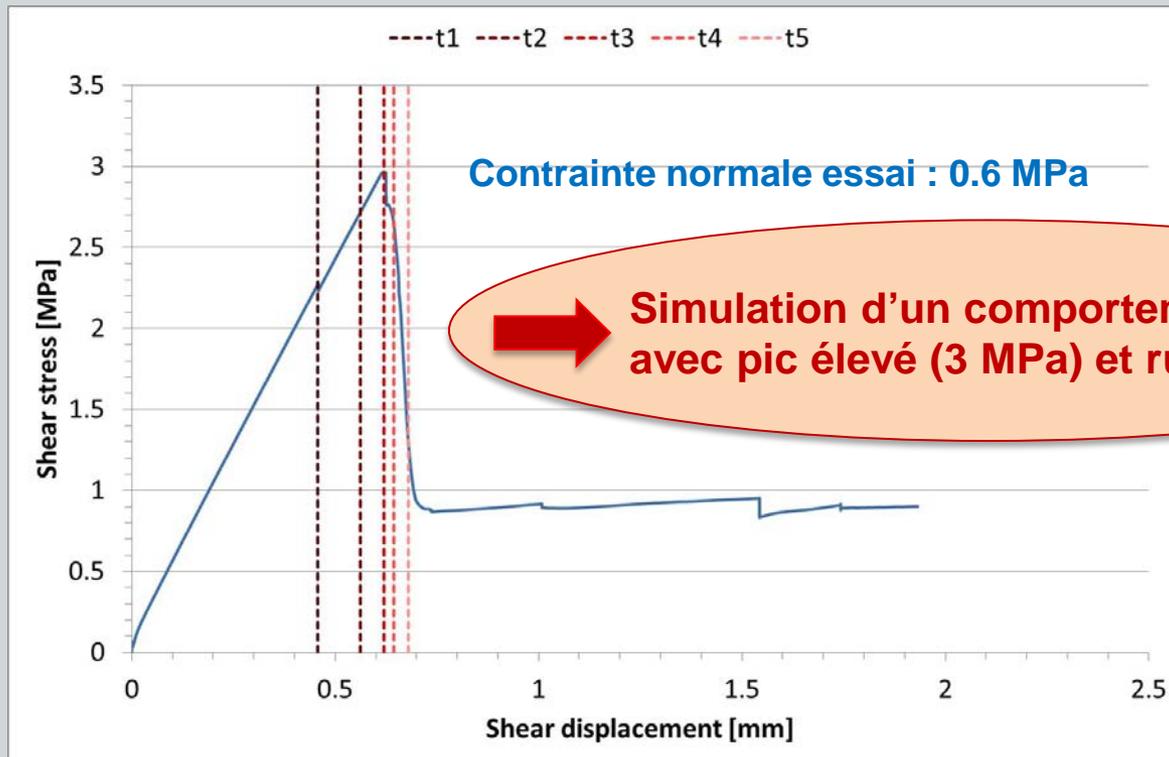
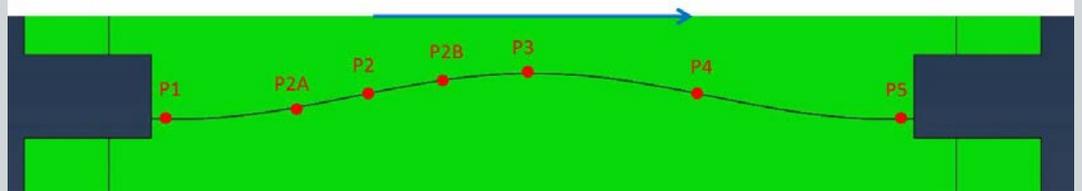
Valeurs obtenues à petite échelle



Approche numérique

❖ Résultats – Longueur d'onde de la dimension de la boîte

Eprouvette similaire à T4



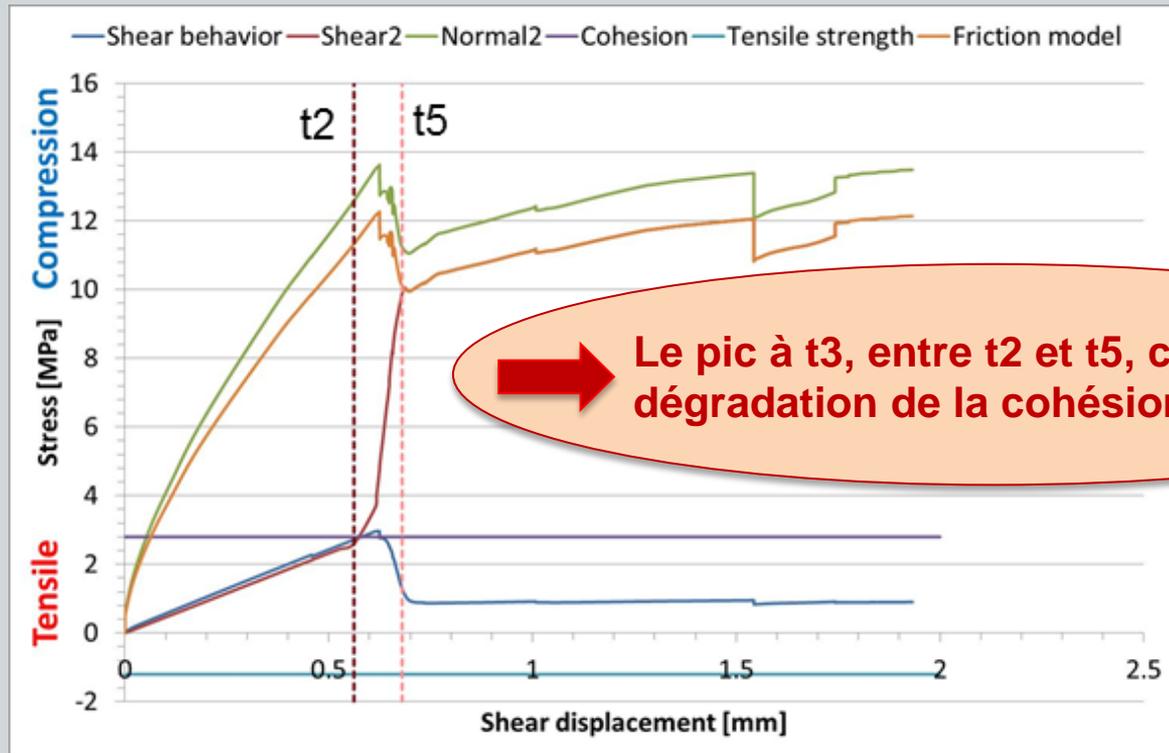
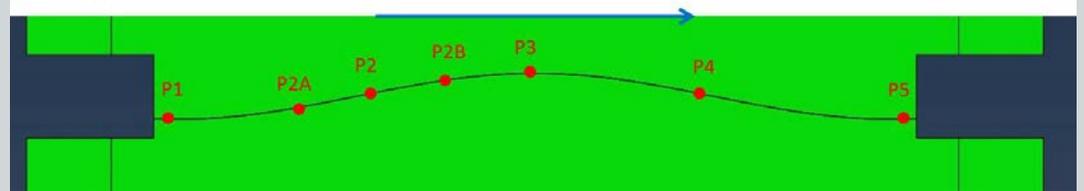
Contrainte de cisaillement moyenne en fonction du déplacement tangentiel relatif entre les demi-boîtes



Approche numérique

❖ Résultats – Longueur d'onde de la dimension de la boîte

Eprouvette similaire à T4, **point P2** (comportement de type A)



➔ Le pic à t3, entre t2 et t5, coïncide avec la dégradation de la cohésion au point P3

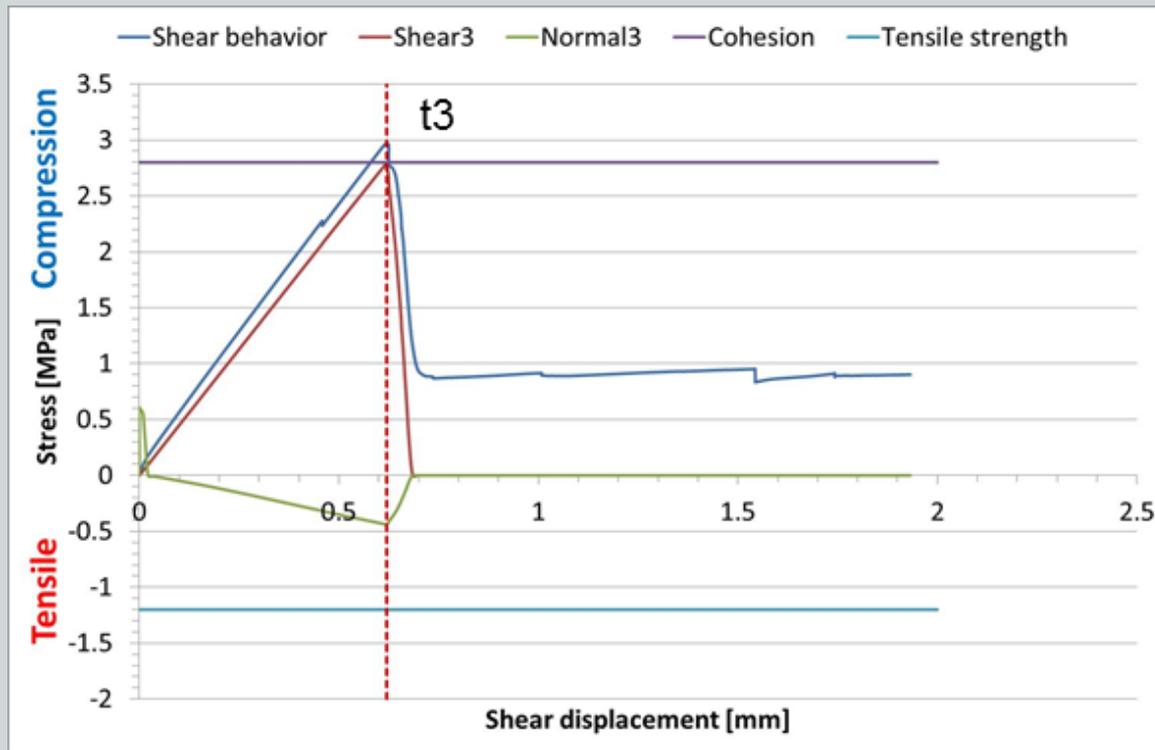
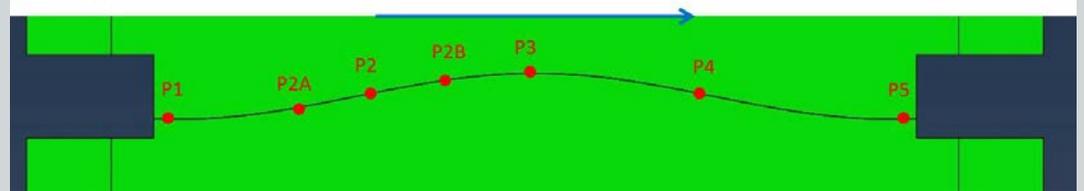
Evolution des contraintes normale et tangentielle à l'interface au point P2 – Interface montante dans la direction du déplacement



Approche numérique

❖ Résultats – Longueur d'onde de la dimension de la boîte

Eprouvette similaire à T4, **point P3**
(comportement de type A)



Evolution des contraintes normale et tangentielle à l'interface
au point P3 – Au sommet du profil



Approche numérique

❖ Résultats – Longueur d'onde de la dimension de la boîte

Eprouvette similaire à T4, comportement de type A

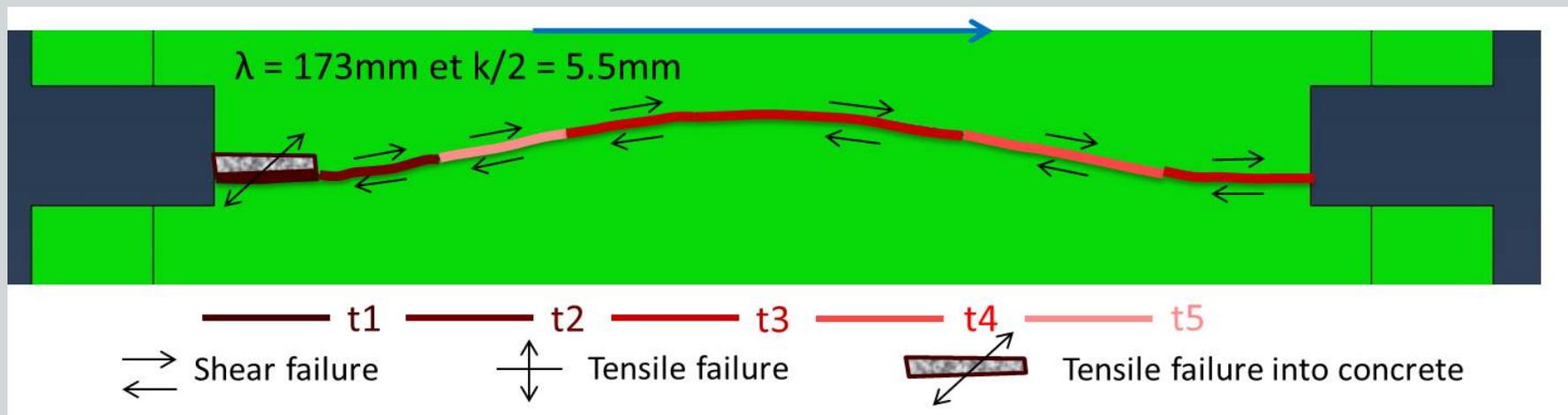


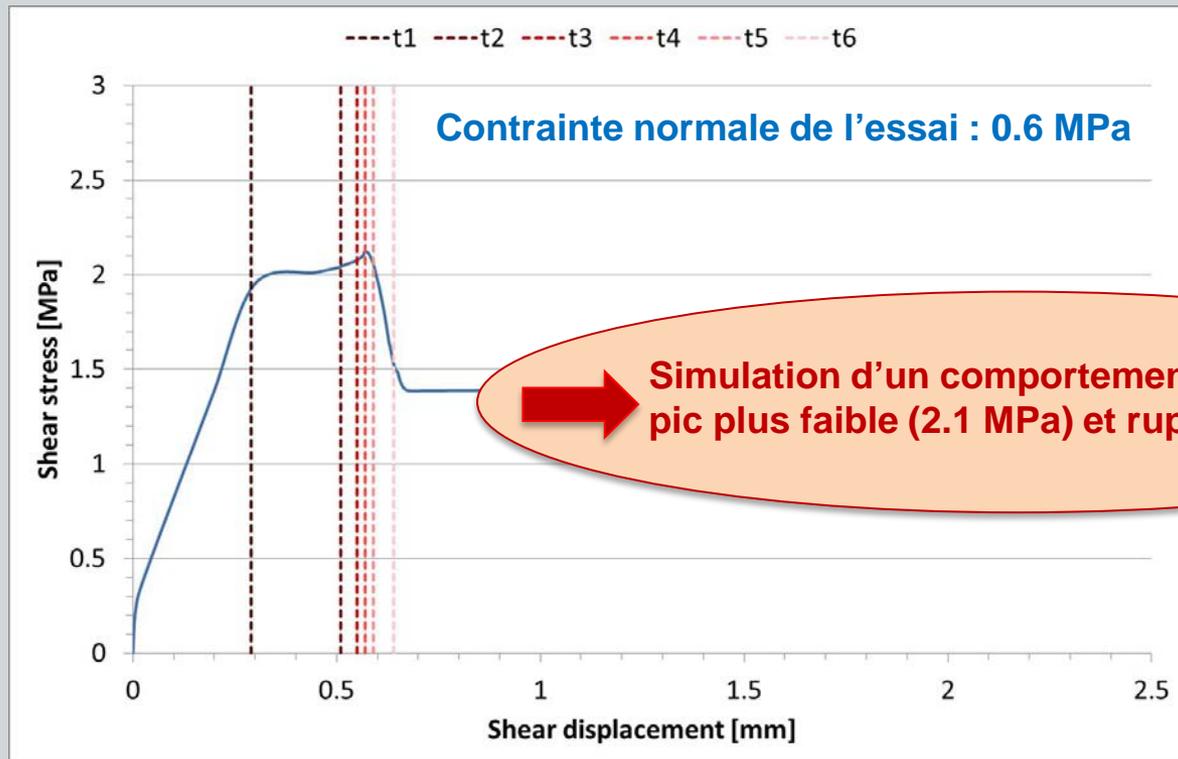
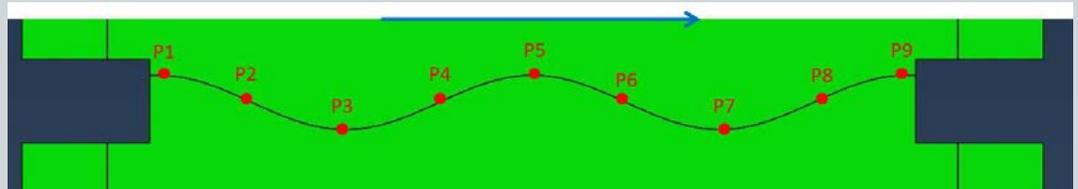
Schéma récapitulatif de la rupture progressive le long de l'interface



Approche numérique

❖ Résultats – Interface de deux fois la longueur d’onde

Eprouvette similaire à T5



➔ Simulation d'un comportement de type B, avec pic plus faible (2.1 MPa) et rupture progressive

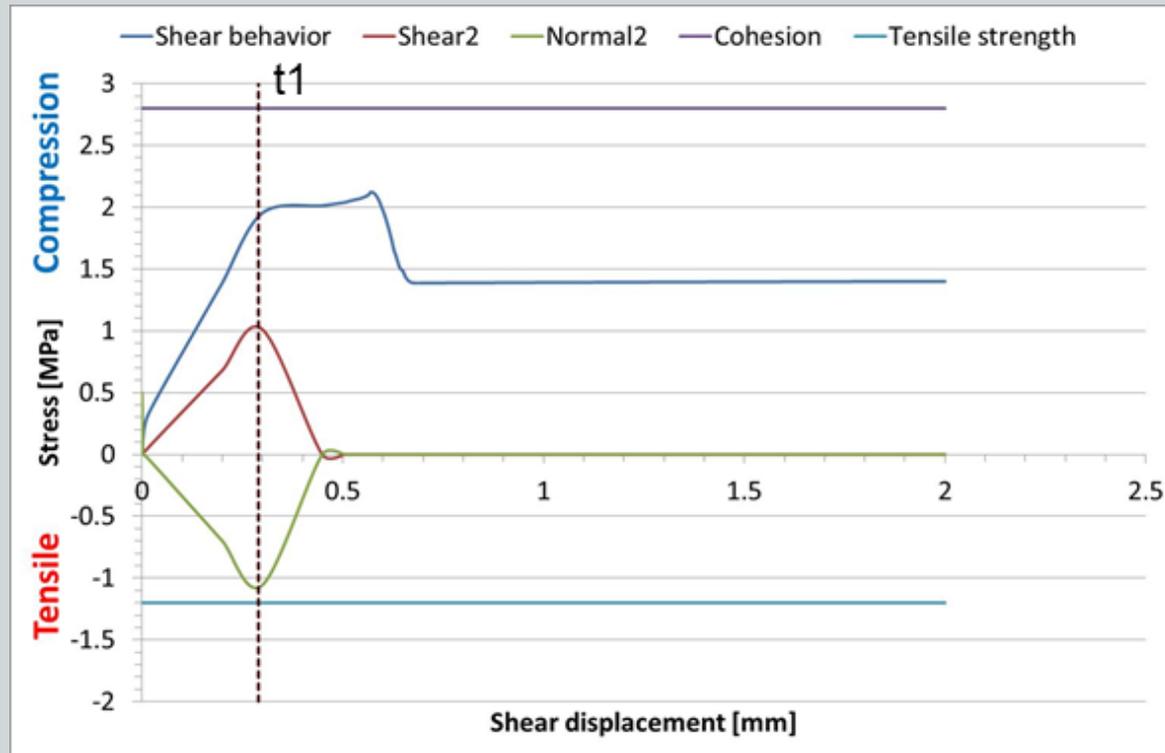
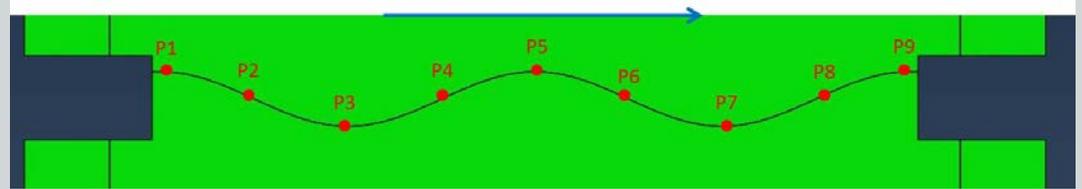
Contrainte de cisaillement moyenne en fonction du déplacement tangentiel relatif entre les demi-boîtes



Approche numérique

❖ Résultats – Interface de deux fois la longueur d’onde

Eprouvette similaire à T5, point P2
(comportement de type B)



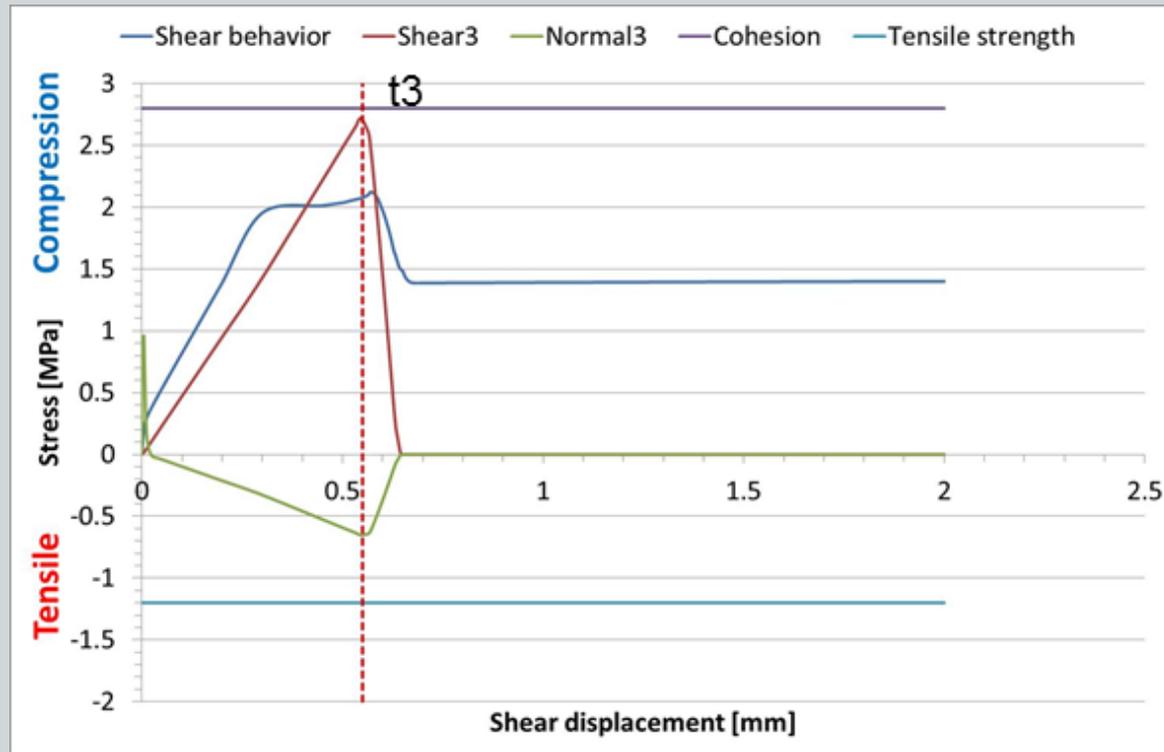
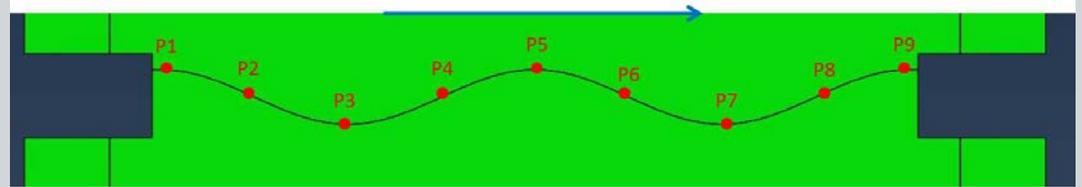
Evolution des contraintes normale et tangentielle à l’interface au point P2 (ou P6) – Interface descendante dans la direction du déplacement



Approche numérique

❖ Résultats – Interface de deux fois la longueur d’onde

Eprouvette similaire à T5, **point P3**
(comportement de type B)



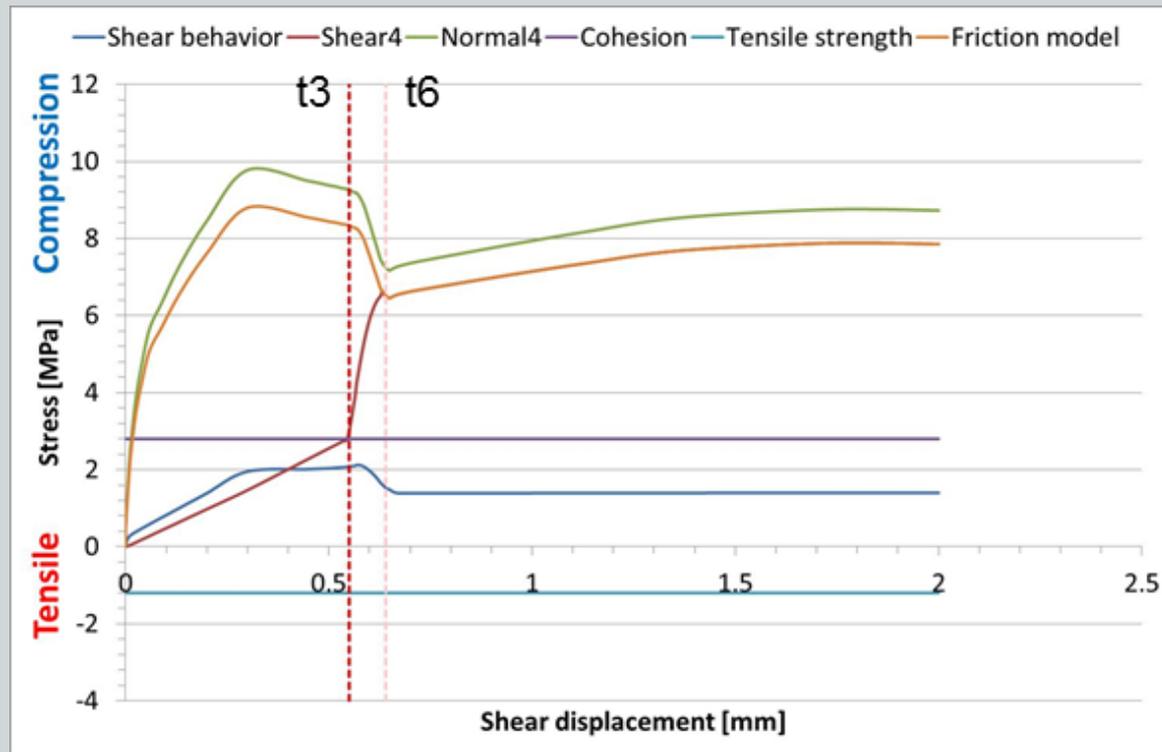
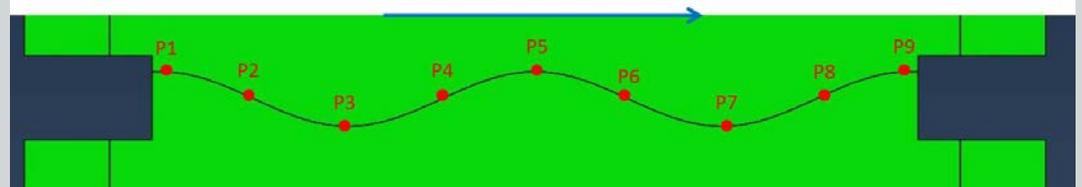
Evolution des contraintes normale et tangentielle à l’interface
au point P3 (ou P5 ou P7) – Aux sommets ou creux de l’interface



Approche numérique

❖ Résultats – Interface de deux fois la longueur d’onde

Eprouvette similaire à T5, point P4
(comportement de type B)



Evolution des contraintes normale et tangentielle à l’interface
au point P4 (ou P8) – Interface montante dans la direction du déplacement



Approche numérique

❖ Résultats – Longueur d'onde de la dimension de la boîte

Eprouvette similaire à T5, comportement de type B

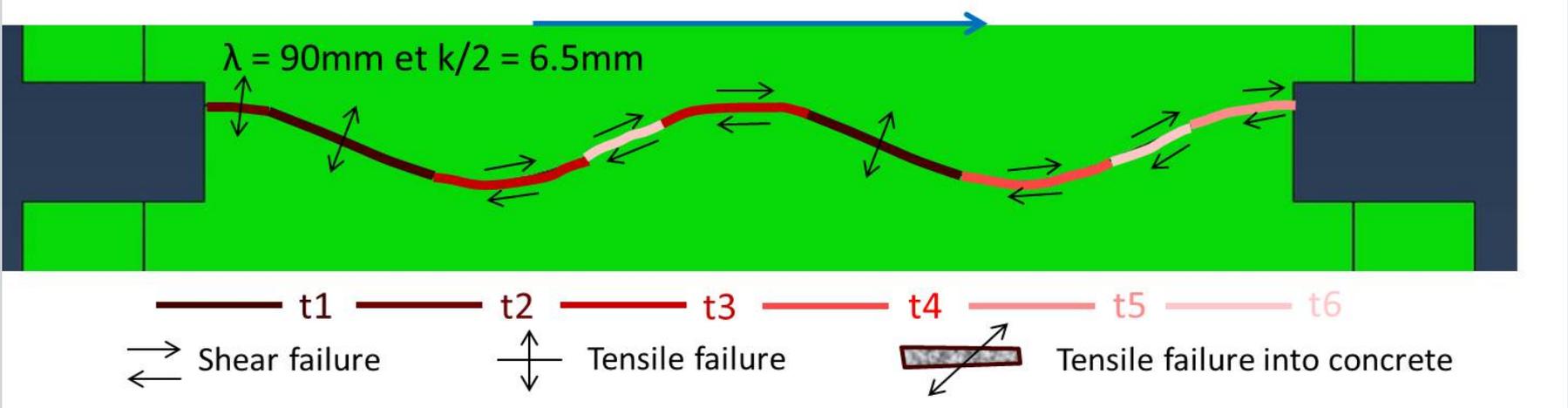


Schéma récapitulatif de la rupture progressive le long de l'interface



Approche numérique

❖ Observations tirées de la modélisation numérique

Pour une amplitude donnée des irrégularités géométriques hors plan moyen majeures,

- La résistance au cisaillement de pic de l'interface roche – béton **globale** diminue avec la longueur d'onde principale (et le comportement à la rupture est moins fragile).
- Le long de l'interface, des contraintes normales de compression élevées apparaissent dans les zones où, dans la direction du cisaillement, l'interface monte par rapport au plan de cisaillement.
- Il existe une longueur d'onde principale critique(*) au-delà de laquelle la cohésion apparente résulte du collage et de l'imbrication. La rupture de l'interface s'initie en cisaillement dans les zones de plus faible contrainte normale, mais en compression.
- En-deçà de cette longueur d'onde critique, la rupture de l'interface s'initie par décollement, dans les zones descendantes par rapport à la direction de cisaillement, où la contrainte normale est en traction.

(*) Cette longueur d'onde critique dépend:

- de la résistance en traction,
- de la déformabilité des matériaux et
- du niveau de contrainte normale appliquée



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 :

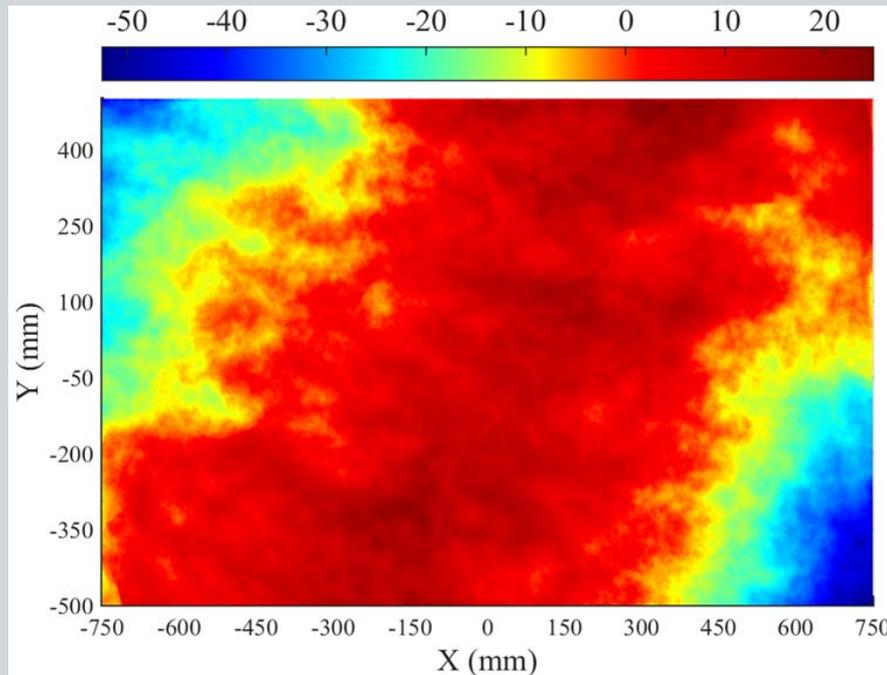
- La surface d'ensemble ne présente pas d'irrégularité marquée de longueur d'onde supérieure à celle observée sur les éprouvettes testées et
- Le plan de cisaillement à l'échelle de l'ouvrage coïncide avec celui testé sur les éprouvettes.



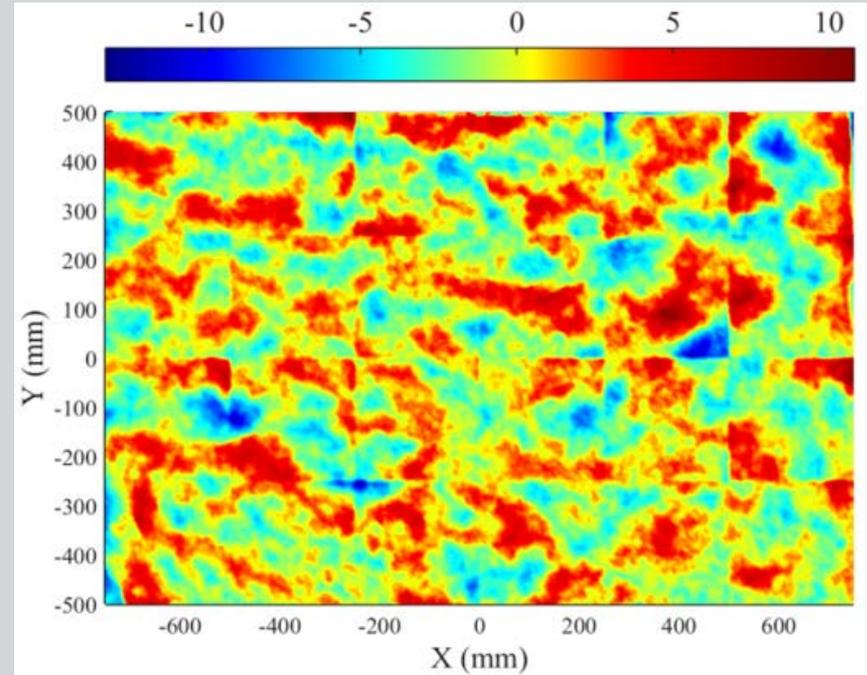
Approche numérique

❖ 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 Ω 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/λ_{\max})

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

Surface	σ_n (MPa)	τ_p experimental (MPa)	Ω (-)	τ_{pA} (MPa)	τ_{pB} (MPa)	τ_p analytique (MPa)	Variation (%)
I2	0.6	1.8	0.25	3.40	1.64	2.08	14.43
I7	0.6	2.2	0.29	3.40	1.64	2.15	2.30
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) Les résultats d'essais de cisaillement direct sur carottes sont à utiliser avec précaution en raison :**
 - a. De la difficulté à placer le plan moyen de l'interface dans le plan de cisaillement de la machine et
 - b. De la zone de distorsion non négligeable (rapport de la hauteur de la zone libre de mortier de scellement sur le diamètre de la carotte)
- (2) Il existe un effet d'échelle, lié à la morphologie de la surface rocheuse, sur la résistance au cisaillement de pic des interfaces roche – béton.**
- (3) Les caractéristiques de l'enveloppe apparente de pic dépendent :**
 - a. De la morphologie ($\max\{k/\lambda_{\max}\}$ à différentes échelles ?),
 - b. Des rigidités des matériaux et
 - c. De la plage de contraintes normales (rupture des matériaux).



Conclusion

❖ Principaux enseignements pratiques (suite)

- (4) Le collage entre la roche et le béton contribue de manière significative à la résistance au cisaillement.**
- (5) La résistance en traction de l'interface, peu dépendant de l'échelle, peut-être utilisée comme minorant de la cohésion.**
- (6) L'angle de frottement résiduel est peu dépendant le l'échelle des essais. C'est une valeur sécuritaire de l'angle de frottement de l'interface.**



Conclusion

❖ Perspectives

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

Merci pour votre attention !

