



CENTRE DE GEOSCIENCES



La maîtrise des déchets radioactifs

Le boulonnage à ancrage réparti

Projet MIBOULAND

Coopération Andra & Mines-ParisTech

Laura BLANCO MARTÍN

Faouzi HADJ-HASSEN

Premier Rapport

Octobre 2009

Référence : R061009LBLA

Sommaire

Introduction.....	5
1 La technique du boulonnage à ancrage réparti.....	6
Introduction	6
Les modes de rupture des boulons à ancrage réparti	7
Justification d'une recherche plus approfondie	9
2 L'essai d'arrachement	10
Le principe de l'essai d'arrachement.....	10
Dispositifs autour du monde.....	10
Nouveau dispositif expérimental conçu au Centre de Géosciences	11
<i>Le nouveau banc d'essais</i>	<i>11</i>
<i>Caractérisation du grès des Vosges</i>	<i>14</i>
<i>Préparation de l'ensemble échantillon-tige</i>	<i>15</i>
3 Premiers résultats obtenus au Centre de Géosciences.....	18
Essais où la tige s'est cassée par traction	18
Essai où la rupture s'est produite à l'interface roche-scellement	19
Essai où la rupture s'est produite à l'interface scellement-tige	19
Conclusions	21
4 Programme d'essais dans le cadre du projet MIBOULAND	22
Matériel fourni.....	22
Tests d'arrachement avec des boulons en acier (HA25)	22
Boulons en fibre de verre (<i>Powerthread</i> 25mm de diamètre).....	23
Essais à réaliser ultérieurement	24
Bibliographie.....	25

Liste de figures

Figure 1: éléments constitutifs du boulonnage à ancrage réparti (<i>Windsor, 1996</i>)	6
Figure 2: distribution des efforts dans un élément unitaire lorsque le boulon est soumis à une traction	8
Figure 3: réduction artificielle de la longueur d'ancrage sur un câble long (<i>Stillborg, 1983</i>)	8
Figure 4: Comparaison des résultats des essais d'arrachement en laboratoire et résultats analytiques (<i>Hyett et al, 1995</i>)	9
Figure 5: schéma d'une cellule de Hoek modifiée, MHC (<i>Hyett et al, 1995</i>)	10
Figure 6: situation réelle. Définition de la longueur d'ancrage	12
Figure 7: principaux éléments du banc expérimental et vue pendant un essai	12
Figure 8: disposition de trois goupilles sur la facette supérieure de l'échantillon de grès pour empêcher la rotation des câbles	13
Figure 9: vue du tour pendant le rainurage d'un échantillon de grès	15
Figure 10: insertion et mélange de la résine dans l'échantillon de grès	16
Figure 11: pièces en plexiglas pour le centrage du boulon et du tube métallique et vue de deux étapes du processus de mise en place	16
Figure 12: outil pour le scellement de la tige dans le tube métallique et vue pendant l'opération	17
Figure 13: résultat de l'essai d'arrachement pour $L=300\text{mm}$, $P=15\text{MPa}$, $w:c=0.3$	18
Figure 14: résultat de l'essai d'arrachement pour $L=150\text{mm}$, $P=5\text{MPa}$, scellement à la résine	19
Figure 15: résultat de l'essai d'arrachement pour $L=100\text{mm}$, $P=5.1\text{MPa}$, scellement à la résine	20

Liste des tableaux

Tableau 1: principales dimensions du banc d'essais	14
Tableau 2: principales propriétés mécaniques du grès des Vosges	15
Tableau 3: conditions de réalisation des essais des tests d'arrachement lorsque le boulon est cassé par traction.....	18
Tableau 4: matériel fourni par l'Andra le 18/06/2009.....	22
Tableau 5: longueurs des trous borgnes. Essais avec les boulons HA25.....	22
Tableau 6: quantités d'eau et de ciment requises pour la préparation des coulis. Essais avec les boulons HA25	23
Tableau 7: conditions des tests d'arrachement. Essais avec les boulons HA25	23
Tableau 8: longueurs des trous borgnes. Essais avec les boulons en fibre de verre	24
Tableau 9: quantités d'eau et de ciment requises pour la préparation des coulis. Essais avec les boulons en fibre de verre.....	24
Tableau 10: conditions des tests d'arrachement. Essais avec les boulons en fibre de verre	24

Introduction

Le centre de Géosciences Mines-ParisTech a lancé depuis le mois d'octobre 2008 une thèse sur l'étude expérimentale et théorique du boulonnage à ancrage réparti. Comme le titre l'explique bien, cette thèse comprend deux volets importants:

- Un volet expérimental qui consiste à réaliser des essais d'arrachement en laboratoire sous confinement variable sur des boulons et des câbles (y compris des fibres de verre) ancrés à la résine ou au coulis de ciment ;
- Un volet théorique qui se propose d'améliorer la loi rhéologique développée au centre de Géosciences à partir des résultats des essais de laboratoire et des essais de validation in-situ et de l'appliquer par la suite à la simulation du comportement des ouvrages renforcés par ce type de soutènement.

Compte tenu de l'intérêt que porte l'ANDRA à cette thématique de recherche et ses deux volets, le projet de coopération MIBOULAND (MINes BOULons ANDra) s'est établi entre les deux organismes (centre de Géosciences Mines-ParisTech et ANDRA). Ce projet porte sur les trois axes suivants :

- Réalisation au laboratoire du centre de Géosciences d'une campagne d'essais d'arrachement sur les boulons utilisés par l'ANDRA dans le site de Bure ;
- Participation du centre de Géosciences à la mise en œuvre et à l'interprétation des essais dans le site de Bure (essais d'arrachement et instrumentation de boulons pour étudier leur comportement avec l'avancement des travaux) ;
- Validation des modèles développés sur le site de Bure : modélisation numérique et confrontation avec les mesures in-situ.

Ce rapport présente d'abord une brève introduction à la technique du boulonnage à ancrage réparti pour passer ensuite à expliquer le principe de l'essai d'arrachement. Au passage, le banc expérimental conçu et utilisé dans le centre de Géosciences Mines-ParisTech est décrit, et les premiers résultats obtenus pendant l'année scolaire 2008/2009 sont commentés. Finalement, on présente la campagne d'essais que l'on va effectuer au cours des prochains mois sur les boulons en acier et en fibre de verre fournis par l'ANDRA dans le cadre du projet MIBOULAND.

1 La technique du boulonnage à ancrage réparti

Introduction

Le boulonnage et le câblage sont deux techniques de soutènement couramment utilisées depuis les années 80 dans de diverses applications, tant dans le domaine du génie civil (présence habituelle des câbles lors de la construction des routes), que dans les applications minières, pour renforcer non seulement les galeries souterraines, mais aussi les gradins et les talus des mines à ciel ouvert.

Le principe de fonctionnement des boulons et des câbles ancrés est simple: on insère une tige de bonnes propriétés mécaniques dans le terrain et on l'y ancre de façon à ce qu'elle soit solidaire de la roche. Dès que le massif rocheux, plus souple que le soutènement, subit une déformation, une force axiale est induite dans la barre, laquelle, étant plus rigide, freine le déplacement de la roche. On remarque bien que c'est le mouvement de la roche qui active le boulon ; c'est pour cela qu'on parle fréquemment d'**ancrage passif**.

On a donc affaire à un nouveau système roche-soutènement qui est plus rigide que la roche éventuellement fracturée. Un boulon/câble sera d'autant plus efficace que sa capacité pour transférer sa rigidité à la roche est élevée. Ses principales missions sont trois: confiner le massif rocheux, jouer un rôle d'armature interne et supporter les blocs lâchés.

D'après Windsor (1996), les éléments du boulonnage/câblage à ancrage réparti sont (voir figure 1) :

- La tige (en acier ou en fibre de verre) ;
- Le matériau de scellement (de la résine ou des coulis de ciment de propriétés différentes [ratio eau/ciment ou $w : c$, emploi d'adjuvants, etc.]) ;
- Le système de fixation à la paroi de la galerie (i.e., une plaque et un écrou) ;
- Le massif rocheux environnant.

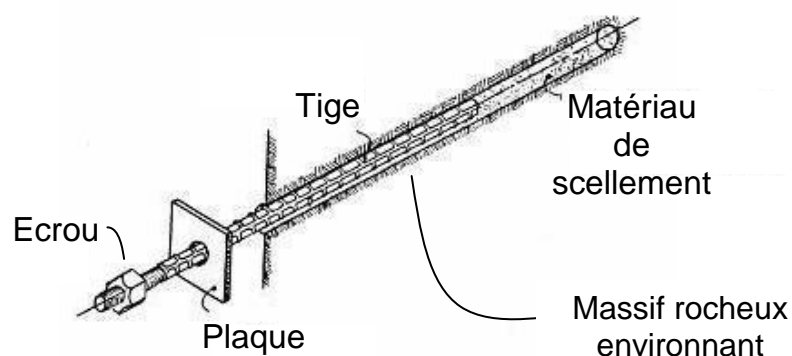


Figure 1: éléments constitutifs du boulonnage à ancrage réparti (Windsor, 1996)

Les trois principales différences entre boulons et câbles sont les suivantes :

- La nature de la barre que l'on introduit dans le terrain : les câbles sont constitués par plusieurs fils d'acier disposés selon différentes formes, plus ou

moins tordus de façon semi-hélicoïdale par rapport à un fil central ; les boulons, quant à eux, sont constitués d'une tige massive, souvent crénelée ou filetée pour augmenter la capacité d'ancrage ;

- Les propriétés mécaniques : la résistance à la traction d'un boulon en fer à béton ne dépasse pas en général 300kN, tandis que celle d'un câble simple à 7 torons est d'au moins 250kN. Un câble double en cage d'oiseau peut tenir jusqu'à 600kN ;
- Les modes de fonctionnement : les boulons à ancrage réparti travaillent en traction, en compression, en flexion et en cisaillement, et les câbles, du fait de leur configuration géométrique, travaillent aussi en torsion ;
- La conception des câbles facilite leur rotation dans le test d'arrachement si la longueur d'ancrage est faible. En effet, une faible longueur d'ancrage implique une résistance frictionnelle faible et donc la torsion du câble est non négligeable. Si la longueur d'ancrage est grande, la rotation est surmontée par la forte friction (*Stillborg, 1983*).

Jusqu'au présent, le dessin et le schéma de mise en place des boulons et des câbles sont basés dans la plupart des cas sur des formules empiriques qui ignorent la distribution de contraintes le long de la partie ancrée, ce qui affecte la stabilité de l'ensemble. Dans le but d'améliorer la conception des boulons et des câbles, il est évident qu'une bonne compréhension du comportement de tels éléments installés dans un massif qui se déforme passe par l'acquisition de mesures in situ, par la réalisation de tests en laboratoire, par le développement de modèles analytiques et par la réalisation de simulations numériques.

Les modes de rupture des boulons à ancrage réparti

L'expérience montre que les deux principaux modes de sollicitation des boulons à ancrage réparti sont le cisaillement et la traction. Afin d'étudier le comportement de ces éléments dans les situations les plus fréquentes, deux types d'essai sont possibles :

- Essais de cisaillement ;
- Essais d'arrachement

On retrouve la rupture en cisaillement des ancrages passifs lorsque, par exemple, un glissement se produit entre deux blocs rocheux renforcés par un boulon. Des essais de cisaillement en laboratoire sont possibles (emploi de boîtes de Casagrande de grandes dimensions [*Durville et al, 2006*]), mais leurs résultats sont d'exploitation difficile et, en outre, ils ne permettent pas de déterminer l'influence que certains paramètres tels que la pression de confinement ou encore la qualité du scellement ont sur la capacité d'ancrage.

L'essai d'arrachement (dont le principe est expliqué dans le chapitre suivant), quant à lui, permet d'analyser le comportement d'un boulon à ancrage réparti lorsqu'il est soumis à un effort de traction. Dans ce cas, les modes de rupture les plus fréquents sont les suivants :

- Rupture de la tige par dépassement de la résistance à la traction ;
- Rupture à l'interface scellement-roche ;
- Rupture à l'interface tige-scellement.

Si la longueur d'ancrage L est très importante, la barre peut casser en traction, d'où l'importance du bon dimensionnement des tiges de renforcement. En effet, l'équilibre du système est régi par l'équation suivante (voir figure 2):

$$dT + 2\pi R \tau dx = 0$$

Où :

$T \equiv$ force axiale dans le boulon ou câble ;

$\tau \equiv$ contrainte de cisaillement développée à l'interface roche-scellement ou scellement-tige (en fonction de l'interface de faiblesse) ;

$R \equiv$ rayon du trou foré dans la roche ou rayon du boulon (en fonction de l'interface de faiblesse).

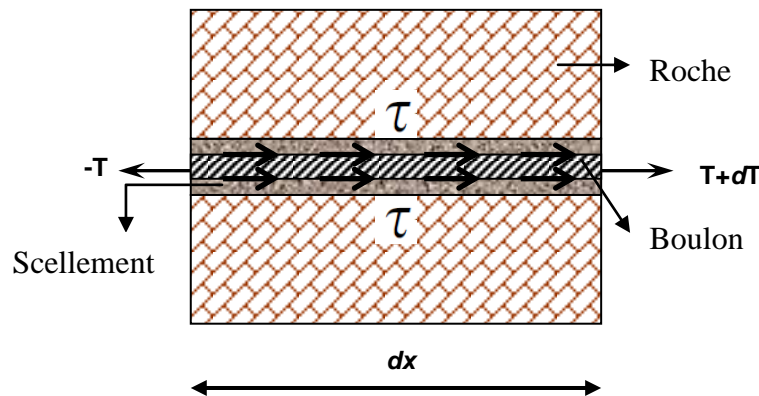


Figure 2: distribution des efforts dans un élément unitaire lorsque le boulon est soumis à une traction

Si la longueur d'ancrage est très forte, le terme $2\pi R \int \tau dx$ pourra dépasser la force maximale supportable par la barre en traction. Dans une telle situation, on peut réduire artificiellement la longueur scellée grâce à l'emploi de chemises en plastique ou de peintures spéciales à base d'huile pour enrober une longueur l (Stillborg, 1983). La figure 3 illustre ce fait : pour éviter la rupture du câble en traction aux environs du joint (dans cette zone, la déformation de la barre peut être très importante), on utilise une chemise en plastique qui enrobe le câble des deux côtés de la discontinuité:

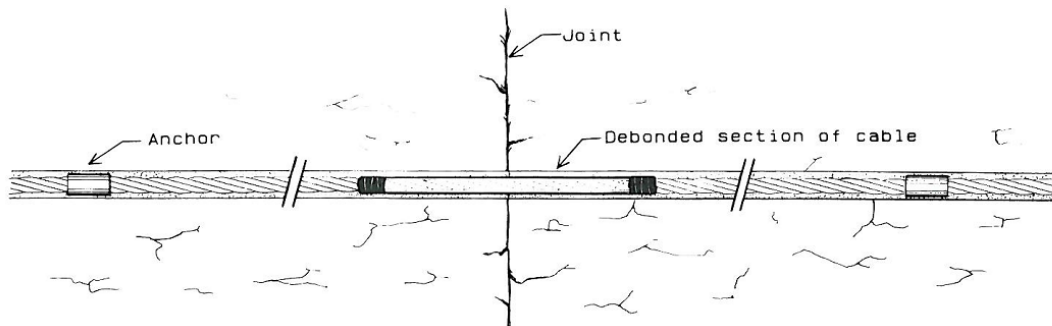


Figure 3: réduction artificielle de la longueur d'ancrage sur un câble long (Stillborg, 1983)

En pratique, si la tige est bien dimensionnée, c'est l'ancrage qui casse en premier lieu (i.e., l'une des deux interfaces mentionnées). L'expérience montre que, dans la plupart des cas, le point de faiblesse du système roche-scellement-boulon est l'interface boulon-scellement ; toutefois, la rupture peut également avoir lieu à l'interface roche-scellement si, par exemple, la roche a de faibles propriétés mécaniques ou si le trou foré est complètement lisse et le coulis ne s'y ancre pas bien.

Justification d'une recherche plus approfondie

La revue bibliographique montre qu'un grand nombre d'études sur les ancrages passifs a été effectué pendant les trente dernières années. Ces études, bien qu'elles soient indispensables et rigoureuses en grande partie, ne permettent pas de répondre aux points suivants :

- Lorsque l'on compare les résultats expérimentaux des essais d'arrachement effectués en laboratoire sur des boulons et des câbles à ceux issus de la théorie, on constate que les modèles analytiques actuels ne sont pas complètement satisfaisants, comme le montre la figure 4 (essais réalisés par Hyett, 1995 - résultats expérimentaux et modèle analytique élaboré d'après ces résultats).

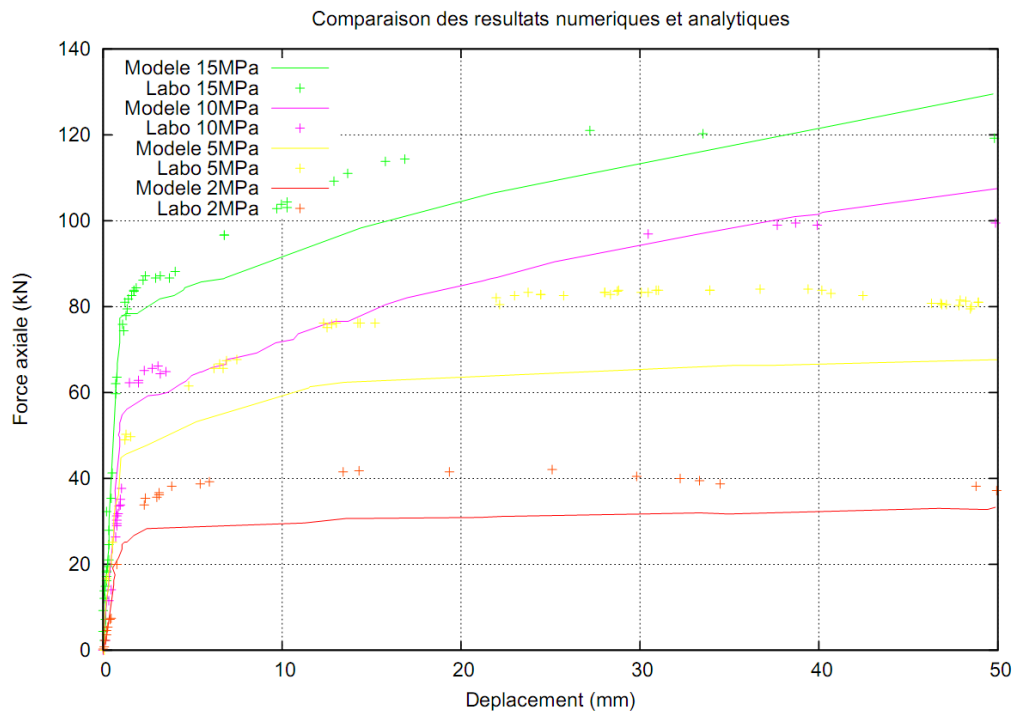


Figure 4: Comparaison des résultats des essais d'arrachement en laboratoire et résultats analytiques (Hyett et al, 1995)

Les principales différences apparaissent pendant la phase post-rupture (l'ancrage est cassé et la tige peut glisser par rapport à l'échantillon) ;

- Le processus d'interaction entre le boulon (ou câble), le scellement et la roche est compliqué et non bien maîtrisé à l'heure actuelle;
- On n'arrive pas à bien expliquer l'influence d'un certain nombre de paramètres sur la capacité d'ancrage, notamment l'effet de la pression de confinement ou de l'épaisseur de l'anneau de scellement.

Compte tenu de ces éléments, et dans le but d'optimiser l'utilisation de ce type de soutènement (bon dimensionnement du schéma de boulonnage), une étude plus approfondie s'avère nécessaire. Ceci permettra non seulement d'abaisser les coûts mais aussi d'améliorer la sécurité des travailleurs et des ouvrages.

2 L'essai d'arrachement

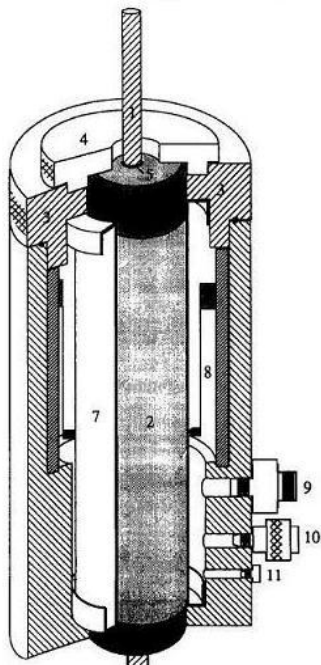
Le principe de l'essai d'arrachement

Le principe de cet essai est simple: on applique une force axiale sur le boulon ou le câble et on mesure le déplacement axial en fonction de la force exercée. Il s'agit d'un essai standard, ce qui permet d'analyser en détail un grand nombre de paramètres intervenant dans la performance des boulons et des câbles.

Les résultats obtenus dans ces essais sont employés par les ingénieurs de conception du schéma de soutènement (nombre de boulons par mètre de galerie, longueur et diamètre des tiges, etc.), d'où l'importance de leur bonne exécution et interprétation.

Dispositifs autour du monde

D'après le travail bibliographique effectué, le dispositif expérimental consiste dans la plupart des cas en un échantillon cylindrique de roche, ciment ou béton à l'intérieur duquel on perce selon son axe un trou de longueur variable (c'est la longueur d'ancrage) pour y sceller au ciment ou à la résine une tige de longueur plus importante que le trou percé. La force nécessaire pour arracher la barre peut être appliquée de différentes formes, par exemple par le biais d'une presse ou d'un vérin hydraulique. A priori, les résultats de l'essai ne dépendent pas du chemin de charge (Hyett, 1995; Moosavi, 2005). Dans quelques cas (Hyett, 1995; Offner, 2000; Bigby, 2003; Hagan, 2003; Moosavi, 2005), et dans le but de mieux reproduire les conditions in situ, on emploie une cellule biaxiale pour exercer un confinement autour de l'échantillon. La figure 5 montre les principaux éléments d'une cellule de Hoek modifiée. Elle a été utilisée dans plusieurs laboratoires au cours des dernières années.



1. Câble
2. Echantillon de ciment
3. Couvercle supérieur cellule
4. Couvercle supérieur échantillon.
5. Tube en PVC de 15mm de longueur
6. Tuyau en ABS pour réduire les effets de bord
7. Jaquette
8. Jauges pour mesures radiales
9. Injection huile

Figure 5: schéma d'une cellule de Hoek modifiée, MHC (Hyett et al, 1995)

Dans un tel dispositif, on utilise une presse pour arracher le câble (non représentée dans la figure 5). Dans ce cas, la longueur d'ancrage est constante pendant

toute la durée de l'essai, puisque la cellule biaxiale et l'échantillon de ciment sont perforés axialement sur toute leur longueur.

Le suivi de la force appliquée par le vérin et du déplacement axial de la barre (grâce à des capteurs LVDT) permet d'étudier la résistance à l'arrachement de l'ensemble échantillon-scellement-tige. Quelques chercheurs (*Hyett, 1995 ; Moosavi, 2005*) ont également réussi à mesurer le déplacement radial à l'extérieur de l'échantillon cylindrique.

Les paramètres étudiés avec ce dispositif sont:

- La pression de confinement;
- La longueur d'ancrage;
- Le type et les caractéristiques du coulis de scellement et de la tige.

Lorsque l'on utilise un vérin hydraulique pour arracher la tige (*Bigby, 2003; Hagan, 2003*), on favorise une configuration en **double arrachement**. Comme nous allons le voir, cette configuration permet de mieux reproduire les conditions in situ (voir l'alinéa suivant la figure 6) et est donc fréquemment recommandée.

Nouveau dispositif expérimental conçu au Centre de Géosciences

Le nouveau banc d'essais

Dans le but de compléter les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire jusqu'au présent (*Hyett, 1995; Offner, 2000; Bigby, 2003; Hagan, 2003; Moosavi, 2005*), une nouvelle cellule expérimentale a été conçue et développée au Centre de Géosciences Mines-ParisTech. Elle est basée sur le principe du **double arrachement**.

La nouveauté de cette cellule par rapport aux résultats trouvés dans la bibliographie, est qu'elle permet de:

- Tester des pressions de confinement plus importantes (jusqu'à 20MPa);
- Etudier les trois types de rupture principaux, à savoir:
 - Rupture de la tige;
 - Rupture de l'interface tige-scellement;
 - Rupture de l'interface scellement-roche;
- Etudier différents types de roche et de tiges;
- Etudier l'influence de l'épaisseur de scellement;
- Etudier l'importance de l'état de surface du trou percé dans la roche ;
- Eviter la rotation lorsque les câbles seront testés.

Bien sur, elle permet l'étude d'autres paramètres dont l'influence est mieux maîtrisée, tels que la longueur d'ancrage. Il faut toutefois remarquer que la plupart des essais en laboratoire ont été réalisés en utilisant des échantillons de ciment ou de béton et non de vrais échantillons de roche (seulement le HSE anglais [*UK Health&Safety Executive, 2006*] a utilisé des échantillons de grès afin de standardiser le comportement des différents types de boulons et de câbles employés dans les mines de charbon anglaises [mais, en aucun cas, les résultats n'ont été exploités pour établir une loi de comportement]).

Le fait d'utiliser une vraie roche permet non seulement de reproduire les deux interfaces que l'on retrouve in situ, mais aussi d'analyser l'influence des rugosités du trou dans lequel on installe le boulon, ainsi que celle de l'épaisseur de l'anneau de scellement (i.e., la différence entre le rayon du trou et celui de la tige), voir figure 6.

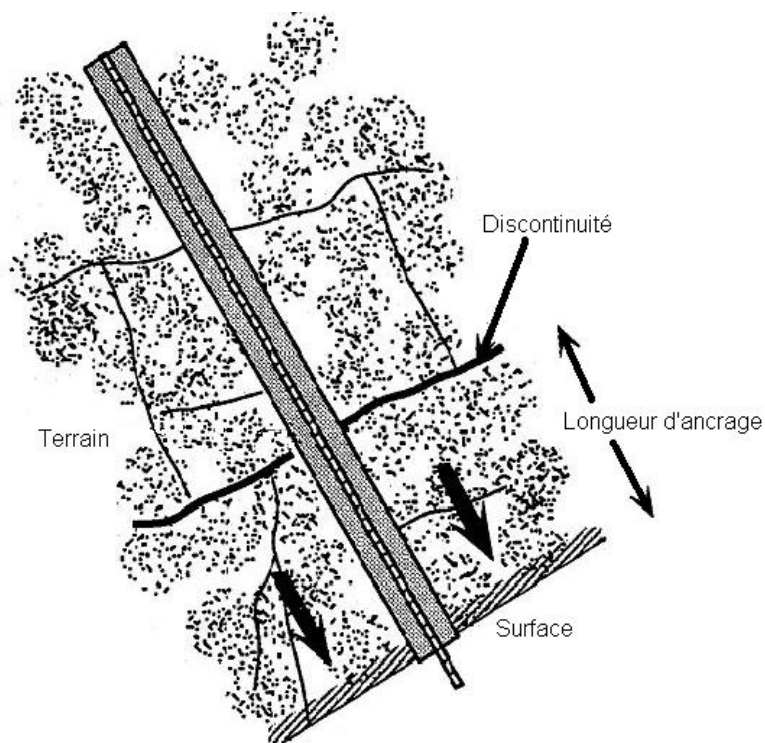


Figure 6: situation réelle. Définition de la longueur d'ancrage

Le développement de la cellule a commencé en 2008. Les différents composants ainsi qu'un aperçu de la cellule pendant la réalisation d'un essai sont montrés dans la figure 7 ci-dessous :

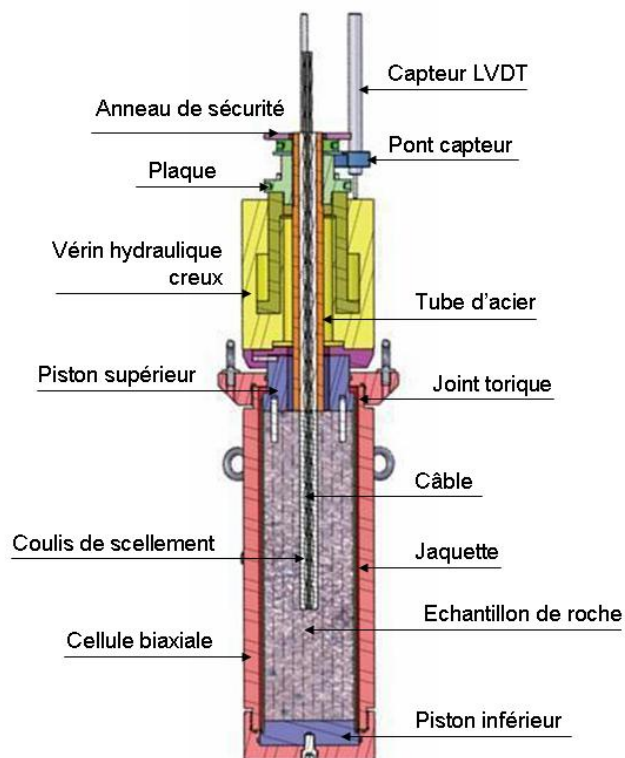


Figure 7: principaux éléments du banc expérimental et vue pendant un essai

Pour tirer axialement du boulon, on utilise un vérin hydraulique. On procède de la façon suivante: la partie de la tige non scellée dans l'échantillon de roche est ancrée à

un *tube creux en acier* (voir figure 7, image de gauche) grâce à une résine HILTI de très forte résistance pour que le boulon ne puisse pas glisser dans cette partie (ce qui nous intéresse, c'est le glissement à l'intérieur de la *cellule biaxiale*, qui correspond à la *longueur d'ancrage* indiquée dans la figure 6). Le tube repose sur la carotte de roche sans y être collé (la procédure de préparation est décrite ci-dessous). Il présente un filetage ISO de 3mm de pas dans la face extérieure qui s'étale sur 200mm à compter d'une de ses extrémités. Sur ce filetage, on installe quatre pièces :

- D'abord, on visse la pièce nommée *plaque* dans la figure 7 ;
- On installe le *pont capteur* grâce auquel les 3 capteurs LVDT sont maintenus en place ;
- On visse ensuite un *écrou* qui plaque le *pont capteur* ;
- Sur cet *écrou* repose un *anneau de sécurité* pourvu de trois trous percés sur sa couronne: à l'aide de trois maillons rapides, on accroche trois chaînes à chacun de ces trous. Le raccordement de chaque chaîne se fait à chacun des anneaux de levage vissés sur le corps de la cellule (voir photo à droite, figure 7). Ceci est une mesure de sécurité en cas d'éjection du tube métallique pendant l'essai.

Lorsque le vérin commence à fonctionner, le piston pousse la *plaque* verticalement vers le haut et on provoque ainsi un déplacement au niveau de l'interface entre la carotte de roche et le tube métallique. Le déplacement axial est mesuré par les capteurs LVDT, qui s'appuient sur la partie non mobile du vérin. Cette configuration oblige à devoir corriger les résultats obtenus, puisque nous ne nous intéressons qu'au déplacement axial ayant lieu à l'intérieur de la roche (que ce soit à l'interface tige-scellement ou scellement-roche) et non à l'éventuel déplacement de la tige dû à la présence du tube métallique; en réalité, la conception de la cellule favorise une configuration de **double arrachement**, puisque l'on a deux longueurs d'ancrage et le glissement peut se produire aussi bien dans l'échantillon de roche qu'à l'intérieur du tube métallique si l'on ne soigne pas la longueur d'ancrage et les conditions d'exécution de l'essai.

La réaction du vérin s'effectue sur le *piston supérieur* (voir figure 7). L'étanchéité est assurée grâce à deux *joints toriques*, placés en haut et en bas de la cellule. Une *jaquette* en Viton empêche que l'huile de confinement puisse entrer dans l'échantillon de roche (ceci générerait des pressions de pore). En même temps, et afin d'empêcher la rotation lorsque des câbles seront testés, on a prévu l'installation de trois goupilles entre *l'échantillon de roche* et le *piston supérieur* (voir la figure 8) et entre la partie mobile du vérin et la *plaque*.

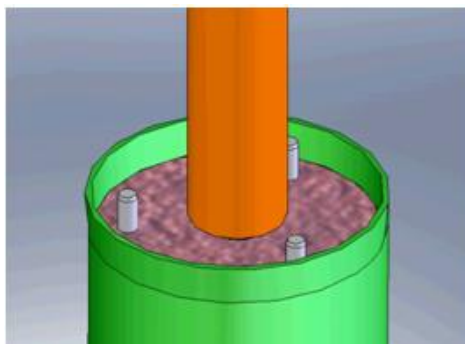


Figure 8: disposition de trois goupilles sur la facette supérieure de l'échantillon de grès pour empêcher la rotation des câbles

L'acquisition des mesures (force appliquée par le vérin et déplacement axial) se fait grâce au programme **LabVIEW**. Le contrôle est effectué en déplacement. La pression qui exerce le vérin est multipliée par sa surface effective afin d'avoir les résultats en termes de force. Le déplacement indiqué est directement la moyenne des trois capteurs à chaque instant. Dans le but de pouvoir réguler le débit de la pompe qui actionne le vérin, une vanne à commande proportionnelle a été achetée.

Le tableau suivant montre les principales dimensions du banc d'essais:

Banc d'essai		
Cellule	Diamètre extérieur [max] (mm)	210 [290]
	Diamètre intérieur (mm)	160
	Longueur (mm)	627
	Pression maximale (MPa)	25
Echantillon	Matériau	Variable
	Diamètre (mm)	133±1
	Hauteur (mm)	500±1
	Rainurage intérieur (vitesse 6tr/min)	Circulaires (pas 10mm)
Trou borgne	Diamètre (mm)	Variable
	Profondeur (mm)	Variable
Tube métallique	Diamètre extérieur (mm)	Variable
	Diamètre intérieur (mm)	Variable
	Longueur (mm)	450±5
	Rainurage intérieur (profondeur de 2±1 mm)	Tous les 10±5mm sur 17cm partant des extrémités
	Filetage extérieur	ISO de pas 3mm sur 20cm
Jaquette	Longueur (mm)	520±2
Tige	Type	Câble / Boulon
	Scellement	Ciment / Résine
	Longueur de l'inclusion (mm)	Variable

Tableau 1: principales dimensions du banc d'essais

Caractérisation du grès des Vosges

La roche retenue pour la réalisation des échantillons est le grès des Vosges. Ce choix est basé sur les faits suivants :

- Il s'agit d'une roche très homogène ;
- Ses propriétés mécaniques sont de facile détermination ;
- Ces propriétés sont bonnes, notamment sa résistance à la compression (il ne faut pas oublier que la réaction du vérin s'exerce sur la roche, moyennant le piston supérieur) ;
- Il s'agit d'une roche que l'on rencontre habituellement dans les mines de charbon (beaucoup de tests autour du monde ont été réalisés sur des câbles et des boulons employés dans le domaine du charbon).

Afin de connaître les caractéristiques mécaniques du grès employé, trois essais de compression simple et trois essais de traction indirecte (brésiliens) ont été effectués. Le tableau suivant montre les résultats obtenus:

Propriété	Valeur
Vitesse du son	2923m/s
Densité	2137kg/m ³
Module Young	13700MPa
Module Poisson	0,26
R _{compression simple}	60MPa
R _{traction}	3,1MPa

Tableau 2: principales propriétés mécaniques du grès des Vosges

Préparation de l'ensemble échantillon-tige à tester

Des procédures précises de préparation des consommables, de montage/démontage du banc expérimental et de réalisation d'un essai ont été établies.

Les principaux enjeux rencontrés ont été:

- Assurer le bon centrage de la tige dans l'échantillon de roche et dans le tube métallique ;
- Créer des rainures dans la surface du trou borgne, et
- Faciliter la mise en place du matériau de scellement.

Après avoir testé plusieurs méthodes, la procédure finale de préparation est la suivante:

1. On rainure la surface du trou borgne avec le tour vertical (vitesse de 6tr/min). Les rainures sont faites tous les 10mm avec une profondeur de 3±1mm. La figure 9 montre une vue du tour en train de rainurer un échantillon;

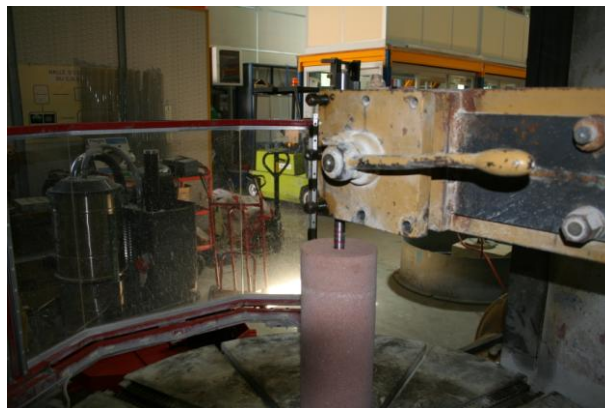


Figure 9: vue du tour pendant le rainurage d'un échantillon de grès

2. On injecte dans le trou borgne le volume de matériau de scellement nécessaire (calculé au préalable) pour que le trou soit rempli jusqu'à la gueule lorsque l'on insérera la tige (en cas de débordement, il faut nettoyer la surface de l'échantillon pour que le tube métallique ne s'y colle pas). S'il s'agit de la résine (à prise lente, environ 3-5 minutes), on videra directement le contenu de la cartouche et on mélangera la résine et le durcisseur avec une

perceuse équipée d'une fine tige avec une extrémité en forme d'hélice (voir figure 10). Pour le coulis, le coulis doit être préparé dans un bac avant de le verser dans le trou borgne. On a constaté que la forte viscosité des coulis de ratio $w:c < 0.35$ rendait énormément difficile leur insertion dans le trou; afin d'améliorer cet aspect, et après avoir testé différentes possibilités (faire vibrer la carotte lorsque l'on coulait le ciment, ...), on s'est approvisionné de trois types de plastifiants fournis par la société *Chryso* (dosage : 1% du poids du ciment). Désormais, la mise en place du coulis ne pose plus de problème;



Figure 10: insertion et mélange de la résine dans l'échantillon de grès

3. On met la tige en place. Pour assurer son bon centrage dans le trou, trois pièces en plexiglas qui s'emboîtent ont été conçues (voir figure 11). La première des pièces sert à centrer la tige dans l'échantillon de roche (c'est pour ceci qu'elle a un faible diamètre intérieur [celui de la tige à centrer]); la deuxième sert à assurer le bon centrage du tube métallique par rapport à l'échantillon de roche (donc son diamètre intérieur est égal au diamètre extérieur du tube métallique), et la troisième pièce est en réalité un patron dont la mission est de permettre de placer les deux pièces précédentes tout en garantissant le centrage ;



Figure 11: pièces en plexiglas pour le centrage du boulon et du tube métallique et vue de deux étapes du processus de mise en place

4. Une fois le scellement est sec, on retire la pièce en plexiglas permettant de centrer la tige et on met le tube métallique en place avec le filetage vers le haut. Le centrage de la tige dans le tube est aussi assuré (figure 11, image de droite);
5. On effectue le scellement dans le tube métallique avec une résine de fortes caractéristiques mécaniques. L'injection se fait en commençant par le bas grâce à un pistolet auquel on raccorde un tube long en plastique que l'on remonte au fur et à mesure que l'on fait le remplissage (voir figure 12).



Figure 12: outil pour le scellement de la tige dans le tube métallique et vue pendant l'opération

3 Premiers résultats obtenus au Centre de Géosciences

Jusqu'au présent, huit essais d'arrachement ont été réalisés au Centre de Géosciences Mines-ParisTech sur des boulons crénelés de 20mm de diamètre et 180kN de résistance à la traction. Tous les tests ont été effectués avec des carottes de grès des Vosges. Le seul échantillon disposant d'un rainurage intérieur est celui employé dans le dernier essai décrit en fin de ce chapitre.

Les résultats les plus remarquables sont décrits ci-dessous

Essais où la tige s'est cassée par traction

Trois essais effectués avec une longueur d'ancrage d'environ 300mm ont abouti à la rupture du boulon au niveau du contact entre la carotte de grès et le tube d'acier. Il s'agit des premiers essais réalisés (à cette époque, le scellement dans la roche et dans le tube s'effectuait avec le même matériau). Les particularités de chaque essai sont présentées dans le tableau suivant:

Essai	Scellement	L(mm)	Confinement (MPa)
1	Minova	280	13
2	w :c 0.3	300	15
3	w :c 0.35	300	5

Tableau 3: conditions de réalisation des essais des tests d'arrachement lorsque le boulon est cassé par traction

La figure 13 suivante montre la courbe effort-déplacement obtenue pour le coulis w:c=0.3:

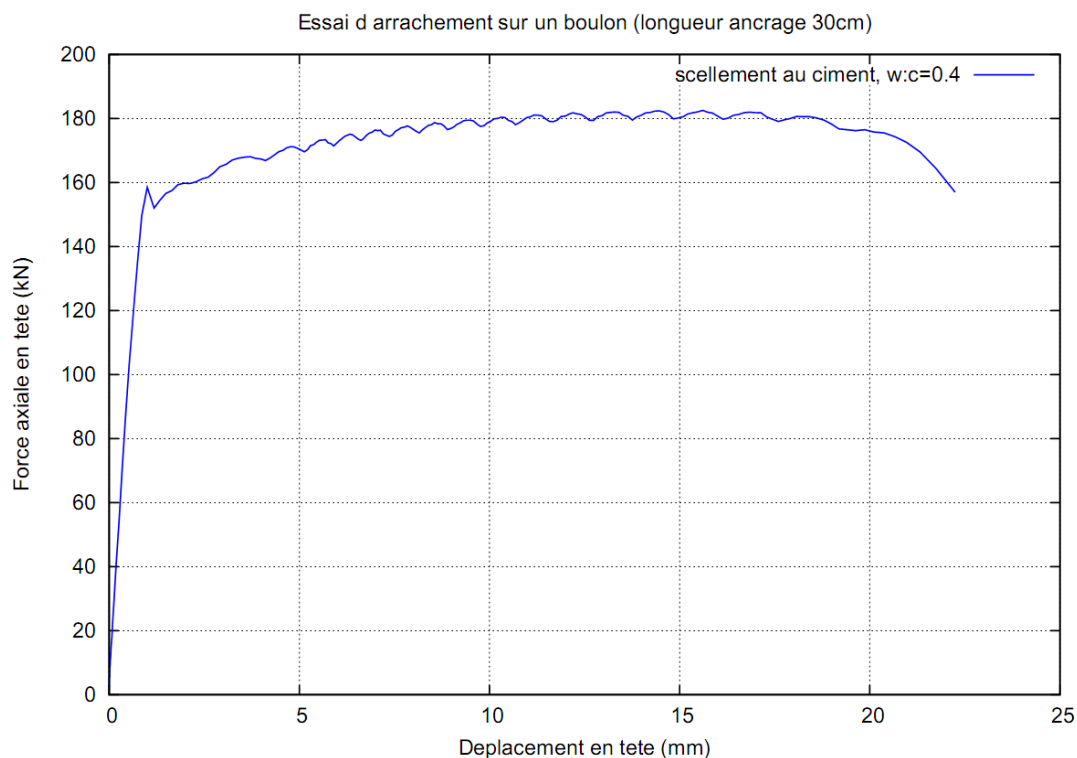


Figure 13: résultat de l'essai d'arrachement pour L=300mm, P=15MPa, w:c=0.3

On voit que l'on retrouve bien la résistance maximale du boulon testé (180kN). Par ailleurs, l'observation de l'échantillon après rupture a montré qu'aucun glissement relatif ne s'est produit à l'intérieur de la roche; pourtant, le graphique obtenu révèle un fort déplacement axial avant rupture: 22,21mm. L'explication au résultat obtenu est que l'arrachement s'est produit à l'intérieur du tube métallique et non dans l'échantillon de roche. Un calcul analytique simple qui prend en compte les aspects géométriques et les caractéristiques élastiques des différents composants (acier, roche, ciment) permet de retrouver ce fait: la résistance au cisaillement étant plus faible dans le tube que dans la roche, le glissement se produira davantage à l'intérieur du tube métallique, à l'interface boulon-ciment.

Essai où la rupture s'est produite à l'interface roche-scellement

Dans le but de provoquer un glissement dans l'une des deux interfaces en étude, on a diminué la longueur d'ancrage à 150mm. Le glissement s'est alors produit au niveau de l'interface entre l'échantillon de grès et la résine Minova. La pression de confinement était de 5MPa. La figure 14 montre le résultat obtenu.

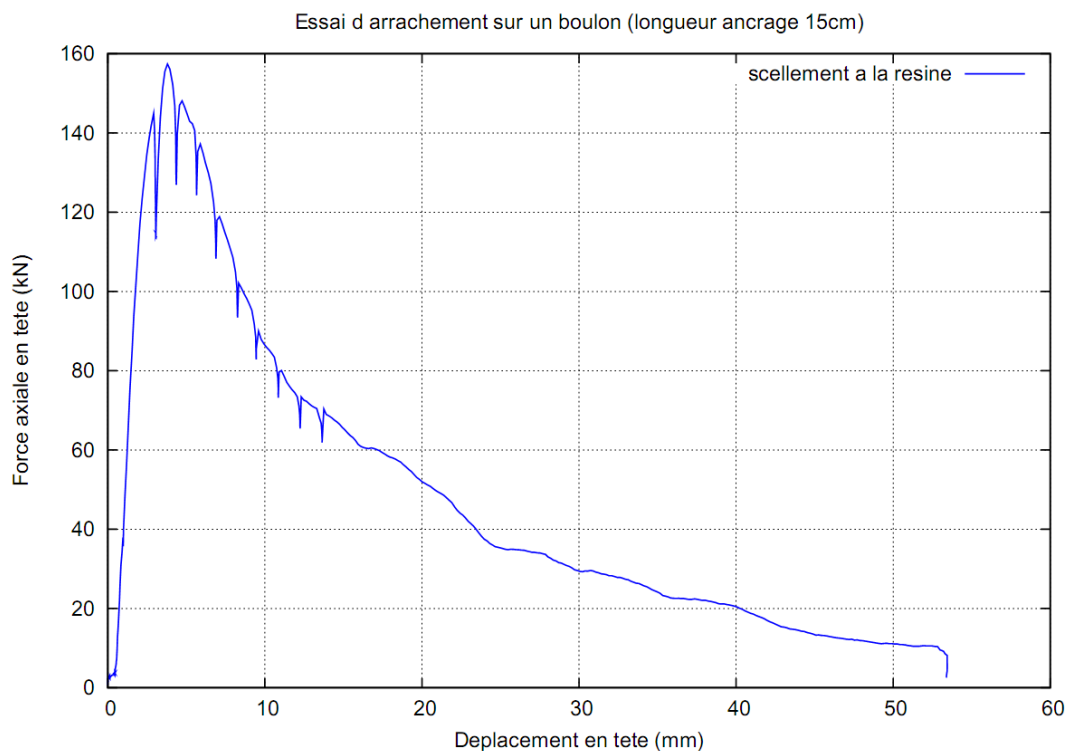


Figure 14: résultat de l'essai d'arrachement pour $L=150\text{mm}$, $P=5\text{MPa}$, scellement à la résine

Essai où la rupture s'est produite à l'interface scellement-tige

Comme l'on vient de le voir, les premiers essais effectués ne nous ont pas permis de reproduire le phénomène le plus courant, à savoir la rupture au niveau du contact entre le scellement et le boulon.

Avant de continuer avec la campagne d'essais, on a pris un peu du recul pour essayer de comprendre le phénomène. Ceci nous a conduits à réaliser un calcul

analytique pour déterminer la longueur d'ancrage nécessaire pour que le point de faiblesse soit l'interface boulon-résine. En supposant un coefficient de friction 23° et une cohésion de 15MPa entre les deux matériaux, on a obtenu une longueur d'environ 10cm (le calcul a été réalisé pour un confinement de 15MPa).

L'essai a été donc effectué avec 10cm d'ancrage en utilisant de la résine Minova comme matériau de scellement. On a décidé d'appliquer un confinement de 5MPa comme mesure de précaution, car le principal but de l'essai était de vérifier que l'on pouvait bien produire le glissement à l'interface souhaitée.

La figure 15 montre le résultat de l'essai en termes de force axiale-déplacement axial. On présente les valeurs brutes obtenues pendant l'essai (i.e., sans corriger) et les valeurs corrigées, après soustraction du déplacement qui a lieu du fait de la présence du tube métallique (configuration de **double arrachement**).

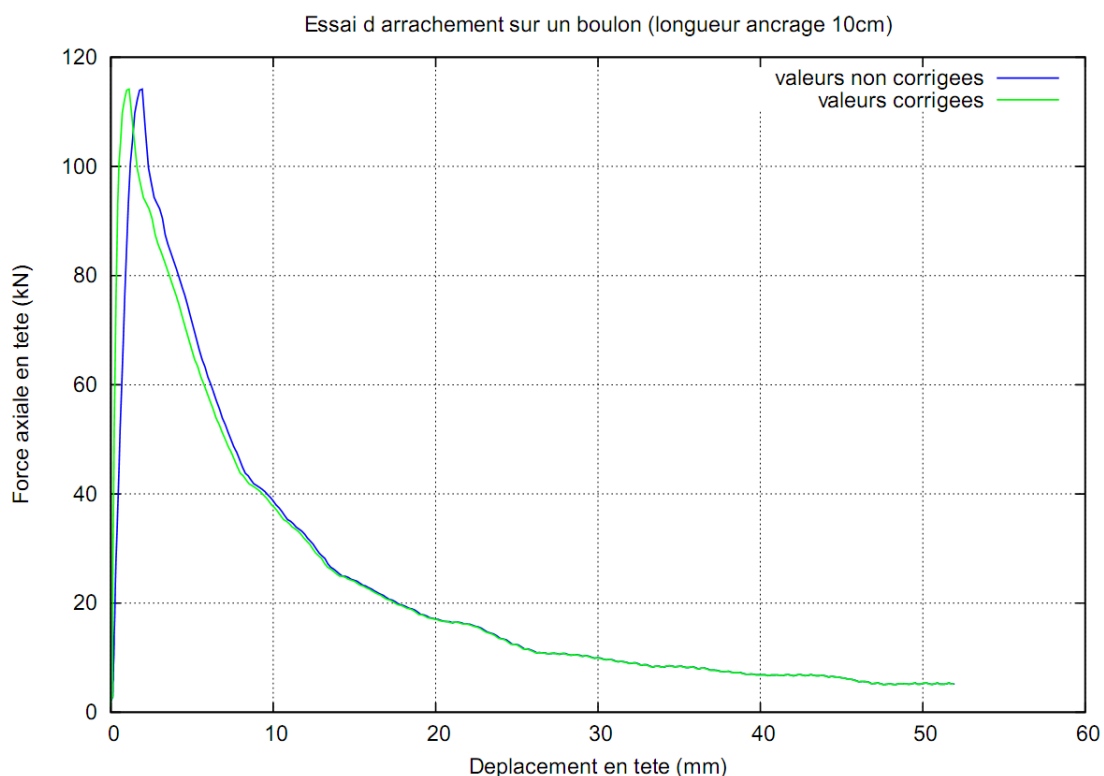


Figure 15: résultat de l'essai d'arrachement pour $L=100\text{mm}$, $P=5.1\text{MPa}$, scellement à la résine

L'analyse de la courbe montre une première phase élastique (droite de pente positive), pendant laquelle il n'y a pas de rupture (i.e., pas de glissement relatif). Ensuite (entre 0,701 et 1,126mm de déplacement), l'interface boulon-résine s'endommage progressivement (c'est le *front de rupture ou de décohesion*) et donc la pente de la courbe diminue jusqu'à arriver à la force maximale, soit 113,18kN. Au-delà, l'interface est complètement cassée et le glissement est possible.

A l'issue de cet essai, on a commencé à développer un modèle analytique, lequel sera complété et amélioré grâce aux futurs essais.

Conclusions

Les premiers essais effectués ont montré que la cellule dont on dispose permet de reproduire les trois types principaux de rupture du soutènement par boulonnage: traction de la tige, glissement à l'interface roche-scellement et scellement-boulon. Ils ont aussi permis de mieux sentir la problématique, ainsi que l'importance du bon dimensionnement de toutes les parties du banc expérimental.

En même temps, on a réussi à mettre à point la cellule pour pouvoir commencer à réaliser des essais conduisant à améliorer les lois de comportement actuelles.

4 Programme d'essais dans le cadre du projet MIBOULAND

Matériel fourni

Le 18 juin 2009, lors de la visite au site de Bure, le matériel suivant fut récupéré par Mines-ParisTech dans le cadre du projet MIBOULAND :

Produit	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Quantité
Boulons crénelés HA25	2,40	25/ 28 (avec filetage)	10
Boulons en fibre de verre	2,40	25	5
Résine Minova LOKSET SiS SF 32/500	0,5	32	30 cartouches

Tableau 4: matériel fourni par l'Andra le 18/06/2009

Grâce à ce matériel, et dans un premier temps, la campagne d'essais décrite ci-dessous va être effectuée dans le laboratoire du Centre de Géosciences Mines-ParisTech, situé à Fontainebleau.

Tests d'arrachement avec des boulons en acier (HA25)

En premier lieu, l'effet des paramètres suivants va être étudié avec ce type de boulons :

- Longueur d'ancrage ;
- Pression de confinement ;
- Type de scellement (de la résine et du ciment avec des ratios eau :ciment, w :c, différents).

Pour cette première campagne, 6 boulons HA25 seront employés. Ils seront coupés chacun en 3 parties identiques de 80cm de longueur.

Le tableau 5 présente les dimensions des trous borgnes dans les échantillons de grès (le diamètre est toujours de 30mm):

Nb d'échantillons	Longueur (mm)
11	130
4	90
1	150

Tableau 5: longueurs des trous borgnes. Essais avec les boulons HA25

Quinze des seize trous seront rainurés à l'intérieur. Un des trous de 130mm de longueur sera lisse (i.e., sans rainures).

Le scellement à l'intérieur du trou borgne du bloc de grès sera effectué à la résine pour 10 des 16 échantillons; les 6 barres restantes seront scellées au ciment (ratio eau:ciment de 0.3, 0.35 et 0.4).

Le tableau 6 suivant montre les quantités d'eau et de ciment nécessaires pour la préparation des différents coulis de ciment :

Ratio w :c	Masse eau (g)	Masse ciment (g)
0.3	37.4	124.5
0.35	41.0x4 tests=164.0	117.1x4 tests=468.4
0.4	44.3	110.6

Tableau 6: quantités d'eau et de ciment requises pour la préparation des coulis. Essais avec les boulons HA25

Dans le cas des barres scellées au ciment, il faudra attendre 28 jours pour faire les tests (temps de prise du ciment).

Le tableau suivant montre les tests à réaliser et les conditions de chaque essai :

Test	L (mm)	Pression confinement (bar)	Etat trou borgne	Scellement
1	130	100	Rugueux	Résine
2	130	50	Rugueux	Résine
3	130	20	Rugueux	Résine
3	130	0	Rugueux	Résine
5	130	100	Rugueux	0.35
6	130	50	Rugueux	0.35
7	130	20	Rugueux	0.35
8	130	0	Rugueux	0.35
9	90	100	Rugueux	Résine
10	90	50	Rugueux	Résine
11	90	20	Rugueux	Résine
12	90	0	Rugueux	Résine
13	130	50	Rugueux	0.3
13	130	50	Rugueux	0.4
15	150	150	Rugueux	Résine
16	130	100	Lisse	Résine

Tableau 7: conditions des tests d'arrachement. Essais avec les boulons HA25

Boulons en fibre de verre (*Powerthread* 25mm de diamètre)

Les paramètres en étude sont, comme dans le cas précédent :

- Longueur d'ancrage ;
- Pression de confinement ;
- Type de scellement (de la résine et du ciment avec de différents ratios eau :ciment) ;
- Type de tige.

Tous les boulons en fibre de verre fournis seront employés dans cette campagne ; un total de 15 tests sera effectué (chaque boulon sera donc découpé en trois barres de 80cm).

Le tableau 8 présente les dimensions des trous borgnes dans les échantillons de grès (le diamètre est toujours de 35mm). Tous les trous seront rainurés.

Nb d'échantillons	Longueur (mm)
7	130
7	90
1	170

Tableau 8: longueurs des trous borgnes. Essais avec les boulons en fibre de verre

Parmi les quinze barres, neuf seront scellées à la résine; les 6 barres restantes seront scellées au ciment (ratio w:c=0.35).

Le tableau 9 suivant montre les quantités d'eau et de ciment nécessaires dans chaque cas :

L (mm)	Ratio w :c	Masse eau (g)	Masse ciment (g)
130	0.35	27.2x3 tests=81.6	77.6x3 tests=232.8
90	0.35	19.3x3 tests=58.2	55.3x3 tests=166.2

Tableau 9: quantités d'eau et de ciment requises pour la préparation des coulis. Essais avec les boulons en fibre de verre

Dans le cas des barres scellées au ciment, il faudra attendre 28 jours pour faire les tests (temps de prise du ciment).

Le tableau suivant montre les tests à réaliser et les conditions de chaque essai :

Test	L (mm)	Pression confinement (bar)	Scellement
1	130	100	Résine
2	130	50	Résine
3	130	20	Résine
3	130	0	Résine
5	90	100	Résine
6	90	50	Résine
7	90	20	Résine
8	90	0	Résine
9	170	200	Résine
10	130	100	0.35
11	130	50	0.35
12	130	0	0.35
13	90	100	0.35
13	90	50	0.35
15	90	0	0.35

Tableau 10: conditions des tests d'arrachement. Essais avec les boulons en fibre de verre

Essais à réaliser ultérieurement

Une fois déterminée l'influence sur la capacité d'ancrage de la longueur de scellement, de la pression de confinement, de la tige employée et du type et de la qualité du coulis, on étudiera l'influence de l'épaisseur de l'anneau de scellement. Ceci sera réalisé sur les boulons en acier HA25 restants (si tous les essais de la première campagne sont exploitables, 3 boulons de 2m40 de longueur seront disponibles pour cette deuxième étape).

Bibliographie

Bigby et al. 2003 «Rock Mechanics Technology Ltd (UK) »

Durville et al. Juillet/août 2006 «Essais de cisaillement sur discontinuités rocheuses armées par ancrages passifs: utilisation d'une boîte de cisaillement de grandes dimensions», «Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon, BLPC n° 263-263»

Hagan. 2003 «Variation in load transfer of a fully encapsulated rockbolt», «UNSW Mining Research Centre, Australia»

Hyett et al. 1995 «A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell», «International Journal of Rock Mechanics and Mining Science»

Moosavi et al. 2005 «Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure», «Cement&Concrete Composites»

Offner et al. 2000 «Evaluating Anchoring Mechanisms of Fully Encapsulated Rock Bolts», «19th International Conference on Ground Control in Mining, Australia»

Stillborg. 1983 « Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock», «PhD Thesis, Lulea (Sweden) »

UK Health&Safety Executive (HSE). 2006 «Testing and standards for rock reinforcement consumables»

Windsor and Thompson. 1996 « Terminology in rock reinforcement practice», «Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam»

