

Étude théorique et expérimentale du boulonnage à ancrage réparti sous sollicitations axiales

Assemblée Générale Annuelle et Séance Technique du CFMR



Centre de Géosciences



Prix de thèse Pierre LONDE

Laura BLANCO MARTÍN

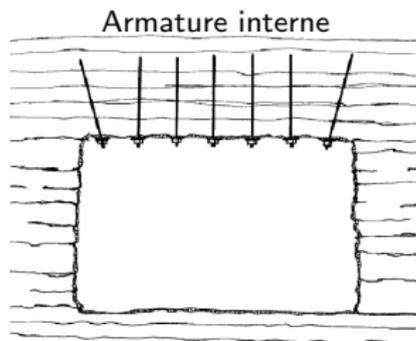
Directeur de thèse : Michel TIJANI

Co-encadrement : Faouzi HADJ-HASSEN

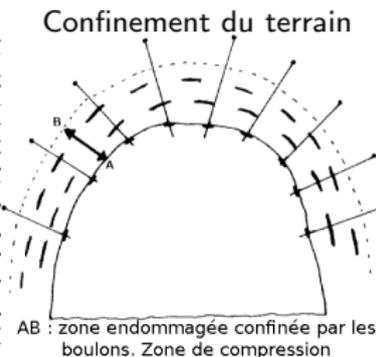
Paris, le 5 décembre 2013

Le boulonnage : technique de soutènement

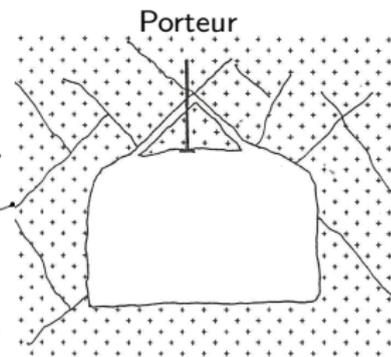
- ▶ Domaines d'utilisation : industrie minière, génie civil
- ▶ Principe : on insère une tige dans le terrain et on l'ancre de façon à ce qu'elle soit solidaire du terrain
- ▶ Rôles du boulonnage :



Source : Stillborg (1986)



Source : Tincelin (1991)



Source : Fine (1998)

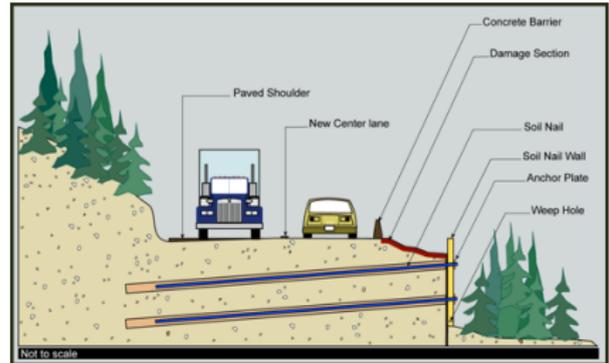
- ▶ Avantages : installation facile, faible encombrement, prix, ...

Le boulonnage : technique de soutènement

- ▶ Utilisation extensive depuis 1960 ($> 10^8$ boulons/an en 2003)
- ▶ Large éventail d'applications

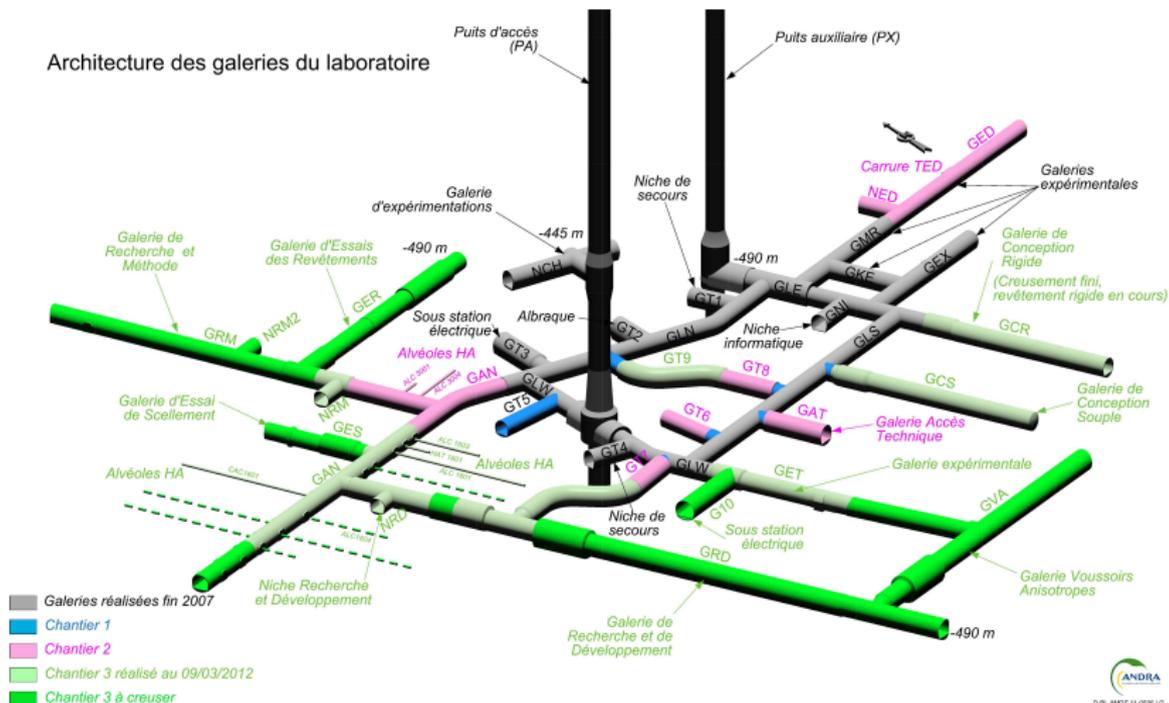


Source : Atlas Copco



Source : WSDOT

Le boulonnage : technique de soutènement



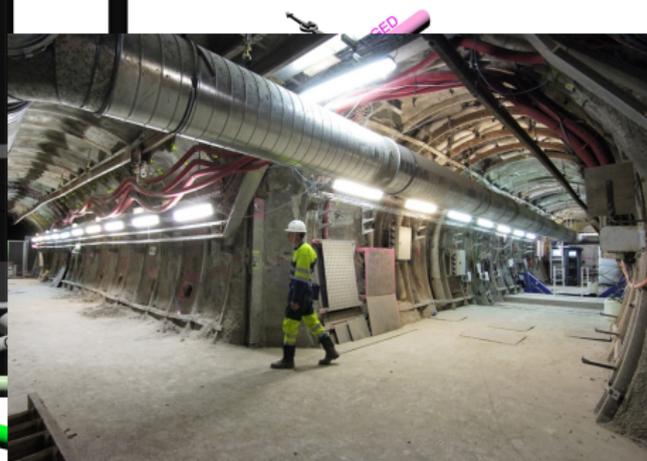
Source : Andra (2012)

Le boulonnage : technique de soutènement

Architecture des galeries du laboratoire

Puits d'accès (PA)

Puits auxiliaire (PX)



Galerie voûtures Anisotropes

Galerie de Recherche et de Développement

-490 m

- Chantier 1
- Chantier 2
- Chantier 3 réalisé au 09/03/2012
- Chantier 3 à creuser

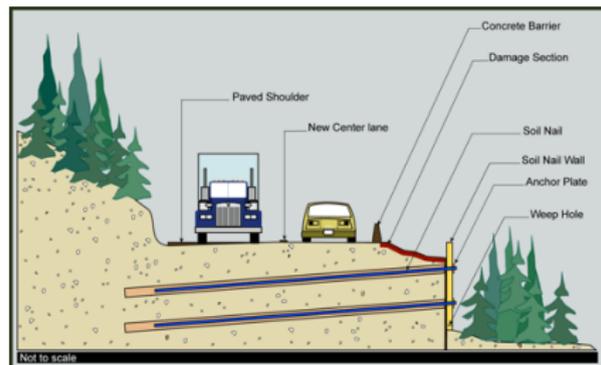
Source : Andra (2012)

Le boulonnage : technique de soutènement

- ▶ Utilisation extensive depuis 1960 ($> 10^8$ boulons/an en 2003)
- ▶ Large éventail d'applications



Source : Atlas Copco

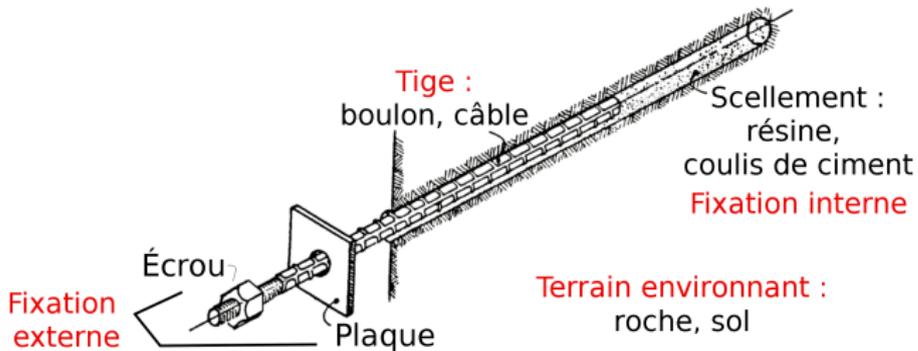


Source : WSDOT

- ▶ Types de boulons :
 - ▶ ancrage ponctuel
 - ▶ friction
 - ▶ **ancrage réparti**

Le boulonnage à ancrage réparti

- ▶ Éléments (Windsor et Thompson, 1996) :



- ▶ Soutènement de type passif : c'est le mouvement du terrain qui active le boulon

Le boulonnage et le câblage

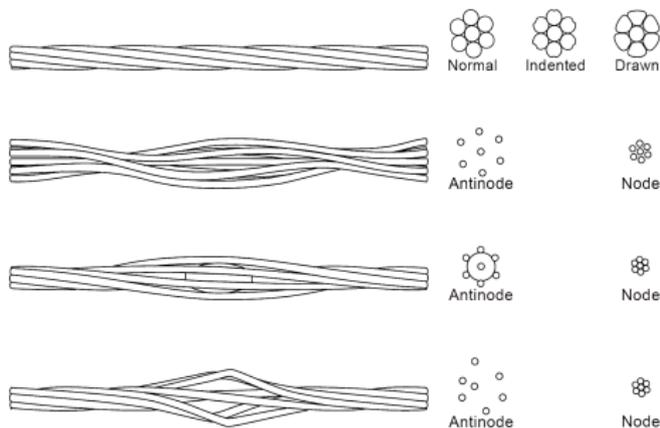
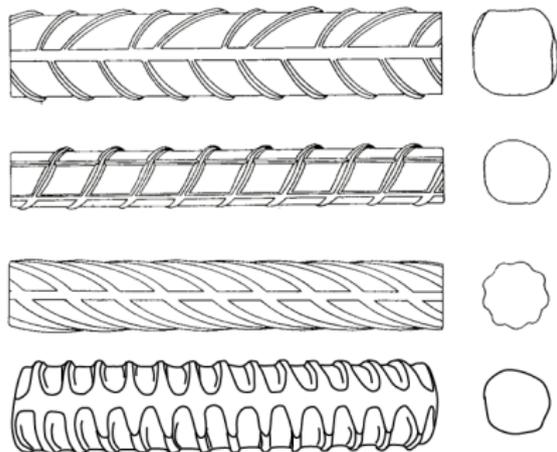
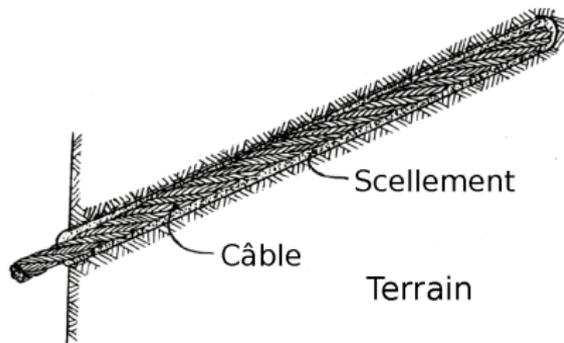
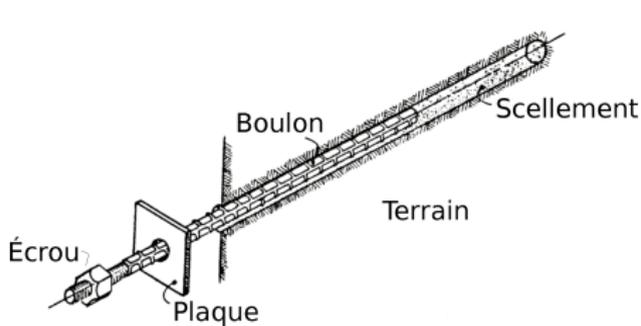
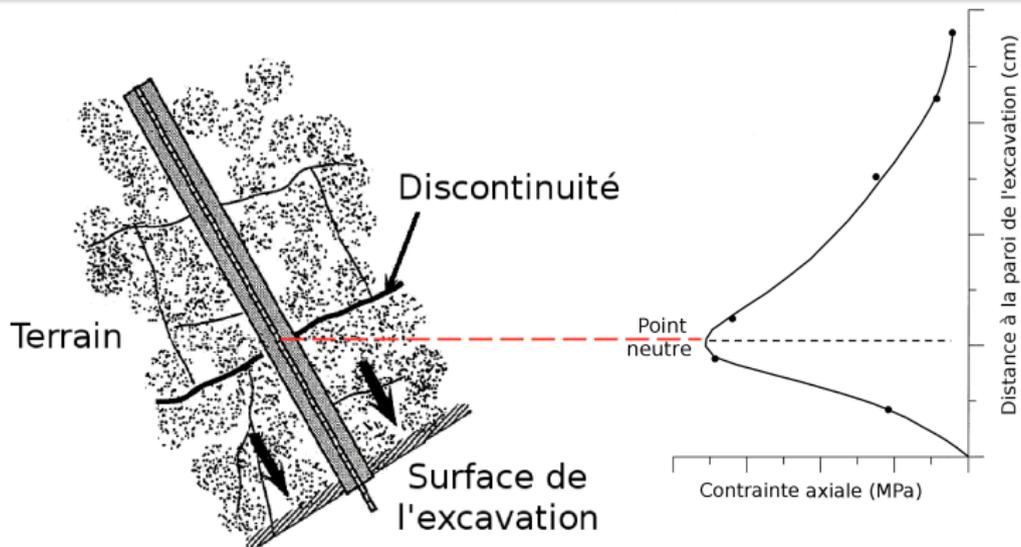


Figure: boulons (source : Bigby et Wittenberg)

Figure: câbles (source : Barley et Windsor)

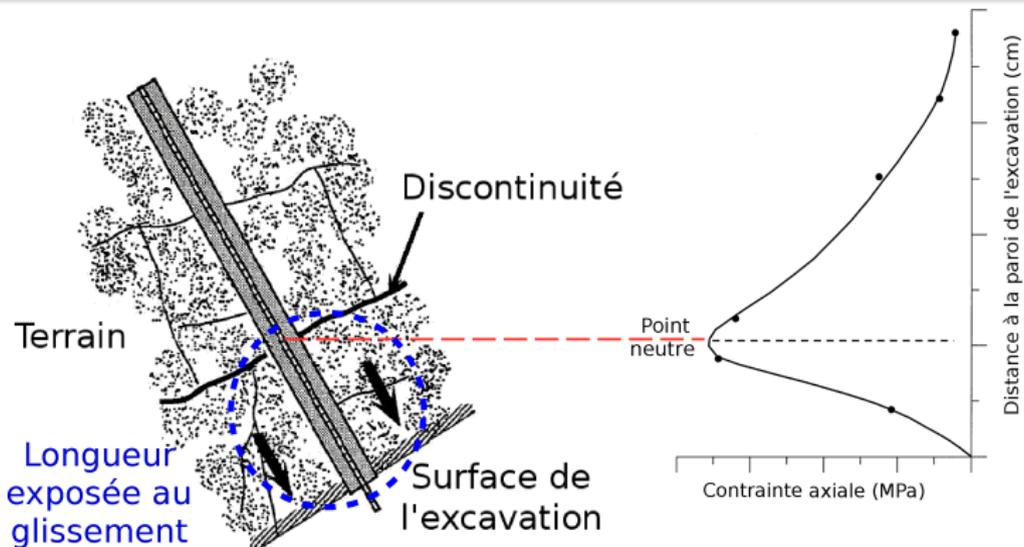
Conditions spécifiques à cette recherche



Source : Bawden et al.

- ▶ Barres soumises à des forces axiales de traction, statiques
- ▶ Sollicitations monotones
- ▶ La barre reste élastique

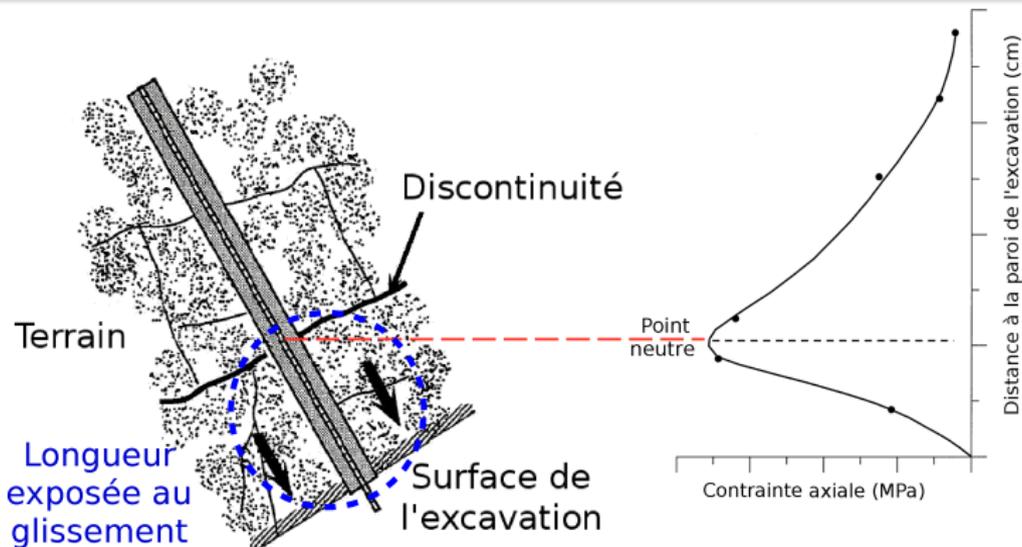
Conditions spécifiques à cette recherche



Source : Bawden et al.

- ▶ Barres soumises à des forces axiales de traction, statiques
- ▶ Sollicitations monotones
- ▶ La barre reste élastique
- ▶ Expérimentalement : **rupture à l'interface tige-scellement par décohesion**

Conditions spécifiques à cette recherche

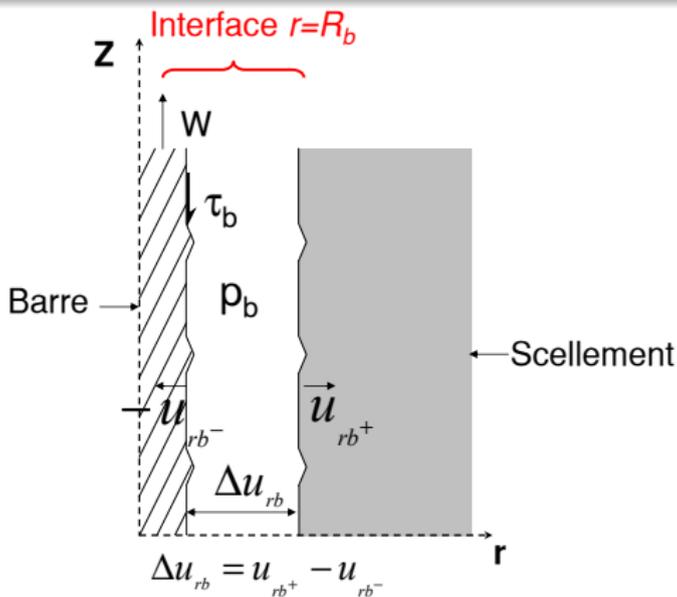


Source : Bawden et al.

Objectif de la recherche

Étudier le comportement de l'interface barre-scellement

Variables déterminantes pour l'interface barre-scellement



Glissement

Cisaillement

Ouverture

Pression

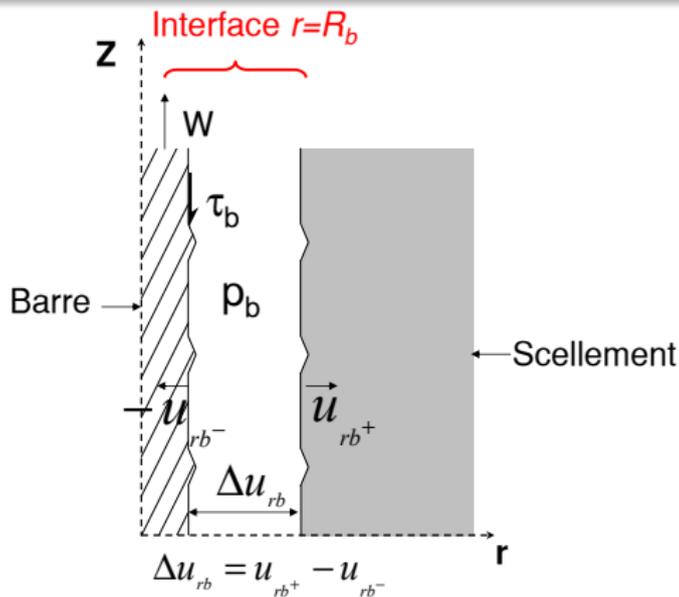
W

τ_b

Δu_{rb}

ρ_b

Variables déterminantes pour l'interface barre-scellement



Glissement

Cisaillement

Ouverture

Pression

W

τ_b

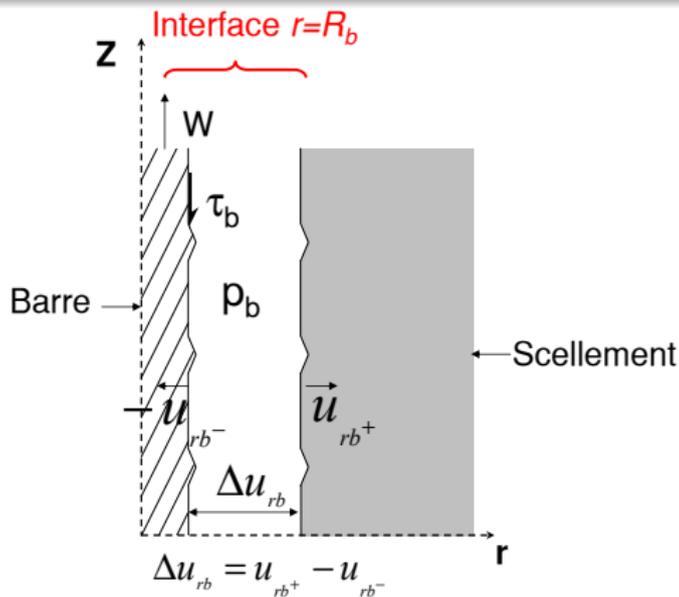
Direction tangentielle

Δu_{rb}

ρ_b

Direction normale

Variables déterminantes pour l'interface barre-scellement



Glissement

W



Imposé

Cisaillement

τ_b

Ouverture

Δu_{rb}

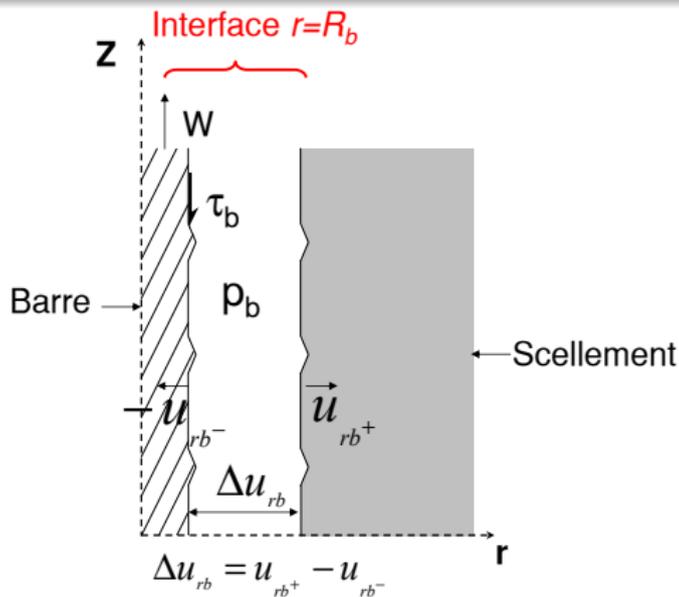
Pression

ρ_b



Liée aux conditions
aux limites

Variables déterminantes pour l'interface barre-scellement



Glissement

W



Imposé

Cisaillement

τ_b

Ouverture

Δu_{rb}

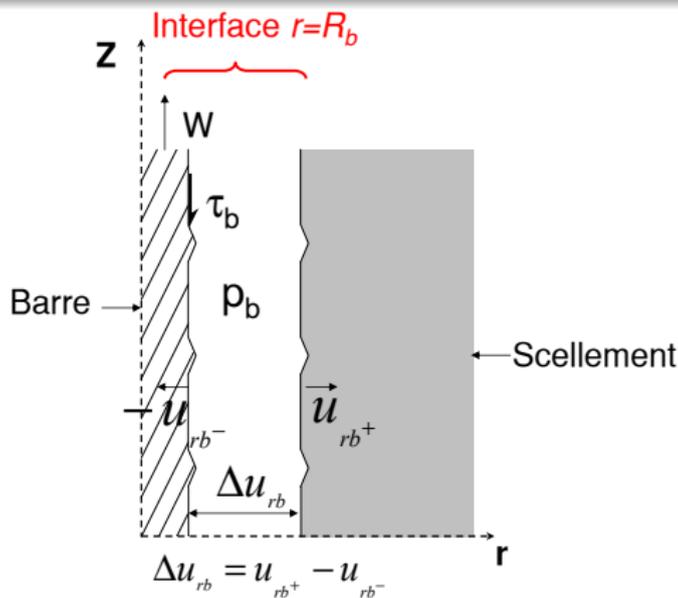
Pression

ρ_b



Liée aux conditions
aux limites

Variables déterminantes pour l'interface barre-scellement



Glissement

W

Cisaillement

τ_b

Ouverture

Δu_{rb}

Pression

p_b

Loi intrinsèque de l'interface barre-scellement :

$$\tau_b(W, p_b) \text{ et } \Delta u_b(W, p_b)$$

Plan

Introduction & état de l'art

- Études théoriques & expérimentales
- Modélisation

Étude théorique de l'interaction interface-matériaux environnants

- Réponse normale
- Réponse tangentielle

Étude expérimentale en laboratoire

- Description de l'appareillage
- Résultats

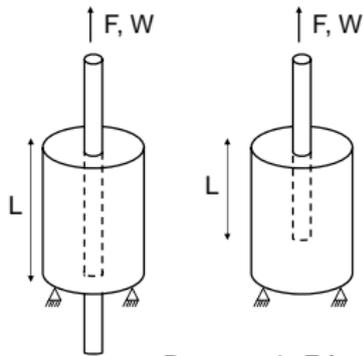
Méthode pour accéder à une loi d'interface

- Importance des effets radiaux
- Proposition d'un modèle semi-empirique

Conclusions et perspectives

Aide à la détermination de la loi d'interface

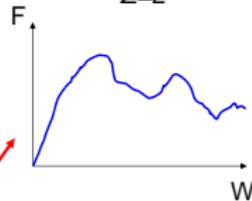
L'essai d'arrachement



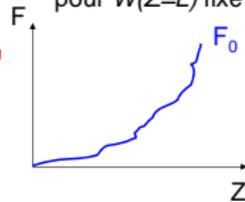
Passage de F à τ_b :

$$dF = 2\pi R_b \tau_b dZ$$

Courbe de charge en
 $Z=L$

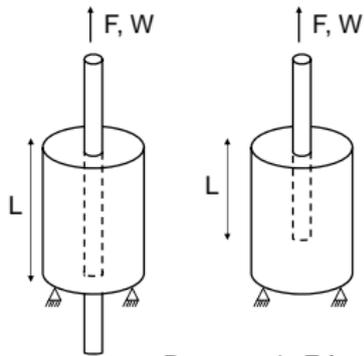


Distribution axiale
pour $W(Z=L)$ fixé



Aide à la détermination de la loi d'interface

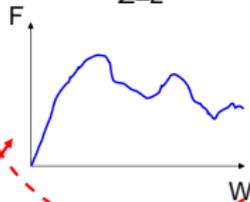
L'essai d'arrachement



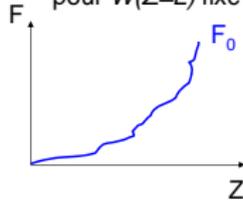
Passage de F à τ_b :

$$dF = 2\pi R_b \tau_b dZ$$

Courbe de charge en
 $Z=L$

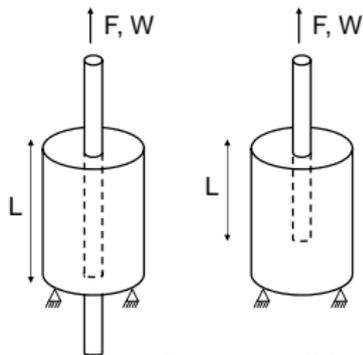


Distribution axiale
pour $W(Z=L)$ fixé



Aide à la détermination de la loi d'interface

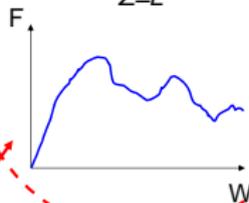
L'essai d'arrachement



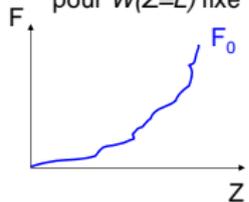
Passage de F à τ_b :

$$dF = 2\pi R_b \tau_b dZ$$

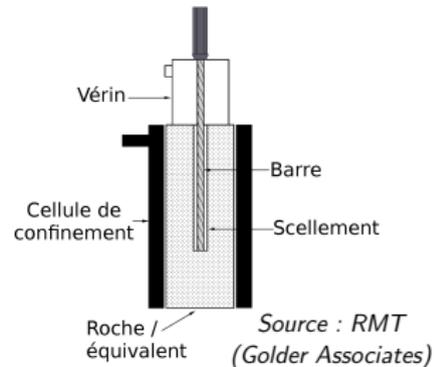
Courbe de charge en $Z=L$



Distribution axiale pour $W(Z=L)$ fixé



Essais en laboratoire



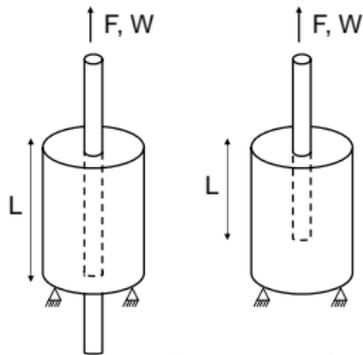
Essais in situ



Source : Andra

Aide à la détermination de la loi d'interface

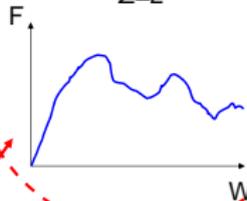
L'essai d'arrachement



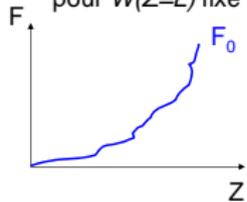
Passage de F à τ_b :

$$dF = 2\pi R_b \tau_b dZ$$

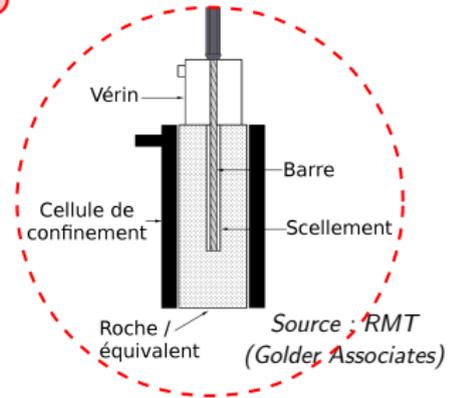
Courbe de charge en $Z=L$



Distribution axiale pour $W(Z=L)$ fixé



Essais en laboratoire



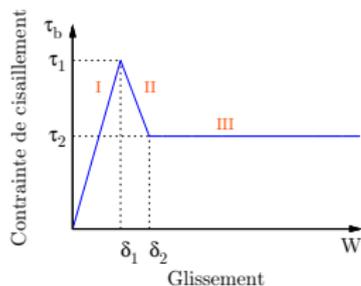
Essais in situ



Source : Andra

Études sur la réponse tangentielle à l'interface

- ▶ Relation cisaillement-glissement, $\tau_b(W)$, tri-linéaire (Benmokrane *et al.* 1995, Ren *et al.* 2010, ...):

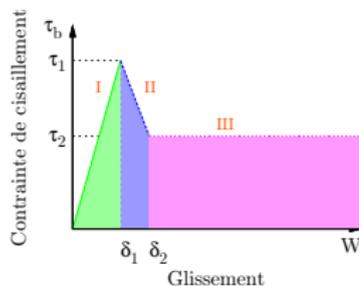


Phases :

- I. réponse élastique
- II. décohésion ou endommagement de l'interface
- III. résistance résiduelle due au frottement

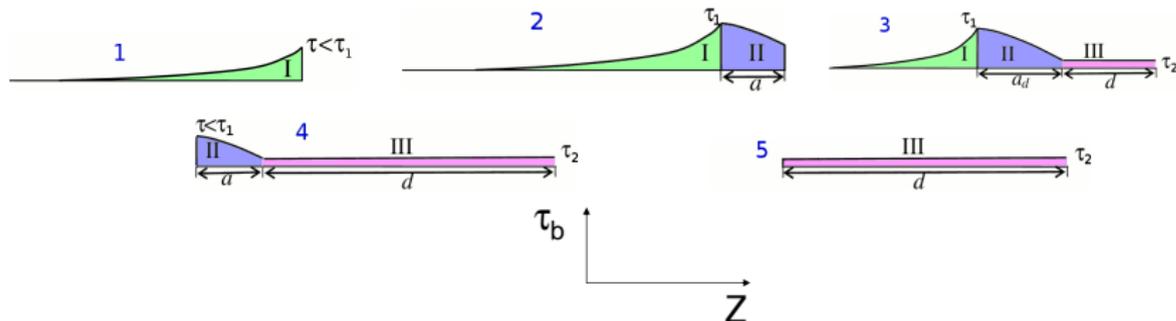
Études sur la réponse tangentielle à l'interface

- ▶ Relation cisaillement-glissement, $\tau_b(W)$, tri-linéaire (Benmokrane *et al.* 1995, Ren *et al.* 2010, ...):



Phases :

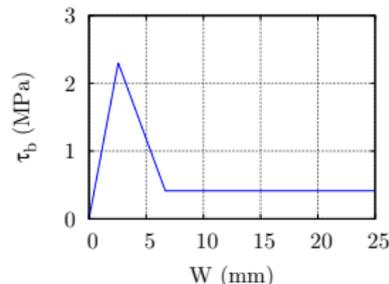
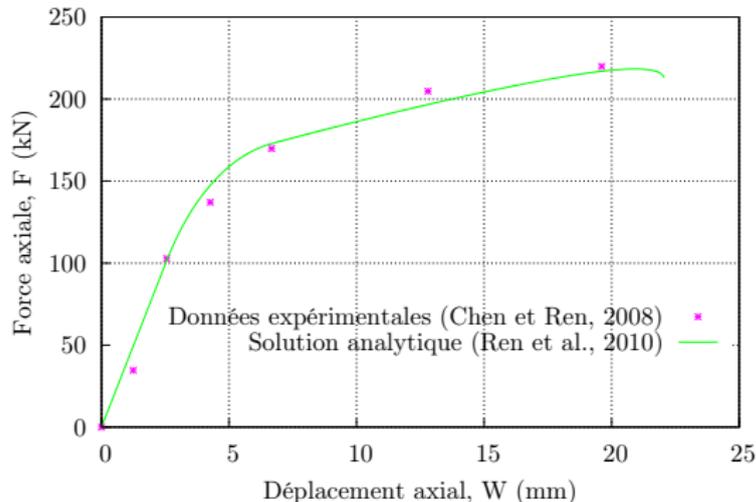
- I. réponse élastique
- II. décohésion ou endommagement de l'interface
- III. résistance résiduelle due au frottement



Études sur la réponse tangentielle à l'interface

- ▶ Relation cisaillement-glisement, $\tau_b(W)$, tri-linéaire (Benmokrane *et al.* 1995, Ren *et al.* 2010, ...) :
- ▶ Outils pour relier F et τ_b

Essai d'arrachement sur un boulon, $L=5$ m



Études sur la réponse tangentielle à l'interface

- ▶ Relation cisaillement-glissement, $\tau_b(W)$, tri-linéaire (Benmokrane *et al.* 1995, Ren *et al.* 2010, ...):
- ▶ Outils pour relier F et τ_b
- ▶ Limites principales :
 - ▶ réponse normale à l'interface non explicite
 - ▶ approches limitées à des relations $\tau_b(W)$ tri-linéaires

Loi de comportement complète (normale + tangentielle)

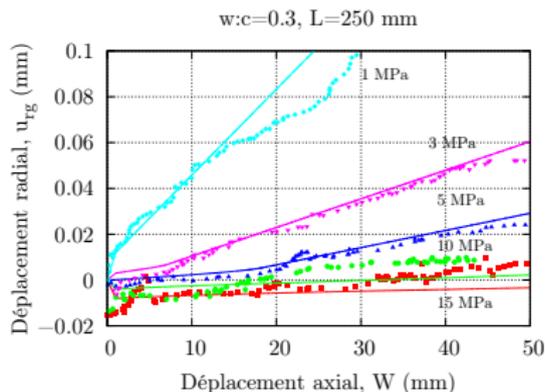
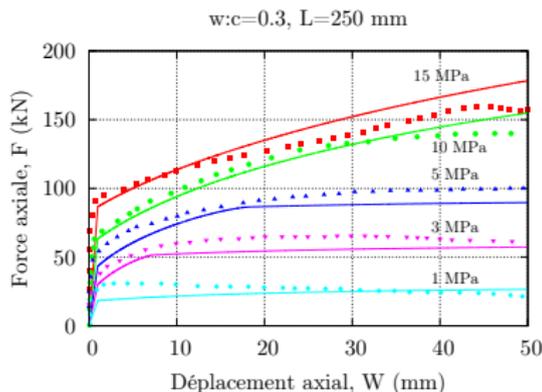
- ▶ Étude de Hyett *et al.*, 1995

Loi de comportement complète (normale + tangentielle)

- ▶ Étude de Hyett *et al.*, 1995
- ▶ Étude de la décohésion à l'interface câble-scellement :
 - ▶ direction tangentielle : $\tau_b = p_b \tan(\varphi)$
 - ▶ direction normale : joint hyperbolique avec dilatance

Loi de comportement complète (normale + tangentielle)

- ▶ Étude de Hyett *et al.*, 1995
- ▶ Étude de la décohésion à l'interface câble-scellement :
 - ▶ direction tangentielle : $\tau_b = p_b \tan(\varphi)$
 - ▶ direction normale : joint hyperbolique avec dilatance
- ▶ Modèle analytique pour reproduire les essais d'arrachement

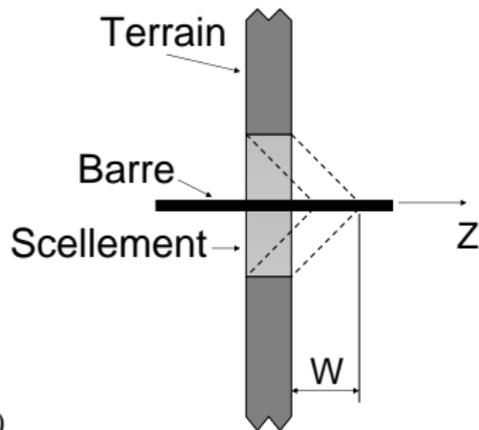


Loi de comportement complète (normale + tangentielle)

- ▶ Étude de Hyett *et al.*, 1995
- ▶ Étude de la décohésion à l'interface câble-scellement :
 - ▶ direction tangentielle : $\tau_b = p_b \tan(\varphi)$
 - ▶ direction normale : joint hyperbolique avec dilatance
- ▶ Modèle analytique pour reproduire les essais d'arrachement
- ▶ Limites :
 - ▶ comportement normal inspiré des joints rocheux → représentatif de l'interface câble-scellement ?
 - ▶ validité inconnue pour les boulons

Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement → pas de glissement



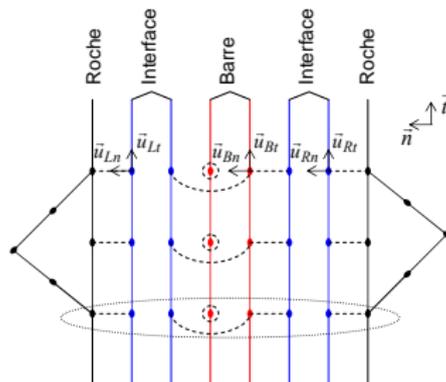
Source : logiciel FLAC (Itasca)

Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement → pas de glissement
- ▶ Discrétisation de l'interface :

Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement \rightarrow pas de glissement
- ▶ Discrétisation de l'interface :
 - ▶ comme une discontinuité (2D)



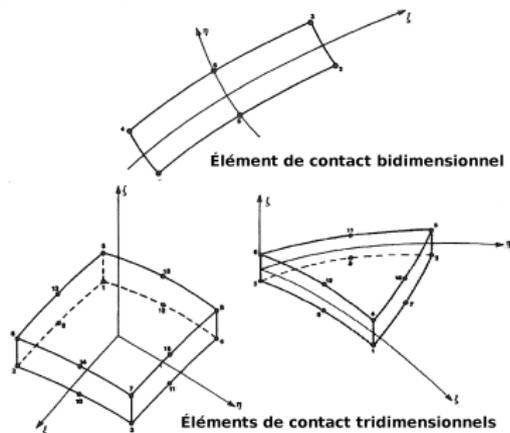
Source : logiciel VIPLEF
(MINES-ParisTech)

- Déplacements identiques
- Coordonnées identiques
- Un degré de liberté (flexion)

Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement → pas de glissement
- ▶ Discrétisation de l'interface :
 - ▶ comme une discontinuité (2D)
 - ▶ comme un milieu continu (2D, 3D)

Source : logiciel CESAR (École des Ponts ParisTech)



Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement → pas de glissement
- ▶ Discrétisation de l'interface :
 - ▶ comme une discontinuité (2D)
 - ▶ comme un milieu continu (2D, 3D)

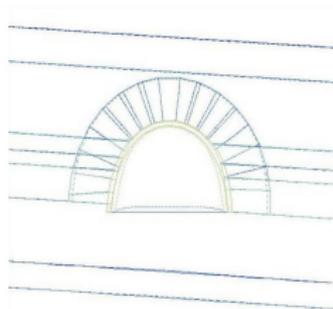
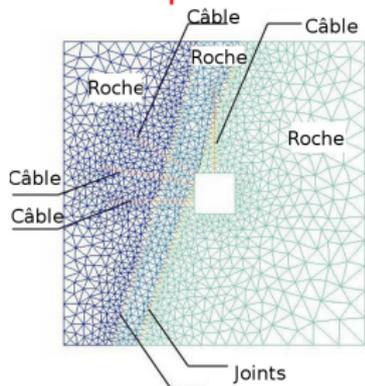


Modélisation numérique du boulonnage passif

- ▶ Sans discrétisation de l'interface : comportement en cisaillement du scellement → pas de glissement
- ▶ Discrétisation de l'interface :
 - ▶ comme une discontinuité (2D)
 - ▶ comme un milieu continu (2D, 3D)



Importance de la loi de comportement



Plan

Introduction & état de l'art

Études théoriques & expérimentales

Modélisation

Étude théorique de l'interaction interface-matériaux environnants

Réponse normale

Réponse tangentielle

Étude expérimentale en laboratoire

Description de l'appareillage

Résultats

Méthode pour accéder à une loi d'interface

Importance des effets radiaux

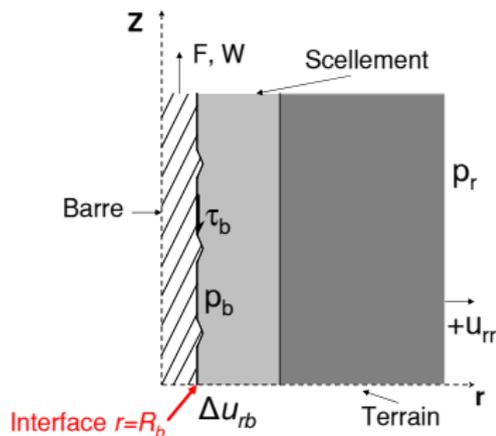
Proposition d'un modèle semi-empirique

Conclusions et perspectives

L'interface influence les matériaux environnants

Interface

Matériaux environnants

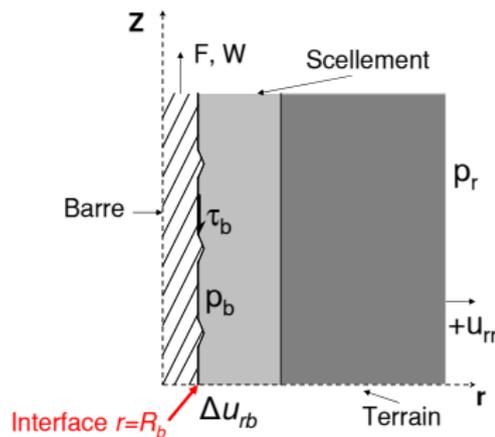


L'interface influence les matériaux environnants

Interface

Matériaux environnants

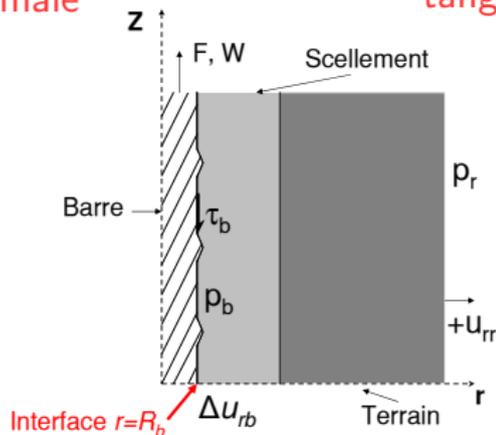
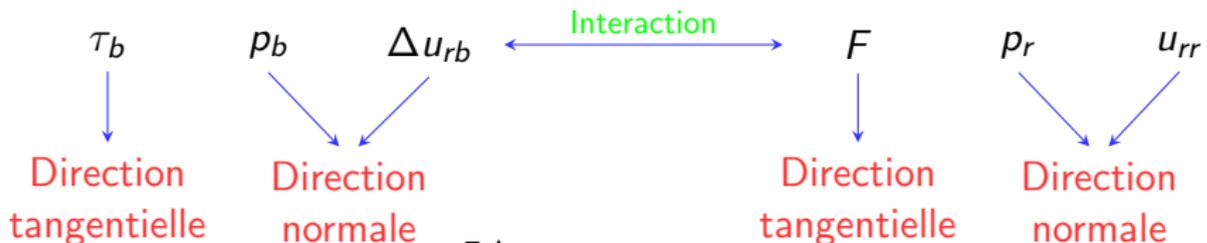
Interaction



L'interface influence les matériaux environnants

Interface

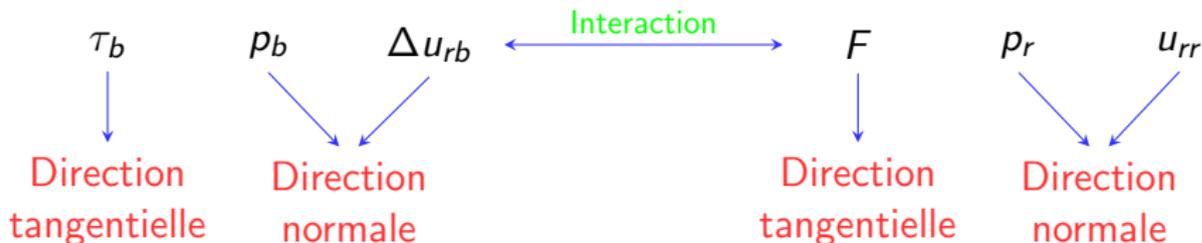
Matériaux environnants



L'interface influence les matériaux environnants

Interface

Matériaux environnants



But : faire le lien entre l'interface et les matériaux environnants

Simplification classique des équations d'équilibre

Séparation de la réponse normale et tangentielle

Lien entre u_{rr} et p_r avec Δu_{rb} et p_b : approche classique

Variables
observables

Variables
pertinentes

u_{rr}

Réponse radiale scellement et roche

p_r

u_{rb+}

p_b

Réponse boulon

u_{rb-}

$$\Delta u_{rb} = u_{rb+} - u_{rb-}$$

Approche classique en élasticité plane

Lien entre u_{rr} et p_r avec Δu_{rb} et p_b : approche classique

Variables
observables

Variables
pertinentes

u_{rr}

Réponse radiale scellement et roche

u_{rb+}

p_r

p_b

Réponse boulon

u_{rb-}

$$\Delta u_{rb} = u_{rb+} - u_{rb-}$$

Approche classique en élasticité plane

Lien entre u_{rr} et p_r avec Δu_{rb} et p_b : approche classiqueVariables
observables u_{rr}

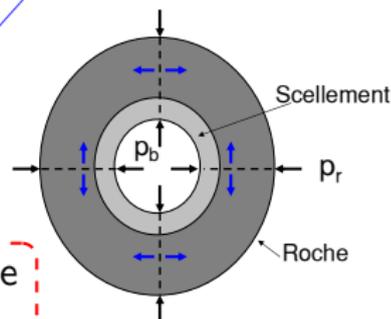
Réponse radiale scellement et roche

 p_r Variables
pertinentes u_{rb}^+ p_b u_{rb}^-

Réponse boulon

$$\Delta u_{rb} = u_{rb}^+ - u_{rb}^-$$

Approche classique en élasticité plane

La fracturation de l'anneau rend l'analyse difficile
(cf. Yacizi et Kaiser 1992, Hyett *et al.* 1995)

Lien entre u_{rr} et p_r avec Δu_{rb} et p_b : approche classiqueVariables
observablesVariables
pertinentes u_{rr}

Réponse radiale scellement et roche

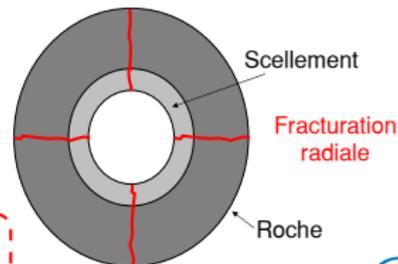
 u_{rb}^+ p_r p_b

Réponse boulon

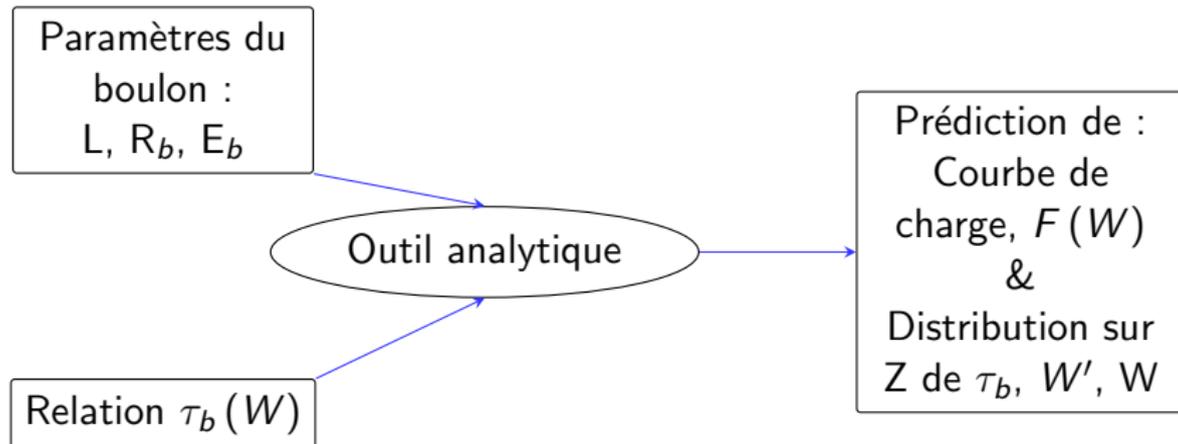
 u_{rb}^-

$$\Delta u_{rb} = u_{rb}^+ - u_{rb}^-$$

Approche classique en élasticité plane

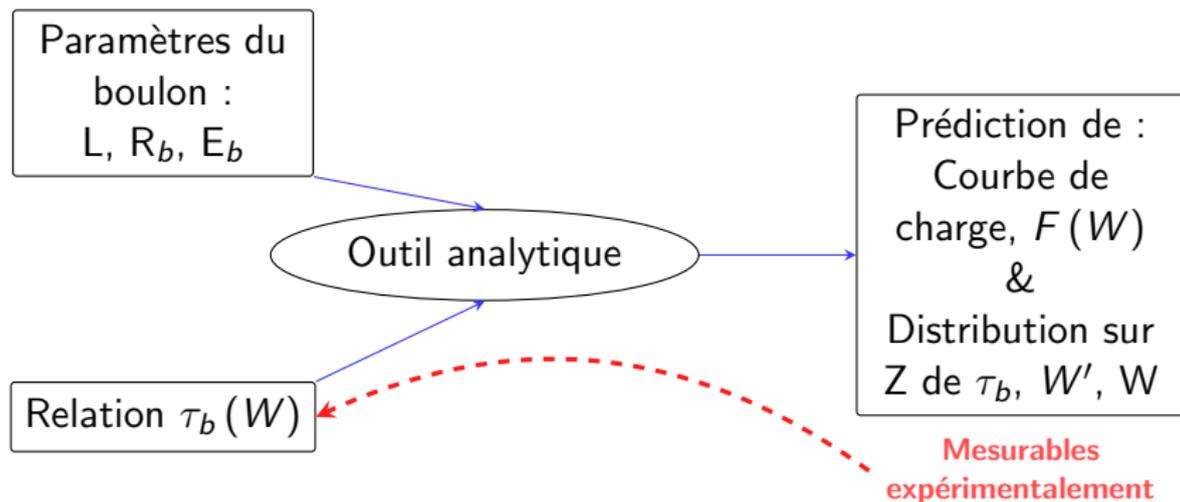
La fracturation de l'anneau rend l'analyse difficile
(cf. Yacizi et Kaiser 1992, Hyett *et al.* 1995)

Lien entre τ_b et F : nouvel outil analytique



$$dF = 2\pi R_b \tau_b(W) dZ \quad \backslash \quad \text{Résolution de :}$$
$$F = \pi R_b^2 E_b W' \quad / \quad E_b R_b W'' = 2\tau_b(W)$$

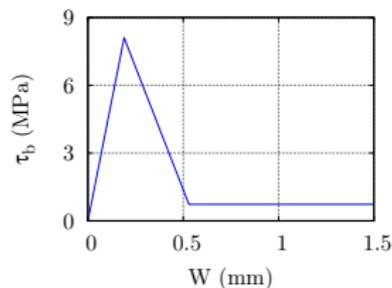
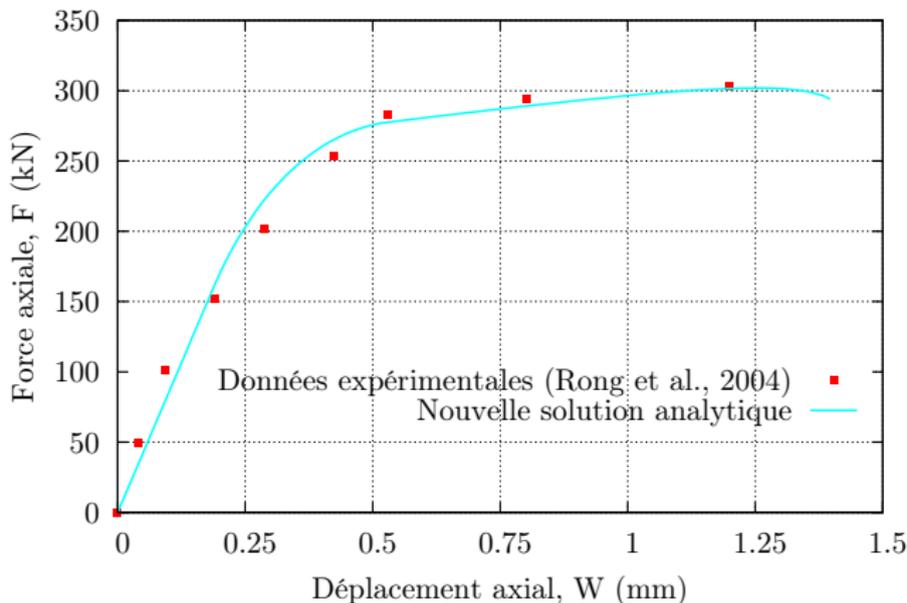
Lien entre τ_b et F : nouvel outil analytique



$$dF = 2\pi R_b \tau_b(W) dZ \quad \backslash \quad \text{Résolution de :}$$
$$F = \pi R_b^2 E_b W' \quad / \quad E_b R_b W'' = 2\tau_b(W)$$

Lien entre τ_b et F : vérification de l'outil

Essai d'arrachement sur un boulon, $L=1$ m



Améliorations par rapport aux solutions existantes

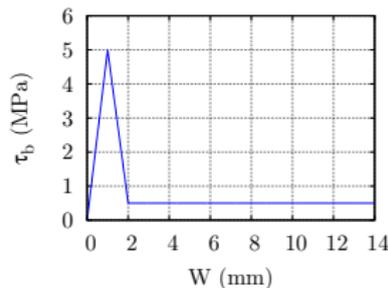
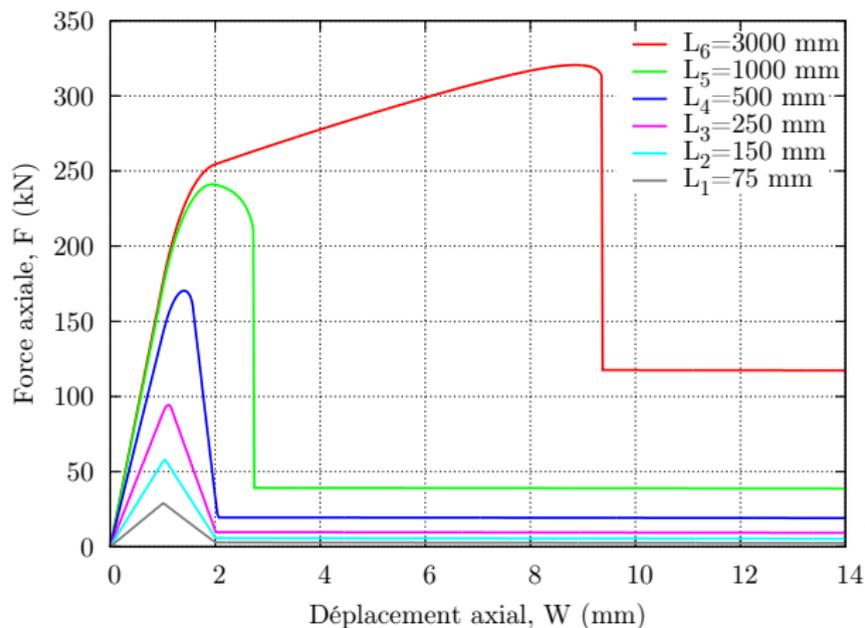
- ▶ Outil non limité à $\tau_b(W)$ tri-linéaire
- ▶ Conditions aux limites employées (extrémité libre seule)
- ▶ Deux cas de figure : L constante, L décroissante

Limites (communes aux solutions existantes)

- ▶ Sollicitations monotones
- ▶ La barre reste en phase élastique

La longueur L influence le lien entre τ_b et F

- ▶ Application de l'outil pour prédire six cas identiques mais avec des longueurs différentes



Plan

Introduction & état de l'art

Études théoriques & expérimentales

Modélisation

Étude théorique de l'interaction interface-matériaux environnants

Réponse normale

Réponse tangentielle

Étude expérimentale en laboratoire

Description de l'appareillage

Résultats

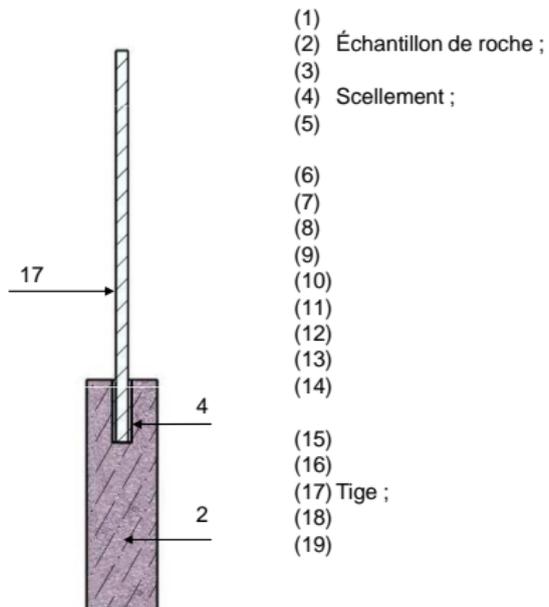
Méthode pour accéder à une loi d'interface

Importance des effets radiaux

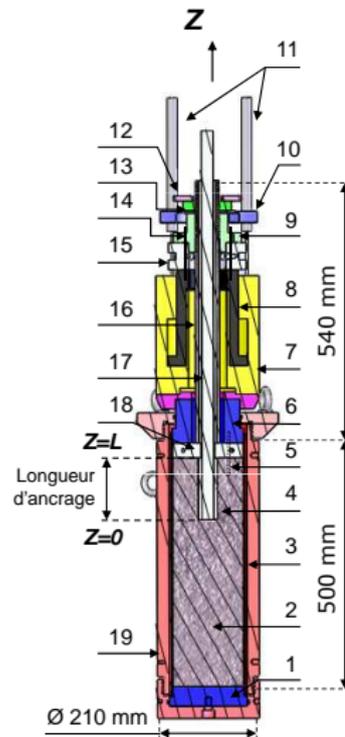
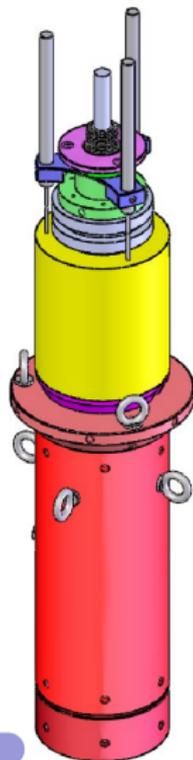
Proposition d'un modèle semi-empirique

Conclusions et perspectives

Nouveau banc expérimental d'arrachement



Nouveau banc expérimental d'arrachement



- (1) Piston inférieur ;
- (2) Échantillon de roche ;
- (3) Jaquette ;
- (4) Scellement ;
- (5) Goupilles pour empêcher la rotation ;
- (6) Piston supérieur ;
- (7) Vérin hydraulique ;
- (8) Piston du vérin ;
- (9) Plaque fileté ;
- (10) Pont capteurs LVDT ;
- (11) Capteurs LVDT ;
- (12) Anneau de sécurité ;
- (13) Contre-écrou ;
- (14) Goupilles pour empêcher la rotation ;
- (15) Capteur de force ;
- (16) Tube métallique ;
- (17) Tige ;
- (18) Plaque (effets de bord) ;
- (19) Cellule triaxiale classique

Nouveau banc expérimental d'arrachement



Nouveau banc expérimental d'arrachement



Variables mesurées :

- ▶ déplacement axial
- ▶ force axiale
- ▶ pression de confinement

Nouveau banc expérimental d'arrachement



Variables mesurées :

- ▶ déplacement axial
- ▶ force axiale
- ▶ pression de confinement

Souplesse pour étudier plusieurs paramètres :

- ▶ longueur d'ancrage, L
- ▶ pression de confinement, p_r
- ▶ barre, scellement, roche
- ▶ épaisseur de l'anneau de scellement
- ▶ rugosité du trou borgne
- ▶ rupture à l'interface roche-scellement

Améliorations progressives

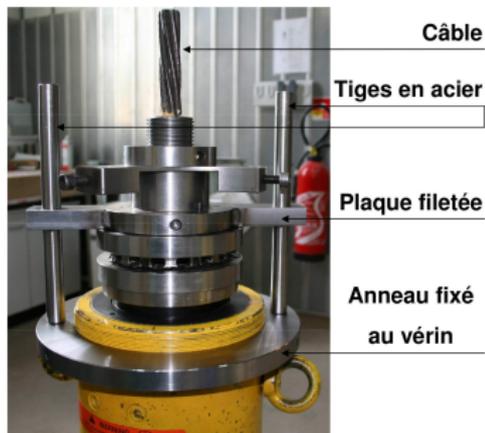
- ▶ Réduction des effets de bord 

Améliorations progressives

- ▶ Réduction des effets de bord 
- ▶ Possibilité de faire des cycles de charge-décharge

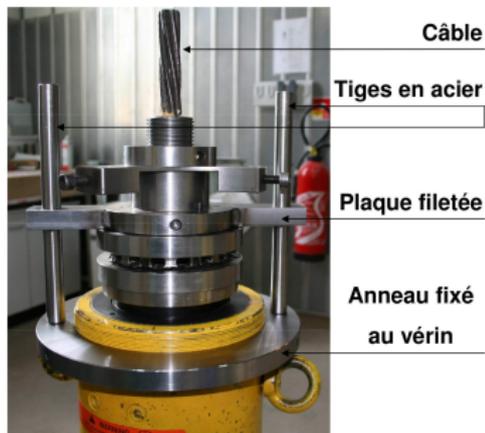
Améliorations progressives

- ▶ Réduction des effets de bord 
- ▶ Possibilité de faire des cycles de charge-décharge
- ▶ Câbles : conception d'outils pour éviter le dévissage



Améliorations progressives

- ▶ Réduction des effets de bord 
- ▶ Possibilité de faire des cycles de charge-décharge
- ▶ Câbles : conception d'outils pour éviter le dévissage



- ▶ Étalonnage du banc pour corriger l'effet de l'ancrage supérieur

Matériaux employés

Boulons

- ▶ Barres HA25 (Andra)
- ▶ Fibres de verre (Andra)
- ▶ Tiges lisses



Câbles

- ▶ Flexible (Osborn Strata Products, Ltd.)



Matériaux employés

Boulons

- ▶ Barres HA25 (Andra)
- ▶ Fibres de verre (Andra)
- ▶ Tiges lisses

Câbles

- ▶ Flexible (Osborn Strata Products, Ltd.)

Scellement

- ▶ Résine
- ▶ Coulis de ciment, $w : c = \{0.35, 0.4\}$

Roche

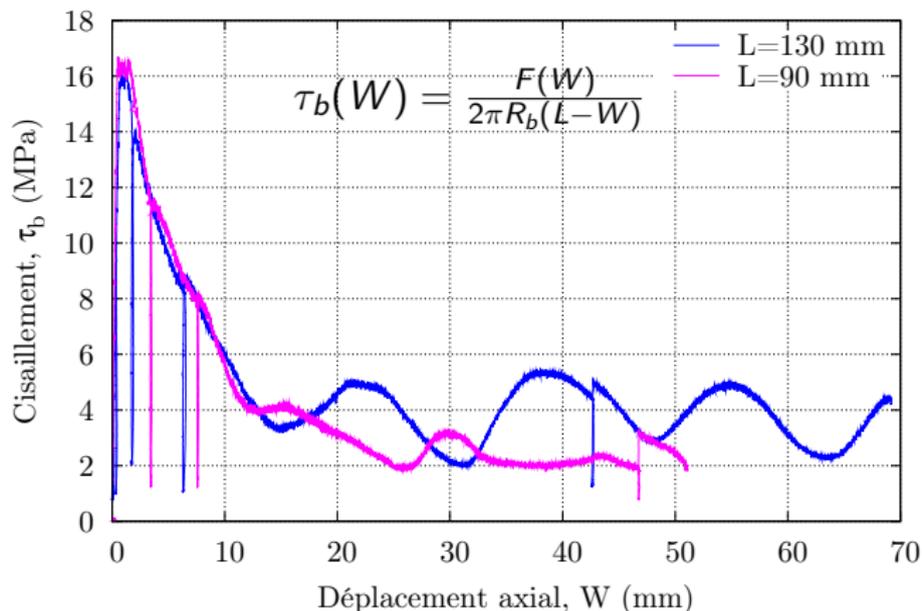
- ▶ Grès des Vosges

Paramètres étudiés

- ▶ Longueur d'ancrage, $L \in [90, 150]$ mm
- ▶ Pression de confinement, $p_r \in [0, 15]$ MPa
- ▶ Type et profil de la barre
- ▶ Conditions aux limites :
 - ▶ pression de confinement constante
 - ▶ rigidité radiale externe constante

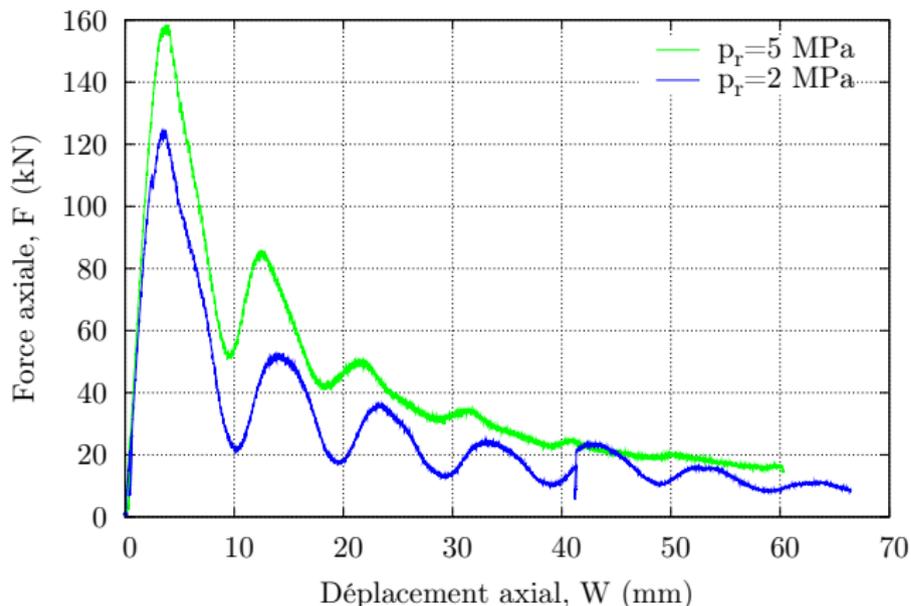
Résultats (I) : L n'a pas d'effet direct sur τ_b

Boulons HA25, $p_r=1.2$ MPa, résine, p_r constante



Résultats (II) : F augmente avec p_r . Fracturation radiale

Boulons FRP, $L=90$ mm, résine, p_r constante



2 MPa

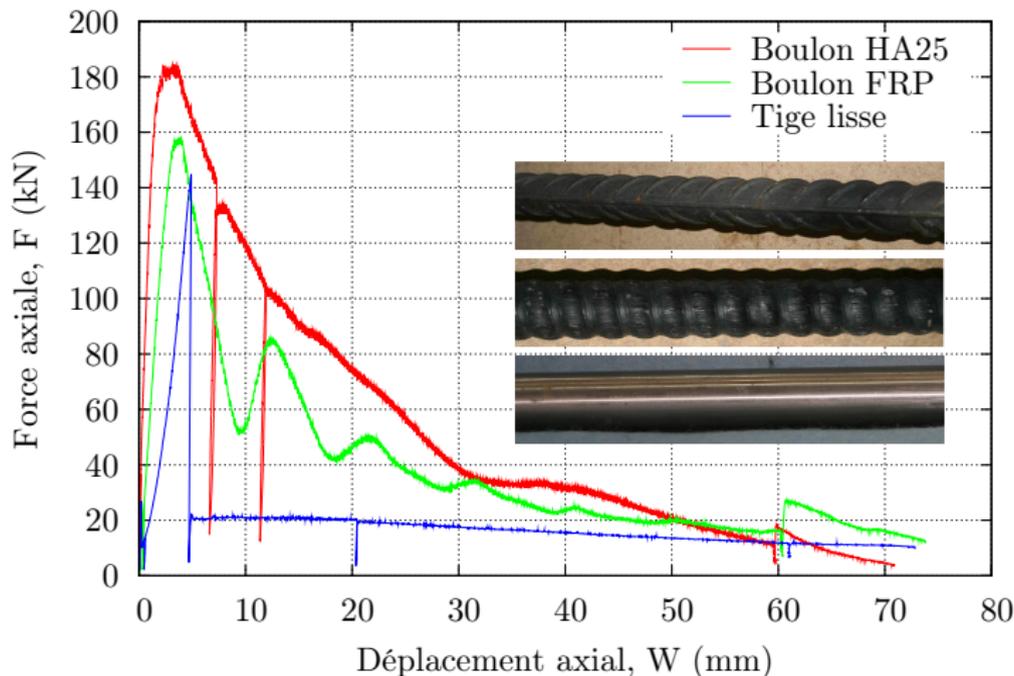


5 MPa



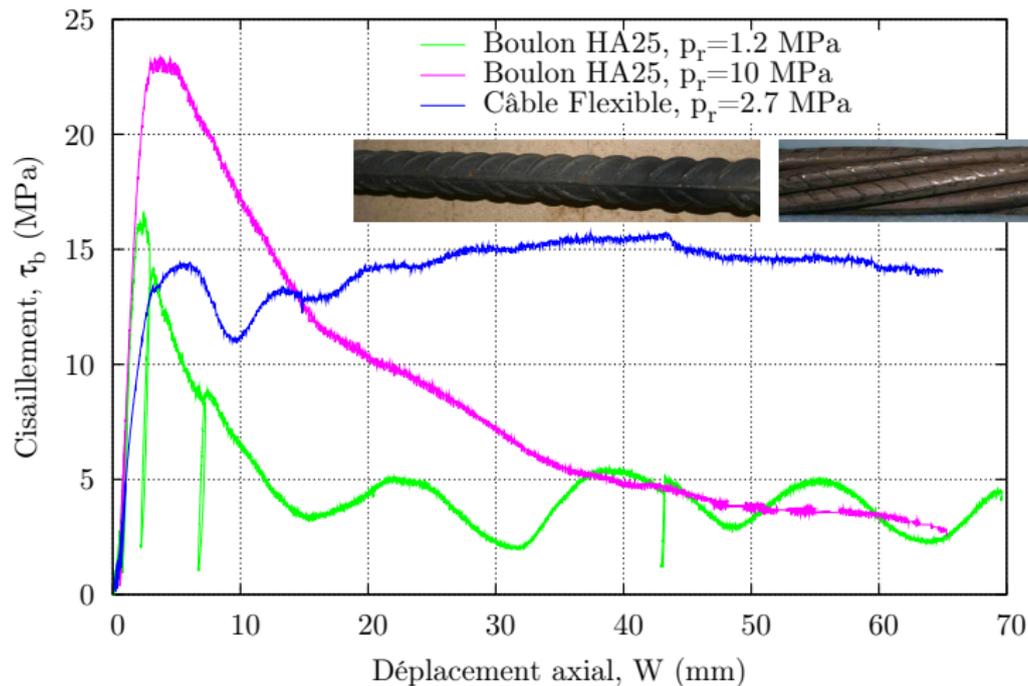
Résultats (III) : le profil de la barre se retrouve dans F

$L=90$ mm, $p_r=5$ MPa, résine, p_r constante



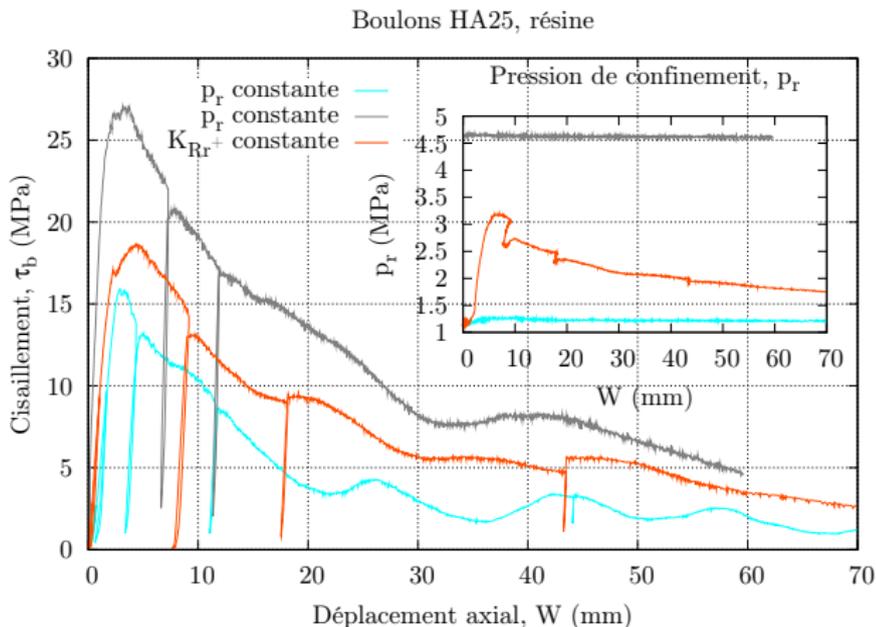
Résultats (III) : le profil de la barre se retrouve dans F

Comparaison boulon-câble. Scellement à la résine, p_r constante



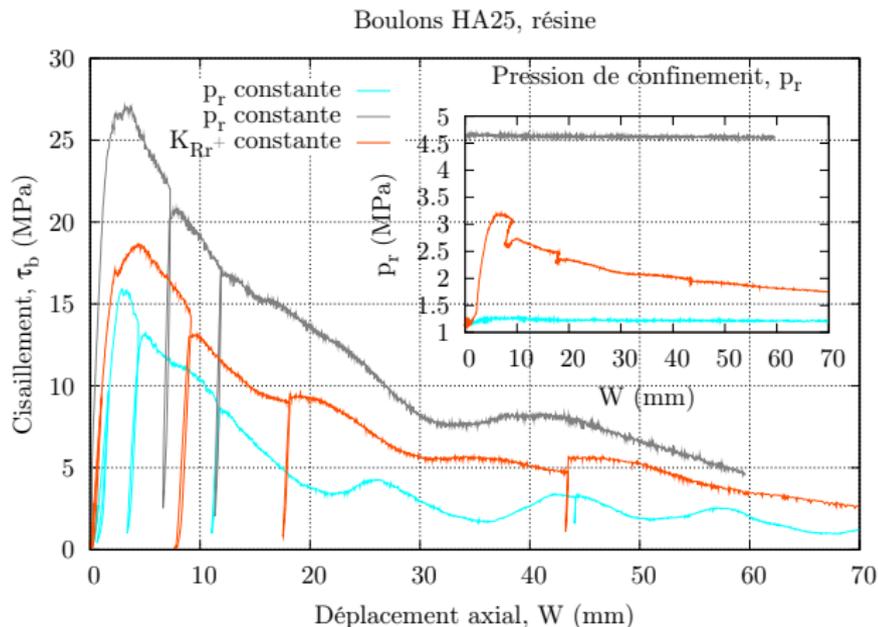
Résultats (IV) : influence des conditions aux limites

L'effet de p_r sur τ_b est maintenu lorsque p_r varie au cours de l'essai. Importance des effets radiaux.



Résultats (IV) : influence des conditions aux limites

L'effet de p_r sur τ_b est maintenu lorsque p_r varie au cours de l'essai. Importance des effets radiaux.



$$\tau_b(W)$$

↓ ?

$$\tau_b(W, p_b)$$

Plan

Introduction & état de l'art

Études théoriques & expérimentales

Modélisation

Étude théorique de l'interaction interface-matériaux environnants

Réponse normale

Réponse tangentielle

Étude expérimentale en laboratoire

Description de l'appareillage

Résultats

Méthode pour accéder à une loi d'interface

Importance des effets radiaux

Proposition d'un modèle semi-empirique

Conclusions et perspectives

But des essais d'arrachement

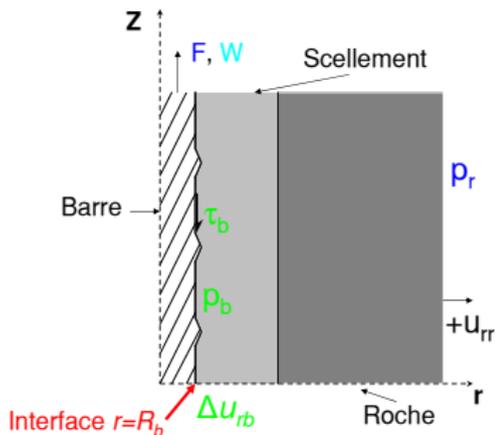
Variables mesurées

W F p_r

Deux directions :
tangentielle,
normale

Variables pertinentes

W τ_b Δu_{rb} p_b



But : trouver les relations
 $\tau_b (W, p_b)$ et $\Delta u_b (W, p_b)$

But des essais d'arrachement

Variables mesurées

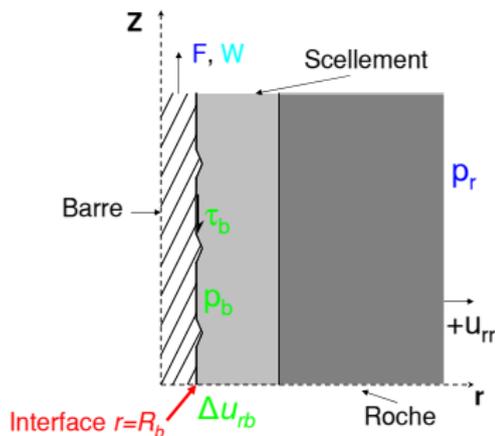
W

F

 p_r

Deux directions :
tangentielle,
normale

W

 τ_b Δu_{rb} p_b 

Variables pertinentes

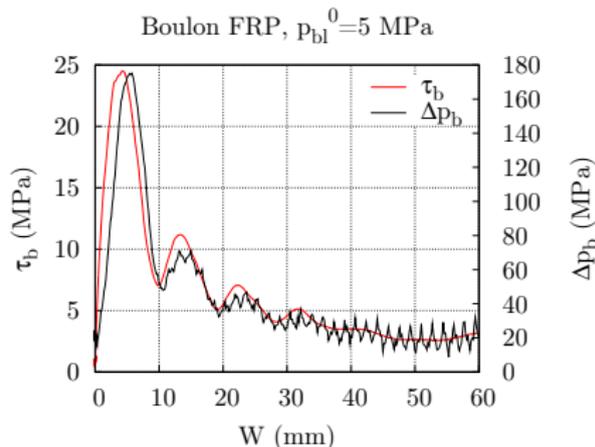
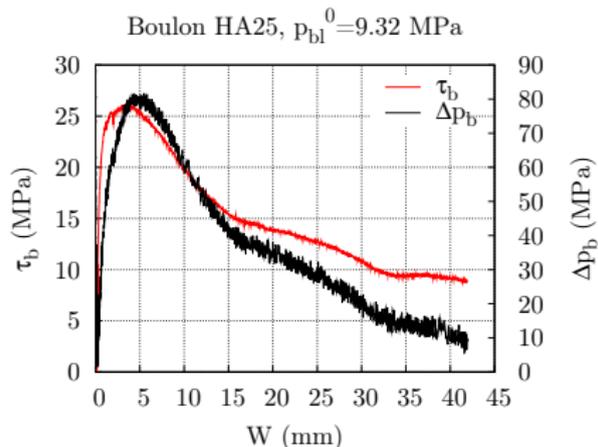
Déterminable :
nouvel outil
analytique

Imposé

Déterminables :
approche
radiale
classique

But : trouver les relations
 $\tau_b (W, p_b)$ et $\Delta u_b (W, p_b)$

Détermination de Δp_b et comparaison avec τ_b



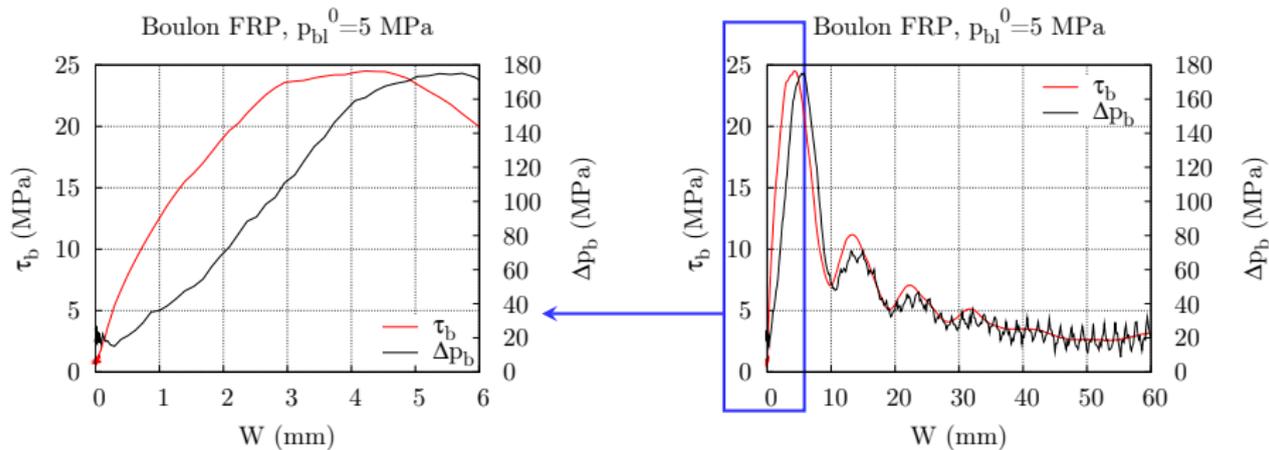
Remarques :

- ▶ Ressemblance entre $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ → proportionnalité ?

Détermination de τ_b : réponse tangentielle

Détermination de Δp_b : réponse normale

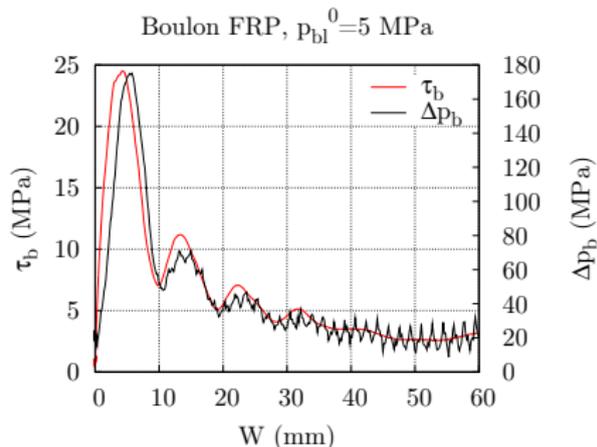
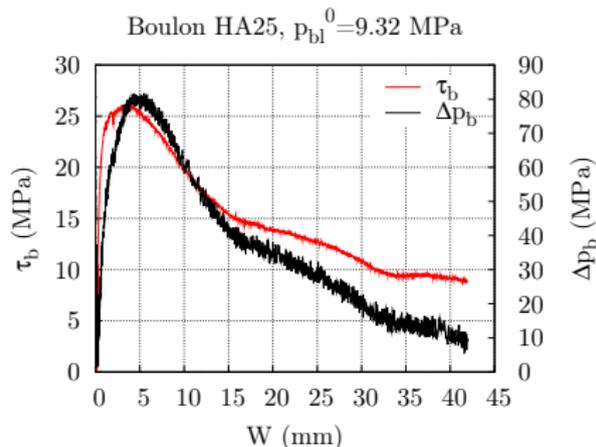
Détermination de Δp_b et comparaison avec τ_b



Remarques :

- ▶ Ressemblance entre $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ → proportionnalité ?
 - ▶ Δp_b commence à augmenter pour $W \simeq 0$
 - ▶ Premier pic de $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ décalés
- } développement du joint ?

Détermination de Δp_b et comparaison avec τ_b



Remarques :

- ▶ Ressemblance entre $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ → proportionnalité?
 - ▶ Δp_b commence à augmenter pour $W \simeq 0$
 - ▶ Premier pic de $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ décalés
 - ▶ Les pics suivants sont en phase
 - ▶ Profil du boulon reflété dans les oscillations
- } développement du joint ?
- } joint découplé ?

Décomposition semi-empirique de τ_b en deux parties

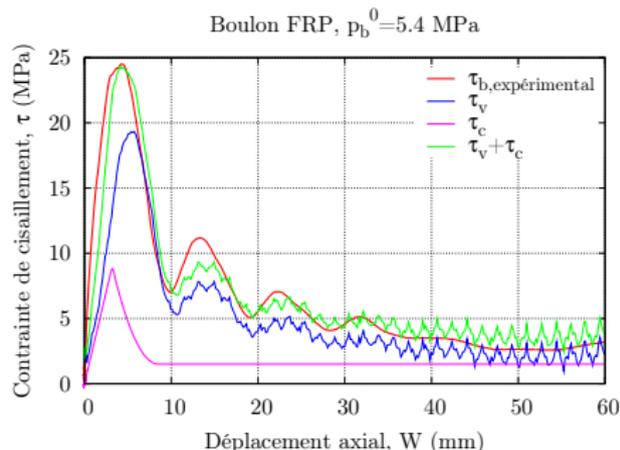
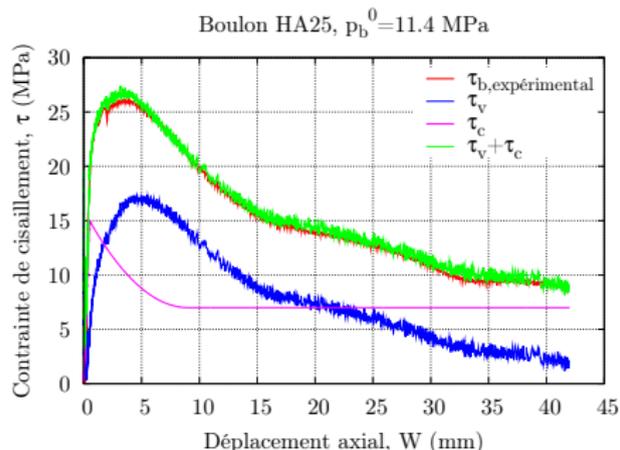
$$\tau_b(W, \Delta p_b) = \tau_v(\Delta p_b) + \tau_c(W)$$

- ▶ τ_v : partie proportionnelle à $\Delta p_b \rightarrow$ frottement
- ▶ τ_c : partie à pression constante \rightarrow adhésion, liaison mécanique

Décomposition semi-empirique de τ_b en deux parties

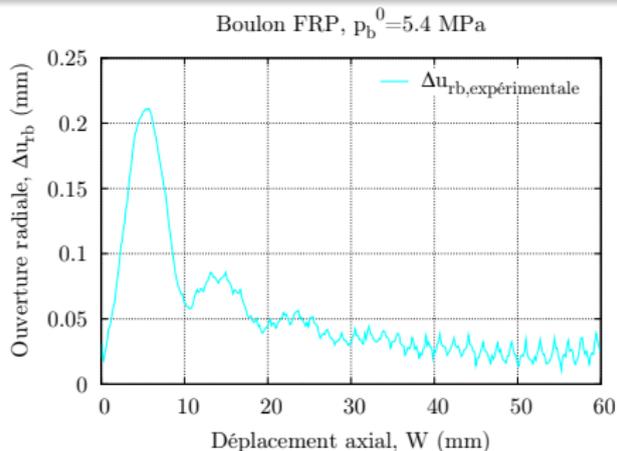
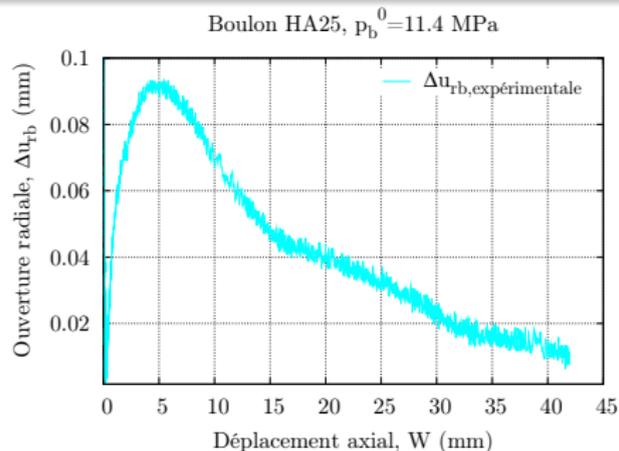
$$\tau_b(W, \Delta p_b) = \tau_v(\Delta p_b) + \tau_c(W)$$

- ▶ τ_v : partie proportionnelle à $\Delta p_b \rightarrow$ frottement
- ▶ τ_c : partie à pression constante \rightarrow adhésion, liaison mécanique



Le modèle s'ajuste bien aux résultats en laboratoire
Nombre de paramètres : 5

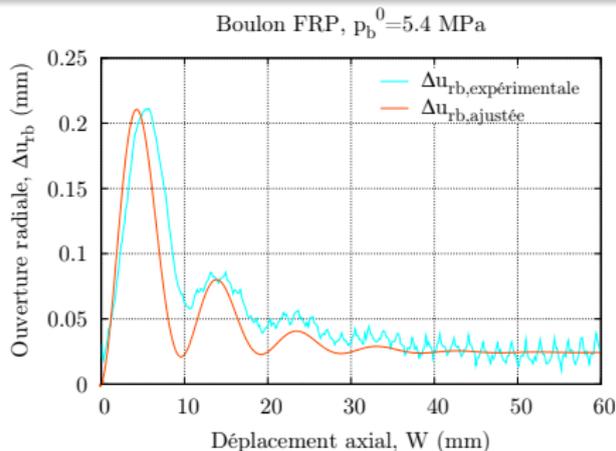
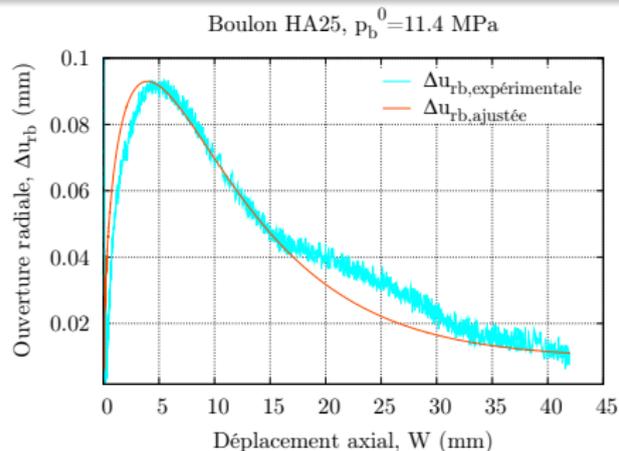
Obtention empirique de l'ouverture Δu_{rb}



Remarques :

- ▶ L'ouverture Δu_{rb} est dominée par le profil $\rightarrow \Delta u_{rb}(W)$

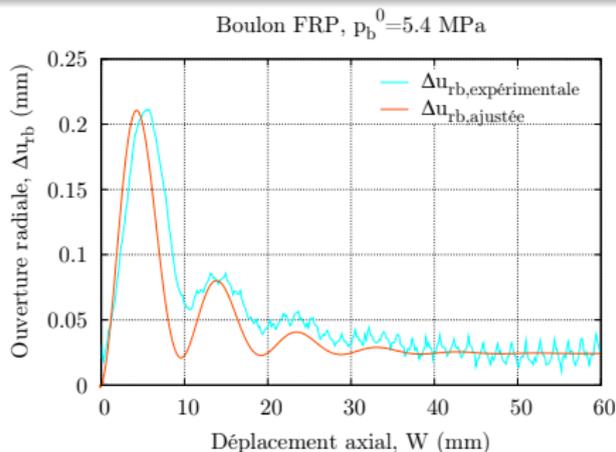
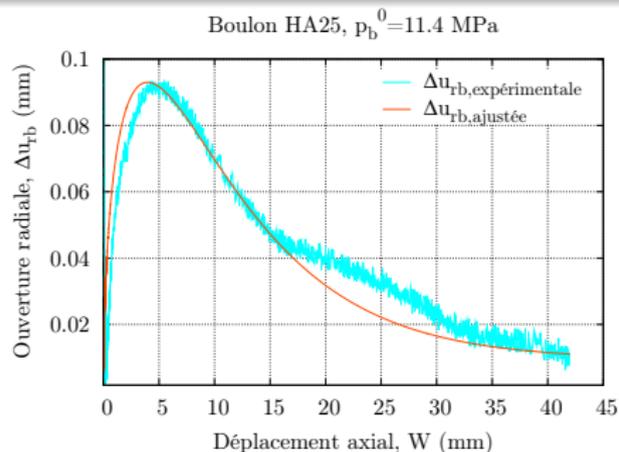
Obtention empirique de l'ouverture Δu_{rb}



Remarques :

- ▶ L'ouverture Δu_{rb} est dominée par le profil $\rightarrow \Delta u_{rb}(W)$
- ▶ Manque provisoire de données \rightarrow on suppose **pour l'instant** indépendance en p_b

Obtention empirique de l'ouverture Δu_{rb}



Remarques :

- ▶ L'ouverture Δu_{rb} est dominée par le profil $\rightarrow \Delta u_{rb}(W)$
- ▶ Manque provisoire de données \rightarrow on suppose **pour l'instant** indépendance en p_b

Le modèle s'ajuste assez bien aux résultats en laboratoire

Nombre de paramètres : 4

En résumé ...

Comparaison de $\tau_b(W)$ et $p_b(W)$

Formulation semi-empirique
pour décrire le comportement
de l'interface

Méthode pour l'obtention de
 $\tau_b(W, p_b)$ et $\Delta u_{rb}(W, p_b)$

Plan

Introduction & état de l'art

- Études théoriques & expérimentales
- Modélisation

Étude théorique de l'interaction interface-matériaux environnants

- Réponse normale
- Réponse tangentielle

Étude expérimentale en laboratoire

- Description de l'appareillage
- Résultats

Méthode pour accéder à une loi d'interface

- Importance des effets radiaux
- Proposition d'un modèle semi-empirique

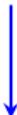
Conclusions et perspectives

Conclusions

- ▶ Méthode analytique pour relier variables observables et pertinentes → comportement tangentiel et radial de l'interface
- ▶ Étude expérimentale → essais d'arrachement :
 - ▶ emploi et amélioration d'un nouveau banc d'essais
 - ▶ observation de l'effet de L , p_r , type et profil de la barre, conditions aux limites
 - ▶ mise au point d'un dispositif pour tester les câbles sans dévissage
- ▶ Méthode d'obtention de la loi d'interface :
 - ▶ prise en compte des effets radiaux : comparaison de τ_b et p_b
 - ▶ formulation semi-empirique pour un modèle de τ_b et Δu_{rb}

Perspectives

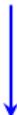
- ▶ La méthode pour l'obtention de la loi intrinsèque $\tau_b(W, \rho_b)$ et $\Delta u_{rb}(W, \rho_b)$ est applicable à d'autres boulons et câbles à ancrage réparti



Détermination de la loi de comportement pour chaque combinaison
barre-scellement

Perspectives

- ▶ La méthode pour l'obtention de la loi intrinsèque $\tau_b(W, \rho_b)$ et $\Delta u_{rb}(W, \rho_b)$ est applicable à d'autres boulons et câbles à ancrage réparti



Détermination de la loi de comportement pour chaque combinaison
barre-scellement

- ▶ Implémentation de la loi d'interface dans un code de calcul



Prédiction de la réponse du soutènement passif dans des ouvrages
réels

Merci de votre attention



Bibliographie

- ▶ Blanco Martín L., Tijani M., Hadj-Hassen F. A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests. *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 749 - 755.
- ▶ Blanco Martín L., Hadj-Hassen F., Tijani M. A new experimental and analytical study of fully grouted rockbolts. *Proceedings of the 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, 26-29 June 2011*.
- ▶ Blanco Martín L., Tijani M., Hadj-Hassen F., Noiret A. Assessment of the bolt-grout interface behaviour of fully grouted rockbolts from laboratory experiments under axial loads. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 63, 50-61.
- ▶ Blanco Martín L. Theoretical and experimental study of fully grouted rockbolts and cablebolts under axial loads. *PhD thesis MINES-ParisTech*, 2012.