

Document DIR Méditerranée

Opération Cadoroc
Journée de restitution

Aix en Provence 10 octobre 2017

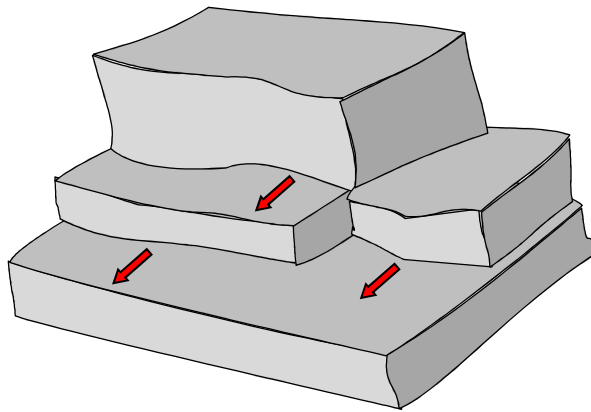
**Comportement
des ancrages passifs
Expérimentations
et applications**

Jean-François Serratrice

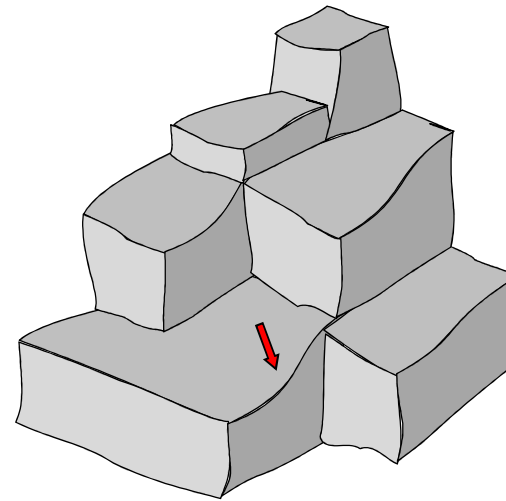
- Principes généraux
- Analyse à l'état limite
- Analyses en déplacement

Principes généraux des études

- ✓ **Connaissance des sites**
 - Reconnaissances du massif rocheux, analyse structurale
- ✓ **Mécanismes de rupture des massifs**
 - Glissement plan, glissement dièdre
 - Autres (basculement, flambement, décrochement, ...)

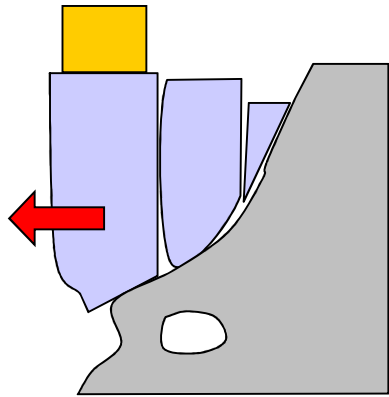


Glissement plan

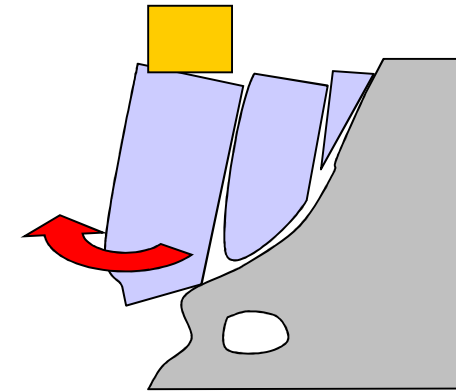


Glissement dièdre

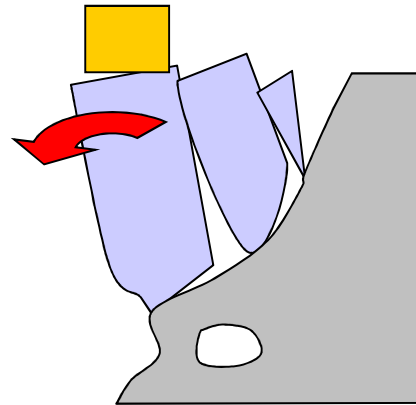
Mécanismes d'instabilité



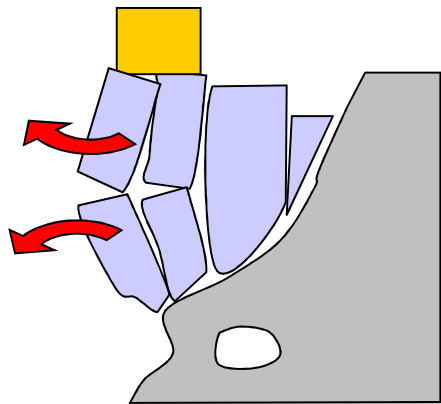
Glissement translationnel



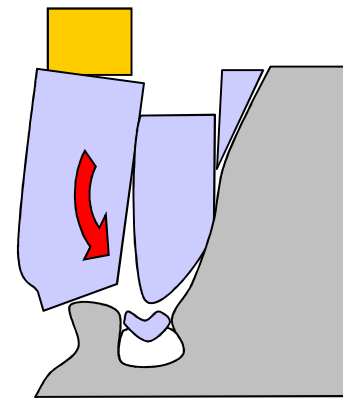
Glissement rotationnel



Basculement



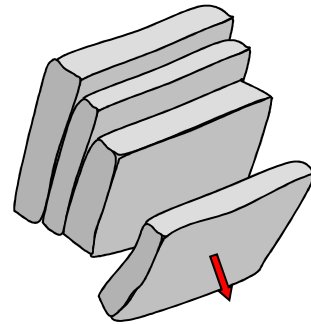
Flambement



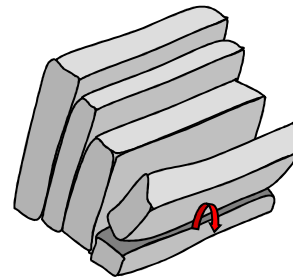
Effondrement

Mécanismes d'instabilité

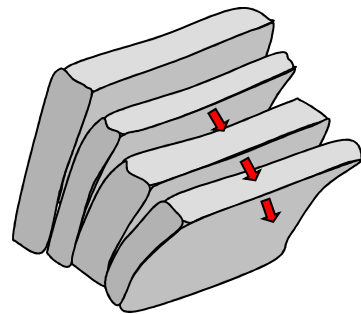
// Stratification



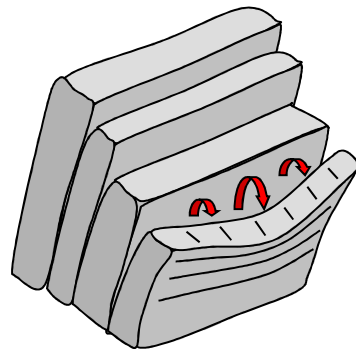
Décrochement



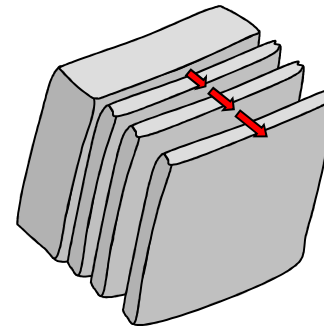
Basculement



Fauchage

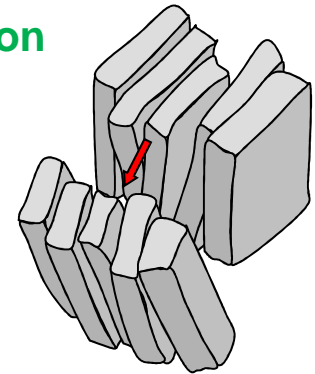


Déversement

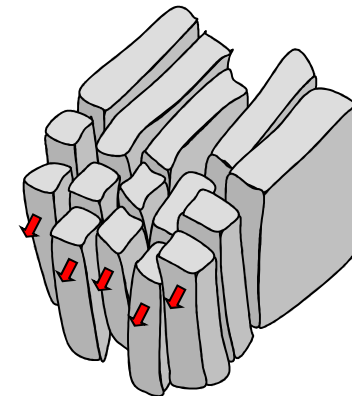


Décompression

⊥ Stratification



Décrochement

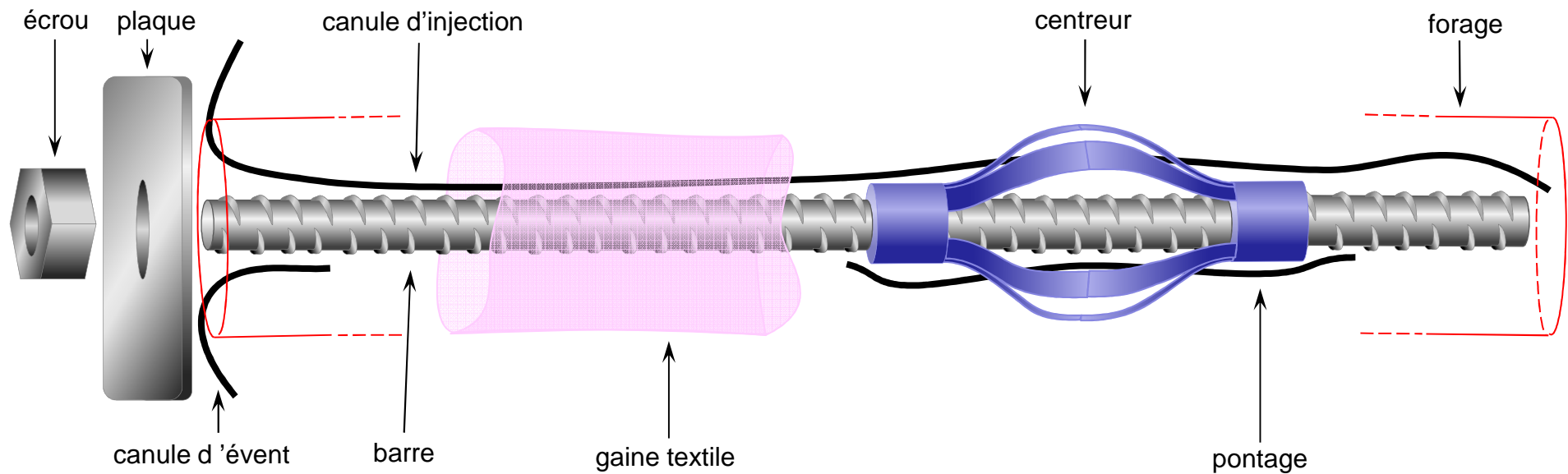


Déconfinement
Fragmentation

Éléments technologiques

✓ Boulons

- Diamètre et longueur des boulons
- Forage (diamètre, longueur)
- Coulis de scellement, centreurs, gaine textile
- Accessoires (plaque d'appui, écrou, cales, ...)



Conception du dispositif de boulonnage

Proposer les caractéristiques de base du dispositif

*Faisabilité
Sécurité du chantier
Avoisinants
Phasage, co-activité*

✓ **Renforcement des massifs**

- Nature des barres et leur diamètre
- Leur direction en azimut et plongement, leur profondeur
- Leur nombre (ou leur densité en paroi)

✓ **Fixation des dispositifs de protection contre les chutes de blocs**

- Nature des barres et leur diamètre
- Leur direction en azimut et plongement, leur profondeur
- Leur équipement en tête

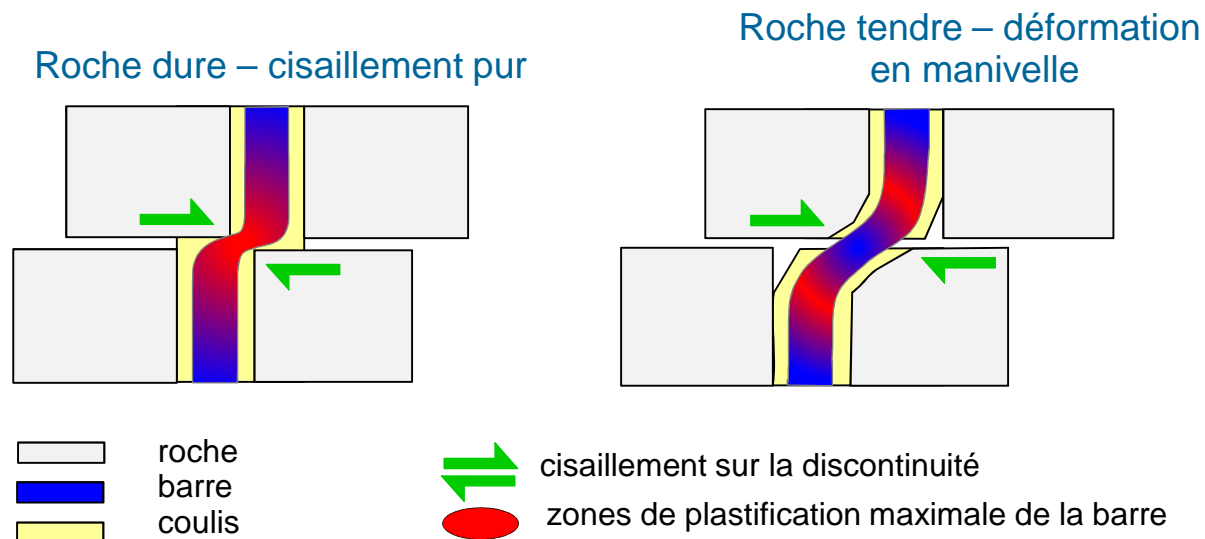
Comportement individuel d'un boulon

✓ Arrachement

- Sollicitation de l'acier, du coulis et de la roche
- Sollicitation des interfaces barre-coulis et coulis-roche

✓ Cisaillement - traction

- Deux modes de ruptures extrêmes
- Cisaillement pur (ou cisaillement dominant)
- Flexion, traction, cisaillement



Calcul du dispositif de renforcement

✓ Principe du calcul, limitations

- Bloc en glissement plan sur une discontinuité plane
- Calcul à l'équilibre limite

✓ Analyse de la stabilité

- A l'état naturel
- Après renforcement

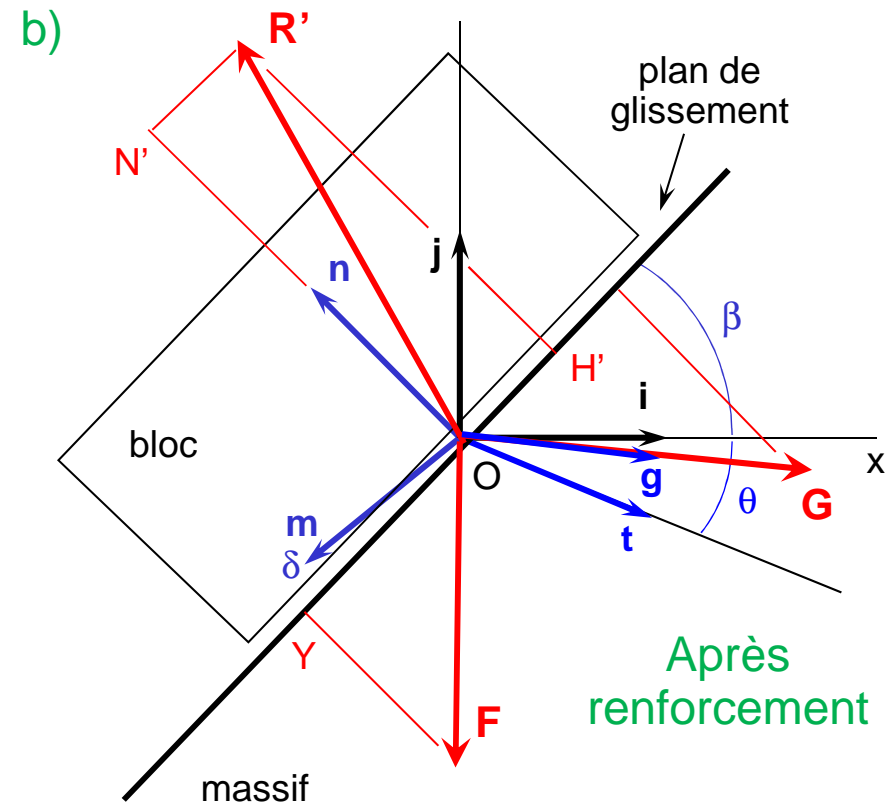
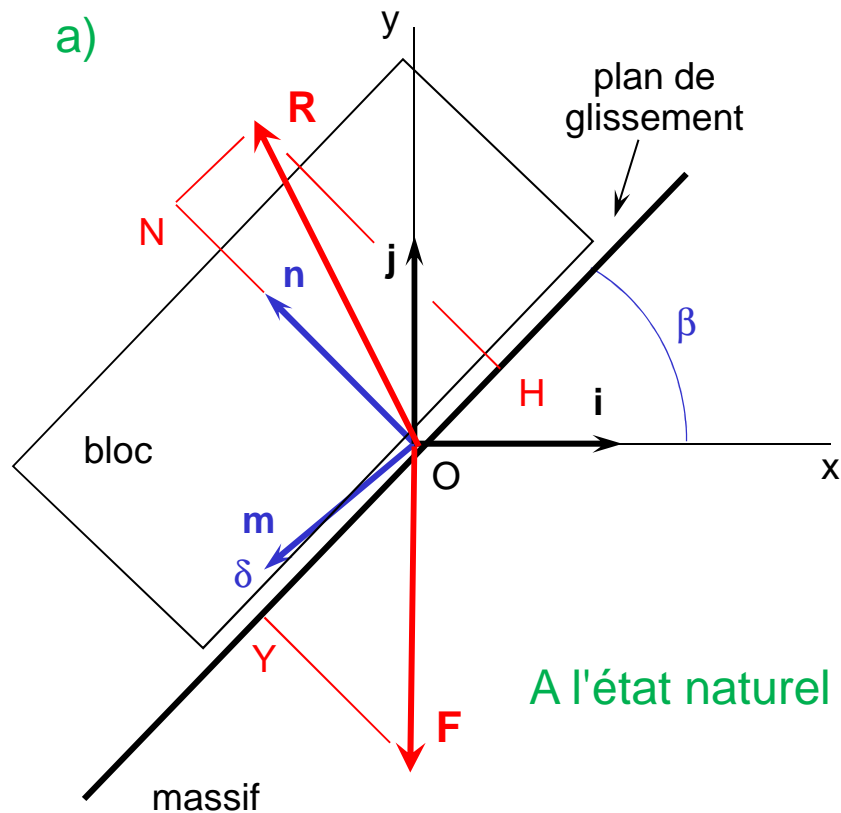
✓ Analyse du renforcement

- Recensement des efforts statiques et sismiques
- Equilibre sur la discontinuité – Loi de Coulomb
- Calcul du renforcement

Trois étapes

Calcul du dispositif de renforcement

✓ Mécanisme de glissement et efforts mobilisés



F Résultante des efforts extérieurs
R Réaction du massif sur le bloc
m vecteur mouvement (avec dilatace)

t direction du boulon
G Effort de boulonnage
R' nouvelle réaction
g Direction de l'effort de boulonnage

Calcul du dispositif de renforcement

✓ Méthode de calcul du renforcement

grandeur	unité	expression
Calcul du coefficient de sécurité naturel		
composante N normale à la direction du mouvement	(kN)	$N = F \cos(\alpha + \beta - \delta)$
composante Y des efforts moteurs	(kN)	$Y = F \sin(\alpha + \beta - \delta)$
composante H des efforts résistants	(kN)	$H = c S + N \operatorname{tg} \phi$
coefficient de sécurité naturel F_{nat}	()	$F_{nat} = \frac{H}{Y}$
Calcul de la contribution du boulon dans la direction du mouvement		
Terme ^(a) m	()	$m = \cot g(\omega + \delta)$
angles ω et ψ	(°)	$\omega = \frac{\pi}{2} - \beta - \theta$ et $\tan \psi = \frac{m}{\lambda^2}$
module de l'effort dans une barre G	(kN)	$G = N_e \sqrt{\frac{1 + \frac{m^2}{\lambda^4}}{1 + \frac{m^2}{\lambda^2}}}$
contribution d'une barre C_b	(kN)	$C_b = G [\cos(\omega + \psi + \delta) \operatorname{tg} \phi + \sin(\omega + \psi + \delta)]$
Calcul du nombre de barres		
n nombre de boulons	-	$n = \Lambda^{\text{sup}} \left[\frac{F_{des} Y - H}{C_b} \right]$
(a) : à ne pas confondre avec le vecteur mouvement m		

Un guide méthodologique

Guide méthodologique

Protection contre les instabilités rocheuses

Dimensionnement et exécution des boulons

Avant-propos

Chapitre 1 - Introduction

Chapitre 2 - Principe d'utilisation des boulons

- 2.1 - Cas d'utilisation courante des boulons
- 2.2 - Comportement individuel d'un boulon
- 2.3 - Comportement d'un dispositif de boulons

Chapitre 3 - Études et conception d'un dispositif de boulonnage

- 3.1 - Principes généraux des études
- 3.2 - Éléments technologiques concernant les boulons

Chapitre 4 - Calcul du dispositif de renforcement

- 4.1 - Renforcement d'un bloc isolé en glissement plan
- 4.2 - Boulon sollicité en tête
- 4.3 - Application des Eurocodes au calcul des boulons
- 4.4 - Exemple d'application
- 4.5 - Les études

Chapitre 5 - Matériaux constitutifs des boulons

- 5.1 - Choix des aciers
- 5.2 - Choix des ciments et produits de scellement
- 5.3 - Choix des accessoires
- 5.4 - Anticorrosion des aciers

Chapitre 6 - Réalisation du dispositif de renforcement

- 6.1 - Principaux aspects pratiques
- 6.2 - Règles d'ordre technologique
- 6.3 - Méthodes de foration des trous
- 6.4 - Éléments de phasage de l'exécution d'un boulon
- 6.5 - Éléments d'exécution du dispositif de renforcement passif
- 6.6 - Éléments de contrôle
- 6.7 - Éléments d'auscultation
- 6.8 - Éléments de l'assurance qualité
- 6.9 - Réception des ouvrages - Récolement

Bibliographie

Apport des données expérimentales

✓ Essais de cisaillement du CETE de Lyon

- Machine de cisaillement de grande capacité

D'après Bidaut et al. (2006)

- Simulation des efforts d'ancrages à la rupture
- Calculs en déplacement

✓ Planche expérimentale IFSTTAR

- Site d'essais de Montagnole

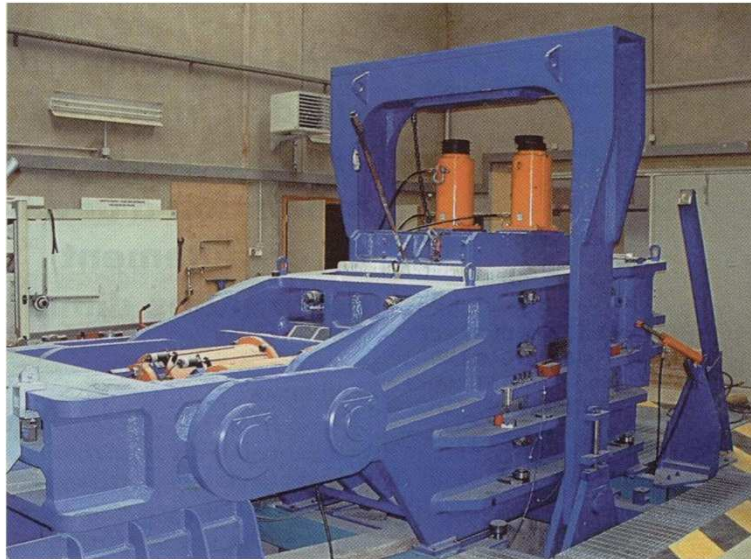
D'après Duc An Ho (2017)

- Calculs au module de réaction axial

Essais de cisaillement du CETE de Lyon

Machine de cisaillement de grande capacité

✓ Dispositif expérimental



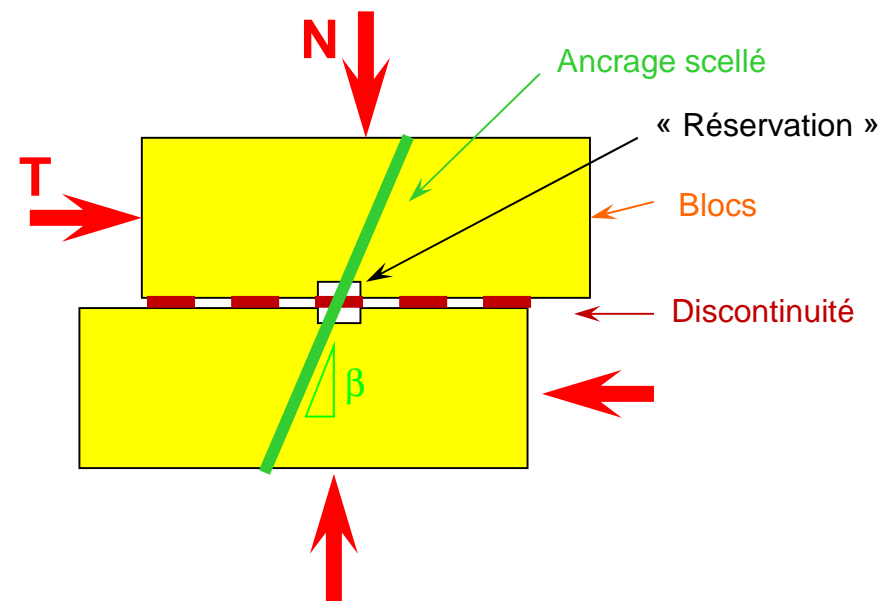
Effort normal maximal 2 MN
Effort de cisaillement maximal $2 \times 2,5$ MN

Longueur 1,5 m
Largeur 1 m
Hauteur $2 \times 0,6$ m

N effort normal
T effort de cisaillement

- Paramètres

diamètre de la barre, inclinaison,
épaisseur de la discontinuité

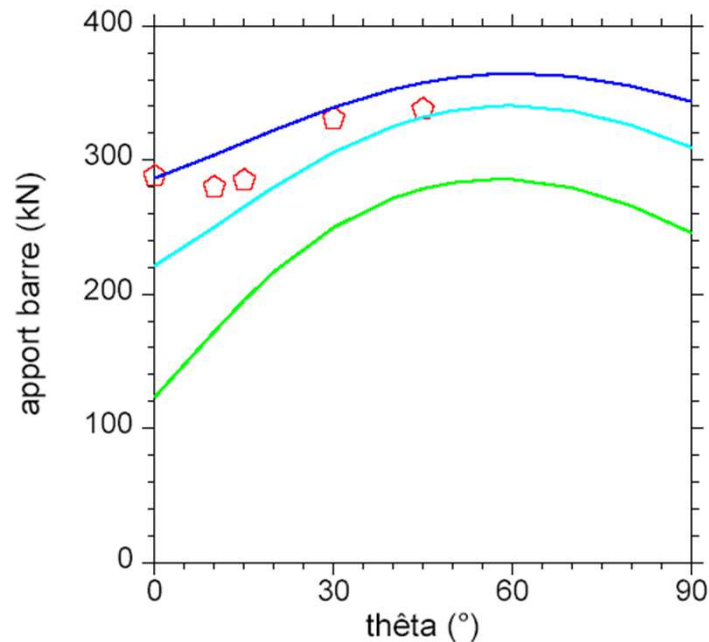


D'après Bidaut et al. (2006)

Simulation des ancrages à la rupture

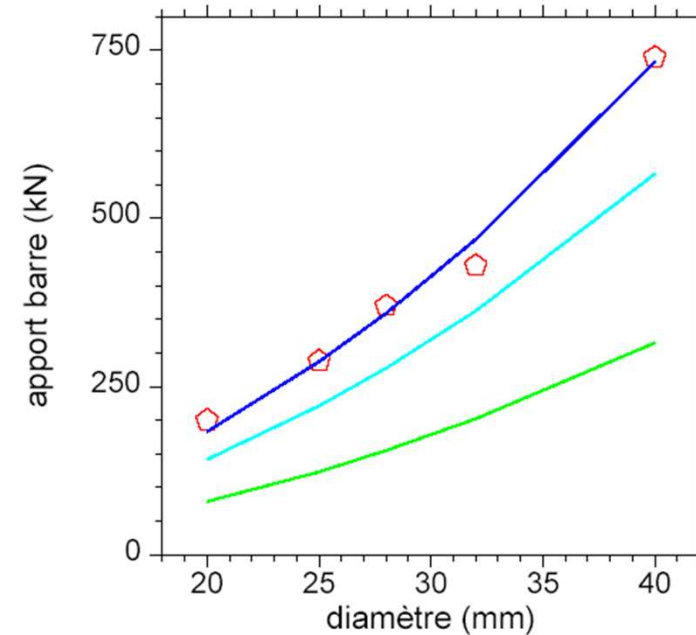
✓ Calcul à l'état limite / résultats expérimentaux

Influence de l'orientation des barres
angle θ entre la normale et la barre



- ◇ ◇ Essais de cisaillement
- Sigma_{ae} = 500 MPa Lambda = 2
- Sigma_{ae} = 630 MPa Lambda = 1,4
- Sigma_{ae} = 700 MPa Lambda = 1,2

Influence du diamètre des barres



Trois couples de paramètres :

$$\lambda = 2,0 \quad \sigma_a = 500 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1,4 \quad \sigma_a = 630 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1,2 \quad \sigma_a = 700 \text{ MPa}$$

Calcul des ancrages en déplacement

✓ Une méthode numérique

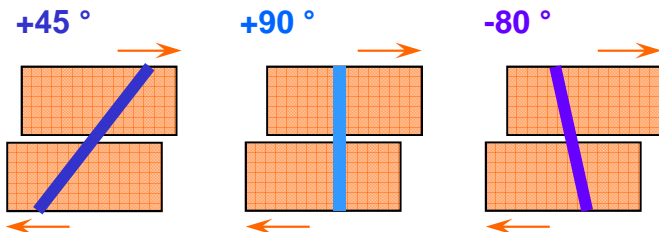
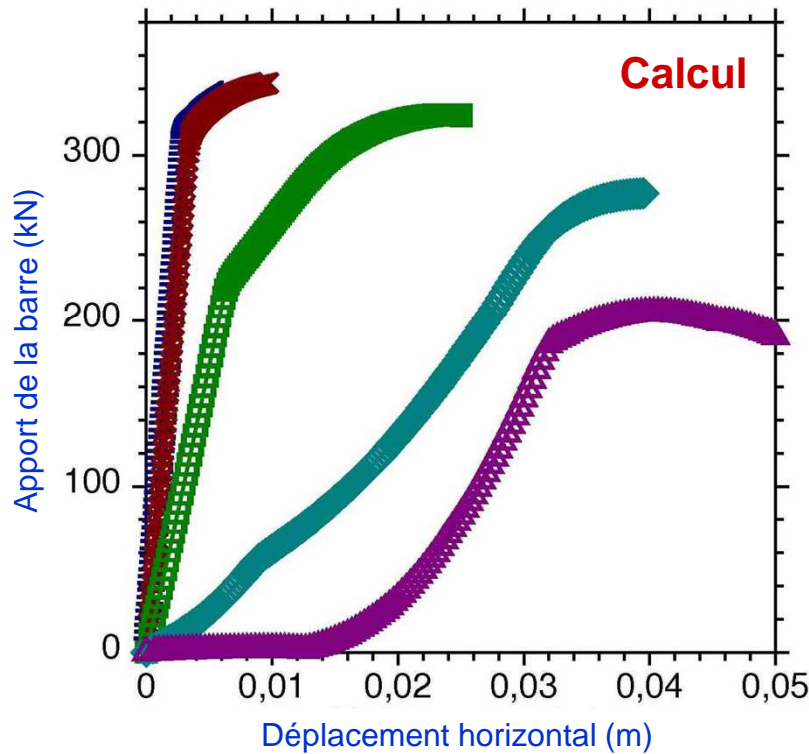
- Théorie des poutres
- Discrétisation de la barre en éléments
- Matrice de raideur par élément construite à partir des relations entre le torseur des efforts (M_i, N_i, T_i) et les déplacements (u_i, v_i, ω_i) aux nœuds
- Comportement élasto-plastique du scellement fondé sur des relations empiriques
- Résolution numérique

✓ Trois modes de sollicitations

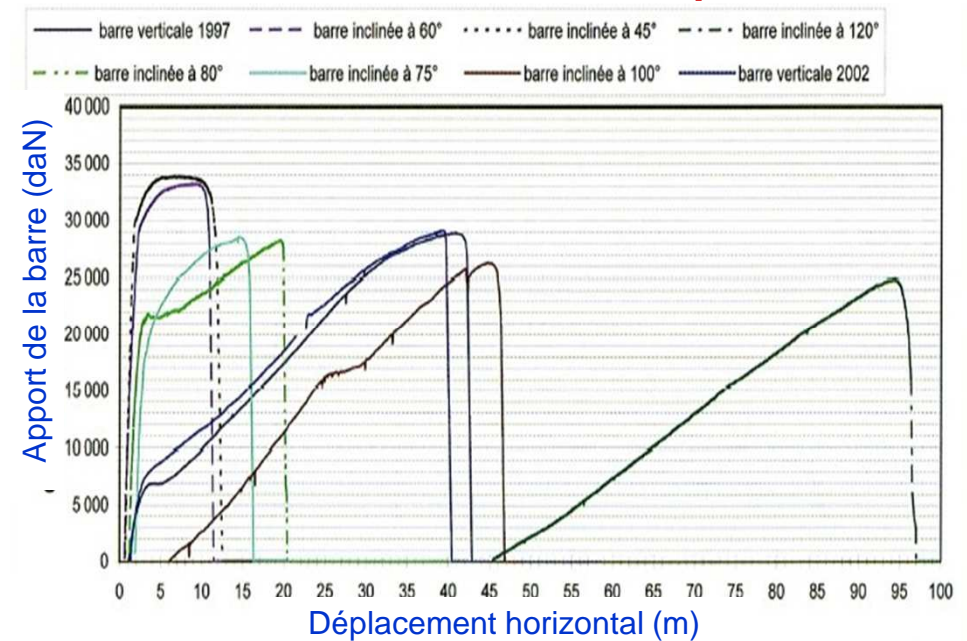
- Efforts de traction et de cisaillement en tête
- Déformation continue imposée par le massif (tunnel)
- Cisaillement par une discontinuité

Calcul des ancrages en déplacement

✓ Influence de l'inclinaison des barres



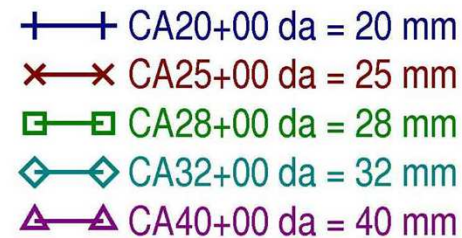
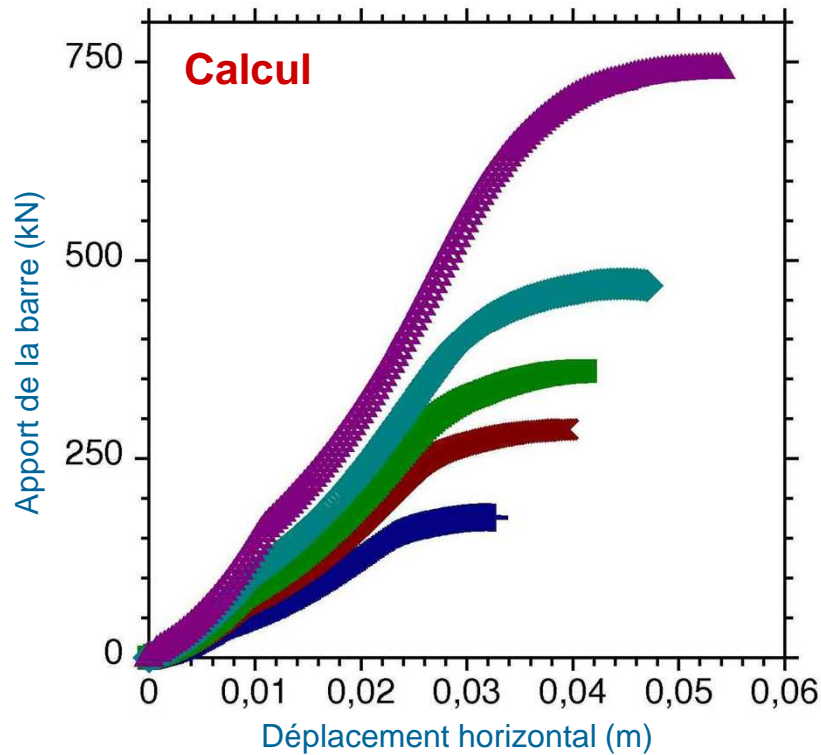
Données expérimentales



D'après Bidaut et al. (2006)

Calcul des ancrages en déplacement

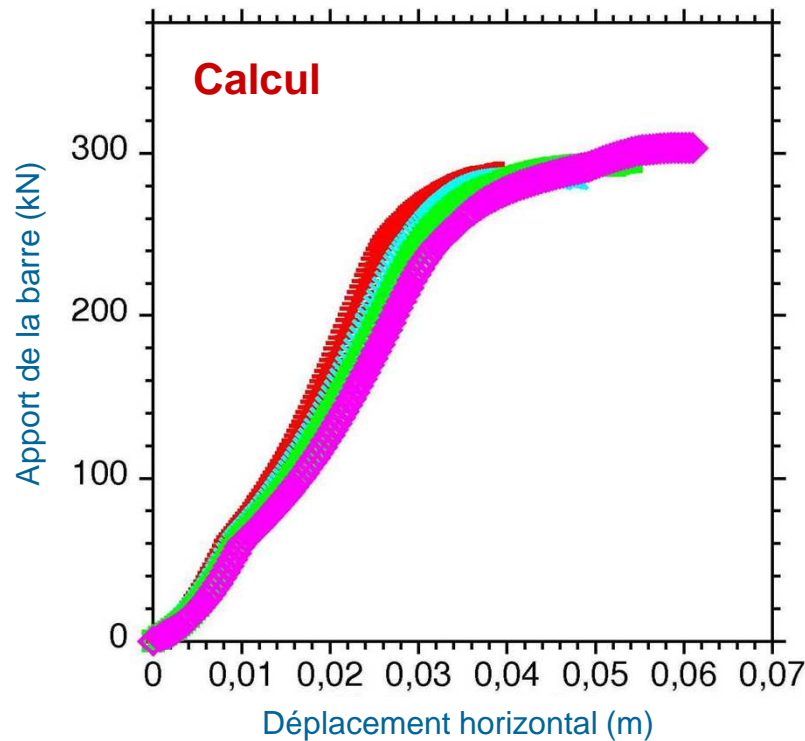
✓ Influence du diamètre de la barre



D'après Bidaut et al. (2006)

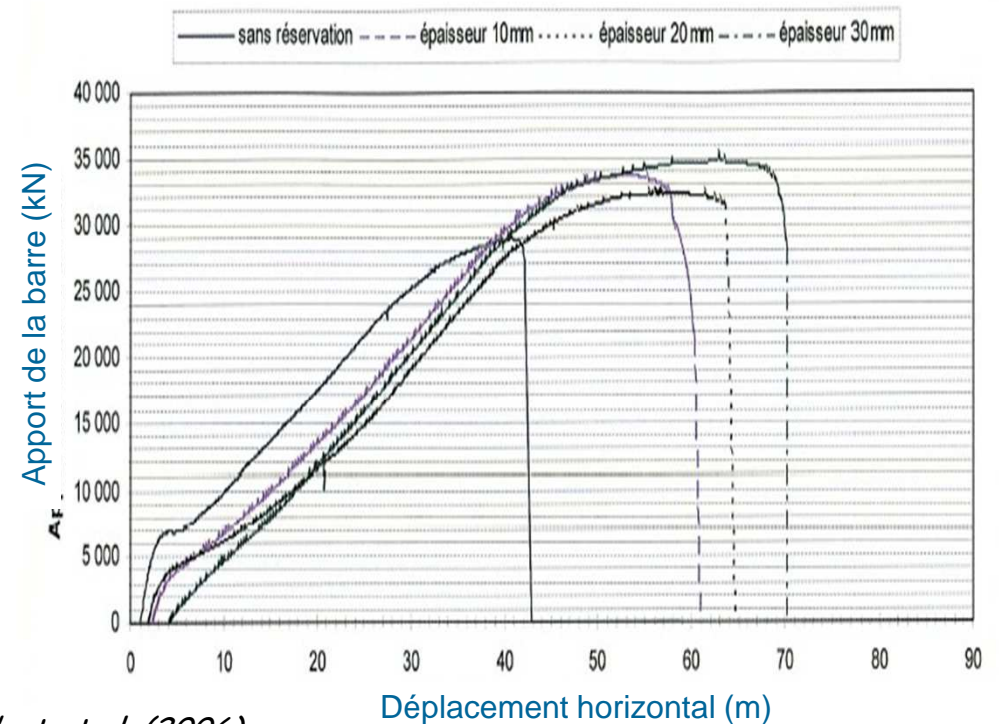
Calcul des ancrages en déplacement

✓ Influence de l'épaisseur de la discontinuité



- + CA25+00 Pas de réservation
- x CA25+00R1 Réservation 10 mm
- CA25+00R2 Réservation 20 mm
- ◇ CA25+00R3 Réservation 30 mm

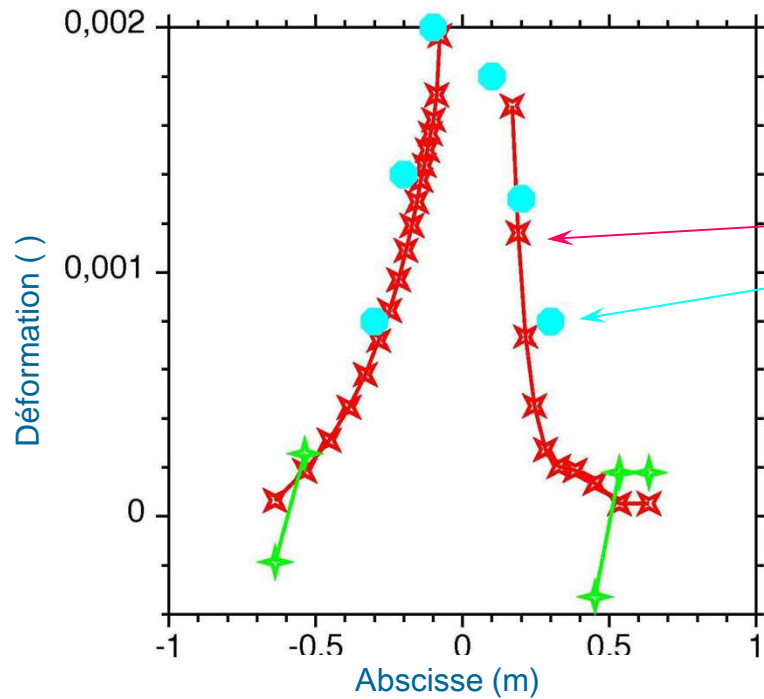
**Données
expérimentales**



D'après Bidaut et al. (2006)

Calcul des ancrages en déplacement

✓ Déformation de la barre



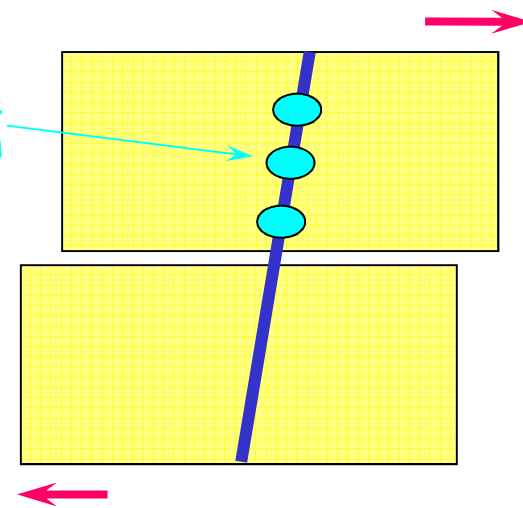
**Données expérimentales
et réponses calculées**

- ✖ CA25+10 eps a
- ✚ CA25+10 gam a
- CA25+10-defo déformations mesurées

Déformations calculées

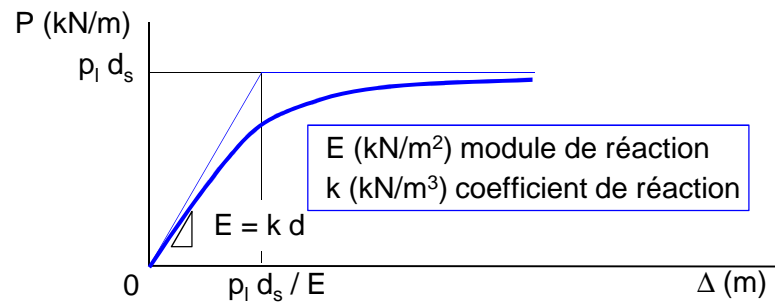
Déformations mesurées

Jauges de déformation



Calculs au module de réaction

✓ Lois de réactions latérales et axiales



- Combinaison des actions latérales et axiales

$$P_y = E_s \Delta y$$
$$P_x = G_s \Delta x$$

✓ Calage sur des essais de la littérature

- Pieux, micro-pieux, ancrages, parois clouées

✓ Une explication globale du mécanisme d'arrachement

- Rôle des principaux facteurs
- Comportement de la longueur scellée de la barre

Planche expérimentale IFSTTAR

Site d'essais de Montagnole

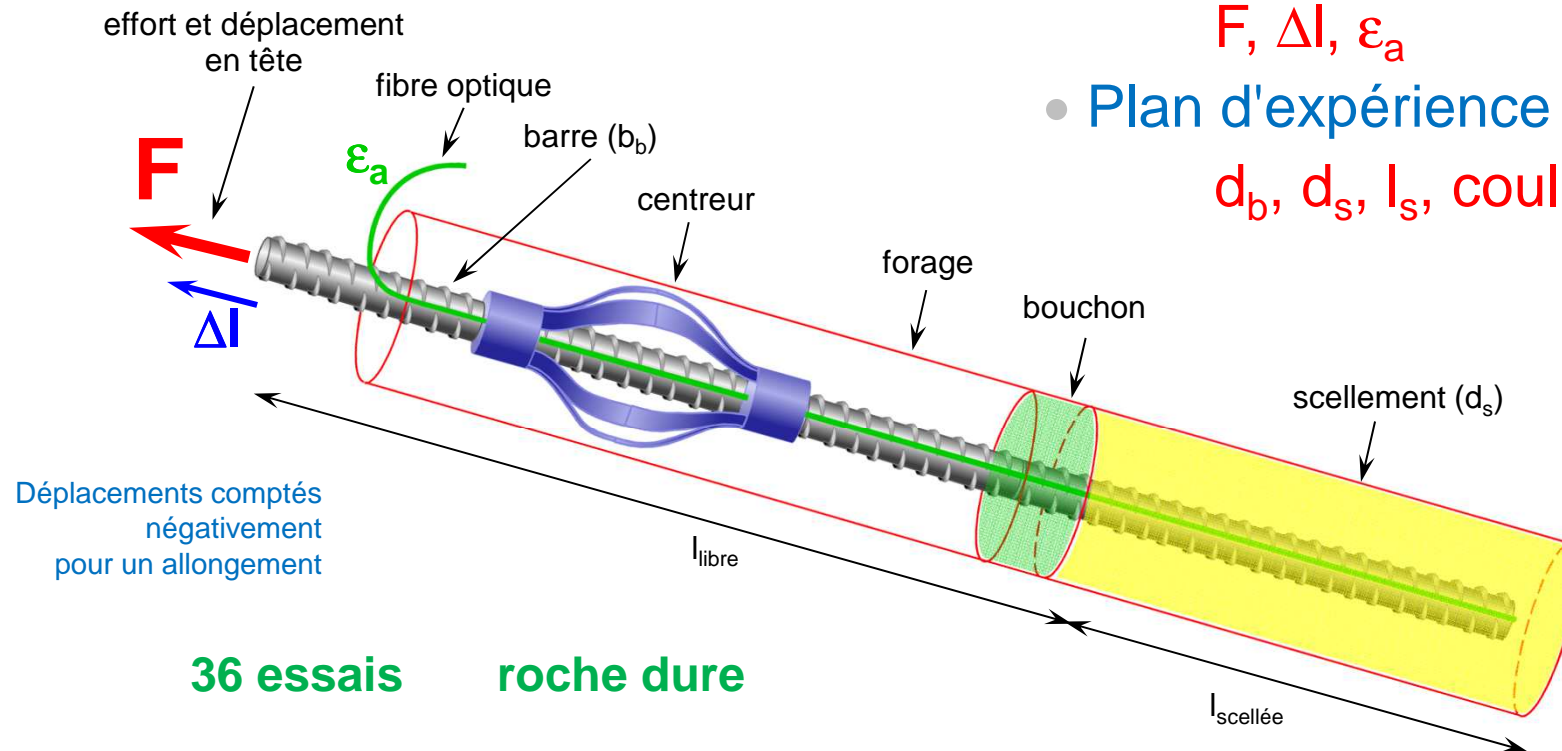
✓ Dispositif expérimental

- Boulons scellés au coulis
- Instrumentation

$F, \Delta l, \varepsilon_a$

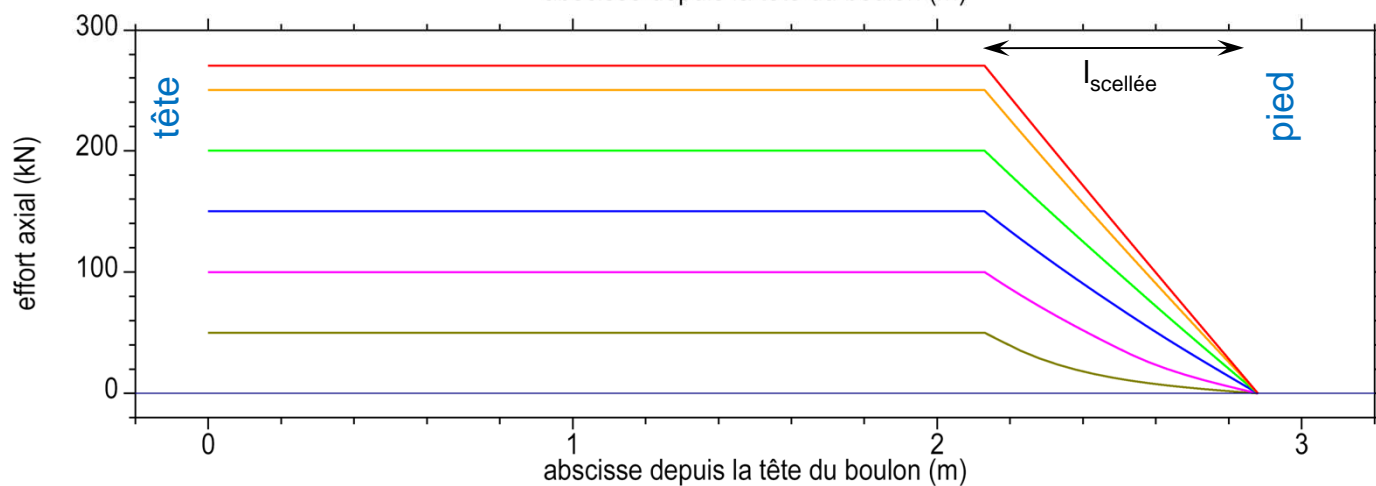
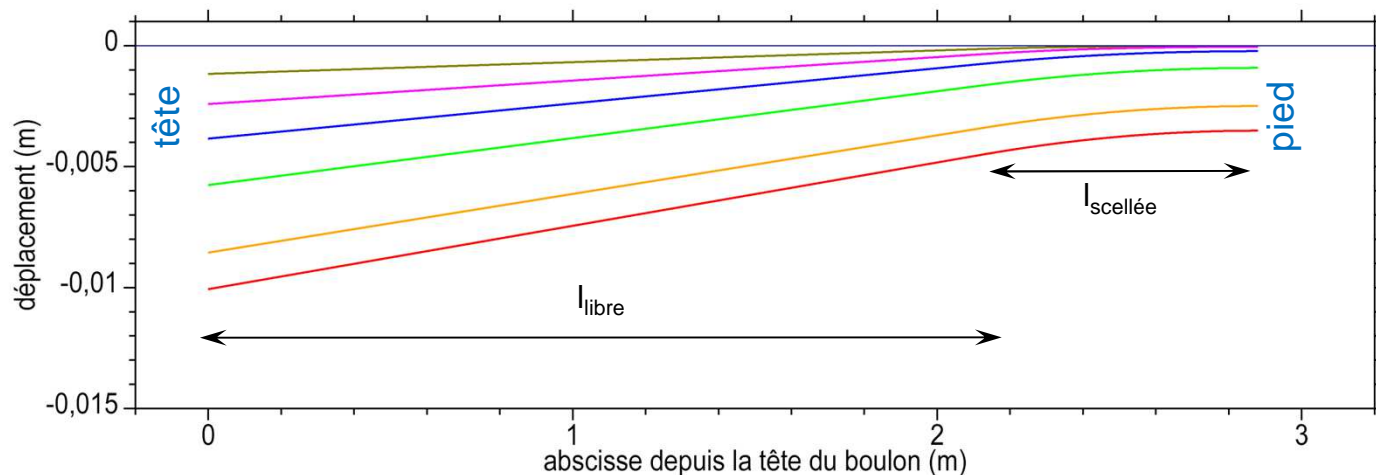
- Plan d'expérience

$d_b, d_s, l_s, \text{coulis}, \dots$



Calculs au module de réaction axial

✓ Déplacement axial et effort axial / abscisse



— essai 3.1 effort de 50 kN
— essai 3.1 effort de 100 kN

— essai 3.1 effort de 150 kN
— essai 3.1 effort de 200 kN

— essai 3.1 effort de 250 kN
— essai 3.1 effort de 270 kN

Essai 3.1

$D_b = 25 \text{ mm}$

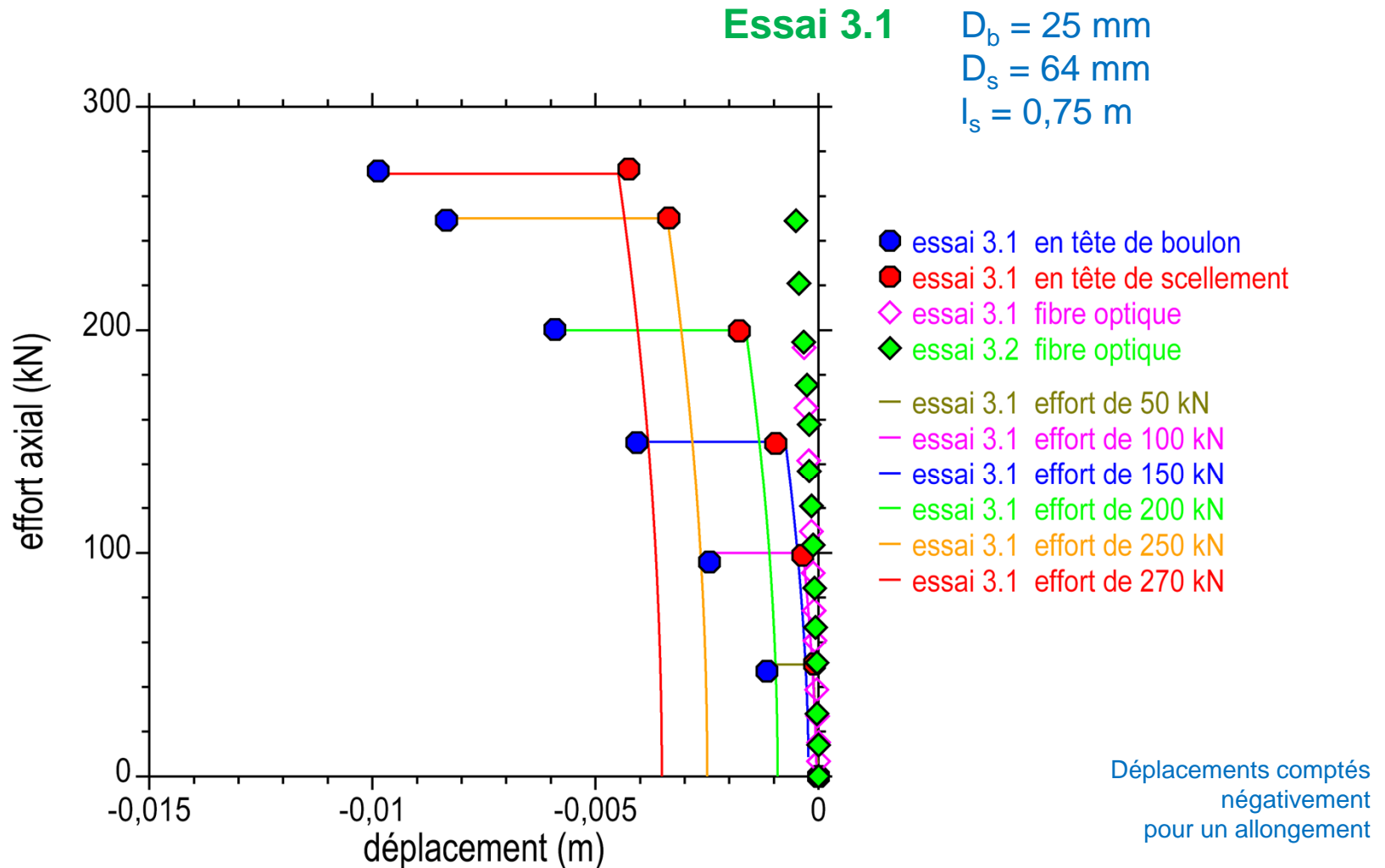
$D_s = 64 \text{ mm}$

$l_s = 0,75 \text{ m}$

Déplacements comptés
négativement
pour un allongement

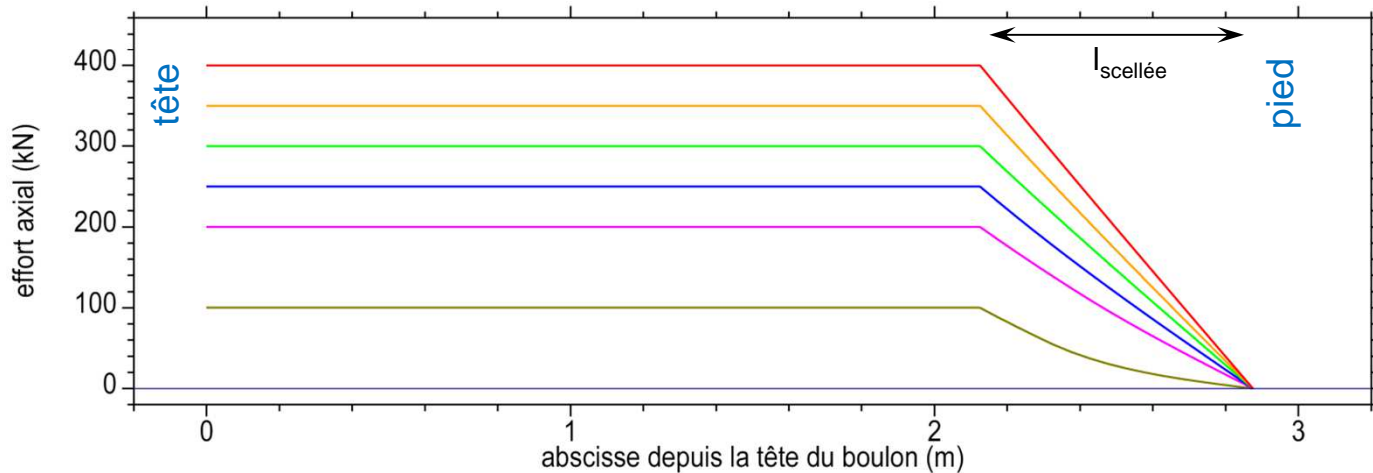
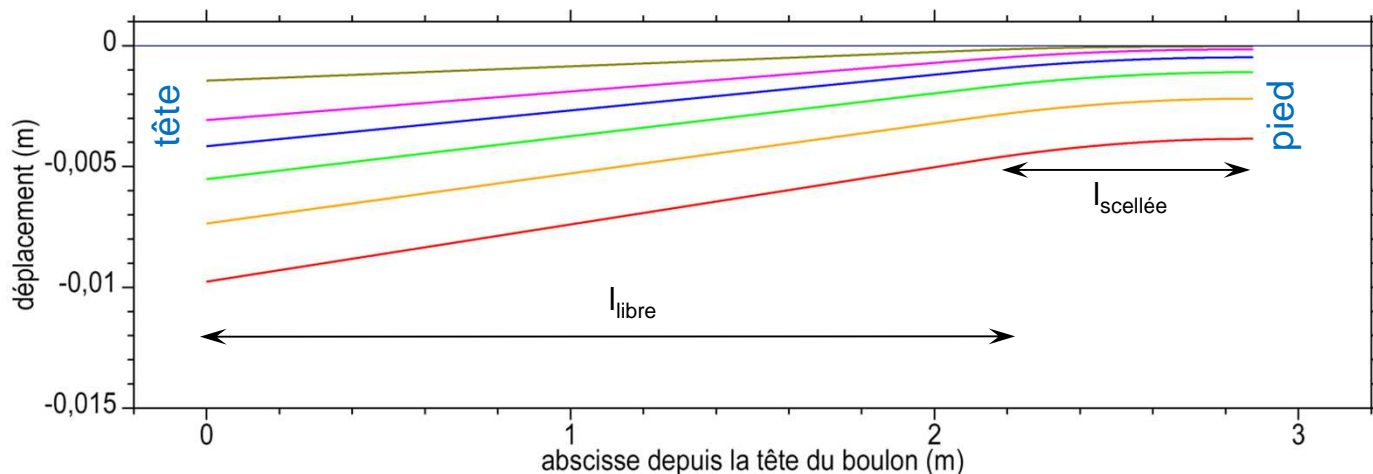
Calculs au module de réaction axial

✓ Effort axial en fonction du déplacement axial



Calculs au module de réaction axial

✓ Déplacement axial et effort axial / abscisse



— essai 14.1 effort de 100 kN

— essai 14.1 effort de 200 kN

— essai 14.1 effort de 250 kN

— essai 14.1 effort de 300 kN

— essai 14.1 effort de 350 kN

— essai 14.1 effort de 400 kN

Essai 14.1

$D_b = 32 \text{ mm}$

$D_s = 90 \text{ mm}$

$l_s = 0,75 \text{ m}$

Déplacements comptés
négativement
pour un allongement

Calculs au module de réaction axial

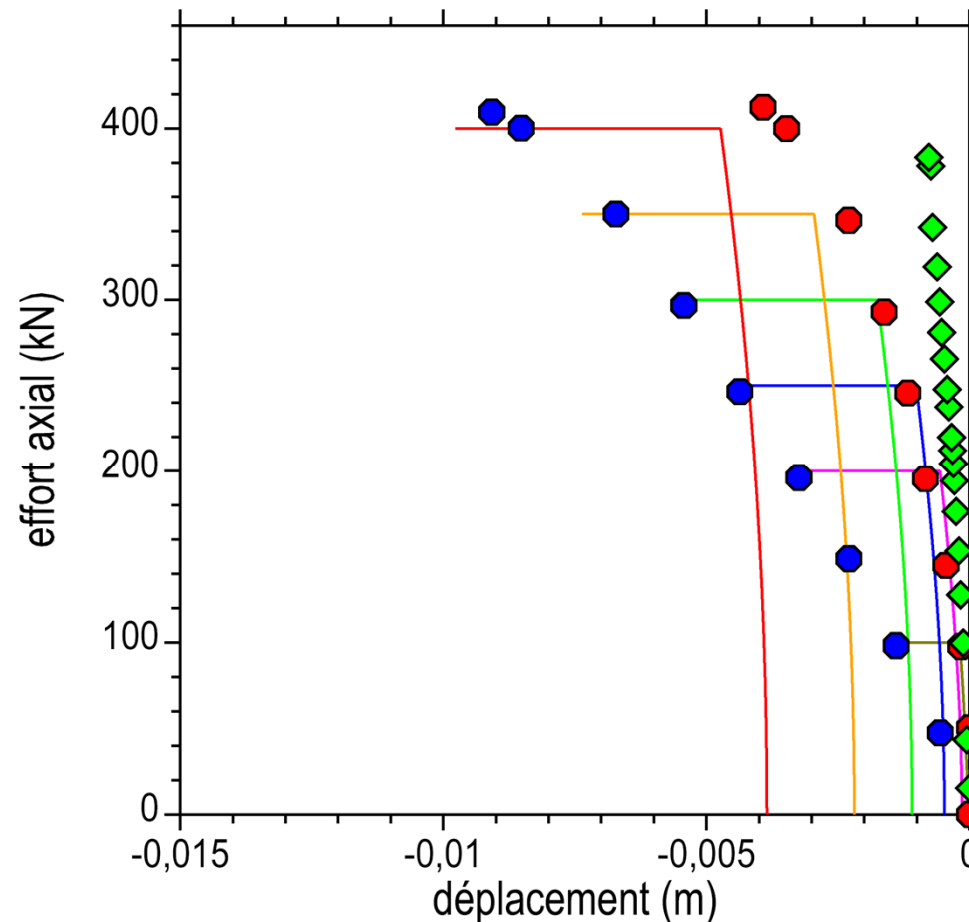
✓ Effort axial en fonction du déplacement axial

Essai 14.1

$D_b = 32 \text{ mm}$

$D_s = 90 \text{ mm}$

$l_s = 0,75 \text{ m}$



- essai 14.1 en tête de boulon
- essai 14.1 en tête de scellement
- ◆ essai 14.1 fibre optique
- essai 14.1 effort de 100 kN
- essai 14.1 effort de 200 kN
- essai 14.1 effort de 250 kN
- essai 14.1 effort de 300 kN
- essai 14.1 effort de 350 kN
- essai 14.1 effort de 400 kN

Déplacements comptés
négativement
pour un allongement

Conclusion

✓ Une méthode élémentaire

- Fondée sur l'équilibre à l'état limite discontinuité / barre
- Etayée par l'expérience en laboratoire
- Proposée dans le guide

"Protection contre les instabilités rocheuses"

✓ D'autres pistes d'analyses

- Méthode en déplacement
- Méthode aux modules de réactions radial et axial

✓ Grand intérêt des données expérimentales

- Sans lesquelles aucune représentation
des mécanismes n'est possible

Fin

