

Opération de Recherche CADOROC  
Caractérisation et dimensionnement des ouvrages au rocher

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

---

## Comportement axial des ancrages au rocher

---

Marion Bost - Ifsttar

Crédits :

Doctorat de Duc AN HO (2017)

Ifsttar, SNCF, GTS



Cerema



IFSTTAR

Etude numérique de l'interface barre-scellement

Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

Conclusions et perspectives

## Contexte

- Utilisation des ancrages :
  - Dispositif actif de protection contre les chutes de blocs
  - Arrimage des dispositifs de protection actifs et passifs contre les chutes de blocs
- Coût important pour les gestionnaires d'infrastructures sujettes à l'aléa rocheux
- Enjeu = optimisation du dimensionnement de ce type d'ouvrage



Contexte et problématique

Etude numérique de l'interface barre-scellement

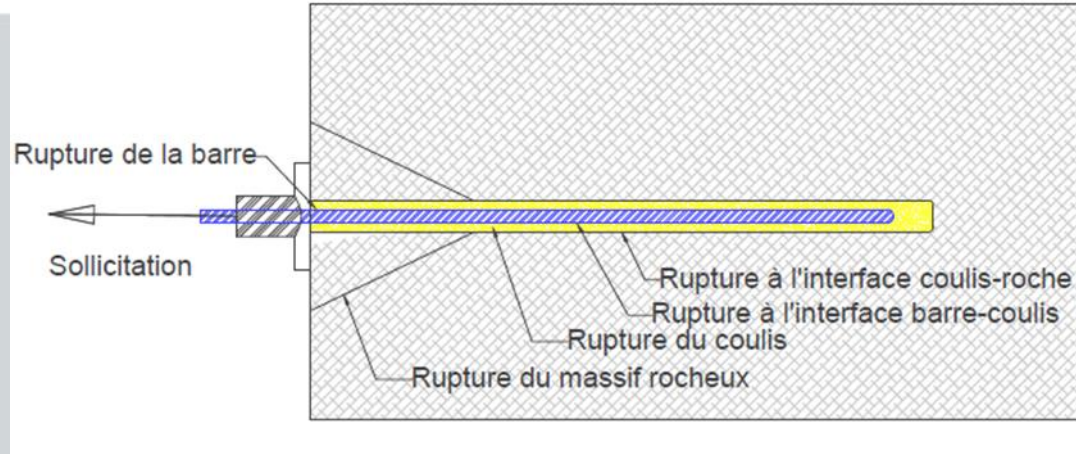
Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

Conclusions et perspectives

Problématique

- Plusieurs modes de rupture possibles



- Dimensionnement d'un ancrage sollicité axialement

Méthode multicritère avec mécanismes de rupture considérés indépendamment

$$L_{scellement} \geq L_{min}$$

$$\left\{ T_{ancrage} = \min \left( \frac{T_{barre\ d'acier}}{\gamma_{barre\ d'acier}}; \frac{T_{b-g}}{\gamma_{b-g}}; \frac{T_{g-r}}{\gamma_{g-r}}; \frac{T_{essai}}{\gamma_{essai}} \right) \right.$$

$$\left. L_{scellement} \geq L_{min} \right.$$

Avec  $T_{b-g} = \pi d_b \tau_{b-g} L_{scellement}$ ;  $T_{g-r} = \pi d_g \tau_{g-r} L_{scellement}$

Méthode	$\tau_{b-g}$	$\tau_{g-r}$ (ou $q_s$ )	$L_{min}$	Essai
Méthode britannique (BS 8081 : 1989)	2,0 MPa	Min (10% $R_{roche}$ ; 4,0 MPa)	$L_{min} \geq 3,0m$ si $F \geq 200\ kN$ $L_{min} \geq 2,0m$ si $F \leq 200\ kN$	Oui
Méthode suisse (Directive Suisse 2007)		1,0 – 2,0 MPa (valeur empirique)	$L_{min} \geq 1,5m$	Oui
Méthode française (Cemagref 2004)		Mesuré par essai (en général 1,0 – 1,5 MPa)	$L_{min} \geq (40 - 50)d_b$ + (0,25 – 0,5m) sur profondeur + 0,5m en partie superficielle	Oui



Dimensionnement sécuritaire

Nécessité de mieux comprendre la mobilisation des mécanismes de rupture



## Contexte et problématique

Etude numérique de l'interface barre-scellement

Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

Conclusions et perspectives

## Objectif et programme d'étude

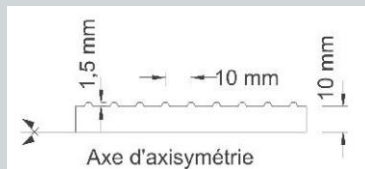
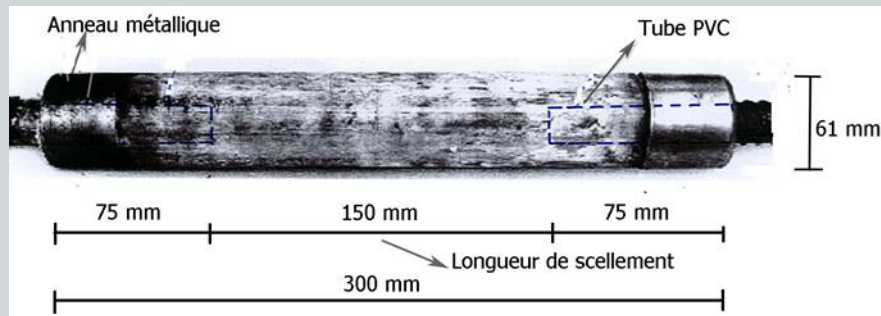
- Pour pouvoir modéliser un ancrage sollicité axialement, établir un modèle du comportement de l'interface barre-scellement, les comportements de la barre, du scellement et de la roche étant connus par ailleurs.
- Observer la mobilisation des contraintes et les mécanismes de rupture lors d'un essai d'arrachement d'un ancrage passif scellé au rocher à l'aide d'un modèle numérique reproduisant un essai réel.
- Réaliser une campagne d'essais d'arrachement d'ancrages scellés au rocher pour :
  - Valider le modèle numérique établi
  - Etudier l'influence de paramètres de conception (diamètres de la barre et du forage, type de coulis de ciment, longueur de scellement, accessoires de mise en œuvre) sur la résistance de l'ancrage.



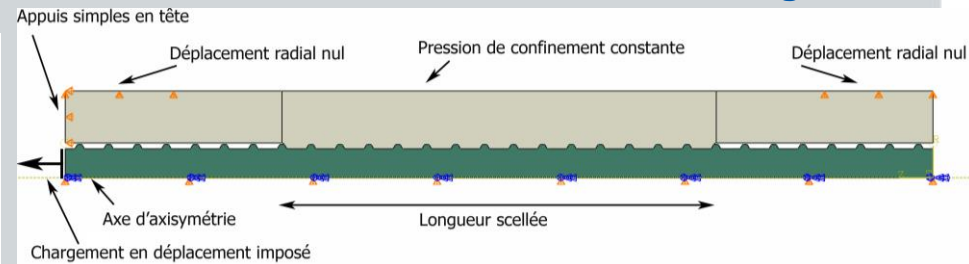


# Reproduction d'un essai d'arrachement sur barre courte et bloquée en tête de scellement avec géométrie réelle

## Eprouvette d'essai de Moosavi et al. (2005)

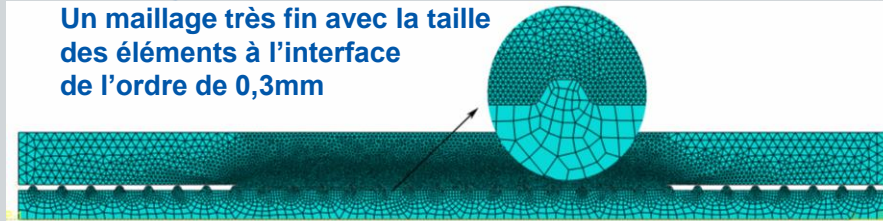


## Géométrie, conditions aux limites et chargement



## Maillage

Un maillage très fin avec la taille des éléments à l'interface des éléments de l'ordre de 0,3mm



## Intérêts

Observation des états de contrainte et de déplacement et des mécanismes de rupture à l'interface barre-scellement  
Considérée uniformément

## Difficultés de mise en œuvre

Problème de convergence numérique du fait de :

- Complexité de la géométrie du contact barre-scellement
- Plastification du scellement
- Grandes déformations

Nécessité de modèle de comportement avancé pour le scellement

- Mécanismes de rupture en traction, en compression et en cisaillement
- Localisation des déformations -> Effets d'échelle



Schéma d'intégration explicite



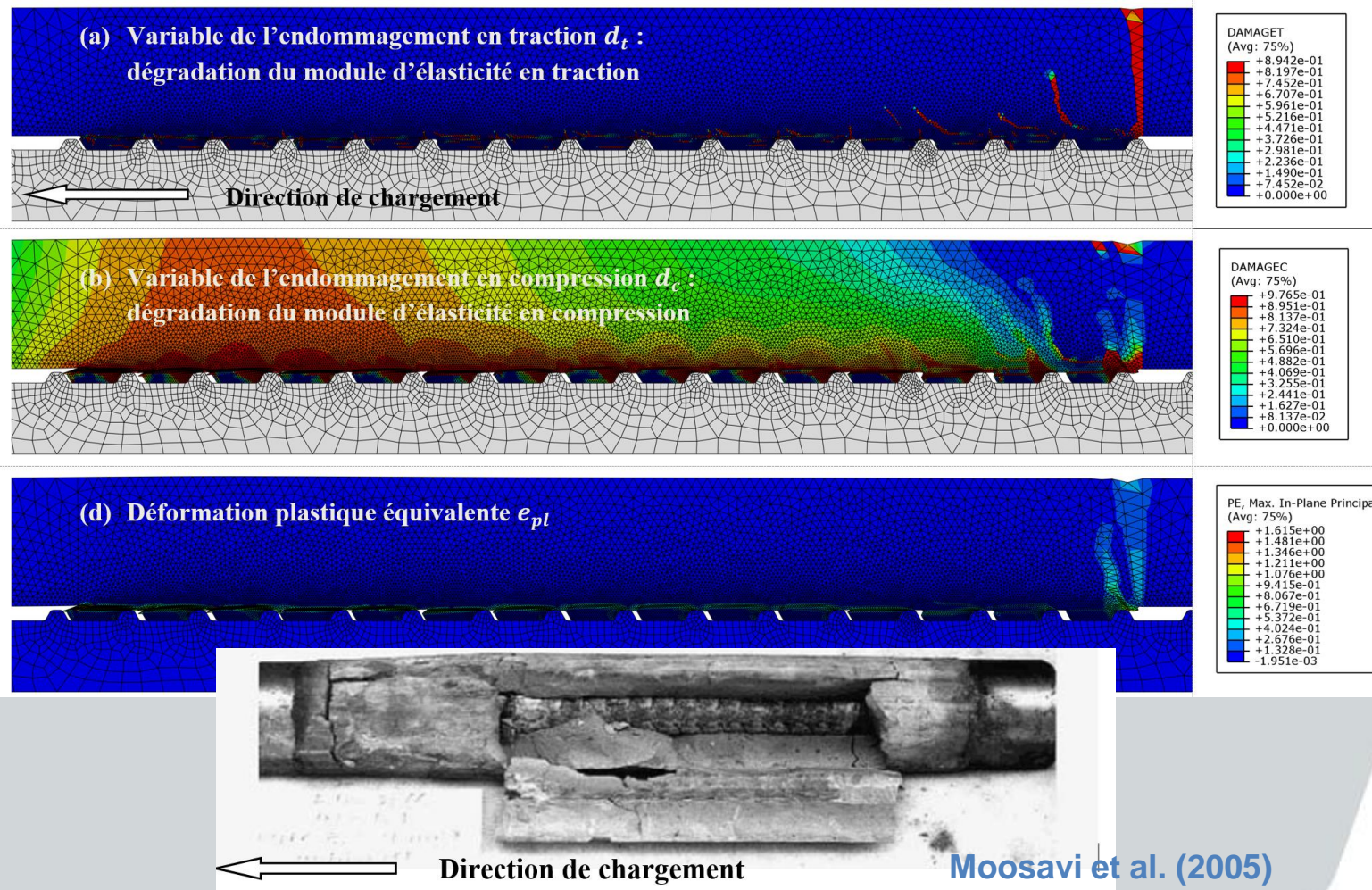
Modèle CDP



Contexte et problématique  
 Etude numérique de l'interface barre-scellement  
 Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ  
 Etude expérimentale du comportement de l'ancrage  
 Conclusions et perspectives

# Reproduction d'un essai d'arrachement sur barre courte et bloquée en tête de scellement avec géométrie réelle – résultats

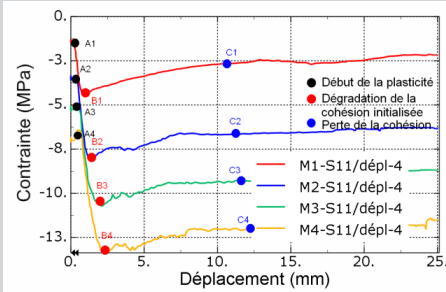
## Comportement et rupture à l'interface barre-scellement au pic de l'effort axial



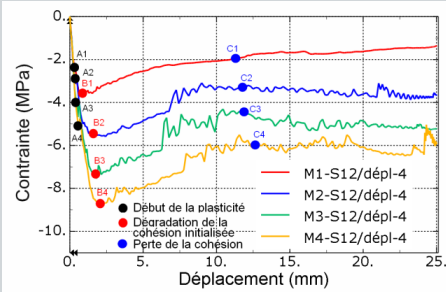


# Etat des contraintes le long de l'interface barre-scellement à 2 hauteurs de verrous pour 4 pressions de confinement imposées

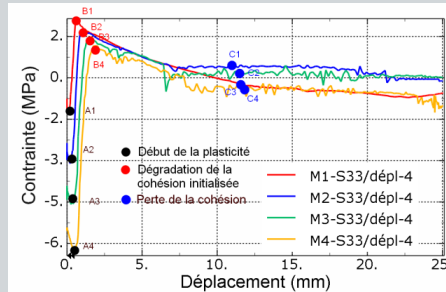
Contrainte normale S11



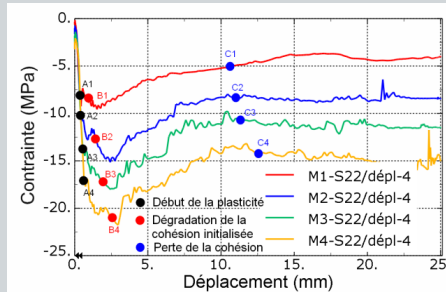
Contrainte tangentielle S12



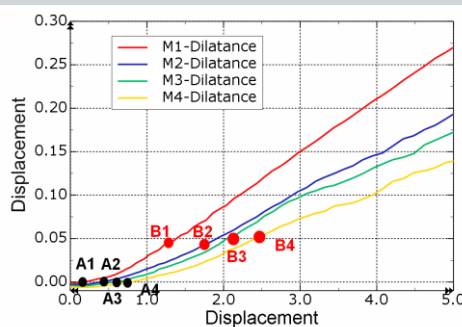
Contrainte orthoradiale S33



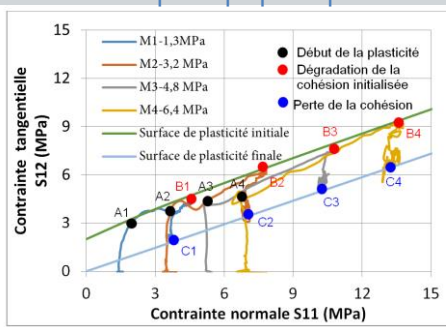
Contrainte axiale S22



Dilatance



Relation  $|S11| - |S12|$



## 4 phases de comportement :

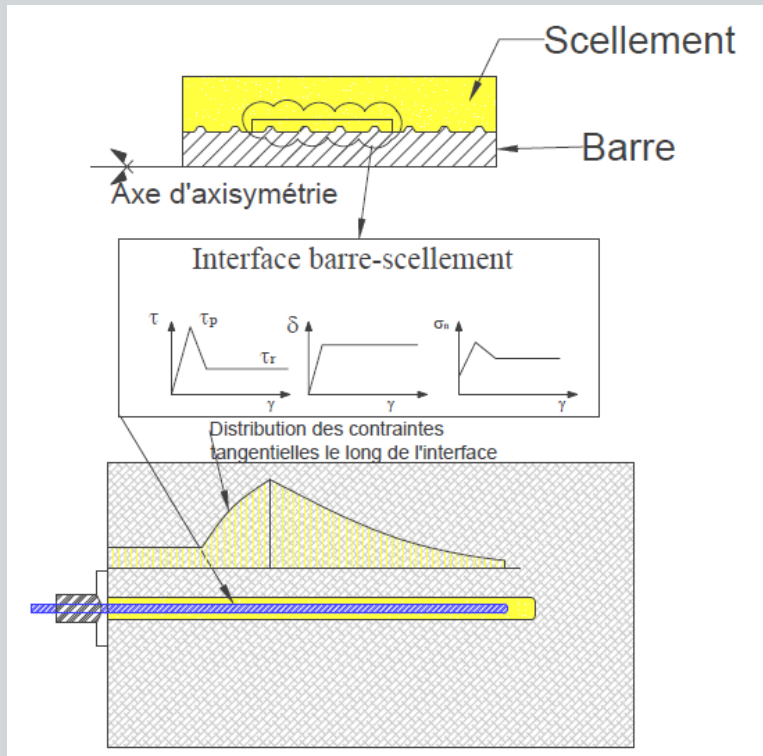
- **de 0 aux points Ai** : sous un faible déplacement, la dilatance est nulle et la contrainte normale est égale à une valeur initiale imposée par la pression de confinement → **élasticité**
- **entre points Ai et Bi** : suite au déplacement de la barre, la dilatance à l'interface fait décroître la contrainte normale S11 jusqu'à une certaine valeur. La contrainte tangentielle à l'interface diminue proportionnellement à celle-ci → **plasticité avec dilatance**
- **entre points Bi et Ci** : au-delà du pic, la contrainte tangentielle commence à augmenter progressivement et se stabilise pour des valeurs proportionnelles aux contraintes de confinement imposées → **endommagement de l'interface**
- **après points Ci** : contrainte tangentielle constante et proportionnelle à la contrainte normale → **comportement résiduel purement frottant**



comportement cohésif  
endommageable avec frottement



## Développement d'un modèle d'interface équivalent - principe



### (1) Reconstituer un modèle de comportement de l'interface reproduisant les modélisations numériques avec verrous.

Ce modèle doit répondre aux critères suivants :

- quatre phases de comportement de l'interface : élasticité + plasticité avec dilatance + endommagement + résiduel  
→ Modèle cohésif endommageable avec frottement
- comportement radial : plafonnement de la dilatance de l'interface barre-scellement

### (2) Implémenter ce nouveau modèle dans ABAQUS par le développement de la subroutine UINTER (VUINTER)





# Développement d'un modèle d'interface équivalent - description

- Comportement élastique (calage sur la pente initiale)

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{mm} & D_{nt} \\ D_{tm} & D_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = [D] \cdot \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

- Surface de plasticité (calage sur les surfaces de plasticité observées)

$$f(\sigma, \tau, k) = \sqrt{r^2 \times c(\sigma, \tau, k)^2 + \tau^2} - \sigma \tan(\phi(k)) - c(k)$$

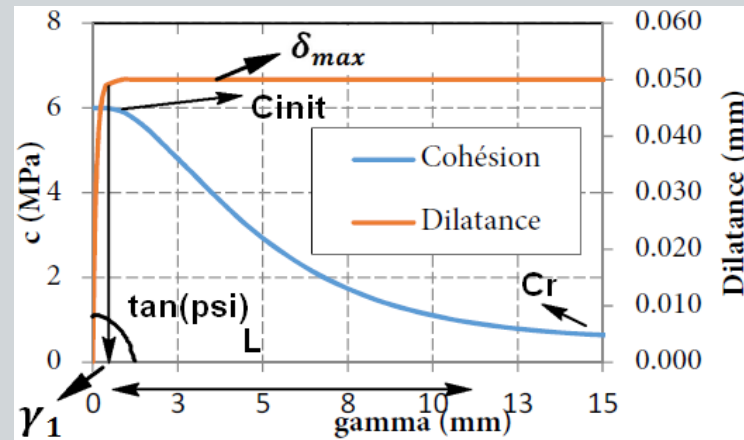
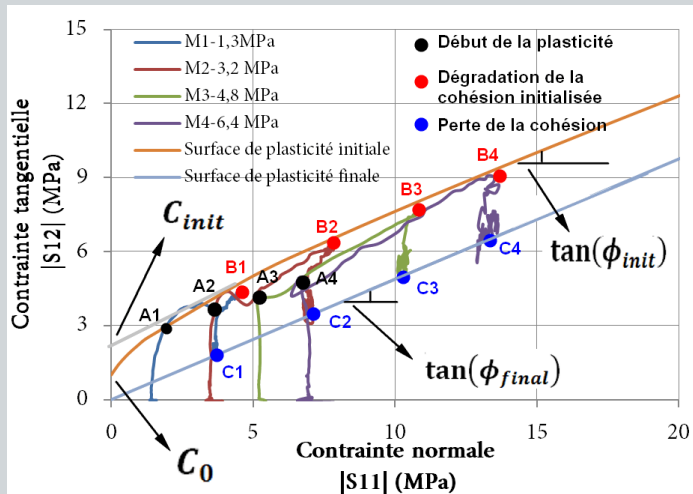
$$r = \sqrt{1 - \left(\frac{C_0}{C_{init}}\right)^2} \quad c(k) = c(\gamma) = \begin{cases} C_{init} & \text{si } \gamma \leq \gamma_1 \\ (C_{init} - c_r) \times \left(2e^{-\alpha \frac{\gamma - \gamma_1}{L}} - e^{-2\alpha \frac{\gamma - \gamma_1}{L}}\right) + c_r & \text{si } \gamma > \gamma_1 \end{cases}$$

$$\tan(\phi(k)) = \begin{cases} \tan(\phi_{init}) & \text{si } \gamma \leq \gamma_1 \\ (\tan(\phi_{init}) - \tan(\phi_{final})) \times \left(2e^{-\alpha \frac{\gamma - \gamma_1}{L}} - e^{-2\alpha \frac{\gamma - \gamma_1}{L}}\right) + \tan(\phi_{final}) & \text{si } \gamma > \gamma_1 \end{cases}$$

- Potentiel plastique (fonction hyperbolique modifiée pour plafonner la dilatance)

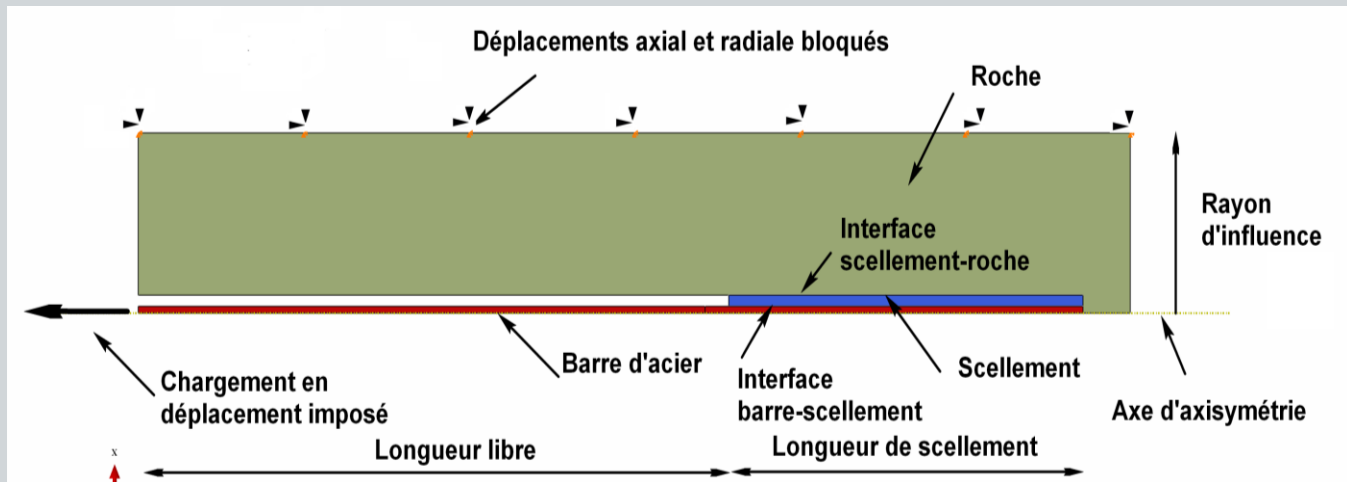
$$g(\sigma, \tau, k) = g(\sigma, \tau, \gamma) = \sqrt{(\vartheta c_t)^2 + \tau^2} - \sigma \tan(\psi) \times e^{-\frac{\beta \gamma}{L}}$$

$$\beta = \frac{L}{\delta_{max}} \tan \psi \quad \text{et} \quad \gamma_1 = \frac{4L}{\beta} = 4\delta_{max}$$

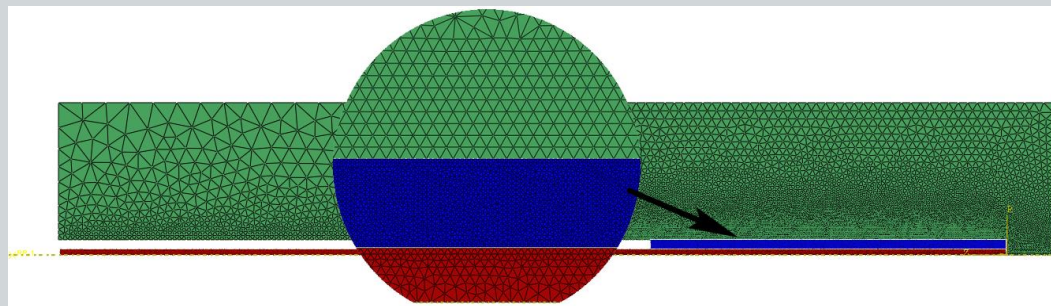


• Géométrie & conditions limites :

- Modèle axisymétrique avec modèle d'interface équivalent et conditions d'essai
- Chargement par déplacement imposé en tête de l'ancrage



• Maillage



Contexte et problématique

Etude numérique de l'interface barre-scellement

Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

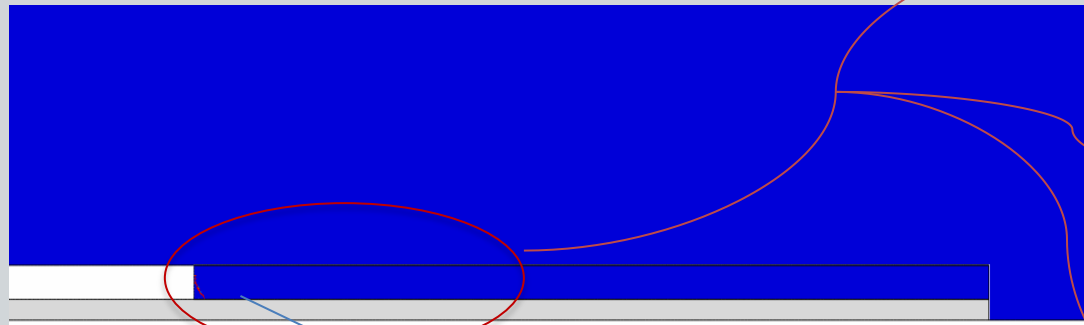
Conclusions et perspectives

Modélisation numérique  
d'un essai d'arrachement $\varnothing_b=25\text{mm}$ ,  $\varnothing_{\text{forage}}=64\text{mm}$ ,

coulis 52,5MPa,

longueur scellée = 750mm - résultats

Mécanisme de rupture = fissuration radiale au-delà de  
l'interface barre-scellement  
car le scellement n'est pas bloqué en tête



F = 30 kN

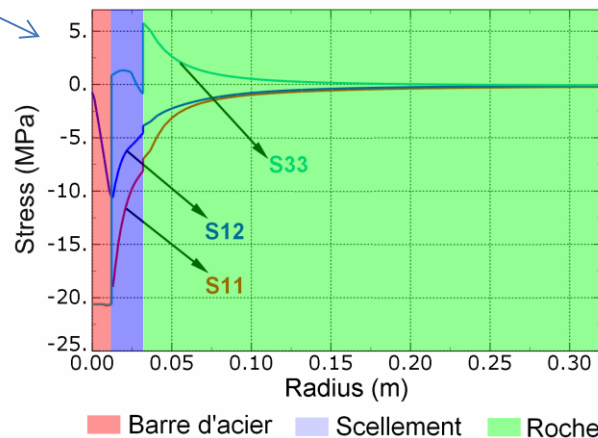
F = 90 kN

F = 245 kN

Profil radial des contraintes  
à la limite élastique  
de la barre d'acier

Contrainte tangentielle à l'interface  
scellement-roche  $3,5\text{MPa} <$   
 $\tau_{g-r}^{max} = c_{r-g} + \sigma \tan \phi_{r-g} = 7,0\text{MPa}$

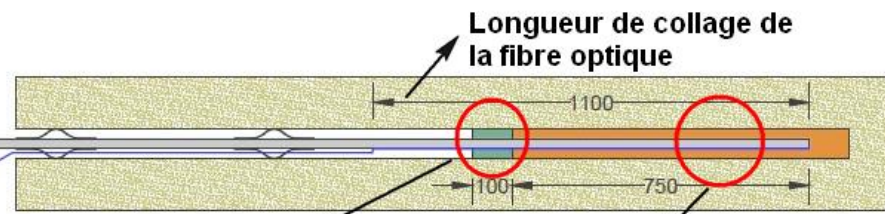
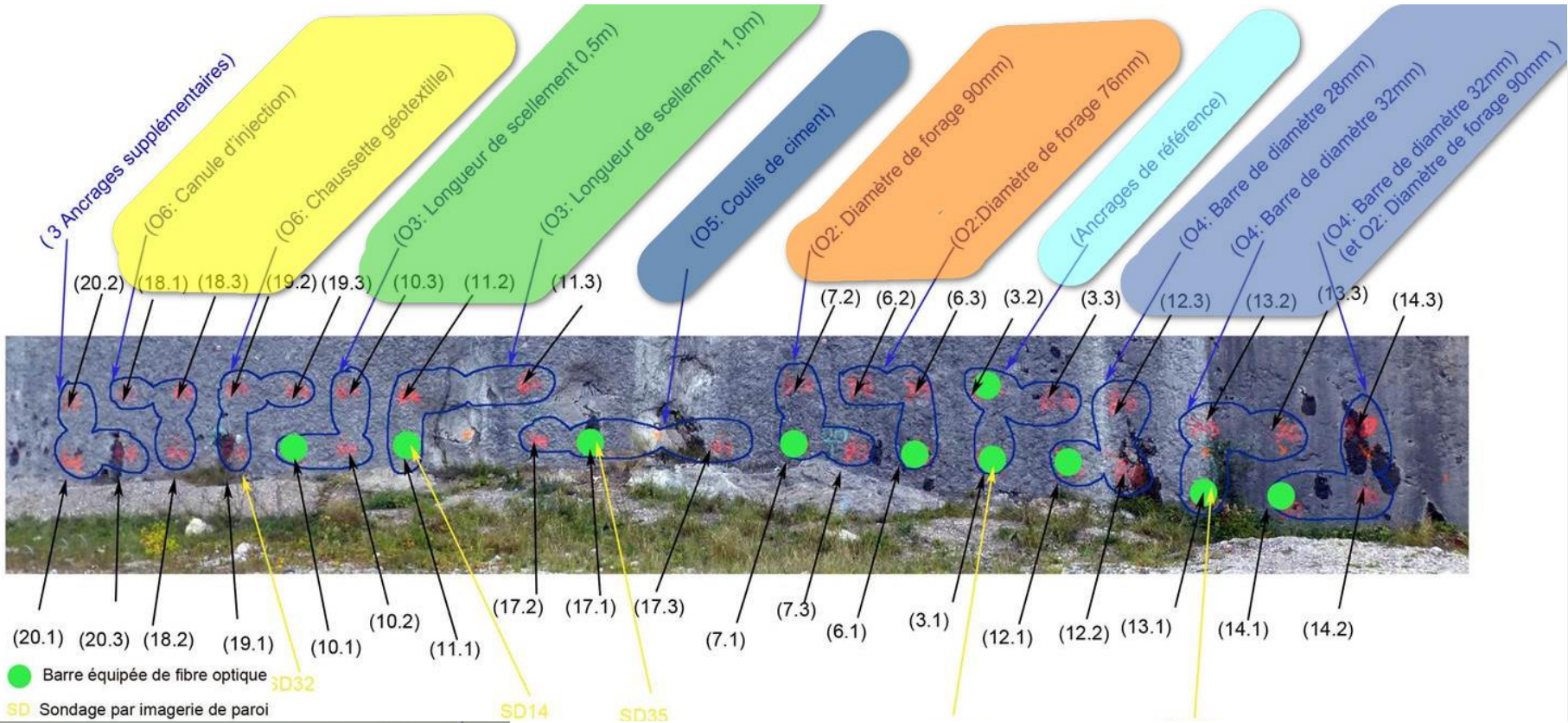
→ Pas de rupture de cette interface





Contexte et problématique  
 Etude numérique de l'interface barre-scellement  
 Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ  
 Etude expérimentale du comportement de l'ancrage  
 Conclusions et perspectives

# Présentation de la campagne de 36 essais d'arrachement in-situ



**Bouchon pour maîtriser la longueur de scellement**

**Scellement en profondeur pour éviter l'effet de bord**

- Bouchon
- Barre d'acier
- Scellement
- Roche



## Contexte et problématique

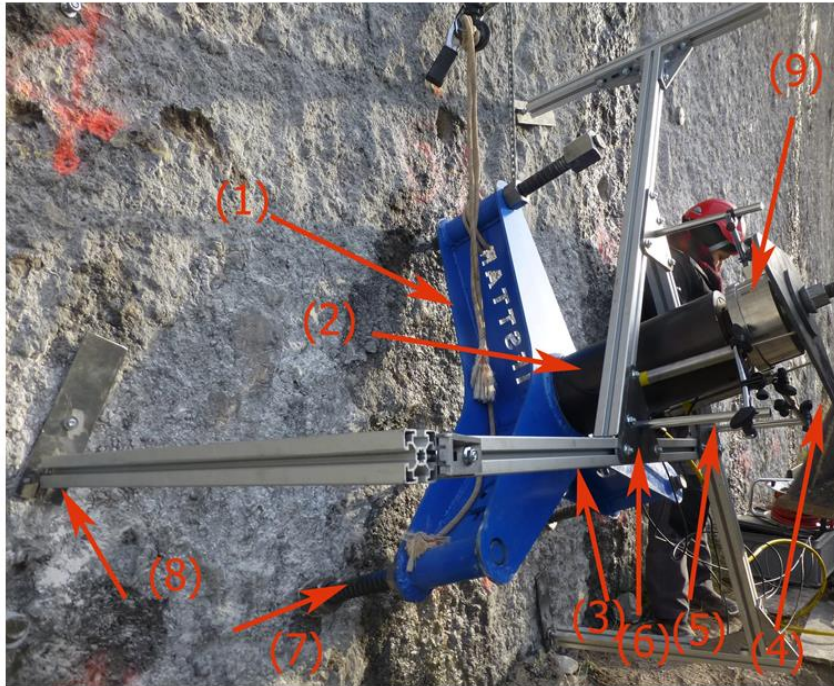
Etude numérique de l'interface barre-scellement

Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

Conclusions et perspectives

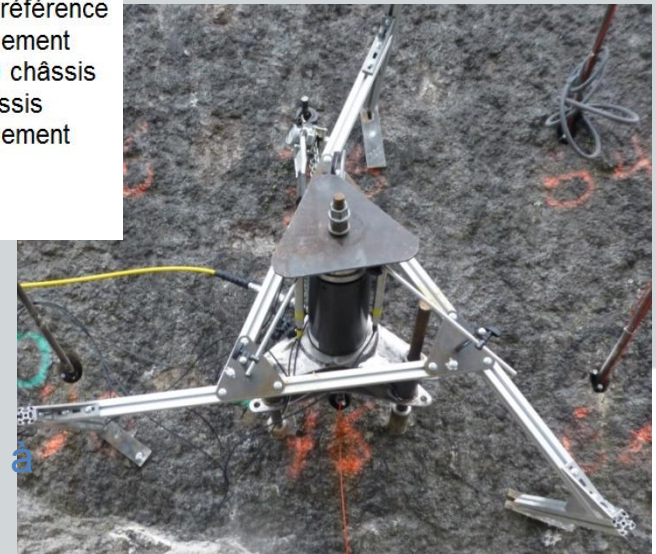
## Dispositif d'essai



- (1) Châssis
- (2) Vérin hydraulique
- (3) Châssis des capteurs de déplacement
- (4) Plaque supérieure de référence des capteurs de déplacement
- (5) Capteur LDT type palpeur
- (6) Plaques inférieures de référence des capteurs de déplacement
- (7) Tiges manchonnées du châssis
- (8) Pieds réglables du châssis des capteurs de déplacement
- (9) Capteur de force

Châssis d'arrachement

Second châssis d'arrachement à empattement réduit



## Instrumentation

### Mesure par fibres optiques



(a) Engravure dans la barre  
I



(b) Fixation et protection de la F.O en tête de la partie scellée

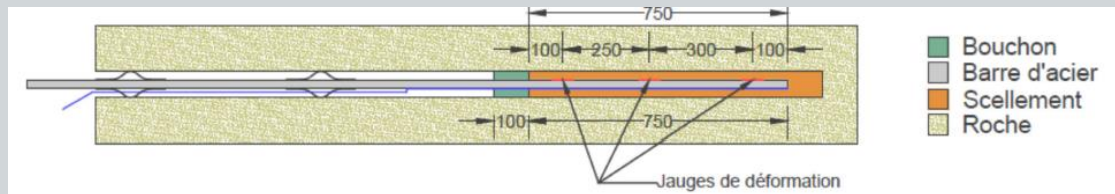


(c) F.O collée en pied de la partie scellée

Equipement d'une barre d'acier avec une fibre optique

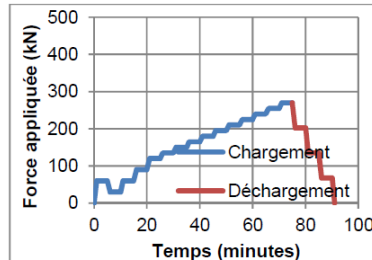
➔ Suivi de la déformation axiale le long de la barre d'acier à l'interface barre-scellement

### Jauges de déformation

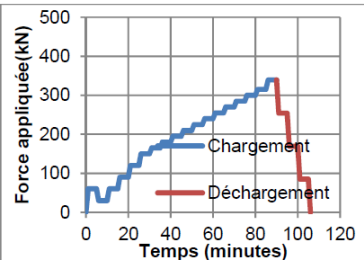


➔ Validation des mesures de la fibre optique

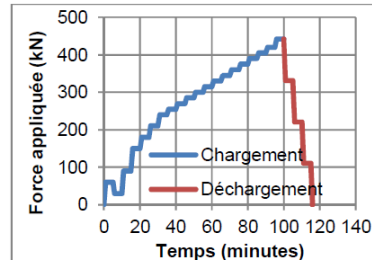
### Programme de chargement/déchargement



(Barre de diamètre 25 mm)



(Barre de diamètre 28 mm)



(Barre de diamètre 32 mm)

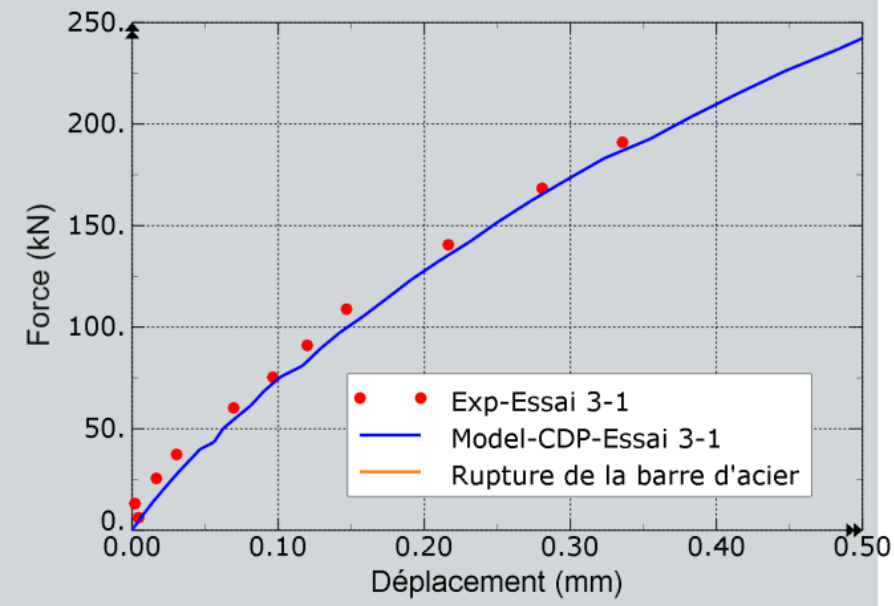
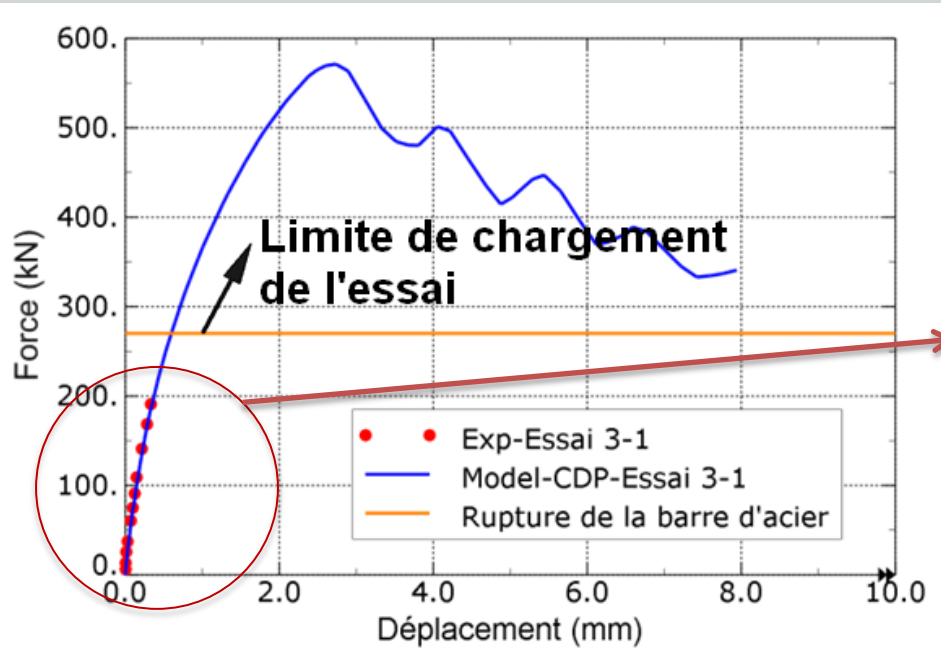
➔ Force appliquée limitée à la résistance à la rupture de la barre d'acier





# Comparaison aux résultats de la modélisation numérique

## Courbe de comportement force-déplacement en tête du scellement

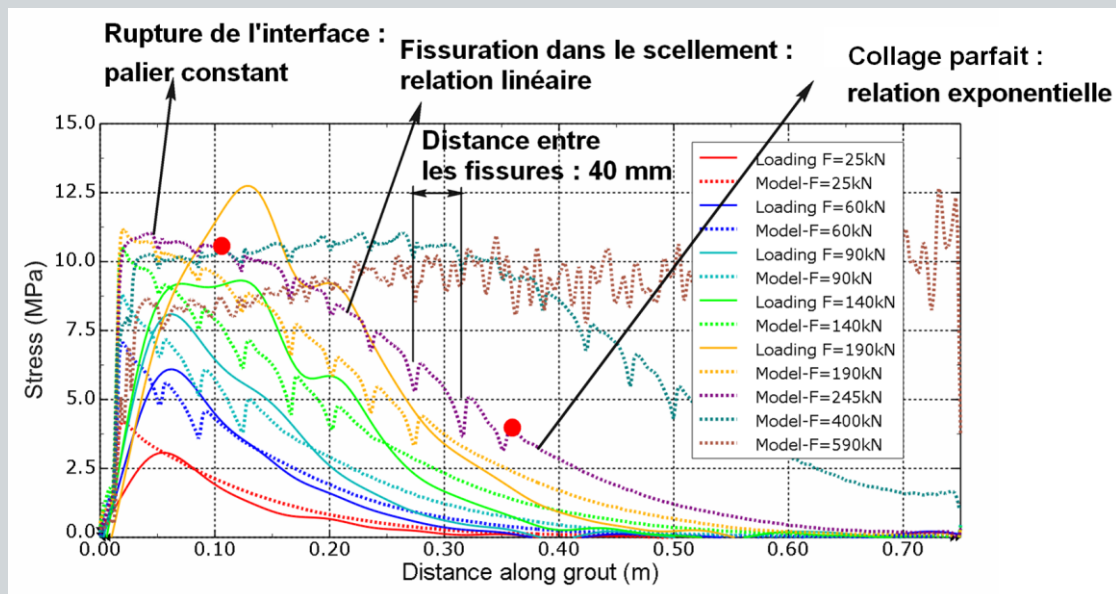


➔ Bonne reproduction numérique de l'essai in-situ



## Comparaison aux résultats de la modélisation numérique

### Etat des contraintes tangentielles le long de l'interface barre-scellement



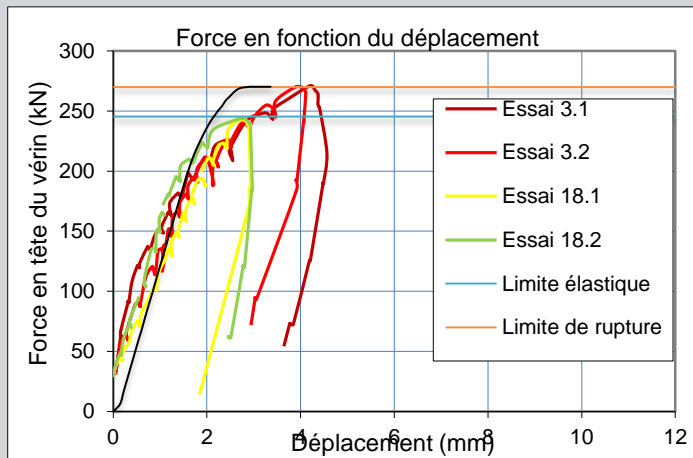
- Bonne correspondance entre modélisation numérique et expérimentation
- Apparition des fissures dans le scellement → linéarisation de la distribution des contraintes tangentielles le long de l'interface barre-scellement

- Longueur de transmission efficace pour la barre d'acier  $\varnothing 25 = 65\text{cm}$



## Influence des paramètres

### Accessoires de mise en œuvre

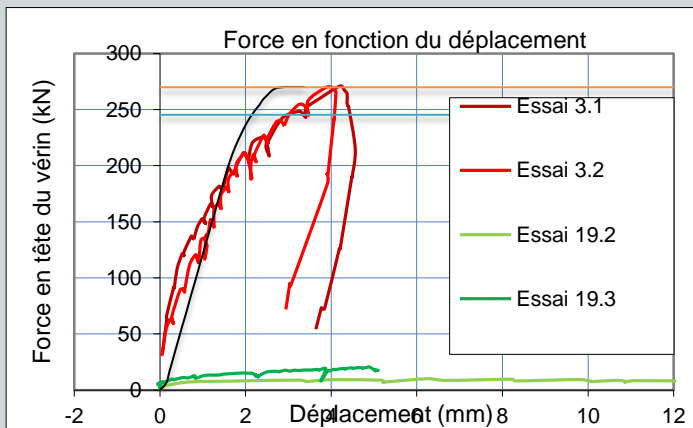


Essais équipés ou non de canule d'injection dans la partie scellée :

- Essais 3x = sans canule d'injection
- Essais 18x = avec canule d'injection

Conclusion:

***Pas d'influence de la canule d'injection***



Essais équipés ou non de chaussette géotextile :

- Essais 3x = sans chaussette géotextile
- Essais 19x = avec chaussette géotextile

Conclusion:

***Importance de mise en œuvre de la chaussette***

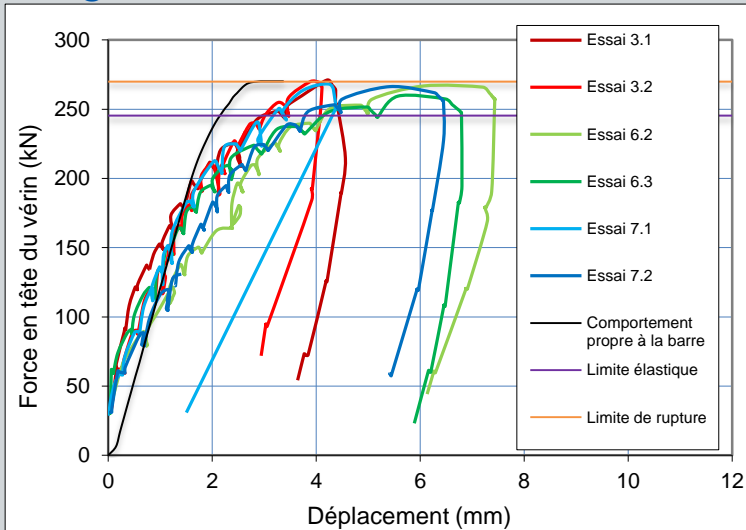
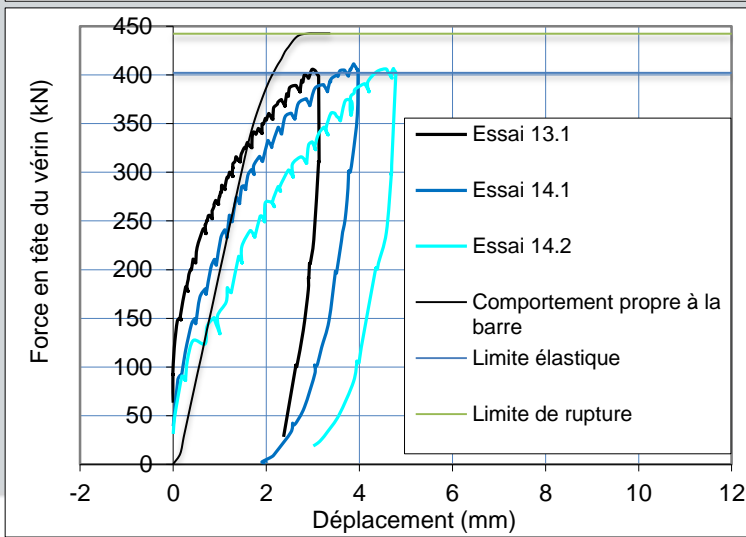




## Influence des paramètres

## Diamètre de forage

## LDT

 $\varnothing_b = 25\text{mm}$  $\varnothing_b = 32\text{ mm}$ 

- Essais 3x :  $\varnothing_{\text{forage}} = 64\text{mm}$
- Essais 6x :  $\varnothing_{\text{forage}} = 76\text{mm}$
- Essais 7x :  $\varnothing_{\text{forage}} = 90\text{mm}$

- Essais 13x :  $\varnothing_{\text{forage}} = 76\text{mm}$
- Essais 14x :  $\varnothing_{\text{forage}} = 90\text{mm}$

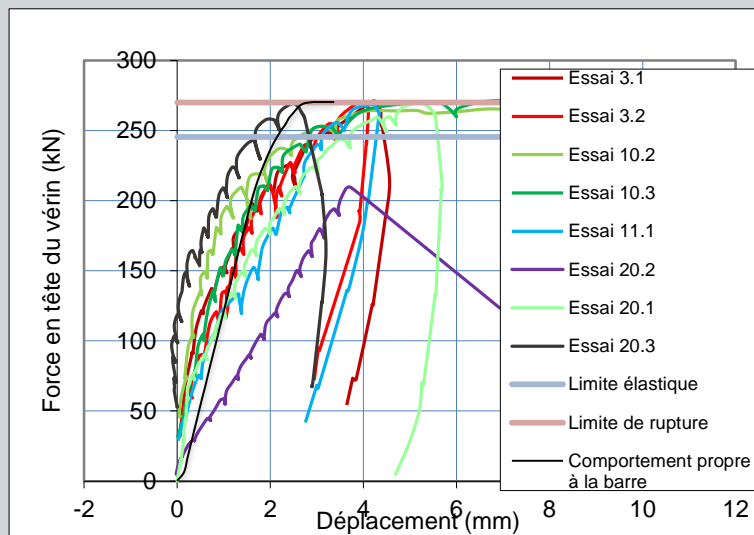
Augmentation de la rigidité avec la diminution de la taille du forage



## Influence des paramètres

## Longueur de scellement

## LDT



- Essais 3x : L = 75mm
- Essais 10x : L = 50mm
- Essais 11x : L = 100mm
- Essais 20x : L = 100mm

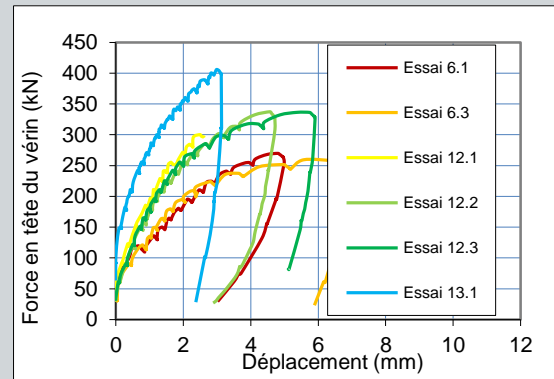
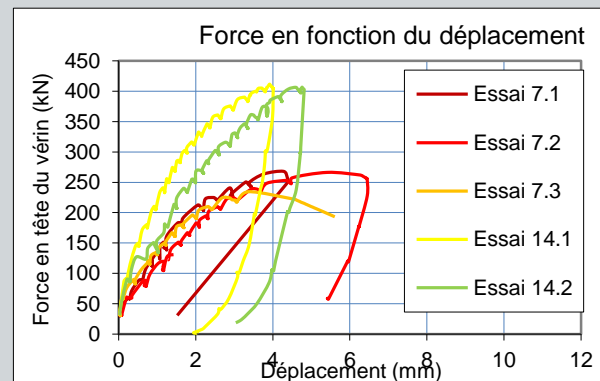
**Pas d'influence de la longueur scellée**



## Influence des paramètres

## Influence des barres de diamètre différent

## LDT

 $\varnothing_{\text{forage}} = 76\text{mm}$ 

 $\varnothing_{\text{forage}} = 90\text{mm}$ 


- Essais 3x :  $\varnothing_b = 25\text{mm}$
- Essais 12x :  $\varnothing_b = 28\text{mm}$
- Essais 13x :  $\varnothing_b = 32\text{mm}$
- Essais 7x :  $\varnothing_b = 25\text{mm}$
- Essais 14x :  $\varnothing_b = 32\text{mm}$

**Augmentation de la rigidité avec l'augmentation du diamètre de la barre**

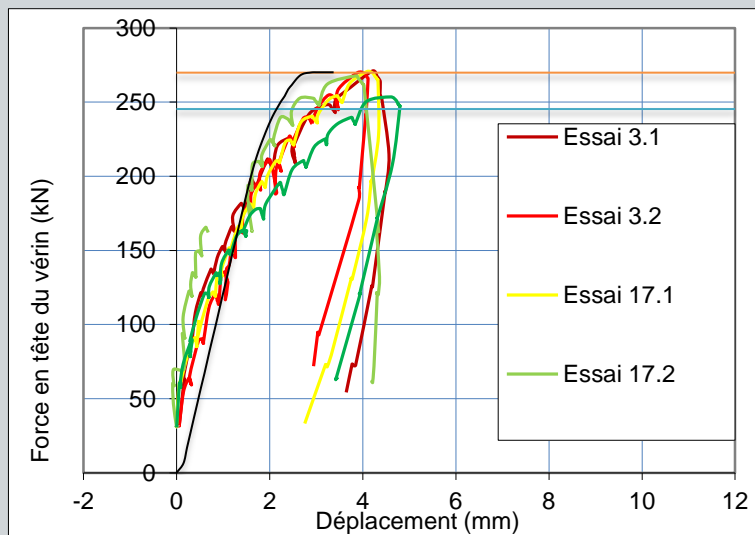




## Influence des paramètres

### Coulis de ciment

#### LDT



- Essais 3x : 52.5MPa
- Essais 17x : 32.5MPa

**Pas d'effet de la résistance du coulis sur la rigidité mais sur la longueur de scellement efficace**



## Conclusion

Dans le cas d'un massif rocheux homogène résistant,

- (1) la longueur de scellement efficace est au maximum de 65cm quelque soit le diamètre de la barre d'acier (25, 28 ou 32). Elle augmente quand la résistance du scellement diminue.
- (2) la résistance en traction de la barre d'acier est le mécanisme de rupture dimensionnant de la résistance de l'ancrage sollicité axialement.
- (3) l'endommagement s'initie par le développement d'une fissuration radiale depuis la tête du scellement.
- (4) la rigidité de l'ancrage augmente avec :
  - l'augmentation du diamètre de la barre d'acier,
  - la diminution du diamètre de forage.



## Conclusion

- (5) Concernant les accessoires de mise en œuvre, on peut noter :
- l'absence d'influence de la canule d'injection,
  - l'importance des conditions de mise en œuvre de la chaussette.
- 
- Développement d'un modèle numérique pour reproduire un essai d'arrachement qui tient compte du comportement à l'interface barre – scellement.
  - Développement d'un modèle d'interface barre-scellement paramétrable sans essai, sur la base des caractéristiques géométriques de la barre et du comportement mécanique du scellement.



## Contexte et problématique

Etude numérique de l'interface barre-scellement

Modélisation d'un essai d'arrachement in-situ

Etude expérimentale du comportement de l'ancrage

Conclusion et perspectives

## Perspectives

- Affiner le paramétrage du modèle d'interface par une meilleure prise en compte de la dilatance à l'interface barre-scellement et du comportement dilatant du scellement.
- Compléter l'étude par la réalisation expérimentale et numérique d'essais d'arrachement en roche tendre pour étudier l'influence de la rigidité de confinement du milieu encaissant.
- Etudier numériquement le comportement de l'ancrage sous d'autres types de chargement (répété ou choc).



Abaque de la longueur de scellement efficace des ancrages passifs sous une sollicitation axiale

