



Le boulonnage à ancrage réparti. Projet MIBOULAND. Coopération ANDRA & MINES-ParisTech. Deuxième Rapport

Laura Blanco Martin, Faouzi Hadj Hassen

► To cite this version:

Laura Blanco Martin, Faouzi Hadj Hassen. Le boulonnage à ancrage réparti. Projet MIBOULAND. Coopération ANDRA & MINES-ParisTech. Deuxième Rapport. 2010. hal-00704095

HAL Id: hal-00704095

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00704095>

Submitted on 19 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Le boulonnage à ancrage réparti

Projet MIBOULAND

Coopération ANDRA & MINES-ParisTech

Laura BLANCO MARTÍN

Faouzi HADJ-HASSEN

Deuxième Rapport

Juillet 2010

Référence : R290710LBLA

Sommaire

Introduction	5
1. L'essai d'arrachement	6
1.1. Le principe de l'essai d'arrachement.....	6
1.2. Dispositif expérimental conçu et employé au Centre de Géosciences	7
2. Campagne d'essais effectuée en laboratoire	10
2.1. Matériel fourni par l'ANDRA	10
2.2. Caractérisation des échantillons rocheux (grès des Vosges)	10
2.3. Objectifs des essais. Essais prévus pour la première campagne	11
2.4. Préparation des échantillons à tester.....	13
<i>Améliorations introduites dans la préparation.....</i>	<i>16</i>
3. Résultats obtenus au Centre de Géosciences	18
3.1. Campagne initiale d'essais effectuée en 2009	18
3.2. Campagne d'essais effectuée en 2010	20
<i>Boulons en acier (HA25)</i>	<i>20</i>
<i>Boulons en fibre de verre (GRP)</i>	<i>24</i>
3.3. Améliorations introduites dans le banc d'essais.....	27
3.4. Conclusions	28
4. Exploitation des résultats : vers une nouvelle loi rhéologique	30
4.1. Développement d'une nouvelle solution analytique	30
4.2. Dérivation de la loi d'interface à partir des essais d'arrachement.....	31
4.3. Application de la nouvelle approche aux essais d'arrachement	32
<i>Essai in-situ</i>	<i>32</i>
<i>Essai en laboratoire</i>	<i>32</i>
5. Campagne d'essais au laboratoire de recherche de Bure.	
Application du nouveau modèle analytique aux résultats obtenus	34
5.1. Introduction	34
5.2. Application du nouveau modèle analytique à un essai d'arrachement in-situ effectué à Bure.....	36
Conclusions et perspectives	39
Bibliographie.....	40

Liste de figures

Figure 1 : Principaux éléments du banc expérimental et vue pendant un essai	7
Figure 2 : Situation réelle. Définition de la longueur d'ancrage	8
Figure 3 : Représentation des résultats des essais triaxiaux dans le plan (σ , τ). Valeurs au pic.....	11
Figure 4 : Carottage du bloc de grès. Forage de la carotte après réalisation du trou borgne	14
Figure 5 : Vue du tour pendant le rainurage d'un échantillon de grès. Vue des rainures créées.....	14
Figure 6 : Insertion et mélange de la résine dans l'échantillon de grès. Versement du coulis de ciment dans le trou borgne.....	15
Figure 7 : Pièces en plexiglas conçues pour le centrage du boulon et du tube métallique et vue de deux étapes du processus de mise en place	15
Figure 8 : Outil pour le scellement de la tige dans le tube métallique et vue pendant l'opération	16
Figure 9 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=300\text{mm}$, $P=15\text{MPa}$, $w:c=0,4$	19
Figure 10 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=150\text{mm}$, $P=5\text{MPa}$, scellement à la résine	19
Figure 11 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=100\text{mm}$, $P=5,1\text{MPa}$, scellement à la résine ..	20
Figure 12 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. $L=130\text{mm}$. Scellement à la résine.....	21
Figure 13 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. $L=90\text{mm}$. Scellement à la résine.....	21
Figure 14 : Vue de deux échantillons où la rupture s'est produite à l'interface résine-roche. Les rainures sont plus marquées dans l'échantillon correspondant à l'essai 14	22
Figure 15 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. $L=130\text{mm}$. Scellements différents	22
Figure 16 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. Scellement à la résine. Plastification de la tige	24
Figure 17 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. $L=130\text{mm}$. Scellement à la résine	24
Figure 18 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. $L=90\text{mm}$. Scellement à la résine	25
Figure 19 : Vue de la longueur scellée pour les cas où $P \approx 10\text{MPa}$. Rupture des deux interfaces	25
Figure 20 : Vue du trou borgne après essai. Influence du rainurage sur le type de rupture obtenu	26
Figure 21 : Vue de l'échantillon 11 après essai. Rupture de la carotte de grès (essai effectué à P_{atm})	26
Figure 22 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. $L=130\text{mm}$. Scellements différents	27
Figure 23 : Distribution des efforts dans une longueur unitaire du système en étude	30
Figure 24 : Modèle rhéologique tri-linéaire pour l'interface boulon-scellement (à gauche) ; comparaison entre le résultat expérimental et la prédiction analytique (à droite)	32
Figure 25 : Comparaison entre le résultat expérimental d'un essai d'arrachement en laboratoire et le résultat analytique obtenu avec une loi d'interface non-linéaire	33
Figure 26 : Données expérimentales d'un essai in-situ (galerie GAT)	37
Figure 27 : Loi tri-linéaire déduite des résultats expérimentaux (essai GAT HA25-06)	37
Figure 28 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction analytique pour une loi de type tri-linéaire.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales dimensions du banc d'essais du Centre de Géosciences	8
Tableau 2 : Matériel fourni par l'ANDRA le 18/06/2009	10
Tableau 3 : Principales propriétés mécaniques du grès des Vosges	11
Tableau 4 : Tests d'arrachement prévus pour la première campagne. Modes de rupture obtenus..	13
Tableau 5 : Récapitulatif des essais d'arrachement effectués en 2009. Modes de rupture obtenus..	18
Tableau 6 : Calcul de la contrainte orthoradiale à l'interface boulon-scellement	23
Tableau 7 : Essais in-situ effectués dans la galerie GT8	35
Tableau 8 : Essais in-situ effectués dans la galerie GAT.....	35

Introduction

Depuis le premier juin 2009, le projet MIBOULAND (*Mines BOULons ANDra*) s'est établi entre le centre de Géosciences MINES-ParisTech et l'ANDRA dans le but de mener une recherche conjointe sur la thématique du boulonnage à ancrage réparti.

En effet, le Centre de Géosciences s'est toujours intéressé aux techniques de soutènement des infrastructures souterraines, et plus particulièrement au boulonnage. Dans ce cadre, le Centre a lancé depuis le mois d'octobre 2008 une thèse intitulée « étude expérimentale et théorique du boulonnage à ancrage réparti ». Dans le premier rapport livré en octobre 2009, on justifie les raisons pour lesquelles une telle étude s'avère nécessaire.

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 (en acier et en fibre de verre) et sur des câbles 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.

De son côté, l'ANDRA s'intéresse à cette technique de soutènement parce que les boulons à ancrage réparti et à friction sont couramment utilisés en parallèle avec d'autres supports dans les galeries du laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute Marne. Ainsi, pendant le mois d'octobre 2009, une campagne d'essais in-situ a eu lieu dans deux galeries du Laboratoire (GAT et GT8). Une première campagne a été effectuée en 2007.

Les principaux objectifs du projet MIBOULAND sont les suivants :

- réalisation au laboratoire du centre de Géosciences d'une campagne d'essais d'arrachement sur plusieurs types de boulons à ancrage repartit 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 des boulons pour étudier leur comportement avec l'avancement des travaux) ;
- validation sur le site de Bure de la loi de comportement développée grâce aux essais effectués : implémentation, modélisation numérique et confrontation avec les mesures in-situ.

Ce deuxième rapport d'avancement présente en premier lieu un rappel du principe de l'essai d'arrachement et une brève description du banc d'essais conçu au Centre de Géosciences. Ensuite, les essais d'arrachement effectués pendant le premier trimestre de 2010 sur le matériel fourni par l'ANDRA dans le cadre du présent projet sont présentés et les résultats sont analysés. Les améliorations qui vont être introduites dans le dispositif expérimental ainsi que les perspectives pour les prochains essais sont également commentées. Finalement, l'état d'avancement de la loi de comportement qui est en train d'être développée grâce aux essais est aussi présenté et une première application aux résultats des essais d'arrachement en laboratoire et in-situ est montrée.

1. L'essai d'arrachement

L'essai d'arrachement a été décrit en détail dans le premier rapport livré dans le cadre du projet MIBOULAND. On en rappelle ici le principe ainsi que les principales caractéristiques du dispositif expérimental développé par le Centre de Géosciences.

1.1. Le principe de l'essai d'arrachement

Le but des essais d'arrachement, qu'ils soient effectués in-situ ou en laboratoire, est d'étudier le comportement des boulons et des câbles sous des efforts de traction. En effet, lorsque le massif rocheux entourant le système de renforcement à ancrage repartie essaie de se déformer, une force axiale de traction est transmise à la tige via le matériau de scellement, moyennant des efforts de cisaillement à l'interface roche-scellement et scellement-boulon. Dès que la force axiale, T , est telle que :

$$T \geq 2\pi R \int_0^L \tau dx \quad (1)$$

où τ est la contrainte de cisaillement et L est la longueur d'ancrage, un glissement relatif se produit à l'interface de rupture correspondante (*i.e.*, entre la roche et le matériau de scellement ou entre le matériau de scellement et la tige), pourvu que T soit inférieure à la résistance en traction de la barre.

Les essais en laboratoire sont préférés aux essais in-situ parce que leur contrôle s'avère plus simple et de plus, du fait qu'il existe une standardisation au niveau mondial de ces essais, les résultats effectués dans de différents laboratoires peuvent être comparés, ce qui contribue à l'avancement de la recherche dans le domaine. Cependant, les essais d'arrachement in-situ sont toujours indispensables pour vérifier que les tiges et les matériaux de scellement utilisés sont compatibles avec le terrain environnant.

En même temps, les essais de cisaillement, bien qu'existants et employés parfois, sont moins répandus pour étudier le comportement des tiges d'ancrage parce que leur réalisation et l'exploitation de leurs résultats sont plus difficiles.

Le principe de l'essai d'arrachement est simple : on applique une force axiale sur le boulon ou le câble et on mesure le déplacement axial provoqué. Ce type d'essai permet d'étudier en détail un grand nombre de paramètres intervenant dans la performance des boulons et des câbles.

En outre, l'essai d'arrachement permet de reproduire les modes de rupture les plus fréquents dans la pratique, à savoir :

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

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.

1.2. Dispositif expérimental conçu et employé au Centre de Géosciences

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 à partir de 2008 au Centre de Géosciences MINES-ParisTech.

Par rapport à d'autres cellules existantes trouvées dans la bibliographie, le nouveau dispositif permet de :

- tester des pressions de confinement plus importantes (jusqu'à 20MPa) ;
- étudier les trois types de rupture principaux ;
- étudier différents types de roche et de tiges ;
- étudier l'influence du scellement et de son épaisseur ;
- étudier l'importance de l'état de surface du trou percé dans la roche ;
- éviter la rotation lorsque les câbles seront testés.

La nouvelle cellule permet également l'étude d'autres paramètres dont l'influence est mieux maîtrisée (tels que la longueur d'ancrage). En même temps, l'emploi d'une vraie roche au lieu d'échantillons de ciment ou béton 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). La figure 1 montre les différents composants de la cellule d'arrachement ainsi qu'une vue du dispositif expérimental pendant la réalisation d'un essai :

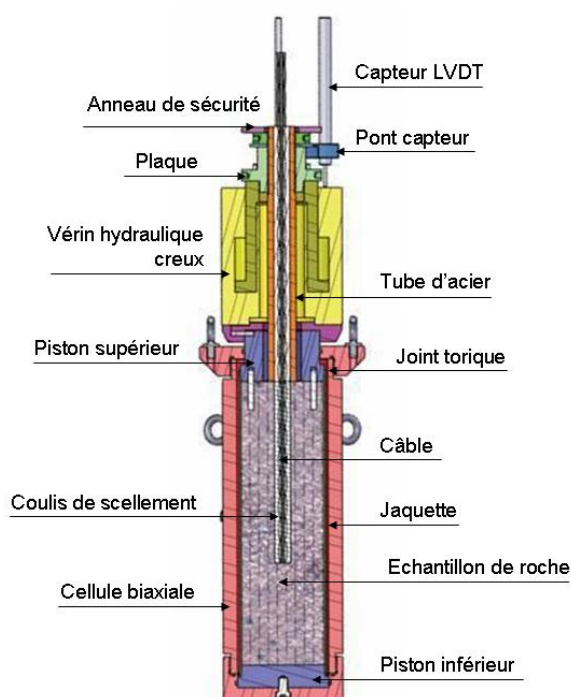


Figure 1 : Principaux éléments du banc expérimental et vue pendant un essai

Il convient de remarquer que la conception de ce nouveau dispositif est basée sur le principe du **double arrachement** : pendant l'essai, la force axiale appliquée grâce au vérin hydraulique creux permet de tirer sur la longueur de la tige scellée dans l'échantillon de roche, la longueur scellée dans le tube d'acier ne servant qu'à

reproduire la longueur du boulon assurant l'ancrage ; c'est-à-dire, l'éventuel glissement relatif aura lieu dans le trou borgne foré dans l'échantillon de roche, tandis qu'à l'intérieur du tube métallique creux il ne devrait pas avoir de mouvement relatif entre les composants. Ceci est montré pour un cas réel dans la figure 2 suivante, où la *longueur d'ancrage* correspond à la longueur du boulon scellée dans l'échantillon de roche de la figure 1. Cet échantillon est contenu dans la *cellule biaxiale*, qui permet d'appliquer un confinement pour mieux reproduire les conditions in-situ :

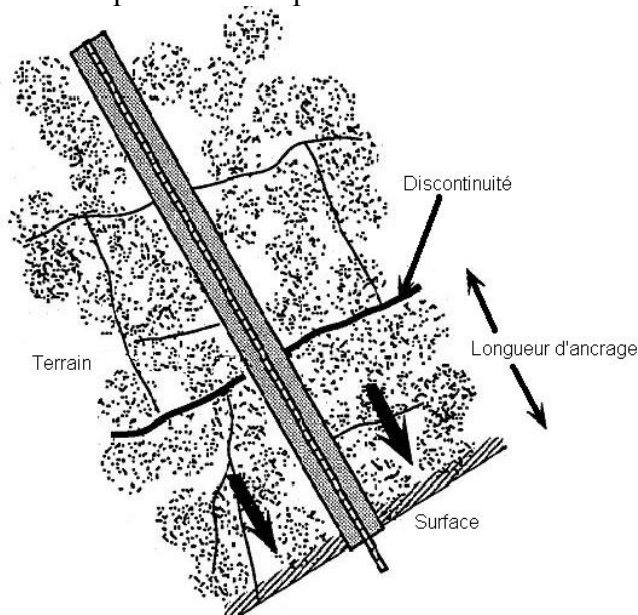


Figure 2 : Situation réelle. Définition de la longueur d'ancrage

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

<i>Banc d'essais</i>		
<i>Cellule</i>	Diamètre extérieur (mm)	210
	Diamètre intérieur (mm)	160
	Longueur du corps (mm)	555
	Pression maximale (MPa)	25
<i>Echantillon</i>	Matériau	Variable
	Diamètre (mm)	144±1
	Hauteur (mm)	500±1
	Rainurage intérieur (vitesse 6tr/min)	Circulaire (pas 10mm, profondeur 3±1mm)
	Longueur trou borgne	Variable
<i>Tube métallique</i>	Diamètre extérieur (mm)	50±1mm
	Diamètre intérieur (mm)	Variable (fonction du boulon)
	Longueur (mm)	480±5
	Rainurage intérieur (sur 170mm partant des extrémités)	Circulaire (pas 10±5mm, profondeur de 2±1mm)
	Filetage extérieur	ISO de pas 3mm sur 200mm
<i>Jaquette</i>	Longueur (mm)	570±2
<i>Tige</i>	Type	Câble / Boulon
	Scellement	Ciment / Résine

Tableau 1 : Principales dimensions du banc d'essais du Centre de Géosciences

L'acquisition de mesures (force appliquée par le vérin, déplacement axial et pression de confinement) se fait grâce au programme LabVIEW. La force est calculée à partir de la pression d'huile mesurée dans le tuyau d'alimentation du vérin. Pour faire la conversion pression-force, on utilise la courbe d'étalonnage du vérin. Le déplacement affiché par le système d'acquisition correspond à la moyenne mesurée par les trois capteurs LVDT. Dans tous les cas, la fréquence d'échantillonnage du signal est de 5Hz (*i.e.*, on prend 5 mesures par seconde).

L'analyse des essais effectués jusqu'au présent nous ont permis d'introduire quelques améliorations dans l'acquisition des mesures. Ces changements seront détaillés dans le chapitre 3 (cf. *Améliorations introduites dans le banc d'essais*).

Comme expliqué dans le premier rapport, la transmission de la force du vérin au boulon ou câble est effectuée par la *plaque* à filetage simple vissée dans le *tube d'acier* (voir figure 1). La réaction du vérin s'effectue sur le *piston supérieur*. L'emploi d'une résine HILTI de bonnes propriétés mécaniques pour sceller le boulon au tube empêche le glissement dans cette partie. Le tube métallique repose sur la carotte de roche sans y être collé. De cette façon, lorsque le vérin est activé (grâce à une pompe électrique), 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'à la déformation de la tige et au glissement relatif ayant lieu à l'intérieur du trou borgne (que ce soit à l'interface tige-scellement ou scellement-roche) et non à l'éventuelle déformation de la tige due à la présence du tube métallique ; en effet, la force appliquée par le vérin est retrouvée dans la section du boulon située au niveau de l'interface entre la carotte et le tube. Bien qu'il n'y ait pas de glissement relatif à l'intérieur du tube, la tige se déforme élastiquement sous l'effet de la force appliquée, et le déplacement correspondant doit être supprimé de la valeur indiquée par les capteurs LVDT.

2. Campagne d'essais effectuée en laboratoire

2.1. Matériel fourni par l'ANDRA

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 :

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

Tableau 2 : Matériel fourni par l'ANDRA le 18/06/2009

Tout ce matériel est consommé dans les essais et n'est donc pas réutilisable. Les autres éléments non réutilisables après chaque essai sont :

- le tube métallique creux. Le rainurage intérieur de ce tube (cf. Tableau 1) a pour but d'empêcher le glissement entre la résine HILTI et la paroi métallique. Les tubes sont fournis par les Acieries de la Seine (94) sous une longueur comprise entre 5 et 6m. Après découpe au Centre de Géosciences, le filetage et le rainurage sont assurés par Mécadistribution (77) ;
- la résine HILTI pour sceller le boulon à l'intérieur du tube métallique. Fournisseur : HILTI ;
- le ciment employé lorsque l'on utilise du coulis pour faire le scellement à l'intérieur du trou borgne. Ce ciment est de type Calcia de 32,5MPa de résistance à la compression simple à 28 jours ;
- les échantillons de roche. Le grès des Vosges a été retenu pour la réalisation des essais parce qu'il est très homogène et offre de bonnes propriétés mécaniques (cf. alinéa suivant). De plus, ce type de roche a été déjà employé par d'autres laboratoires (RMT-Golder, Royaume Uni) pour faire des essais similaires aux essais que nous effectuons. Le grès utilisé provient de la carrière de Rothbach (67). Il est livré sous la forme de blocs de 1000x500x400mm³. Le carottage des échantillons, le forage des trous borgnes et leur rainurage ultérieur sont assurés par le laboratoire du Centre de Géosciences.

2.2. Caractérisation des échantillons rocheux (grès des Vosges)

Outre son homogénéité, le grès est retenu dans les essais d'arrachement parce qu'il s'agit d'une roche que l'on rencontre très souvent dans les mines de charbon (il ne faut pas oublier qu'une grande partie de la recherche menée autour du monde dans le domaine de l'ancrage réparti dérive des applications minières et en particulier des mines de charbon).

Afin de déterminer les propriétés mécaniques les plus importantes de ce matériau, des essais de compression simple (trois), compression triaxiale (six) et traction indirecte (trois essais brésiliens) ont été effectués sur des éprouvettes préparées à cet effet. Le confinement appliqué lors des essais triaxiaux fut de 2, 5 et 10MPa (on a réalisé deux essais par niveau de confinement). La figure 3 montre les cercles de Mohr

déduits de ces essais pour les valeurs correspondantes au pic de résistance (pour chaque pression de confinement, on représente la moyenne des deux essais réalisés) :

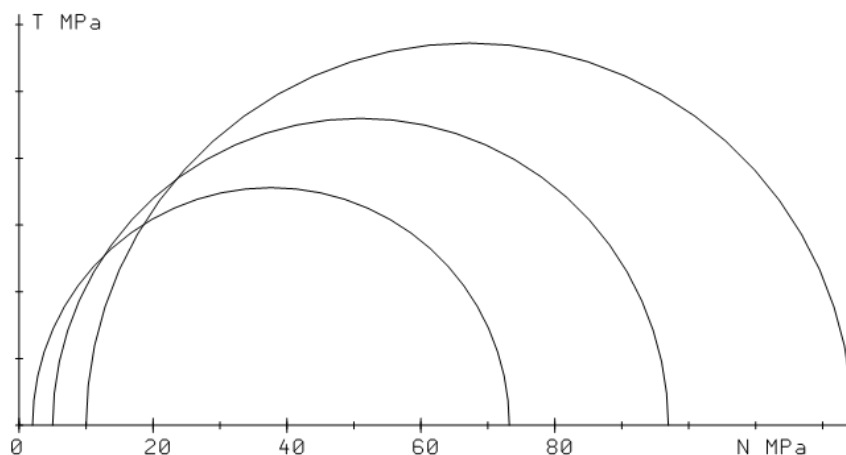


Figure 3 : Représentation des résultats des essais triaxiaux dans le plan (σ , τ). Valeurs au pic

Le tableau 3 suivant montre les propriétés déduites des essais effectués :

<i>Propriété</i>	<i>Valeur</i>
Vitesse du son	2923 m/s
Densité	2137 kg/m ³
Module Young	13700MPa
Coefficient de Poisson	0,26
Résistance en compression simple	60MPa
Résistance à la traction	3,1MPa
Cohésion de pic	12,4 MPa
Angle de frottement de pic	46°
Cohésion résiduelle	4,9 MPa
Angle de frottement résiduel	37°

Tableau 3 : Principales propriétés mécaniques du grès des Vosges

Ces essais montrent que le grès employé possède de bonnes propriétés mécaniques. Ceci est très important si l'on considère le principe de fonctionnement de la cellule : la réaction du vérin se fait via le piston supérieur sur l'échantillon de roche et, par ailleurs, le confinement latéral appliqué afin de mieux reproduire les conditions in-situ est transmis au scellement et à la tige à travers le cylindre de grès.

2.3. Objectifs des essais. Essais prévus pour la première campagne

Les principaux buts des essais que nous effectuons au laboratoire sont les suivants :

- déterminer quels sont les paramètres ayant un rôle prépondérant dans le comportement à l'arrachement des boulons à ancrage réparti ;
- quantifier l'effet de chacun de ces paramètres et leurs possibles relations ;
- d'après les résultats obtenus, établir une loi de comportement pour l'interface de rupture (tige-scellement ou scellement-roche). Cette loi doit prendre en compte

l'effet des paramètres étudiés pour ainsi améliorer les lois d'interface actuelles. Par ailleurs, il est important de noter que les essais en laboratoire, du fait qu'ils sont mieux contrôlés et plus standardisés que les essais in-situ, permettent de déterminer la loi de comportement de l'interface de rupture de façon plus précise.

Dans un premier temps, nous avons décidé d'étudier l'effet des paramètres ci-dessous :

- longueur d'ancrage ;
- type de boulon (matériau constitutif) ;
- profil du boulon ;
- état surfacique du trou borgne ;
- pression de confinement ;
- type de scellement (de la résine et du ciment avec des ratios eau:ciment, w:c, différents).

La première campagne entreprise grâce au matériel fourni par l'ANDRA a été réalisée entre les mois de janvier et mars 2010. La préparation des échantillons débute en octobre 2009. Un total de 32 échantillons fut prévu au début, dont un test en utilisant une tige lisse non fournie par l'ANDRA ; néanmoins, des problèmes survenus lors de la préparation de certains d'entre eux réduisirent le nombre d'éprouvettes disponibles à 29.

Jusqu'au présent, vingt-quatre essais ont été effectués. Comme nous allons voir dans le chapitre suivant (cf. *Améliorations introduites dans le banc d'essais*), la campagne n'est pas achevée à l'heure actuelle à cause des changements que nous avons décidés d'introduire dans le banc expérimental afin d'obtenir des résultats plus précis et plus faciles à exploiter. Ces améliorations ont été proposées au fur et à mesure que nous avons analysé les résultats obtenus.

Le tableau 4 suivant montre les essais prévus pour la première campagne ainsi que leurs particularités.

Le diamètre du trou borgne dans le cas des essais effectués sur les boulons HA25 est de 40mm, tandis que dans le cas des essais sur les boulons en fibre de verre, ce diamètre vaut 35mm. Pour l'arrachement de la tige lisse (de 20mm de diamètre), une couronne de carottage de 30mm de diamètre a été employée pour forer le trou intérieur. Tous les trous borgnes des éprouvettes de grès, à l'exception de celui employé dans l'essai 17, sont rainurés.

Tous les boulons en fibre de verre fournis ont été utilisés dans cette première campagne. Des dix boulons HA25 fournis, quatre sont encore disponibles.

Test	Tige	L (mm)	Pression confinement (MPa)	Scellement	Rupture
1	HA25	130	5	Résine	Essai arrêté très tôt
2	HA25	130	P_{atm}	Résine	Essai arrêté très tôt
3	HA25	130	5	w:c=0,4	Interface boulon-scellement
4	HA25	130	10	Résine	Interface boulon-scellement
5	HA25	130	2	Résine	Deux interfaces
6	HA25	130	10	w:c=0,35	Interface boulon-scellement
7	HA25	130	2	w:c=0,35	Interface boulon-scellement
8	GRP	130	10	Résine	Deux interfaces
9	GRP	130	5	Résine	Interface boulon-scellement
10	GRP	130	2	Résine	Interface boulon-scellement
11	GRP	130	P_{atm}	Résine	Rupture échantillon de grès
12	HA25	90	10	Résine	Interface scellement-roche
13	HA25	90	5	Résine	Interface boulon-scellement
14	HA25	90	2	Résine	Interface scellement-roche
15	HA25	90	P_{atm}	Résine	Interface scellement-roche
16	HA25	150	15	Résine	Interface boulon-scellement
17	HA25	130	10	Résine	Interface boulon-scellement
18	Lisse	100	5	Résine	Essai non exploitable
19	GRP	90	10	Résine	Deux interfaces
20	GRP	90	5	Résine	Interface boulon-scellement
21	GRP	90	2	Résine	Interface boulon-scellement
22	GRP	90	P_{atm}	Résine	Interface scellement-roche
23	GRP	130	2	w:c=0,35	Interface boulon-scellement
24	GRP	130	5	w:c=0,35	Interface boulon-scellement
25	GRP	130	P_{atm}	w:c=0,35	Echantillon préparé. Non testé
26	GRP	90	5	w:c=0,35	Echantillon préparé. Non testé
27	GRP	90	2	w:c=0,35	Echantillon préparé. Non testé
28	GRP	90	P_{atm}	w:c=0,35	Echantillon préparé. Non testé
29	GRP	170	20	Résine	Echantillon préparé. Non testé
30	HA25	130	5	w:c=0,3	Echantillon perdu (très incliné)
31	HA25	130	5	w:c=0,35	Echantillon perdu (très incliné)
32	HA25	130	5	w:c=0,4	Echantillon perdu (très incliné)

Tableau 4 : Tests d'arrachement prévus pour la première campagne. Modes de rupture obtenus

2.4. Préparation des échantillons à tester

Des procédures précises de préparation des éprouvettes, de montage/démontage du banc expérimental et de réalisation d'un essai ont été établies. La préparation des différents consommables s'effectue de la façon suivante :

1. Découpe des boulons en trois morceaux de 80cm de longueur.
2. Carottage des blocs de grès. Dans le but de bien assurer le centrage et la verticalité du trou borgne, on commence par faire une amorce en utilisant la couronne de carottage de diamètre 144mm. La profondeur de cette amorce est comprise entre 10 et 50mm. Ensuite, on installe la couronne correspondante au diamètre du trou borgne souhaité et on fore ce trou jusqu'à la profondeur désirée. Ensuite, et toujours sans déplacer la carotteuse, on réinstalle la couronne de 144mm et on reprend l'amorce faite au préalable (voir l'image 4). Le cylindre de grès est alors carotté sur toute la hauteur du bloc, i.e., 500mm.

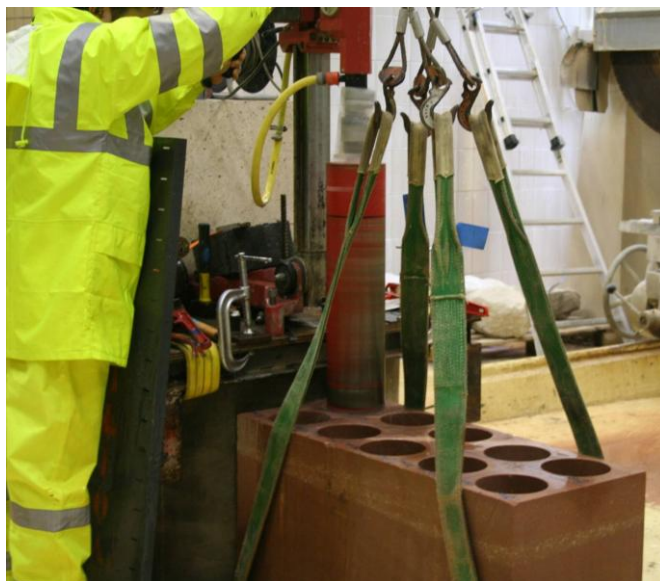


Figure 4 : Carottage du bloc de grès. Forage de la carotte après réalisation du trou borgne

3. Rainurage de la surface latérale du trou borgne. Pour ce faire, on utilise le tour vertical disponible à la Halle d'essais (voir figure 5). Les rainures sont circulaires et sont faites tous les 10mm avec une profondeur de 3 ± 1 mm. La vitesse de rotation du tour est de 6tr/min.



Figure 5 : Vue du tour pendant le rainurage d'un échantillon de grès. Vue des rainures créées

4. 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 catalyseur avec une perceuse équipée d'une fine tige avec une extrémité en forme d'hélice (voir figure 6). Pour le ciment, 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 $w:c \leq 0,35$ rendait 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). Depuis, la mise en place du coulis ne pose aucun problème.



Figure 6 : Insertion et mélange de la résine dans l'échantillon de grès. Versement du coulis de ciment dans le trou borgne

5. 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 7). 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 7 : Pièces en plexiglas conçues pour le centrage du boulon et du tube métallique et vue de deux étapes du processus de mise en place

6. 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.
7. On effectue le scellement dans le tube métallique avec une résine HILTI de bonnes 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 8). Lorsque la résine déborde en haut, on vérifie la verticalité du tube et le bon centrage du boulon.



Figure 8 : Outil pour le scellement de la tige dans le tube métallique et vue pendant l'opération

Améliorations introduites dans la préparation

La préparation d'un nombre important d'échantillons nous a permis de comprendre les principaux enjeux et d'introduire quelques améliorations pour les surmonter, à savoir :

- la précision de montage du banc expérimental exige que l'ensemble roche-boulon-tube métallique soit le plus vertical possible. On a constaté que la pièce en plexiglas servant à centrer le boulon n'était pas suffisamment longue pour respecter l'inclinaison maximale admise. Pour cette raison, on a commandé de nouvelles pièces (trois pièces pour chaque diamètre différent) de 500mm de longueur totale (voir figure 7 ci-dessus, image de droite) ;
- lorsque le scellement est fait au coulis de ciment, il est très important de laisser quelques jours les trois pièces en plexiglas installées sur l'ensemble roche-boulon avant de mettre le tube métallique en place. Ceci est dû au rétrécissement du ciment pendant la prise : en effet, si l'on enlève les pièces de centrage avant que le ciment n'ait modérément séché, le boulon peut s'incliner de quelques degrés. Ce phénomène s'est produit lors de la préparation des échantillons 30, 31 et 32 (cf. Tableau 4), qui n'ont pas pu être utilisés car ils étaient trop inclinés pour pouvoir les installer dans la cellule expérimentale ;
- le rainurage du trou borgne est l'une des phases de préparation les plus critiques. En effet, comme nous allons voir dans le chapitre suivant, la bonne réalisation des rainures conditionne fortement l'interface où la rupture aura lieu. Cette constatation nous a conduits à acheter un nouvel outil plus long pour mieux rainurer les trous borgnes sur toute leur longueur ;
- lors du démontage du banc d'essais, l'étape la plus compliquée s'avère en général celle qui consiste à retirer la jaquette de l'échantillon de grès : il faut faire glisser la membrane le long de la surface latérale du cylindre de roche, de 500mm de long, donc le frottement est important. Etant donné que seulement l'échantillon de grès fait à peu-près 15kg, il n'est pas envisageable de « secouer » légèrement l'ensemble pour désolidariser les pièces. La solution retenue a consisté à poser l'ensemble roche+jaquette sur un socle cylindrique de diamètre 144mm (*i.e.*, celui du cylindre de grès) et environ 44mm de hauteur. Un anneau ayant un diamètre intérieur de 145mm, une épaisseur de 12,5mm, une hauteur inférieure à celle du socle (environ 18,5mm) et équipé de trois anneaux

dans sa paroi extérieure est posé par terre et entoure le socle. A l'aide du palan de manutention, on soulève doucement l'anneau et on fait ainsi glisser la jaquette le long du corps de l'échantillon de roche, sa récupération se faisant alors par le haut de l'échantillon de grès.

3. Résultats obtenus au Centre de Géosciences

3.1. Campagne initiale d'essais effectuée en 2009

Un total de huit essais a été effectué pendant le printemps 2009 dans le laboratoire du Centre de Géosciences. Les boulons employés à cette occasion avaient un diamètre de 20mm et 180kN de résistance à la traction. Leur profil était crénelé, avec des verrous obliques disposés d'une façon similaire à ceux présents dans les boulons HA25.

Le but principal de ces essais était de mettre au point le nouveau banc d'essais afin de pouvoir commencer à réaliser des essais conduisant à améliorer les lois de comportement actuelles. En même temps, ces premiers essais ont confirmé la capacité du nouveau dispositif à reproduire les trois types principaux de rupture du soutènement par ancrage passif, à savoir : rupture de la tige, glissement à l'interface roche-scellement et glissement à l'interface scellement-boulon. Ils ont aussi permis de comprendre l'importance du bon dimensionnement de tous les composants des échantillons à tester pour que la rupture ait lieu davantage à l'endroit souhaité.

Par ailleurs, l'exploitation des résultats obtenus a montré que, du fait de la configuration en double arrachement de la cellule, les valeurs de déplacement axial enregistrées par les capteurs LVDT doivent être corrigées (voir figure 11 ci-après), comme il a été annoncé précédemment.

Le tableau suivant récapitule les essais effectués en 2009 :

<i>Essai</i>	<i>Scellement</i>	<i>L(mm)</i>	<i>Pression Confinement (MPa)</i>	<i>Rupture</i>
1	Résine	280	13	Rupture de la tige
2	Résine	300	7,5	Non exploitable (mauvaise préparation)
3	Résine	300	15	Glissement tube métallique
4	w:c=0,4	300	15	Rupture de la tige
5	w:c=0,45	300	5	Rupture de la tige
6	Résine	300	5	Glissement tube métallique
7	Résine	150	5	Interface scellement-roche
8	Résine	100	5,1	Interface boulon-scellement

Tableau 5 : Récapitulatif des essais d'arrachement effectués en 2009. Modes de rupture obtenus

Comme on peut le constater, le glissement a eu lieu deux fois à l'intérieur du tube métallique (forte longueur d'ancrage dans l'échantillon de roche et confinement élevé, donc l'arrachement s'est produit principalement dans le tube creux). Afin de provoquer la rupture par glissement dans l'une des deux interfaces en étude, on a diminué la longueur d'ancrage à 150mm, ce qui a favorisé le glissement au niveau de l'interface entre l'échantillon de grès et la résine Minova. Finalement, le rainurage du trou borgne nous a conduits à obtenir la rupture dans l'interface boulon-résine (essai 8).

Les figures suivantes montrent les résultats (en termes de force axiale-déplacement axial) obtenus dans le cas des essais 4, 7 et 8, respectivement.

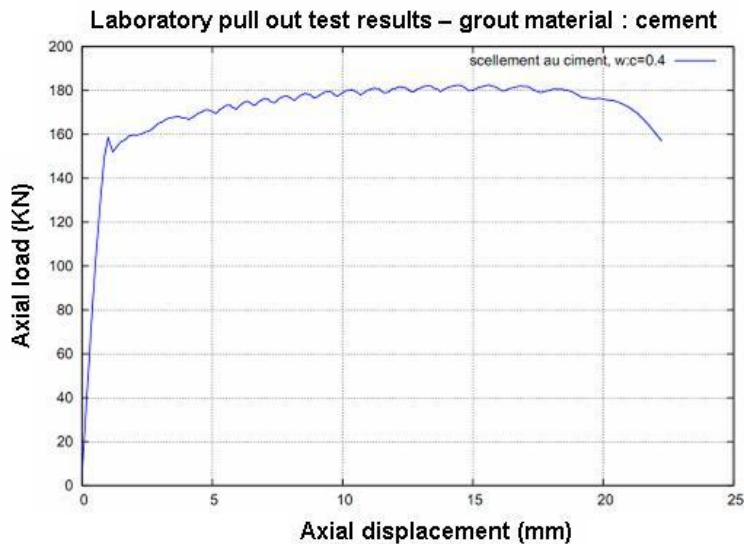


Figure 9 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=300\text{mm}$, $P=15\text{MPa}$, $w:c=0,4$

Dans le premier cas, la tige s'est cassée par dépassement de sa résistance à la traction (180kN). Par ailleurs, avant que la tige ne casse, 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 mécaniques 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 plus facilement à l'intérieur du tube métallique, à l'interface boulon-scellement.

Dans l'essai montré ci-dessous, la rupture a eu lieu à l'interface résine-roche :

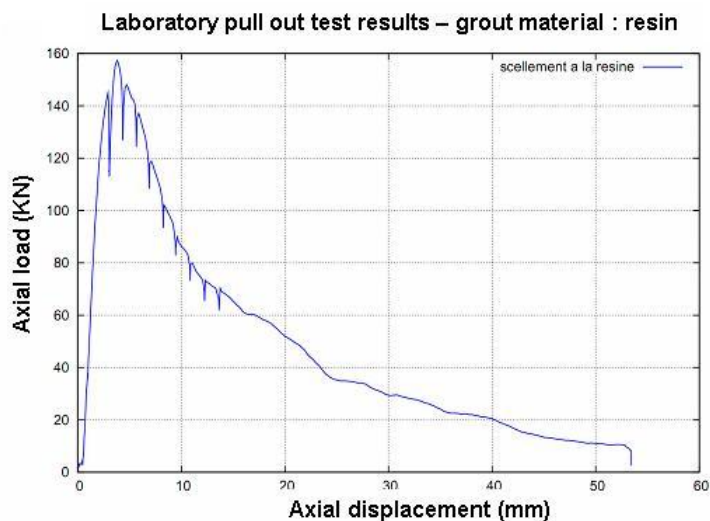


Figure 10 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=150\text{mm}$, $P=5\text{MPa}$, scellement à la résine

La figure 11 montre le résultat obtenu dans le dernier essai. On présente les valeurs brutes obtenues pendant l'essai (*i.e.*, sans correction) et les valeurs corrigées, après soustraction du déplacement qui a lieu du fait de la présence du tube métallique.

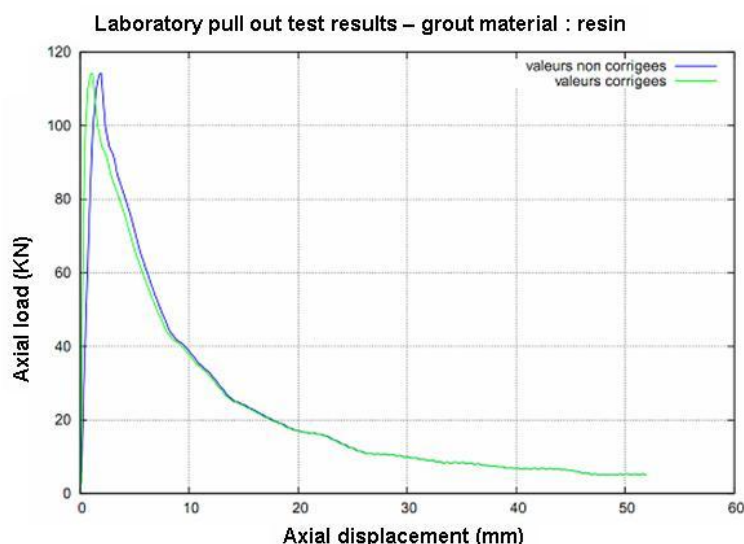


Figure 11 : Résultat de l'essai d'arrachement pour $L=100\text{mm}$, $P=5,1\text{MPa}$, scellement à la résine

A l'issue de cet essai, on a commencé à développer un modèle analytique capable de prédire le comportement d'un essai d'arrachement, une fois la loi d'interface connue.

Les détails de la nouvelle approche analytique développée seront donnés dans le chapitre 4.

3.2. Campagne d'essais effectuée en 2010

Jusqu'au présent, les premiers vingt-quatre essais présentés dans le tableau 4 ont été effectués. Le seul essai non exploitable est l'essai 18, à cause d'une mauvaise installation de l'échantillon dans la cellule. Dans cet essai, une tige lisse de 20mm de diamètre avait été utilisée. L'objectif de ce test était d'étudier l'influence des rugosités des boulons crénelés sur la capacité d'ancrage et de comparer les résultats avec ceux obtenus pour des tiges lisses. L'essai sera refait avec une nouvelle tige lors du redémarrage de la campagne.

On présente dans la suite les résultats obtenus et les principales observations en déduites.

Boulons en acier (HA25)

La figure 12 montre les résultats obtenus dans les essais effectués sur les boulons HA25, pour quatre pressions de confinement différentes et pour une longueur d'ancrage de 130mm. La figure 13 montre les résultats correspondants aux mêmes confinements testés lorsque la longueur d'ancrage employée est de 90mm. Le matériau de scellement employé dans les huit essais est la résine Minova.

Les deux graphiques montrent que les résultats sont cohérents en termes de l'influence de la pression de confinement, sauf pour l'essai 12 ($L=90\text{mm}$, $P=9,81\text{MPa}$) : pour une longueur donnée, plus le confinement est fort, plus la résistance à l'ancrage développée est importante. L'observation visuelle de l'échantillon 12 après l'essai nous a permis de comprendre l'anomalie obtenue : dans cet essai, la rupture s'est produite au

niveau de l'interface roche-résine et le rainurage n'était pas *a priori* très bien exécuté, d'après la comparaison entre l'état des échantillons 12 et 14 (voir figure 14).

Le cas de l'essai 4 ($L=130\text{mm}$, $P=10,03\text{MPa}$) est un peu spécial parce que dans cet essai la force maximale atteinte est de $261,30\text{kN}$, valeur qui dépasse la limite élastique de la tige (245kN), ce qui explique la forte valeur obtenue. La rupture a eu lieu à l'interface boulon-résine.

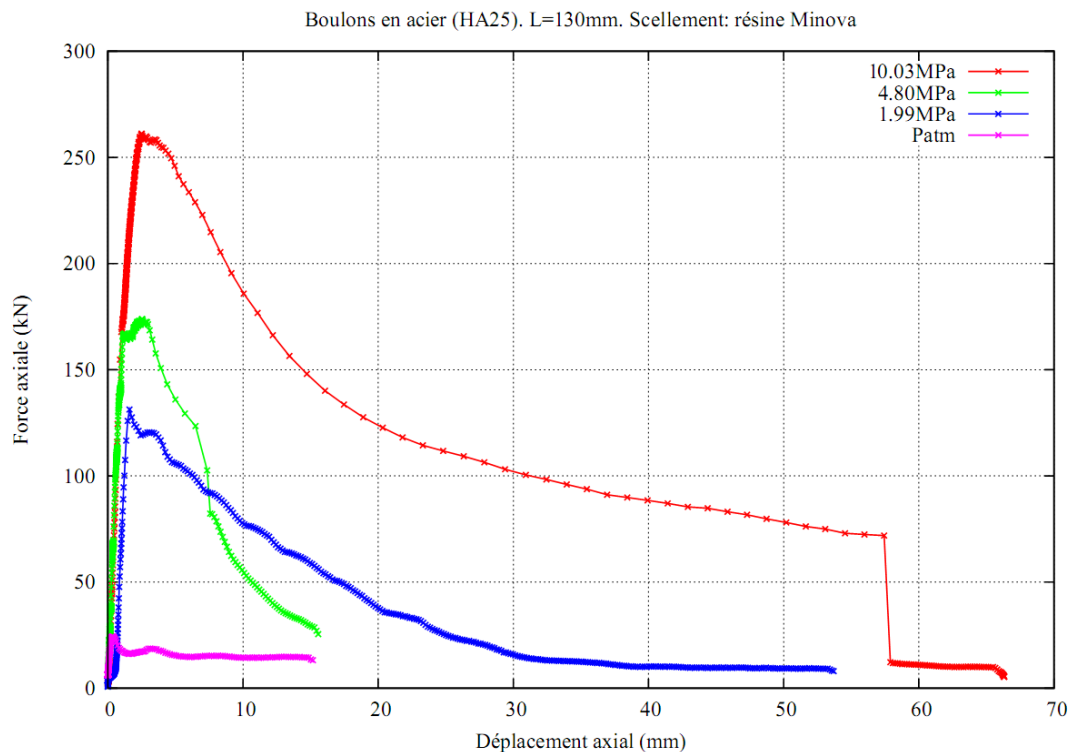


Figure 12 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. $L=130\text{mm}$. Scellement à la résine

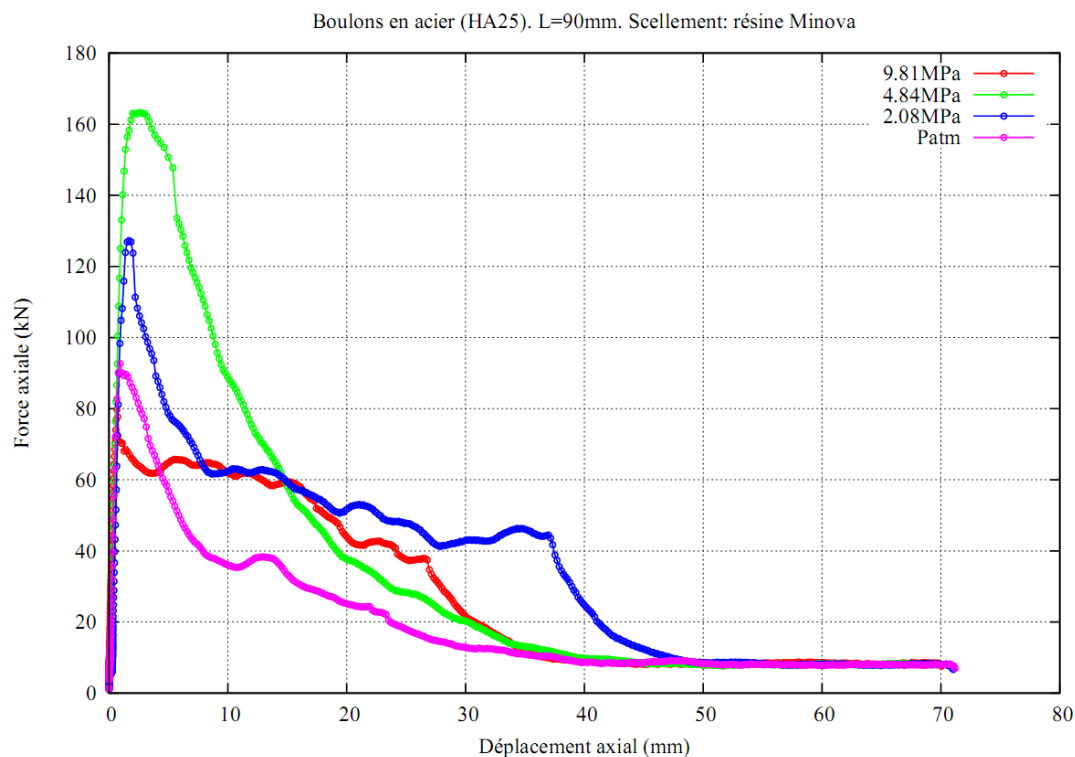


Figure 13 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. $L=90\text{mm}$. Scellement à la résine



Essai 12 (L=90mm, P=9,81MPa)



Essai 14 (L=90mm, P=2,08MPa)

Figure 14 : Vue de deux échantillons où la rupture s'est produite à l'interface résine-roche. Les rainures sont plus marquées dans l'échantillon correspondant à l'essai 14

Les essais à L=130mm effectués à 5MPa et sans confinement (essais 1 et 2 respectivement) ont été arrêtés très tôt car ce sont les premiers essais effectués ; à cette époque-là, le programme d'acquisition de mesures ne permettait pas de visualiser la courbe de charge de l'essai en temps réel, ce qui nous obligeait à « estimer » à quel moment l'essai devait être arrêté pour ne pas dépasser la course maximale du vérin. Le problème a été rapidement réglé.

La figure 15 compare les résultats obtenus pour différents matériaux de scellement : résine Minova et coulis de ciment à ratio w:c=0,35 et 0,40. Dans tous les cas, la rupture a eu lieu à l'interface boulon-scellement. Bien que le comportement post-pic ne soit pas très différent pour les différents coulis employés (il ne faut pas oublier que dans l'essai 4, la tige a plastifié), il convient de remarquer que, pour un confinement de 2MPa, la force maximale obtenue est supérieure pour le scellement au ciment w:c=0,35 que pour la résine Minova, tandis que lorsque le confinement vaut 5 ou 10MPa, la résine offre de meilleurs résultats que le ciment.

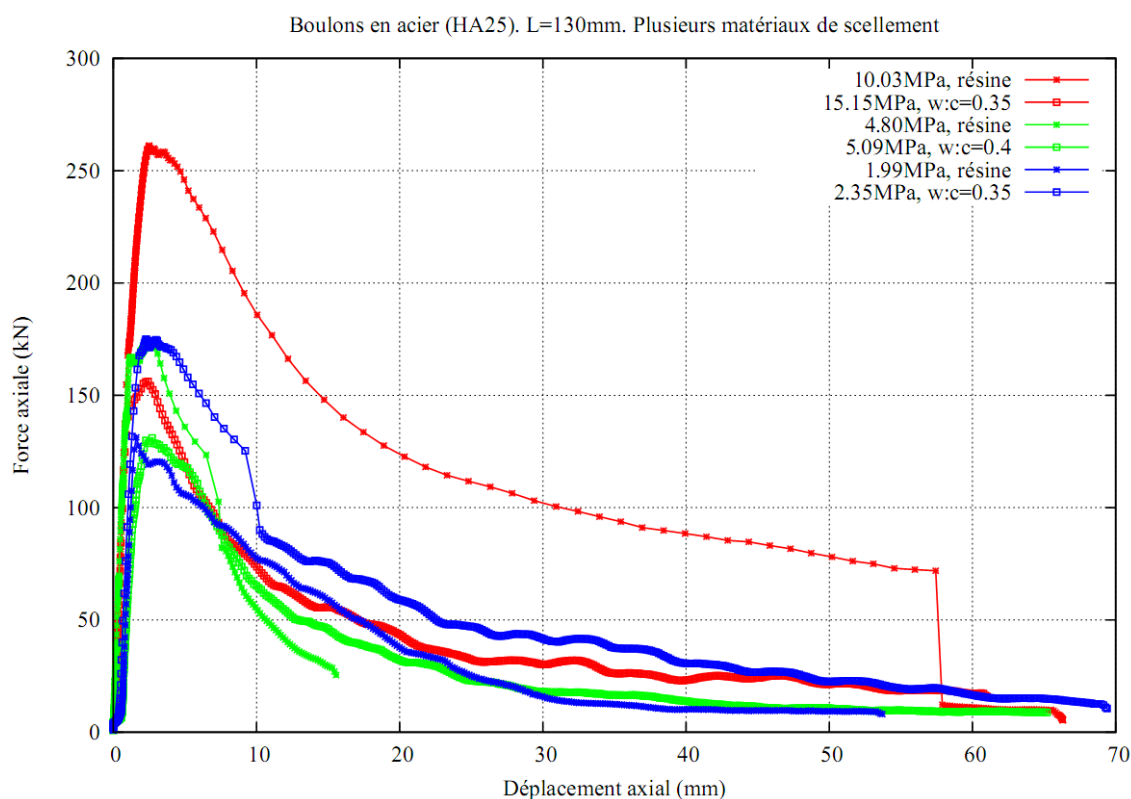


Figure 15 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. L=130mm. Scellements différents

L'explication de ce résultat se trouve dans la résistance à la traction du ciment, qui est d'environ 4MPa. En effet, lorsque l'on tire axialement sur le boulon, une pression radiale fonction du confinement appliqué apparaît à l'interface tige-scellement. Sous l'influence de cette pression (qui sera d'autant plus importante que le confinement est élevé), l'anneau de scellement se comprime radialement et se dilate dans la direction orthoradiale. Les fractures commenceront ainsi à l'interface tige-scellement si la contrainte orthoradiale σ_t est supérieure à la résistance à la traction du scellement. Ensuite, elles se propageront vers la surface latérale extérieure du cylindre de roche. Un calcul analytique permettant de déterminer la contrainte σ_t en fonction des pressions radiales à l'interface boulon-scellement (p_3) et à l'interface roche-scellement (p_2) a été effectué. Les résultats sont affichés dans le tableau 6 (p_1 est la pression de confinement appliquée). On voit clairement que pour 10MPa, σ_t dépasse largement 4MPa, d'où l'obtention d'une force d'arrachement plus faible (l'anneau de scellement est cassé, donc il est plus facile d'arracher le boulon). Pour $p_1=5\text{MPa}$, la contrainte tangentielle obtenue est légèrement inférieure à 4MPa (cette valeur de résistance est juste approximative) :

	p_1	p_2	p_3	σ_t
$w:c=0,40$	2,00	2,31	3,08	1,30
	5,00	5,78	7,70	3,25
	10,00	11,55	15,40	6,50
$w:c=0,35$	2,00	2,40	3,20	1,35
	5,00	5,99	7,99	3,37
	10,00	11,98	15,98	6,74

Tableau 6 : Calcul de la contrainte orthoradiale à l'interface boulon-scellement

La figure 16 suivante compare les résultats obtenus pour de fortes pressions de confinement. Ces résultats n'ont pas été étudiés en détail parce que la tige a plastifié pendant l'essai (pour le moment, on se contente d'analyser les résultats des essais dans lesquels le boulon est resté en phase élastique). En même temps, il est fort probable que le rainurage du trou borgne dans le cas de l'essai 4 ($L=130\text{mm}$, $P=10,03\text{MPa}$) n'ait pas été bien effectué.

En tout cas, il est intéressant de noter que, par rapport aux autres essais effectués sur les boulons en acier HA25, la phase post-pic de ces trois essais ne présente pas de pics et de creux disposés de façon périodique, correspondants au profil crénelé du boulon.

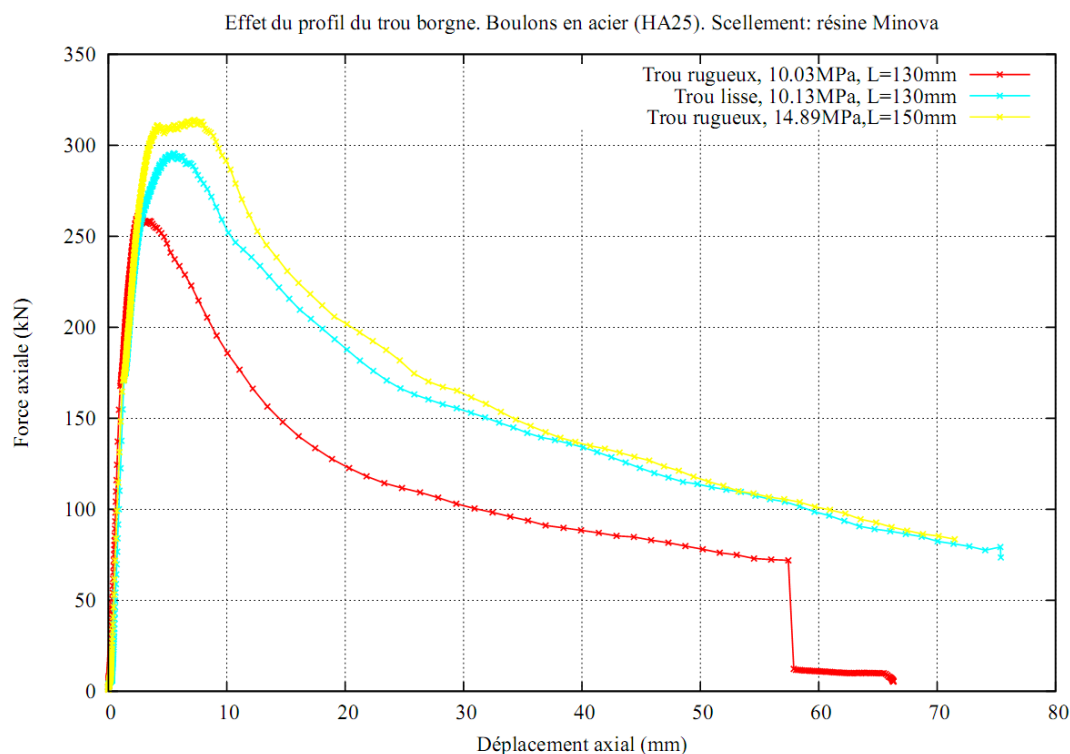


Figure 16 : Essais d'arrachement sur les boulons HA25. Scellement à la résine. Plastification de la tige

Boulons en fibre de verre (GRP)

La figure 17 montre les résultats obtenus pour $L=130\text{mm}$ lorsque la résine Minova a été utilisée comme matériau de scellement. Quatre pressions de confinement différentes ont été employées. Les résultats correspondants aux mêmes confinements lorsque $L=90\text{mm}$ sont présentés dans la figure 18.

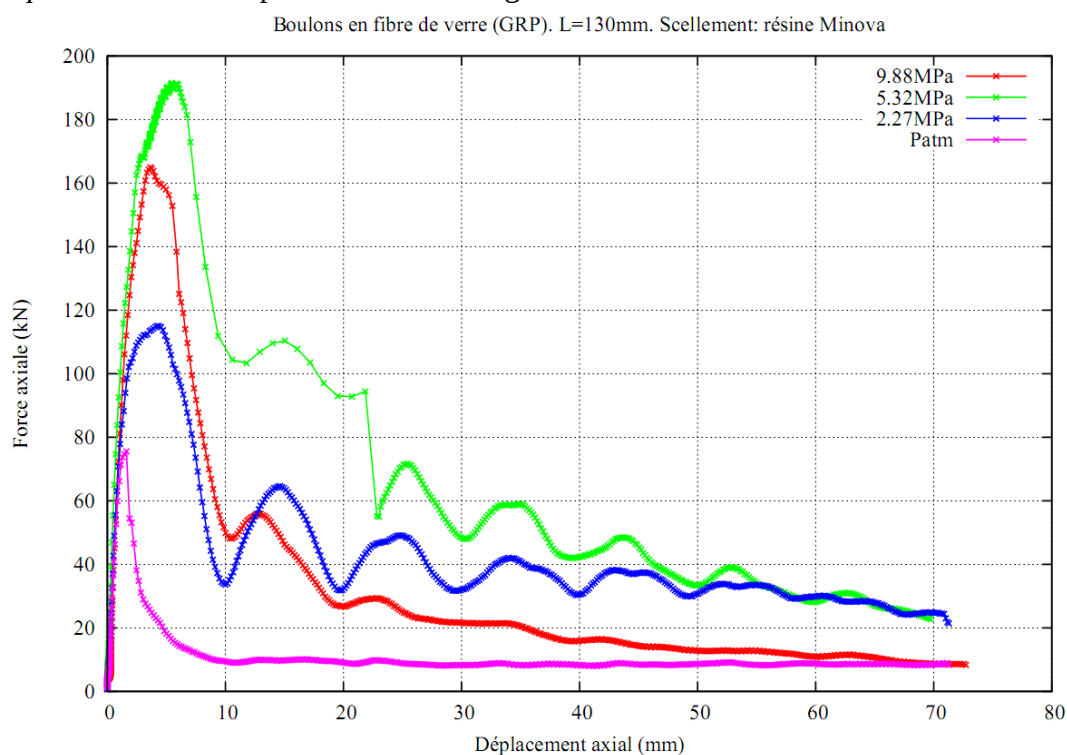


Figure 17 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. $L=130\text{mm}$. Scellement à la résine

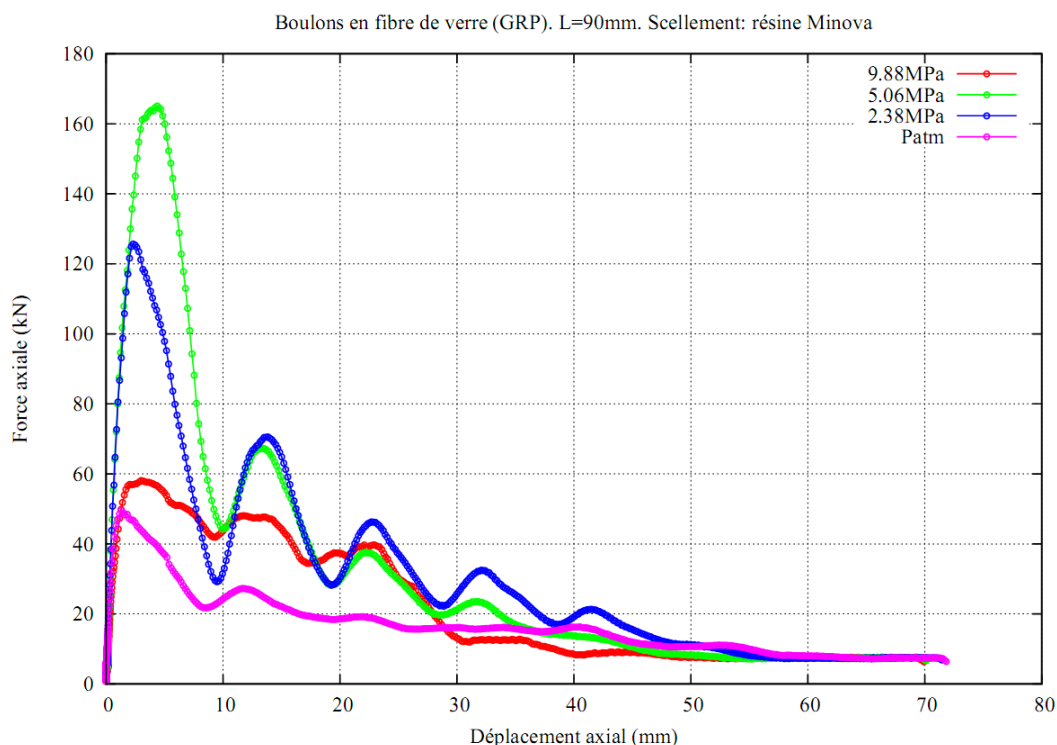
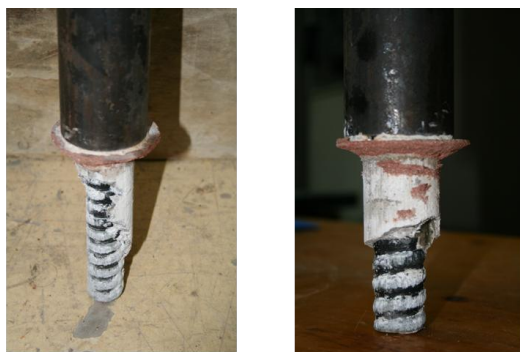


Figure 18 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. L=90mm. Scellement à la résine

Dans ce cas, et à la différence de ce qui était arrivé pour les boulons HA25, on retrouve en phase post-pic, d'une façon très marquée, le profil rugueux du boulon : les pics obtenus dans les courbes de charge sont espacés de 8mm, distance qui correspond à la périodicité des rugosités du boulon. Cet effet s'affaiblit au fur et à mesure que l'essai se poursuit, puisque l'interface boulon-résine est de plus en plus endommagée.

Dans le cas des boulons HA25, le profil est moins marqué parce que les verrous, en plus d'être irréguliers le long du périmètre d'une section droite, ne sont pas aussi protubérants que dans le cas des boulons GRP.

L'analyse des graphiques montre que pour une longueur d'ancrage donnée, la résistance à l'arrachement augmente avec la valeur du confinement appliquée. Ceci est vrai sauf pour les deux cas où le confinement est d'environ 10MPa (essais 8 et 19). Dans ces cas, la rupture a eu lieu aux deux interfaces, comme le montrent les images suivantes :



Essai 8 (L=130m)

Essai 19 (L=90m)

Figure 19 : Vue de la longueur scellée pour les cas où $P \approx 10$ MPa. Rupture des deux interfaces

Par ailleurs, l'observation du profil des trous borgnes révèle clairement que, lorsque le rainurage n'est pas effectué de façon satisfaisante, la rupture a lieu davantage à l'interface roche-scellement (voir l'image 20, correspondante à l'essai 8) :



Figure 20 : Vue du trou borgne après essai. Influence du rainurage sur le type de rupture obtenu

Dans le cas de l'essai 11 ($L=130\text{mm}$, P_{atm}), l'échantillon de roche s'est cassé pendant l'essai, ce qui explique la forme différente de la courbe de charge obtenue. La rupture a donné lieu à quatre morceaux de dimensions similaires deux à deux. La hauteur de ces morceaux ne dépasse en aucun cas la longueur d'ancrage. L'image 21 montre une vue de l'échantillon après démontage du banc expérimental :



Figure 21 : Vue de l'échantillon 11 après essai. Rupture de la carotte de grès (essai effectué à P_{atm})

L'observation du cylindre révèle qu'il y a deux plans de rupture à 45° qui s'étalent sur à peu près la moitié de la section de la carotte. L'autre moitié est coupée suivant un plan horizontal. Les fractures commencent dans tous les cas au niveau de trou borgne et se propagent vers la surface latérale extérieure de l'échantillon. Par ailleurs, lorsqu'on touche les plans de rupture, ceux inclinés sont rugueux, tandis que le plan horizontal est plus lisse (il semble qu'il y a eu du frottement entre les deux parties cassées).

Cette rupture peut s'expliquer de la manière suivante : l'absence d'huile de confinement (il s'agit d'un essai effectué à la pression atmosphérique) permet que l'échantillon de roche puisse se déformer plus aisément dans la direction radiale sous l'effet de la dilatance créée à l'interface boulon-résine, qui est due au profil rugueux du boulon. Une fois l'échantillon cassé, la force exercée par le vérin n'est autre que le poids des éléments à soulever plus un éventuel frottement résiduel.

Pour ce qui est du matériau de scellement, lorsque l'on compare les résultats obtenus avec de la résine Minova et du coulis de ciment (ratio $w:c=0,35$), on constate que le même phénomène qui avait eu lieu lors des essais sur des boulons en acier s'est aussi produit pour les boulons en fibre de verre (voir figure 22) : dès que le scellement est fait à base de ciment, la force maximale obtenue pour un confinement de 2MPa est supérieure à celle obtenue pour un confinement de 5MPa. L'explication est la même que dans le cas précédent, à savoir, la faible résistance à la traction du ciment.

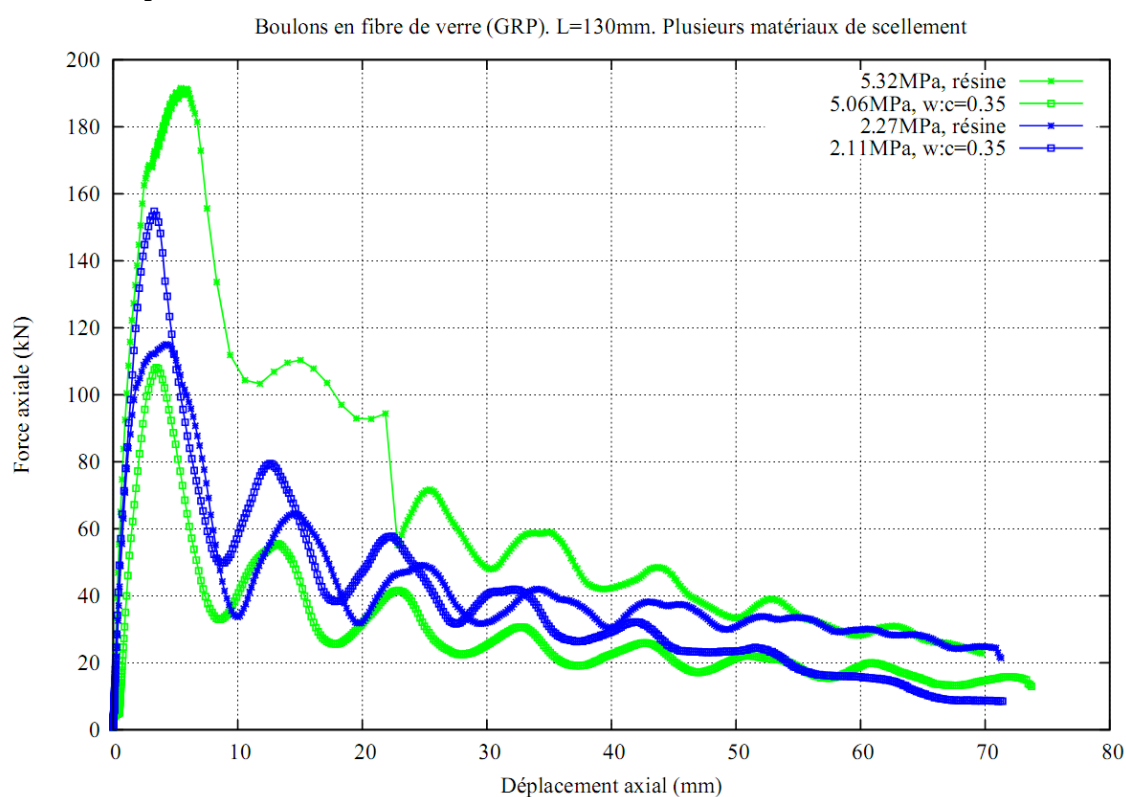


Figure 22 : Essais d'arrachement sur les boulons GRP. L=130mm. Scellements différents

Il est aussi important de remarquer que la force résiduelle obtenue est plus sensible au matériau de scellement qu'à l'effet de la pression de confinement : *a priori*, la résine offre plus de résistance résiduelle à l'arrachement que le coulis de ciment à ratio $w:c=0,35$.

3.3. Améliorations introduites dans le banc d'essais

L'exploitation des résultats obtenus nous a conduits à introduire les changements suivants dans le dispositif expérimental :

1. Mesure de l'effort exercé par le vérin grâce à un capteur de force au lieu de convertir la pression de l'huile injectée en force moyennant la courbe d'étalonnage du vérin.

Le capteur sera installé entre le piston du vérin et la plaque à filetage simple qui est vissée dans le tube métallique. Il a été commandé auprès de SIXAXES. Sa capacité est de 350kN (un peu élevée pour pouvoir l'employer dans les futurs essais sur les câbles), avec une linéarité $\leq \pm 0,25\%$ de l'étendue de mesure. Il disposera de deux trous diamétralement opposés de 7mm de diamètre permettant d'installer les goupilles servant à bloquer toute rotation possible entre le vérin et l'échantillon à tester.

Nous avons jugé que ce capteur était important parce que les mesures de force obtenues ne nous semblent pas être très précises en phase résiduelle : en effet, la valeur indiquée est constante (de l'ordre de 8kN pour les HA25 et de 7kN pour les GRP), alors que la longueur d'ancrage diminue et l'interface de rupture est de plus en plus endommagée. Dans toute logique, cette force résiduelle devrait diminuer et atteindre une valeur presque nulle en fin de l'essai.

Lors de l'arrivée du nouveau capteur, et afin de pouvoir exploiter les résultats dont on dispose déjà de la manière la plus précise possible, on fera simultanément des mesures de pression (comme nous l'avons fait jusqu'au présent) et de force et on essayera d'établir une corrélation entre les deux pour pouvoir corriger les résultats existants.

2. Régulation de la pression de confinement pendant toute la durée de l'essai.
Afin d'assurer que la pression de confinement est maintenue constante durant l'essai, nous avons décidé d'installer un accumulateur d'azote dans le circuit hydraulique de confinement. Il sera mis en place lors du redémarrage de la campagne d'essais.
3. Ralentissement de l'essai pour mieux s'approcher des conditions réelles.
Le débit constant de 0,64l/min imposé par la pompe électrique raccordée au vérin nous oblige à renvoyer une partie de ce débit nominal à son réservoir : la surface effective du vérin étant de 133cm², avec une course de 76mm, l'essai ne pourrait durer plus que 95s. L'emploi d'une vanne à commande proportionnelle n'étant pas possible finalement, on a privilégié l'utilisation d'un robinet, qui permet de prolonger la durée moyenne d'un essai à 2min15s. Cette durée est jugée trop courte si l'on la compare avec le phénomène réel de charge d'un boulon ancré in-situ. Pour cette raison, on a décidé d'enlever le robinet lors des futurs essais. La durée obtenue nous permettra de déterminer si cette solution est valide ou non.

3.4. Conclusions

Une campagne d'essais d'arrachement en laboratoire a été lancée grâce aux boulons et à la résine de scellement fournis par l'ANDRA et elle est achevée en grande partie. Tous les essais sauf un sont exploitables. Cet essai a été effectué sur une tige lisse afin d'étudier l'influence du profil du boulon. Il sera refait lors du redémarrage de la campagne d'essais.

Sur les vingt-trois essais exploitables, la rupture s'est produite dans la plupart des cas (16 essais) à l'interface boulon-scellement, et ce d'autant plus que le rainurage du trou borgne a été bien réalisé.

L'analyse des résultats nous a permis de comprendre un certain nombre de phénomènes, dont l'influence de la pression de confinement sur la résistance à l'arrachement ou encore l'importance du bon rainurage du trou borgne ou l'effet que les

propriétés mécaniques du matériau de scellement ont sur la résistance maximale développée. Nous avons constaté également l'effet du profil du boulon dans la phase post-pic, ainsi que le comportement totalement différent que l'on obtient lorsque la barre plastifie. Ce dernier aspect n'a pas encore été abordé en détail, car dans un premier temps nous ne nous intéressons qu'aux situations où le boulon suit un comportement élastique pendant toute la durée de l'essai.

L'exploitation des résultats n'a pas pu être poussée totalement parce que les mesures de force disponibles ne sont pas très précises à cause du système d'acquisition employé. Un nouveau capteur a été commandé et il permettra de traiter les mesures existantes afin de pouvoir les exploiter de façon rigoureuse.

En tout cas, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant, une loi d'interface a été dérivée des mesures disponibles et les résultats obtenus sont très encourageants.

Les essais que nous ferons une fois la campagne en cours finie, consisteront à valider les résultats déjà obtenus et à étudier l'effet d'autres paramètres, notamment celui de l'épaisseur de l'anneau de scellement. Ceci sera réalisé sur les boulons en acier (car plus répandus).

4. Exploitation des résultats : vers une nouvelle loi rhéologique

4.1. Développement d'une nouvelle solution analytique

Une nouvelle approche analytique qui décrit le comportement des boulons à ancrage réparti soumis à des charges de traction a été développée et un article a été soumis pour publication dans la revue *Construction and Building Materials*.

Le but de cette solution analytique est de prédire le résultat d'un essai d'arrachement (in-situ ou en laboratoire) sur un boulon à ancrage réparti sans avoir besoin de l'effectuer.

Pour ceci, les données nécessaires sont les suivantes :

- le rayon du boulon, R ;
- le module de Young du matériau constitutif du boulon, E ;
- la longueur d'ancrage, L ;
- la loi rhéologique de l'interface, $\tau(w)$. Il s'agit d'une relation locale entre le déplacement axial et la contrainte de cisaillement. Cette loi peut être déduite des essais d'arrachement, comme nous allons le voir ci-après.

La nouvelle solution analytique se base sur deux hypothèses :

- le boulon reste en phase élastique pendant toute la durée de l'essai, et
- le déplacement axial mesuré et le glissement relatif entre le boulon et le matériau de scellement sont identiques, ce qui équivaut à négliger la déformation axiale du boulon (hypothèse justifiée parce que le module de Young des barres employées est très élevé).

Les équations de base de cette solution analytique sont simples : équilibre global du système (voir figure 23 et équation 2), loi de comportement du boulon (équation 3) et loi de comportement de l'interface de rupture (équation 4) :

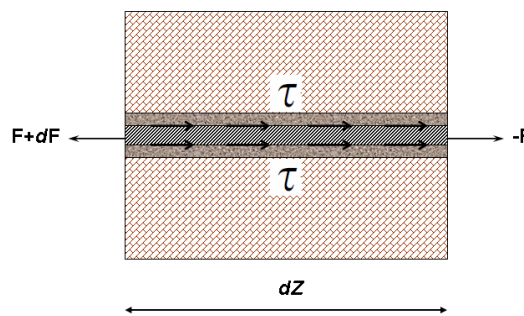


Figure 23 : Distribution des efforts dans une longueur unitaire du système en étude

$$dF - 2\pi R \tau dZ = 0 \quad (2)$$

$$F(Z) = \pi R^2 \sigma(Z) = \pi R^2 E W' \quad (3)$$

$$\tau = S(W) \quad (4)$$

Dans ces équations, $F(Z)$ est la force axiale et $W(Z,T)$ est le déplacement axial du boulon au point Z de l'interface (le système de référence est fixé dans le joint existant entre le boulon et le matériau de scellement).

La combinaison de ces trois équations mène à une équation différentielle de deuxième ordre (équation 5) :

$$W'' = \frac{2}{E R} S(W) \quad (5)$$

Cette équation est assortie des conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} W(kT, T) &= T \\ W'(kT, T) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Où $Z=kT$ correspond à l'extrémité libre du boulon (tension nulle). La nouveauté de cette solution analytique par rapport aux approches existantes consiste à ne pas utiliser de conditions aux limites reliées au point d'application de la force, $Z=L$. Ceci nous a permis de prédire la courbe de charge issue d'un essai d'arrachement en utilisant un seul paramètre de contrôle : le déplacement de l'extrémité libre du boulon, T .

Par ailleurs, le modèle n'est applicable que si le déplacement axial $W(Z, T)$ en tout point $Z \in [0, L]$ est une fonction croissante de T . En effet, la variable $T \geq 0$, qui représente le déplacement de l'extrémité libre du boulon, peut être utilisée comme un temps cinématique parce qu'elle augmente avec le vrai temps (*i.e.*, la progression de l'essai d'arrachement).

La résolution du problème se fait en variables réduites, puisque ceci conduit à une solution plus générale. On a donc : $z=Z/R$, $t=T/R$, et $w(z, t)=W(Z, T)/R$. La loi du joint s'écrit désormais $f(w)=2S(W)/E$. L'équation différentielle (5) devient alors :

$$w'' = f(w) \quad (7)$$

assortie des conditions aux limites :

$$\begin{aligned} w(kt, t) &= t \\ w'(kt, t) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

4.2. Dérivation de la loi d'interface à partir des essais d'arrachement

Il a été annoncé dans l'alinéa précédant que la loi d'interface du joint doit être connue au préalable pour pouvoir utiliser la solution analytique proposée.

Or, durant l'essai d'arrachement, on mesure la force et le déplacement axiaux en gueule du trou borgne : $w(L/R, t)$ et $w'(L/R, t)$. De ces données on peut déduire la loi du joint, $f(w)$, avec d'autant plus de précision que la longueur de scellement est courte, puisque le cisaillement sera alors uniformément distribué sur toute la longueur d'ancrage. On peut donc écrire :

$$f(w(L/R, t)) \approx \frac{w'(L/R, t)}{L/R - kw(L/R, t)} \quad (9)$$

C'est pour cette raison que les essais en laboratoire, mieux contrôlés et à longueur de scellement plus faible, sont plus adaptés pour déterminer la loi du joint entre le boulon et le matériau de scellement (ou entre le scellement et la roche).

L'exploitation des résultats expérimentaux que nous effectuons pour déterminer la loi d'interface et les paramètres les plus influents suit ce principe. La comparaison des fonctions $f(w(L/R,t))$ obtenues dans les différents essais permet de quantifier l'effet de chaque paramètre en étude. Cependant, comme il a été expliqué, cette quantification n'est pas encore finie à cause du problème de précision dans les mesures de force. Elle sera entreprise prochainement, une fois la corrélation entre les mesures de pression et les mesures données directement par le nouveau capteur de force établie.

4.3. Application de la nouvelle approche aux essais d'arrachement

Cette partie est consacrée à la validation de la nouvelle solution analytique proposée. On verra que la nouvelle approche est capable de prédire le résultat des essais in-situ et aussi des essais en laboratoire.

Essai in-situ

L'essai d'arrachement effectué par Chen et Ren en 2008 (*Ren et al. 2009*) sur un boulon de 7,63mm de rayon, $E=200\text{GPa}$ et $L=5\text{m}$ a été retenu pour valider cette loi. La loi d'interface a été supposée tri-linéaire, puisqu'il s'agit d'une loi rhéologique bien connue et acceptée au niveau international. Le modèle tri-linéaire employé est présenté dans l'image de gauche de la figure 24. La comparaison entre les données expérimentales, issues de l'essai d'arrachement, et la prédiction analytique, fournie par la nouvelle approche en utilisant la loi d'interface tri-linéaire présentée, est montrée à droite dans la figure 24. Le résultat est très satisfaisant :

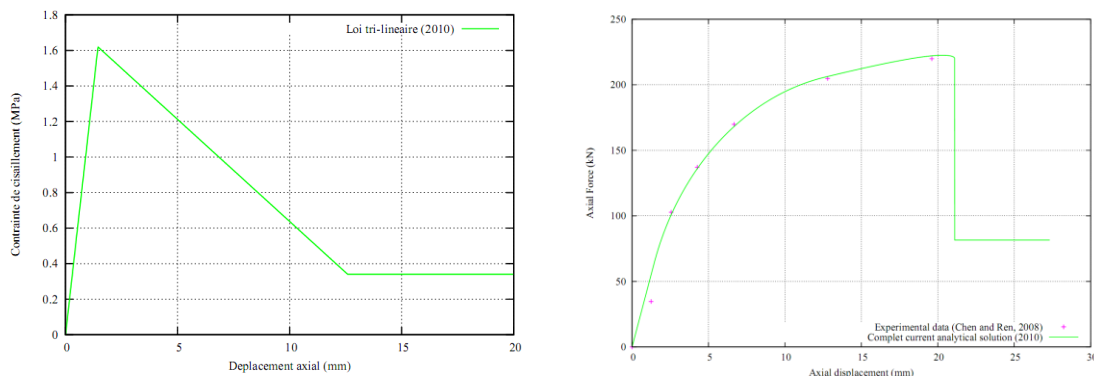


Figure 24 : Modèle rhéologique tri-linéaire pour l'interface boulon-scellement (à gauche) ; comparaison entre le résultat expérimental et la prédiction analytique (à droite)

Essai en laboratoire

L'exploitation des essais effectués dans le laboratoire du Centre de Géosciences suggère une loi d'interface de type non linéaire pour mieux reproduire les résultats expérimentaux :

$$f(w) = (a \cdot w - c) \cdot \exp(-d \cdot w^e) + c \quad (10)$$

Dans l'un des cas où la rupture a eu lieu à l'interface entre la résine Minova et le boulon (HA25, essai13 : $L=90\text{mm}$, $P=4,84\text{MPa}$), les paramètres obtenus pour la fonction $f(w)$ sont : $a=0,044$, $c=-3,53 \cdot 10^{-5}$, $d=5,57$, $e=0,31$. La figure 25 suivante

compare la courbe expérimentale de charge obtenue pendant l'essai et la prédiction donnée par la nouvelle solution analytique :

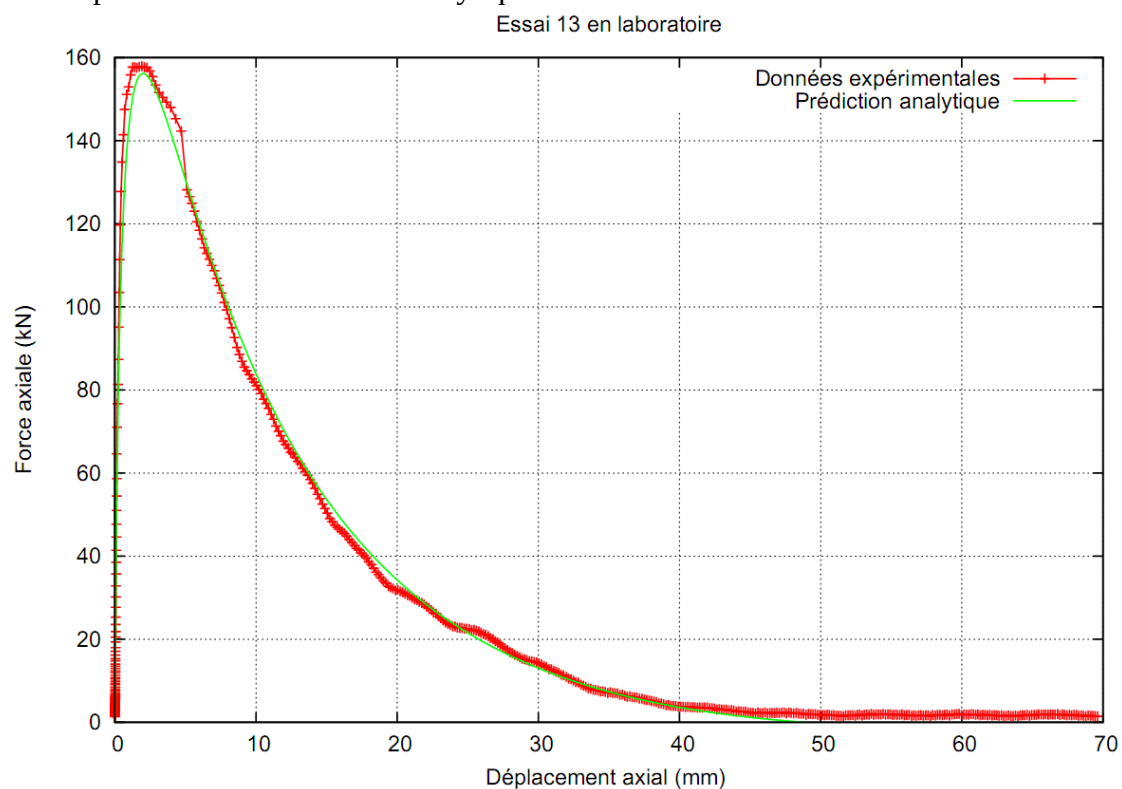


Figure 25 : Comparaison entre le résultat expérimental d'un essai d'arrachement en laboratoire et le résultat analytique obtenu avec une loi d'interface non-linéaire

Les résultats sont encourageants et seront poussés davantage lorsque de bonnes mesures de force seront disponibles grâce au nouveau capteur.

5. Campagne d'essais au laboratoire de recherche de Bure. Application du nouveau modèle analytique aux résultats obtenus

5.1. Introduction

Pendant les mois de septembre et octobre 2009, une campagne d'essais d'arrachement in-situ a eu lieu dans deux galeries du laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute Marne. Une première campagne avait déjà eu lieu en 2007. A cette occasion, plus d'une centaine de tests avaient été effectués sur plusieurs types de boulons.

L'objectif de cette deuxième campagne est de comparer les résistances à l'arrachement fournies par chaque type de boulon testé, afin d'identifier les boulons qui offrent un meilleur comportement mécanique dans l'argilite du Callovo-Oxfordien.

Un total de 66 boulons a été testé. Ces boulons se trouvent dans les galeries techniques GT8 et GAT, creusées durant le deuxième trimestre de l'année 2009. Les boulons furent mis en place pendant le mois de juillet de la même année. Les trous forés à cet effet furent effectués au jumbo.

Deux types d'essai d'arrachement ont été effectués :

- essais à vitesse de déplacement constante : on impose une vitesse de déplacement d'environ 1-1,5mm/min pendant l'arrachement et on mesure les forces créées dans la tige. Cet essai est établi d'après la norme NF-P-94-242-1 ;
- essais par paliers : on impose une force constante qu'on maintient pendant une durée établie au préalable et on mesure le déplacement en résultant. La référence pour cet essai est la norme NF-P-94-153.

Quatre type de boulons ont été testés : des boulons HA25 M26 (25mm de diamètre nominal), des boulons Dywidag 26WR (26mm de diamètre nominal), des boulons Swellex Pm24 et des CT-Bolt M22. Les deux premiers sont des boulons à ancrage réparti (scellement à la résine Minova ou au coulis de ciment de ratio $w:c=0,5$). Les boulons Swellex travaillent en friction et les CT-Bolts travaillent en friction et aussi comme des boulons à ancrage réparti (ils disposent d'une cheville en fin de leur corps, le reste de leur longueur étant ancrée au massif rocheux par le biais d'un coulis de ciment).

En ce qui concerne les boulons à ancrage réparti, le ciment a été injecté sans pression à partir du fond du trou. Les cartouches de résine ont été installées dans les trous de façon habituelle.

Par ailleurs, un total de 6 boulons a été instrumenté par le LAEGO (15 jauges de contrainte disposées de façon régulière sur la longueur d'ancrage) afin de suivre l'effort axial le long de la partie scellée. Il s'agit de trois boulons HA25 de 2m40 de longueur ancrés au coulis de ciment et de trois CT-Bolts de 2m de long. Ils se trouvent tous dans la galerie GAT.

Les tableaux suivants résument les essais in-situ effectués en 2009 :
Galerie GT8 :

Type de boulon	L(m)	Ø _{trou}	Scellement	Nombre d'essais	Type d'essai
HA25	3,0	35	Résine	5	2 vitesse cste/3 paliers
	3,0	76	Ciment	5	2 vitesse cste/3 paliers
Swelllex	3,0	48	--	10	5 vitesse cste/5 paliers
	2,4			10	5 vitesse cste/5 paliers

Tableau 7 : Essais in-situ effectués dans la galerie GT8

Galerie GAT :

Type de boulon	L(m)	Ø _{trou}	Scellement	Nombre d'essais	Type d'essai	Instrumentation
HA25	2,4	35	Résine	5	2 vitesse cste/3 paliers	--
	2,4	76	Ciment	8	4 vitesse cste/4 paliers	1vitesse cste/2 paliers
Dywidag	2,4	35	Résine	5	3 vitesse cste/2 paliers	--
		76	Ciment	5	2 vitesse cste/3 paliers	--
CT-Bolt	2,0	45	Ciment	3	1vitesse cste/2 paliers	1vitesse cste/2 paliers
	2,4			10	5vitesse cste/5 paliers	

Tableau 8 : Essais in-situ effectués dans la galerie GAT

Il est important de remarquer que ce sont des essais non destructifs : ces boulons font partie intégrante du soutènement dessiné pour les différentes galeries du laboratoire de recherche.

Un essai est arrêté lorsqu'au moins l'une des conditions suivantes est remplie :

- le déplacement axial mesuré est supérieur ou égal à 30mm ;
- la traction limite définie au préalable (90% de la traction limite d'élasticité de chaque tige) est atteinte ;
- instabilité de la zone d'appui des outils nécessaires pour l'exécution de l'essai ;
- mise en danger de l'opérateur.

Une première analyse des résultats obtenus montre que les déplacements axiaux sont très faibles. Très peu de boulons ont été arrachés. En effet, les longueurs d'ancrage dépassant les 2m, et étant donné qu'on ne souhaite pas charger les boulons au-delà d'une certaine valeur de traction limite, les essais sont arrêtés très tôt. A cet égard, la campagne menée en 2007 a été plus performante, car les longueurs d'ancrage étaient de l'ordre de 1m.

Cependant, comme nous disposons des mesures pendant la décharge (l'enregistrement de mesures ne fut en général pas arrêté une fois l'essai fini), nous savons que, même si le boulon est toujours en phase élastique, l'interface de rupture (certainement celle entre la roche et le scellement parce que les trous de forage sont lisses) a plastifié totalement ou partiellement, puisque lorsque la décharge est terminée, on ne retrouve pas la valeur du déplacement initial.

Ce fait nous permettra d'exploiter les résultats in-situ pour valider l'approche analytique présentée dans le chapitre précédant et pour déterminer la loi de comportement de l'interface de rupture, à condition que les essais soient menés jusqu'à ce que l'interface soit en phase résiduelle ; sinon, la loi ne pourra être déterminée que partiellement.

L'alinéa suivant montre les premiers résultats obtenus, qui ne sont en rien définitifs parce que seulement un nombre limité d'essais a été analysé pour l'instant.

5.2. Application du nouveau modèle analytique à un essai d'arrachement in-situ effectué à Bure

Nous montrons dans cette partie la comparaison entre les résultats expérimentaux issus d'un essai d'arrachement réalisé dans le laboratoire souterrain de Bure et la prédiction fournie pour le même essai par la nouvelle solution analytique développée. Pour ce faire, nous avons déduit la loi d'interface des résultats expérimentaux. Une loi rhéologique de type tri-linéaire a été sélectionnée à cet effet.

L'essai retenu est l'essai GAT-HA25-06. Il s'agit d'un essai effectué à vitesse de déplacement constante sur un boulon HA25 scellé au coulis de ciment. La longueur d'ancrage est de 2m40. Le pas d'acquisition de mesures est de 5s. La durée de l'essai fut de 4min12s.

Nous avons décidé de retenir cet essai parce c'est le seul essai à vitesse contrôlée réalisé sur un boulon HA25 (type de boulon testé aussi au laboratoire du Centre de Géosciences) dans lequel on observe un palier relativement long avant l'arrêt de l'essai. D'autres essais in-situ sur d'autres types de boulons (Dywidag principalement car ces boulons sont aussi à ancrage réparti) seront également étudiés et les résultats seront fournis dans un rapport ultérieur. Néanmoins, il faut remarquer que, afin de pouvoir déterminer la loi de comportement de l'interface de rupture, les essais doivent être menés jusqu'à ce que l'interface ait parcouru toutes les phases de son comportement (*i.e.*, élasticité, plasticité et comportement résiduel éventuellement), au moins au point d'application de la force axiale.

La figure 26 montre le résultat expérimental obtenu pour l'essai GAT HA25-06 tel que fourni par SOL DATA :

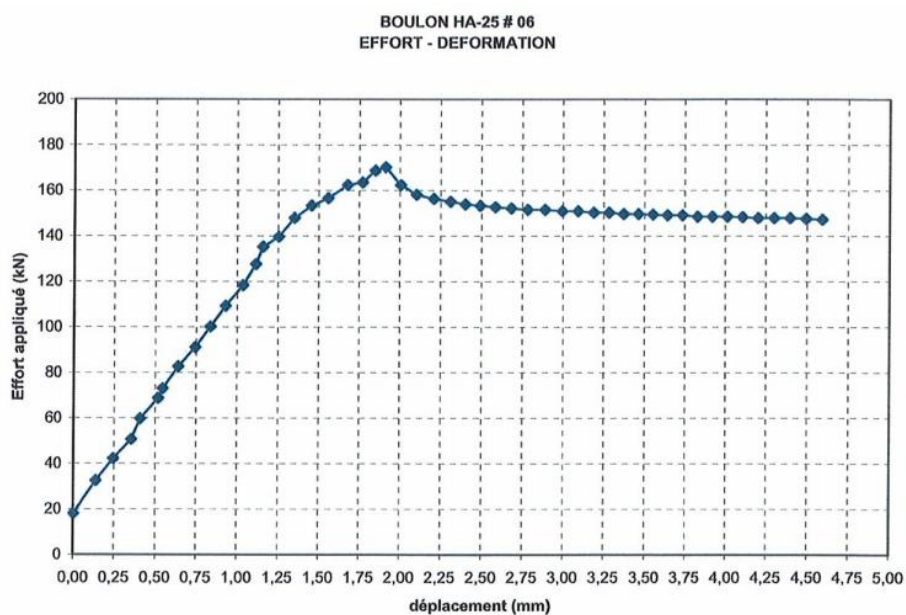


Figure 26 : Données expérimentales d'un essai in-situ (galerie GAT)

La loi tri-linéaire suivante en a été déduite dans un premier temps (voir figure 27) : $u_0=0$, $\tau_0=0$, $u_1=0,3\text{mm}$, $\tau_1=0,93\text{MPa}$, $u_2=1,0\text{mm}$, $\tau_2=0,695\text{MPa}$.

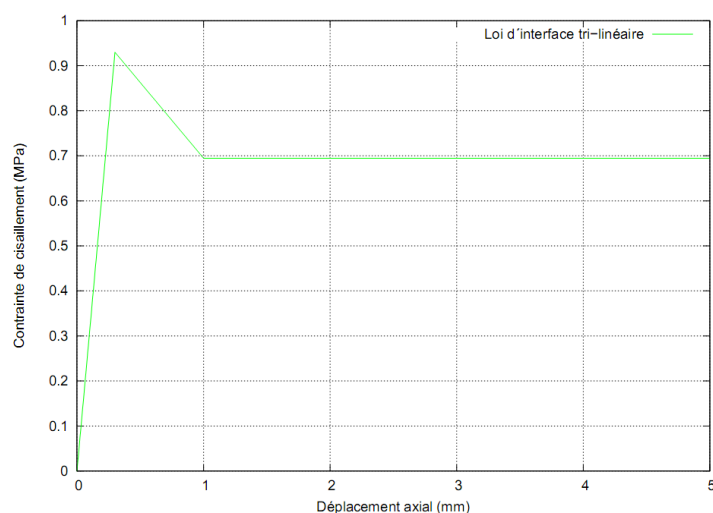


Figure 27 : Loi tri-linéaire déduite des résultats expérimentaux (essai GAT HA25-06)

La comparaison entre la prédiction proposée par la nouvelle approche analytique développée et les résultats expérimentaux est montrée dans la figure 28 :

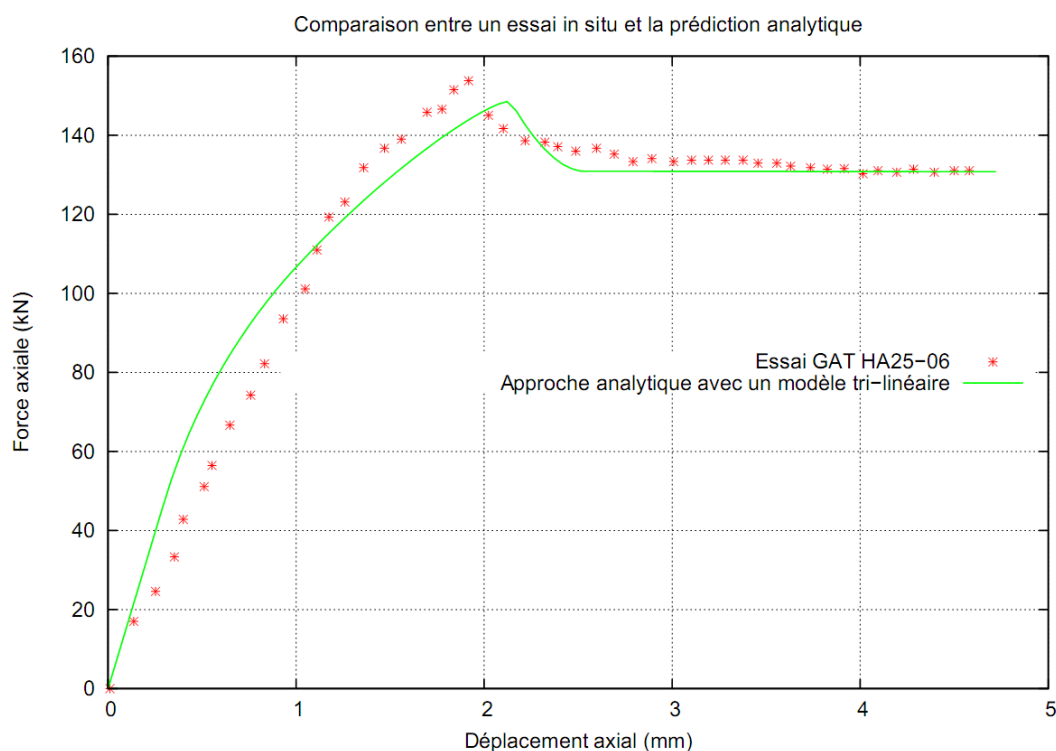


Figure 28 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction analytique pour une loi de type tri-linéaire

Comme l'on peut voir, les résultats obtenus reproduisent l'allure générale de l'essai, mais ils ne sont pas complètement satisfaisants. D'autres types de loi seront testés et les résultats seront comparés à ceux issus de l'utilisation d'une loi tri-linéaire. En même temps, ce n'est qu'une conclusion préliminaire : d'autres essais in-situ seront exploités pour valider ces premières constatations.

Conclusions et perspectives

Une première campagne d'essais d'arrachement en laboratoire sur des boulons en acier et en fibre de verre, scellés à la résine et au coulis de ciment, a été établie et effectuée en grande partie. Vingt-quatre essais ont été réalisés jusqu'au présent, et les résultats sont en cours d'analyse.

Cette analyse nous a permis d'introduire un certain nombre d'améliorations dans le banc expérimental, dont les plus importantes sont :

- l'installation d'un capteur de force pour mesurer directement l'effort exercé sur le boulon (au lieu de mesurer la pression d'huile à l'entrée du vérin) ;
- la régulation de la pression de confinement pendant un essai, grâce à l'emploi d'un accumulateur d'azote, qui sera installé dans le circuit hydraulique de confinement ;
- le ralentissement de l'essai pour mieux s'approcher des conditions réelles. Pour cela, une partie du débit d'huile devant rentrer dans le vérin sera renvoyé au réservoir de la pompe d'alimentation.

Ces changements, bien que considérés nécessaires, ont légèrement retardé l'achèvement de la première campagne ainsi que l'aboutissement de l'analyse des résultats. En tout cas, une première loi de comportement pour l'interface boulon-scellement a été proposée. La comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction analytique basée sur cette loi semble assez prometteuse. Une analyse plus poussée des résultats permettra la validation de la nouvelle loi ainsi que la détermination des paramètres les plus influents sur la capacité d'ancrage.

Outre la finition de l'analyse des résultats des essais effectués jusqu'au présent, les principales perspectives de la recherche en cours sont :

- effectuer d'autres essais sur des boulons (essais de répétitivité et validation) ;
- déterminer les paramètres les plus influents et quantifier leur effet ;
- compléter la loi de comportement pour l'interface de rupture ;
- implémenter la nouvelle loi dans un code de calcul par éléments finis (VIPLEF) ;
- appliquer la nouvelle loi aux essais d'arrachement in-situ et analyser sa pertinence ;
- simuler le comportement d'un ouvrage réel comprenant des boulons et éventuellement des câbles et comparer les résultats numériques avec les mesures recueillies dans le site (extensométrie, convergence, etc.).

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»

Blanco Martín, Hadj-Hassen. 2009 « Le boulonnage à ancrage réparti. Projet MIBOULAND. Premier Rapport »

Blanco Martín, Tijani, Hadj-Hassen. 2010 « A New Analytical Solution to the Mechanical Behaviour of Fully Grouted Rockbolts Subjected to Pull-out Tests». Article soumis pour publication dans la revue *Construction and Building Materials*.

Ren, Yang, Chen, Chen. 2009 «An analytical analysis of the full range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model». *Construction and Building Materials*, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.021.

