



HAL
open science

**Le boulonnage à ancrage réparti. Projet MIBOULAND.
Coopération ANDRA & MINES-ParisTech. Troisième
Rapport (final)**

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. Troisième Rapport (final). 2012. hal-00704097

HAL Id: hal-00704097

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00704097>

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

Troisième Rapport (final)

Mai 2012

Référence : R310512LBLA

Table des matières

Liste de figures	5
Liste de tableaux.....	7
Avant propos	9
1.Introduction	11
2.Étude expérimentale de l'arrachement	13
Dispositif expérimental conçu et employé au Centre de Géosciences MINES ParisTech	13
Matériel fourni par l'Andra.....	15
Étalonnage du banc expérimental.....	16
Récapitulatif des essais effectués sur les boulons.....	18
Récapitulatif des essais effectués sur les câbles	20
Analyse des essais effectués <i>in situ</i> dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute Marne.....	22
3.Analyse des résultats et modélisation	25
4.Conclusions et perspectives	31
Bibliographie.....	33
Annexe : essais d'arrachement effectués sur les boulons	35
Boulons HA25	35
Boulons FRP	49
Tiges lisses	61

Liste de figures

Figure 1 : section droite du banc d'arrachement conçu par le Centre de Géosciences et vue générale de l'installation.	13
Figure 2 : importance des effets de bord. Le mode de rupture (images de gauche) et les résultats expérimentaux (graphique de droite) sont altérés.	14
Figure 3 : maillage et géométrie utilisés dans les simulations numériques du banc d'arrachement (logiciel VIPLEF).	16
Figure 4 : étalonnage du banc pour les boulons HA25. Courbe force-déplacement axial obtenue lors d'un essai d'étalonnage (ancrage supérieur) et fonction d'ajustement employée pour corriger le déplacement brut.	17
Figure 5 : correction du déplacement axial grâce à l'étalonnage. Comparaison entre données brutes et données corrigées.	18
Figure 6 : jeux de goupilles pour bloquer la rotation (test de câbles).	21
Figure 7 : outils conçus pour empêcher la rotation relative entre le corps du vérin et son piston (test de câbles).	21
Figure 8 : banc d'arrachement <i>in situ</i> (image adaptée de (Dénecé, Leleu, & Beth, 2009)).	23
Figure 9 : résultats <i>in situ</i> pour les boulons HA25. Les astérisques représentent les essais par paliers.	23
Figure 10 : relations $\tau_b(W)$ obtenues à partir des données expérimentales corrigées montrées dans la Figure 9.	24
Figure 11 : schéma de l'interface avec les variables qui la définissent.	25
Figure 12 : schéma des matériaux environnants (barre, scellement et roche) avec les variables mesurables et les variables d'interface.	26
Figure 13 : comparaison entre le cisaillement et la variation de la pression normale à l'interface (valeurs expérimentales).	27
Figure 14 : comparaison entre le cisaillement expérimental (courbe rouge) et le cisaillement modélisé (courbe verte).	28
Figure 15 : comparaison entre l'ouverture radiale expérimentale (courbe cyan) et l'ouverture modélisée (courbe orange).	30

Liste de tableaux

Tableau 1 : matériel fourni par l'Andra dans le cadre du projet MIBOULAND pour la réalisation d'essais d'arrachement au Centre de Géosciences.....	15
Tableau 2 : essais d'arrachement effectués sur les boulons.....	19
Tableau 3 : essais d'arrachement effectués sur les câbles.....	20
Tableau 4 : essais d'arrachement effectués sur les boulons HA25 dans le laboratoire souterrain de l'Andra.....	22

Avant propos

Depuis le premier juin 2009, le projet MIBOULAND (*MInes BOULons ANDra*) s'est établi entre le Centre de Géosciences MINES ParisTech et l'Andra. Le but de ce projet est de mener une recherche conjointe dans la thématique du boulonnage à ancrage réparti, pendant une durée initiale prévue de trois ans.

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 de novembre 2008 une thèse intitulée « étude expérimentale et théorique du boulonnage à ancrage réparti sous sollicitations axiales ». Dans le premier rapport livré en octobre 2009, on a justifié 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 (en acier) 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 systèmes de confortement 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 avait eu lieu 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 réparti 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 troisième rapport présente une synthèse des résultats obtenus au cours de ces trois ans, en particulier dans le cadre de la thèse effectuée au Centre de Géosciences MINES ParisTech. L'intérêt dans ce rapport est axé sur les avancées et les résultats non décrits dans les deux rapports

précédents (Blanco Martin & Hadj-Hassen, 2009; Blanco Martin & Hadj-Hassen, 2010). Le mémoire de thèse (Blanco Martin L. , 2012) contient la totalité du travail effectué.

Ce rapport décrit d'abord les dernières améliorations introduites dans le banc d'arrachement, ainsi que l'étalonnage effectué en 2011 pour exploiter les résultats expérimentaux de façon plus précise. On présente la totalité du matériel fourni par l'Andra depuis le lancement du projet et les essais réalisés aussi bien sur les boulons que sur les câbles (fournis par un autre partenaire). L'exploitation des résultats des essais *in situ* est également présentée. L'analyse des résultats en laboratoire, orientée vers l'obtention d'une loi de comportement pour l'interface barre-scellement, est présentée également. Finalement, on présente les principales conclusions du travail effectué, ainsi que les possibles perspectives. Les résultats expérimentaux et les photos de tous les essais sur les boulons sont montrés en annexe.

1. Introduction

Le boulonnage et le câblage (boulonnage de façon générale) sont deux techniques de renforcement du terrain couramment utilisées dans l'industrie minière et dans le génie civil. À titre d'exemple pour quantifier l'importance de ces deux techniques, des centaines de millions de boulons sont installées chaque année dans les mines du monde entier.

Dans cette recherche, on s'intéresse au boulonnage à ancrage réparti, où la barre est scellée au terrain sur toute sa longueur. Étant donné que l'action de renforcement n'a lieu que si le terrain environnant essaie de se déformer, le boulonnage à ancrage réparti est un renforcement de type passif. Cette technique connaît un essor très important depuis les années 1960.

Plus particulièrement, l'étude menée s'intéresse au comportement de l'interface barre-scellement. Cette interface joue un rôle prépondérant vis-à-vis du phénomène de transfert de charge qui a lieu entre le terrain environnant et le renforcement. Par ailleurs, diverses expériences ont montré que la rupture des boulons et des câbles à ancrage réparti se produit le plus fréquemment à l'interface tige-scellement, *via* un processus local de décohéation qui se propage au fur et à mesure que le glissement entre les deux matériaux en contact augmente.

L'étude de l'interface barre-scellement s'avère ainsi important pour mieux comprendre le fonctionnement des ancrages passifs et leur interaction avec le terrain. Par ailleurs, l'interface pouvant être implémentée dans un code numérique (comme une discontinuité ou comme un milieu continu), sa maîtrise permettra de mieux modéliser l'action complexe du soutènement passif, et par la suite non seulement d'aider à la conception des schémas de soutènement par boulonnage, mais aussi de prédire la réponse des ouvrages complexes, au moins en termes de tendances d'évolution. Le comportement de l'interface doit être décrit par une **loi rhéologique** à déterminer.

L'interface barre scellement est semblable en grandes lignes à un joint rocheux, la principale différence entre les deux étant la nature des matériaux côte à côte : dans le cas des joints rocheux classiques, les deux matériaux en contact ont des propriétés mécaniques très proches, tandis que dans le cas de l'interface barre-scellement, les propriétés mécaniques des matériaux en contact (de l'acier et du ciment typiquement) sont très différentes. Cette différence va entraîner un comportement rhéologique distinct. Cependant, l'étude de ces deux interfaces est similaire, et consiste à appliquer une force axiale de traction (*i.e.*, à tirer) sur l'un des matériaux, alors que l'autre est bloqué afin de pouvoir créer un déplacement relatif ou *glissement* entre les deux corps. Les conditions aux limites (dans la direction normale à l'interface) pendant la sollicitation peuvent être modifiées dans les deux cas : pression de confinement constante, déplacement constant, rigidité normale constante. Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, on a travaillé en conditions statiques. De ce fait, des phénomènes tels que les coups de terrain n'y ont pas été considérés. L'étude expérimentale de l'interface a été entreprise moyennant des essais d'arrachement.

La réponse de l'interface est ainsi définie selon les directions tangentielle et normale. La revue bibliographique montre que la plupart des études se focalisent sur la réponse tangentielle, et que seulement l'étude de Hyett *et al.* (Hyett, Bawden, Macsporrán, & Moosavi, 1995) propose une loi complète pour l'interface câble-scellement (ces chercheurs ont étudié le contact entre les câbles classiques à sept torons et de différents coulis de ciment). Bien que l'application de cette loi pour

reproduire des essais d'arrachement donne des résultats satisfaisants, elle est basée sur un nombre d'hypothèses dont la représentativité reste à prouver. En particulier, cette loi suppose que le comportement normal à l'interface est similaire à celui des joints rocheux. Par ailleurs, elle suppose que la réponse tangentielle est purement frictionnelle. Finalement, la représentativité de cette loi pour décrire l'interface entre un boulon et un matériau de scellement n'a pas été abordée dans des documents publiés.

Le but de cette étude est d'améliorer les connaissances existantes sur l'interface barre-scellement, avec l'objectif final de déterminer sa loi de comportement (ou, au moins, une méthode pour la déterminer, étant donné qu'elle pourrait changer en fonction de la combinaison barre-scellement retenue) et de l'implémenter par la suite dans un code de calcul.

2. Étude expérimentale de l'arrachement

Dispositif expérimental conçu et employé au Centre de Géosciences MINES ParisTech

Le dispositif expérimental utilisé pour effectuer les essais d'arrachement en laboratoire a été présenté en détail dans les rapports précédents. Il en est de même pour la procédure de préparation des échantillons et d'exécution des essais. Pour cette raison, seulement les dernières modifications, entreprises depuis juillet 2010, sont décrites ici. Il est à noter que le banc d'essais ainsi que quelques résultats ont été présentés lors du 45th Symposium de l'ARMA (Blanco Martin L. , Hadj-Hassen, Tijani, & Noiret, 2011).

La Figure 1 montre une section droite du banc conçu et employé ainsi qu'une vue générale de l'installation pour l'arrachement.

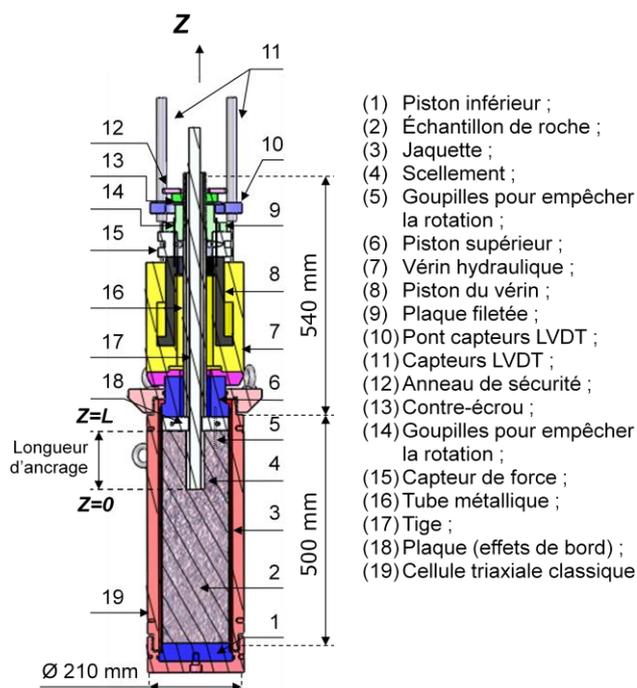


Figure 1 : section droite du banc d'arrachement conçu par le Centre de Géosciences et vue générale de l'installation.

Les dernières modifications sont les suivantes :

- utilisation d'un capteur de force, placé entre le piston du vérin et la plaque fileté servant à transmettre l'effort au boulon. Le capteur repose sur une plaque de répartition et de centrage. L'emploi du capteur permet de mesurer la force directement (au préalable, on se basait sur la mesure de pression effectuée dans le circuit hydraulique du vérin, ce qui avait donné des résultats anormaux comme indiqué dans le deuxième rapport) ;

- emploi d'une plaque métallique entre l'échantillon de roche et le piston inférieur de la cellule. Le but de cette plaque est de limiter les effets de bord. En effet, le champ de contraintes dans l'échantillon (forte compression sous le piston en raison de la réaction du vérin et forte traction aux alentours du trou borgne en raison de l'arrachement) favorise la création d'un cratère conique proche de la position $Z=L$. Ce cratère diminue la longueur d'ancrage testée. L'angle du cône est d'environ 45° (avec le sommet orienté vers le fond du trou borgne), ce qui montre qu'il est créé par un excès de traction. Le principal inconvénient de ce cratère n'est pas la réduction de la longueur d'ancrage testée, mais l'altération du processus de décohérence qu'il entraîne, en particulier lorsque la longueur testée est courte. Par conséquent, les résultats des essais sont aussi altérés. Ceci est montré dans la Figure 2, où l'on présente les résultats expérimentaux et une vue des échantillons correspondant à deux essais effectués dans les mêmes conditions mais avec et sans plaque. L'image supérieure, correspondant au cas sans plaque, montre clairement que la rupture ne s'est pas produite de façon franche à l'interface boulon-scellement.

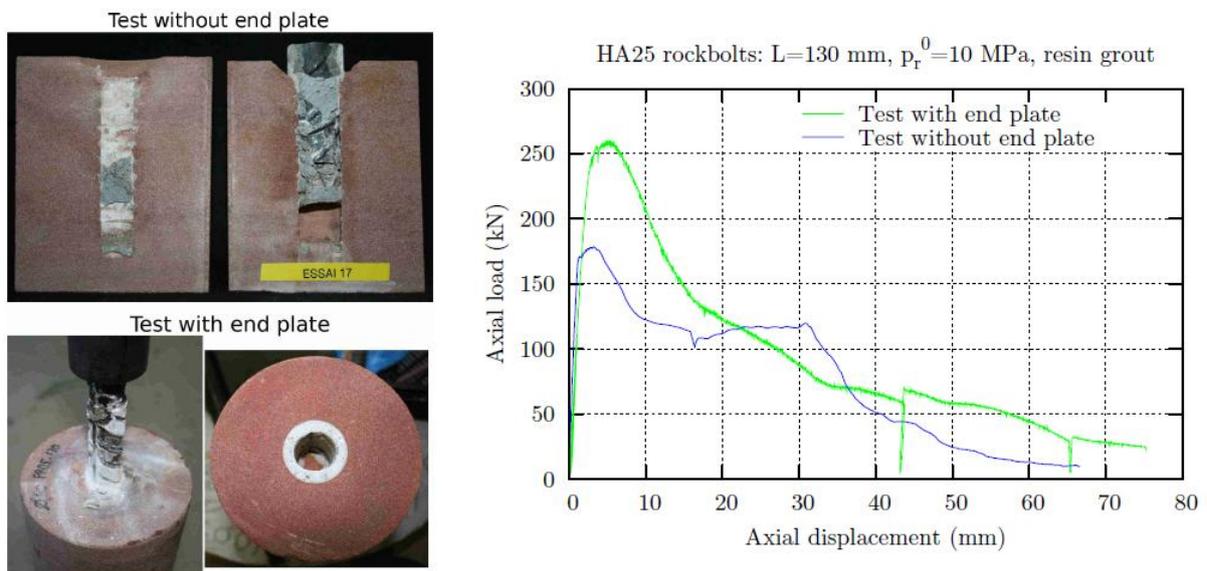


Figure 2 : importance des effets de bord. Le mode de rupture (images de gauche) et les résultats expérimentaux (graphique de droite) sont altérés.

Comme on peut le voir, les résultats obtenus (courbes de charge à droite) sont très différents. Une simulation aux éléments finis (logiciel VIPLEF) de l'échantillon a montré que l'utilisation de la plaque réduit effectivement la traction aux alentours du trou borgne. Par ailleurs, du fait que la section de réaction augmente par rapport au cas sans plaque, la contrainte de compression diminue également ;

- utilisation d'une pompe manuelle pour solliciter le vérin, au lieu d'une pompe électrique à fort débit (0,64 l/min). Ce choix a été effectué pour ralentir la vitesse de réalisation des essais (déplacement du piston du vérin). La nouvelle vitesse employée est de 0,02 mm/s (recommandation de la norme NF P94-242-1 (AFNOR, 1993)). Par ailleurs, l'emploi d'une pompe manuelle a permis d'effectuer des cycles charge-décharge pendant l'essai; les cycles sont utiles en phase pré-pic notamment, pour suivre les irréversibilités qui apparaissent au fur et à mesure que l'interface s'endommage ;

- possibilité d'effectuer les essais sous deux conditions aux limites différentes : pression de confinement constante ou rigidité radiale constante. Dans le premier cas, la cellule triaxiale classique est connectée à un accumulateur hydraulique pendant l'essai (elle constitue donc un système ouvert), de façon à assurer que la pression soit constante grâce au rôle amortissant de l'accumulateur. En revanche, dans le deuxième cas la cellule triaxiale est fermée pendant l'essai; en conséquence, si l'échantillon essaie de se déformer radialement pendant l'arrachement, la pression va varier. Le suivi de cette pression fournit ainsi une information sur la réponse radiale de l'échantillon, et par la suite de l'interface barre-scellement.

Lorsque le capteur de force a été introduit, et dans le but de corriger les mesures de force dérivées de celles de la pression du vérin (24 essais de la campagne 2010), une corrélation a été établie en mesurant simultanément la force (capteur de force) et la pression (capteur de pression). Les données de force correspondantes ont été alors corrigées. Par ailleurs, pendant ce processus de corrélation, on est arrivé à la conclusion que les sauts de pression mesurés pendant quelques essais (cf. Figures 13, 15 et 17 du rapport 2010) pourraient être liés au fonctionnement de l'accumulateur lorsque l'azote se décomprime (la pompe électrique était reliée à un accumulateur gonflé à 12,5 MPa). Afin de vérifier si les tiges avaient plastifié ou pas lors de quelques essais douteux (Figure 12 du rapport 2010 par exemple), on a utilisé la technique de microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer les échantillons. Les résultats ne montrent pas de signe de plastification; en effet, les valeurs de force corrigées grâce à la corrélation pression-force sont inférieures à la limite élastique des boulons HA25.

En ce qui concerne la préparation des échantillons, la seule modification introduite consiste à améliorer la verticalité des éprouvettes pendant la phase de scellement du tube métallique. Pour cela, on a utilisé un système de fixation vertical à base de plaques en bois et de serre-joints.

Matériel fourni par l'Andra

Le matériel recueilli dans le Tableau 1 a été fourni par l'Andra depuis juin 2009 pour la réalisation des essais d'arrachement en laboratoire.

Tableau 1 : matériel fourni par l'Andra dans le cadre du projet MIBOULAND pour la réalisation d'essais d'arrachement au Centre de Géosciences.

<i>Produit</i>	<i>Descriptif</i>	<i>Quantité</i>
Boulons HA25	Crénelés, 25 mm de diamètre nominal	10
Boulons FRP <i>Powerthread</i>	Crénelés, 25 mm de diamètre nominal	10
Écrous boulons FRP	100 mm de longueur, acier et FRP	Acier (5), FRP (5)
Boulons <i>Dywidag</i> 26 WR	Crénelés, 28 mm de diamètre nominal	5
Résine Minova <i>LOKSET SiS SF</i> 32/500	Résine pour scellement roche-barre	7 cartons
Mortier Quick-Mix AVG-QM	Mortier spécifique pour ancrage	1 sac (25 kg)

La fourniture du reste du matériel (grès, ciment, tubes métalliques, tiges lisses, câbles, résine pour sceller les tubes, gaines, etc.) est assurée par le Centre de Géosciences.

Il est à noter que les boulons Dywidag n'ont pas encore été testés. En effet, on a préféré maîtriser toutes les étapes d'un essai, depuis la préparation des échantillons jusqu'à l'analyse et l'interprétation des résultats. Cela a naturellement nécessité la répétition de certains essais, entraînant ainsi un retard (qui reste tout de même productif) par rapport au planning initial.

Les écrous pour les boulons en fibres de verre (FRP) ont été utilisés pour l'étalonnage du banc, décrit ci-dessous.

Étalonnage du banc expérimental

Avant de commencer à analyser les résultats expérimentaux pour développer une loi de comportement, il a été jugé nécessaire de maîtriser le fonctionnement du banc d'arrachement, ce d'autant plus qu'il s'agit d'un dispositif neuf.

Dans cet esprit, on a essayé de reproduire analytiquement et numériquement la pente initiale des essais. Pour l'étude analytique, on a utilisé les développements classiques en 2D avec une hypothèse de contraintes planes. Le détail de ce développement se trouve dans le mémoire de thèse. En ce qui concerne l'étude numérique, on a effectué une simulation aux éléments finis à l'aide de VIPLEF. La géométrie simulée est montrée dans la Figure 3. La simulation a consisté à provoquer un déplacement relatif entre la plaque fileté (*threaded plate* dans l'image) et le piston supérieur de la cellule (*upper piston*). L'interface barre-scellement est parfaitement « collée » dans la roche et dans le tube métallique; en effet, s'il y avait de l'adhérence parfaite au début de l'essai, les matériaux de part et d'autre des interfaces seraient totalement collés, sans déplacement relatif entre eux.

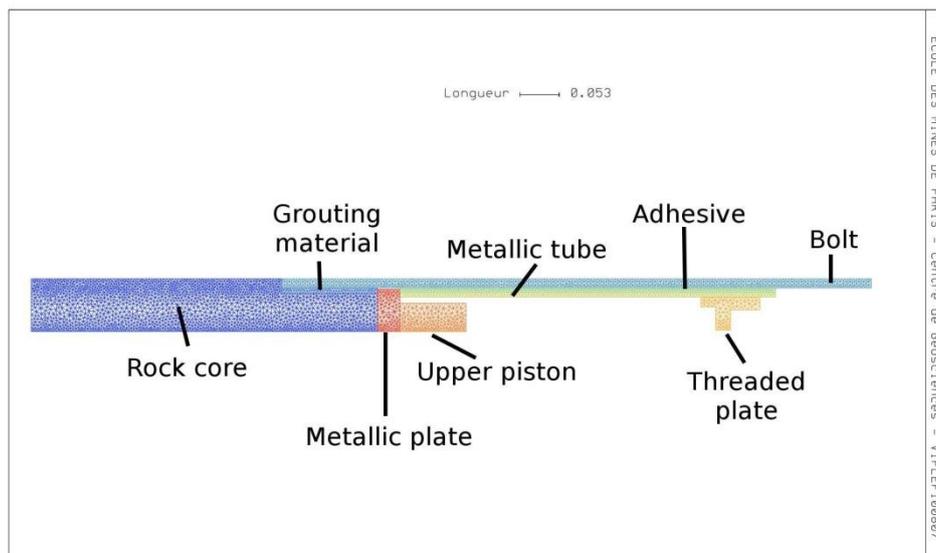


Figure 3 : maillage et géométrie utilisés dans les simulations numériques du banc d'arrachement (logiciel VIPLEF).

La comparaison des résultats issus de l'approche analytique et numérique est satisfaisante; cependant, la pente expérimentale est deux fois plus faible que les pentes théoriques. Pour cette raison, il a été décidé de tester la rigidité de l'ancrage supérieur (dans le tube métallique) : cet ancrage, bien qu'il soit plus résistant que l'ancrage dans la roche (plus que quatre fois plus long), il risque de s'endommager légèrement pendant l'arrachement, faussant ainsi le déplacement mesuré. Par ailleurs, même si l'adhérence parfaite n'existe pas non plus à l'intérieur de la roche, il est nécessaire de s'affranchir de tout effet parasite ayant lieu à l'intérieur du tube métallique, car la seule interface étudiée est l'interface barre-scellement à l'intérieur de la roche.

Afin de tester la rigidité de l'ancrage supérieur, on a préparé plusieurs échantillons dans lesquels le tube est scellé comme d'habitude au boulon, mais sans roche (*i.e.*, il y a seulement un ancrage, entre le tube et le boulon). L'étalonnage a été effectué pour les boulons HA25 et FRP, et devrait par la suite être effectué pour chaque barre testée. L'étalonnage a consisté à tirer sur le boulon de la façon habituelle (*i.e.*, grâce à la plaque vissée au tube métallique), mais en le bloquant dans l'autre extrémité. Pour cela, nous avons soudé un anneau métallique aux barres HA25. Dans le cas des boulons FRP, nous avons utilisé les écrous cités dans le Tableau 1, particulièrement usinés pour ce type de boulon.

Les résultats de l'étalonnage sont cohérents pour les boulons HA25. Pour les boulons FRP, l'étalonnage n'a pas donné de résultats satisfaisants parce que les boulons se sont déformés plastiquement (et finalement cassés) pendant ces essais de calibration. Le résultat de l'étalonnage pour un échantillon HA25 est montré dans la Figure 4.

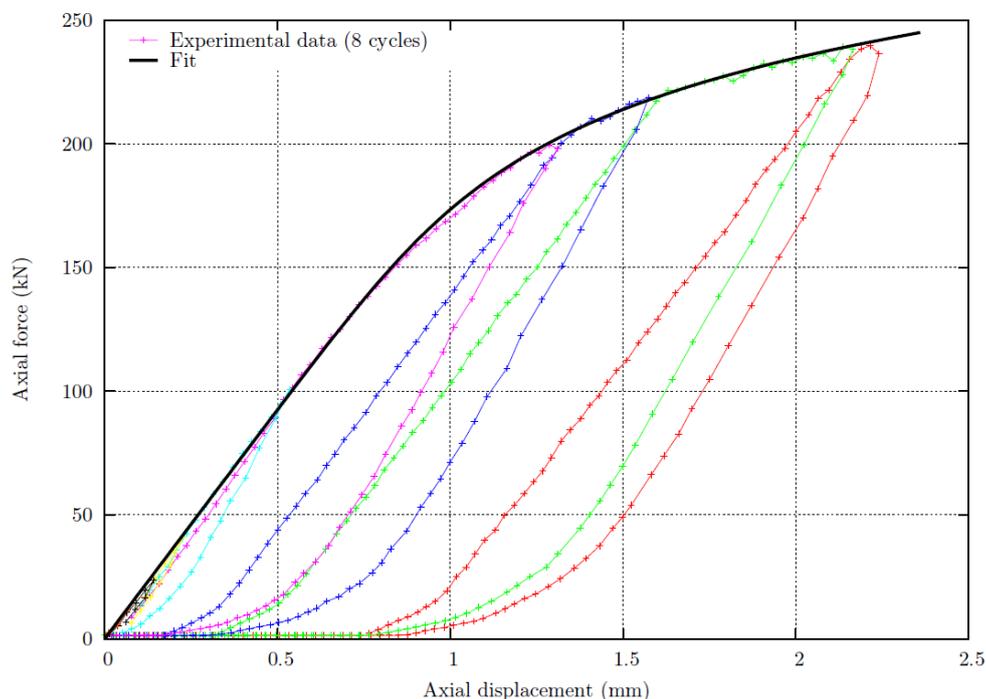


Figure 4 : étalonnage du banc pour les boulons HA25. Courbe force-déplacement axial obtenue lors d'un essai d'étalonnage (ancrage supérieur) et fonction d'ajustement employée pour corriger le déplacement brut.

Dans la figure, chaque couleur correspond à un cycle de charge-décharge. On peut constater que des irréversibilités apparaissent lorsque l'ancrage supérieur est sollicité. En conséquence, l'ancrage tube-boulon s'endommage, faussant les résultats de déplacement brut. La courbe noire correspond à un ajustement effectué pour corriger les valeurs de déplacement brut. La Figure 5 montre la comparaison de la courbe force-déplacement brute et corrigée d'un essai d'arrachement effectué sur un boulon HA25.

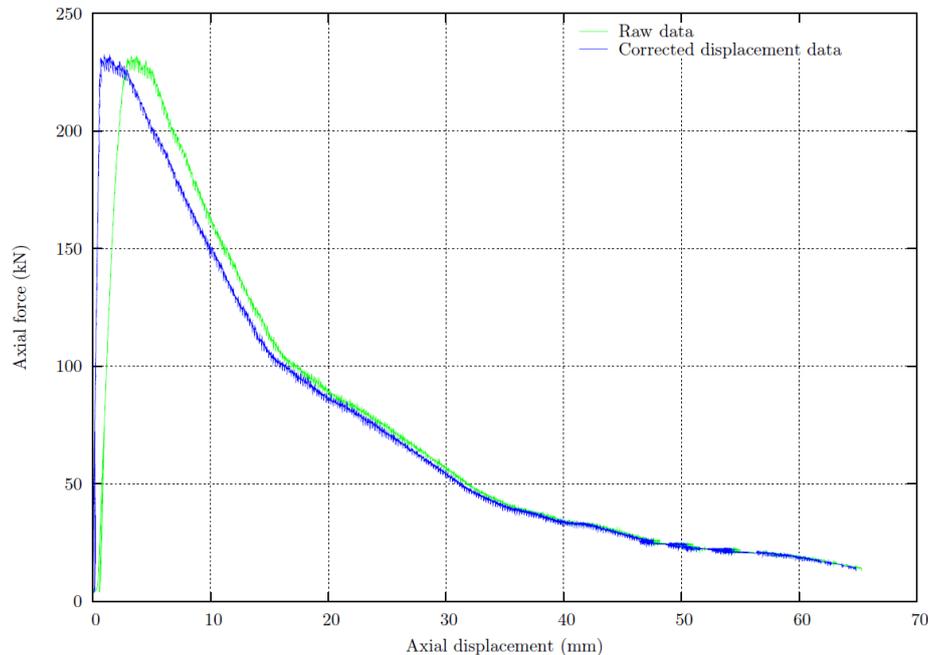


Figure 5 : correction du déplacement axial grâce à l'étalonnage. Comparaison entre données brutes et données corrigées.

On constate que l'effet de l'ancrage supérieur est particulièrement important au début de l'essai, pour de faibles valeurs de déplacement axial.

Grâce à cet étalonnage, les valeurs de déplacement correspondant aux boulons HA25 ont été corrigées. Pour ce qui est du reste des barres testées (boulons FRP, tiges lisses et câbles), on a seulement corrigé l'effet de l'élasticité des tiges dans la longueur libre entre l'échantillon de roche et le bas du tube métallique. Par ailleurs, après le constat de l'influence de l'ancrage supérieur, les échantillons correspondant aux boulons HA25 ont été préparés sans sceller le tube métallique à la barre : le tube a été bloqué en haut moyennant un anneau métallique soudé.

Récapitulatif des essais effectués sur les boulons

Le Tableau 2 montre la totalité des essais effectués sur les boulons (sauf les huit essais effectués en 2009 pour rendre le banc opérationnel).

Tableau 2 : essais d'arrachement effectués sur les boulons.

Boulon	p_r (MPa)	L (mm)	Scellement
HA25	15	150	Résine (1*)
	10	130	Résine (3*,2), w:c=0,35 (1*)
		90	Résine (1*)
	5	130	Résine (1*,1), w:c=0,40 (1*)
		90	Résine (1*,1)
	2	130	Résine (1*), w:c=0,35(1*)
		90	Résine (1*)
	1,2	130	Résine (3)
		90	Résine (1)
	0	130	Résine (1*,1)
90		Résine (1*)	
FRP	10	130	Résine (1*)
		90	Résine (1*)
	6	90	Résine (1)
	5	130	Résine (2*), w:c=0,35(1*)
		90	Résine (1*,1)
	2	130	Résine (1*), w:c=0,35(1*)
		90	Résine (1*,1)
	0,6	90	Résine (1)
	0	130	Résine (1*), w:c=0,35(1*)
		90	Résine (1*,1), w:c=0,35(1*)
Tiges lisses	5	130	Résine (1)
		100	Résine (1*)
	2	130	Résine (1)
		100	Résine (1)
	1,2	130	Résine (1)
	0	130	Résine (1)

L'astérisque indique que l'essai a été effectué à rigidité radiale constante (masse d'huile fixe dans la cellule). Les longueurs d'ancrage employées sont comprises entre 6 et 10 fois le rayon du boulon, comme le recommandent de nombreux chercheurs tels que Benmokrane *et al.* (Benmokrane, Chennouf, & Mitri, 1995) ou encore Verderame *et al.* (Verderame, Ricci, De Carlo, & Manfredi, 2009).

La totalité des résultats expérimentaux, ainsi qu'une vue de la plupart des échantillons après les essais, sont montrées en annexe.

Il est important de signaler à ce stade que, dans le rapport 2010, on avait privilégié les essais à pression de confinement constante. Les deux conditions aux limites, pression de confinement constante et rigidité constante, permettent l'étude de l'interface barre-scellement. Néanmoins, afin de pouvoir obtenir des informations utiles sur le comportement radial, la seule mesure de la pression ne suffit pas dans les essais à confinement constant; elle doit être accompagnée soit de la mesure du déplacement radial de l'échantillon, soit de la variation volumique de l'huile hydraulique. En revanche, dans les essais à rigidité radiale constante, l'équation d'état de l'huile peut être utilisée pour déduire sa variation volumique, et par la suite le déplacement radial de l'échantillon. La combinaison du déplacement radial et de la pression de confinement mesurés permet alors

d'accéder à la réponse radiale de l'interface barre-scellement. Étant donné que le banc n'est pas équipé à ce jour que pour effectuer des mesures de pression radiale, on a décidé de faire davantage d'essais à rigidité radiale constante, parce que, tels qu'effectués, ils fournissent plus d'information exploitable pour la détermination de la loi d'interface.

En outre, dans le rapport 2010 on avait attribué à la faible résistance à la traction du scellement le fait que, plus la pression de confinement est faible, plus la force maximum est élevée. Avec la compréhension davantage de phénomènes, on sait que cette « anomalie » est due à l'augmentation de la pression de confinement pendant l'essai, lorsqu'il est effectué à rigidité radiale constante (cas de la campagne montrée dans le rapport 2010) : en effet, cette augmentation de la pression extérieure est plus importante pour les essais à faible confinement initial. L'explication, déjà évoquée par Hyett *et al.* (Hyett, Bawden, Macsporrán, & Moosavi, 1995), a un lien direct avec le comportement de l'anneau de scellement et de roche pendant l'essai : pour des faibles confinements, ces anneaux vont se fracturer radialement, et les morceaux vont être poussés radialement vers l'extérieur lorsque l'on tire sur la barre, provoquant ainsi une augmentation de la pression extérieure lorsque la cellule est fermée. Comme on peut le voir dans l'annexe, l'augmentation de la pression extérieure est beaucoup plus importante lorsque le confinement initial est faible, ce qui explique que la force maximum soit plus importante (le confinement *effectif* a augmenté).

Récapitulatif des essais effectués sur les câbles

Le Tableau 3 montre les essais effectués sur les câbles à sept torons (type « Flexible » de 23 mm de diamètre et « Mini-Cage » de 16 mm de diamètre nominal). Ces câbles ont été fournis par Osborn Strata Products Ltd. dans le cadre du projet européen PROSAFECOAL. Le but principal de ces essais a été de vérifier l'efficacité du dispositif dessiné pour empêcher le phénomène de rotation qui pourrait fausser les résultats lorsque la longueur d'ancrage est faible (situation typique en laboratoire parce que l'emploi de courtes longueurs d'ancrage facilite l'exploitation des résultats). Afin de quantifier l'effet de la rotation sur les résultats, des essais dans lesquels la rotation était bloquée ou empêchée ont été effectués. Les résultats ne sont pas montrés dans ce rapport, mais peuvent se trouver dans le mémoire de thèse.

Tableau 3 : essais d'arrachement effectués sur les câbles.

Câble	p_r (MPa)	L (mm)	Scellement	Rotation
Flexible	2,7	325	Résine	Oui (1)
			Résine	Non (2)
		250	Résine	Oui (1)
			Résine	Non (1)
Mini-Cage	3	325	Résine	Non (1*)
	0,3	325	Résine	Non (1*)
		250	Résine	Non (1*)

Les longueurs d'ancrage utilisées sont plus importantes que dans le cas des boulons ; en effet, lorsque l'on teste des câbles, on utilise des longueurs proches de l'espacement entre les

discontinuités *in situ*. Ce choix a été recommandé par d'autres chercheurs, en particulier (Hyett, Bawden, & Reichert, 1992).

Concernant les conditions opératoires, tous les essais sur les câbles « Flexible » ont été effectués à pression constante, tandis que les essais sur les câbles Mini-Cage ont été réalisés à rigidité radiale constante (car effectués plus tard).

Le dispositif dessiné pour empêcher la rotation est composé de deux types d'outils :

- un jeu de goupilles en acier pour bloquer la rotation relative entre la roche et le corps du vérin, et un autre jeu pour bloquer la rotation relative entre le piston du vérin et le tube métallique. Ces deux jeux sont montrés dans la Figure 6 ;

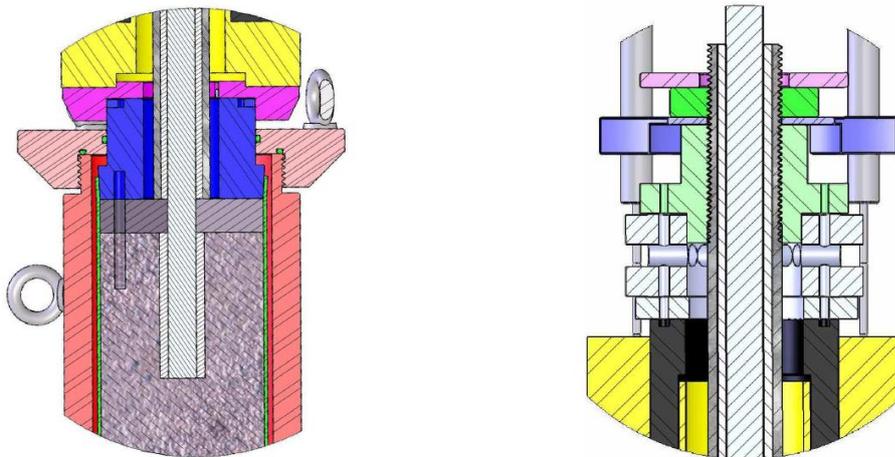


Figure 6 : jeux de goupilles pour bloquer la rotation (test de câbles).

- un système qui permet d'empêcher la rotation relative entre le corps du vérin et son piston. Ce système est composé d'un anneau vissé et fixé sur le corps du vérin et de deux tiges métalliques fixées à cet anneau et qui peuvent coulisser le long de la plaque fileté pendant l'essai. La Figure 7 montre ce système.

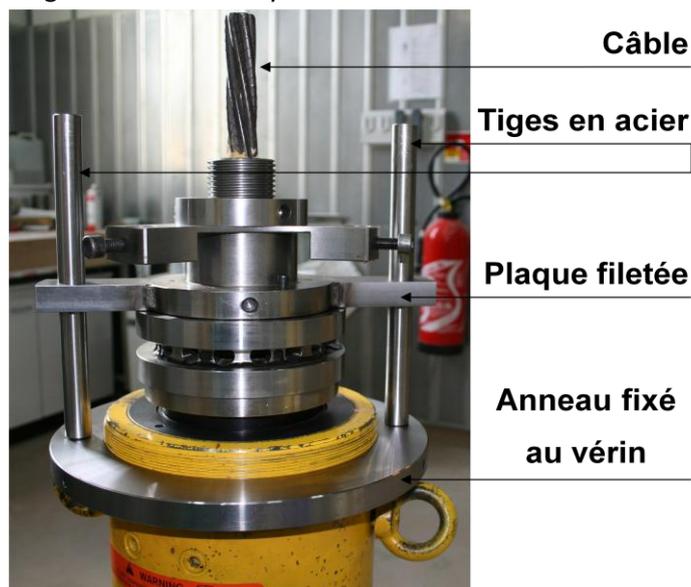


Figure 7 : outils conçus pour empêcher la rotation relative entre le corps du vérin et son piston (test de câbles).

Analyse des essais effectués *in situ* dans le laboratoire de recherche souterrain de Meuse-Haute Marne

En septembre-octobre 2009, soixante-six essais d'arrachement ont été effectués *in situ* au laboratoire de l'Andra à Bure, dans les galeries GT8 et GAT (Dénece, Leleu, & Beth, 2009). Quatre types de boulons ont été testés :

- boulons HA25 ;
- boulons Dywidag 26WR ;
- CT-bolts ;
- Boulons Swellex.

Seulement les résultats relatifs aux boulons HA25 ont été analysés dans le cadre du projet MIBOULAND parce ces boulons ont été testés à petite échelle en laboratoire (Centre de Géosciences). Au total, vingt-trois essais d'arrachement ont été réalisés sur ces barres. Des essais à vitesse contrôlée et des essais par paliers ont été exécutés. Le Tableau 4 montre les caractéristiques des essais effectués.

Tableau 4 : essais d'arrachement effectués sur les boulons HA25 dans le laboratoire souterrain de l'Andra.

Galerie	L(m)	Matériau de scellement	Rg (mm)	Test (nombre)
GT8	3	Résine Minova	17,5	Vitesse contrôlée (2) & Paliers (3)
		Ciment (w:c= 0,5)	38	Vitesse contrôlée (2) & Paliers (3)
GAT	2,4	Résine Minova	17,5	Vitesse contrôlée (2) & Paliers (3)
		Ciment (w:c= 0,5)	38	Vitesse contrôlée (4) & Paliers (4)

Par ailleurs, et dans le but de ne pas plastifier les tiges, les essais ont été arrêtés pour des valeurs de force axiale $F \leq 90 \% T_e$, où T_e est la limite élastique de la barre. Un autre critère d'arrêt des essais (outre la sécurité) est que le déplacement axial soit inférieur à 30 mm (critère jamais atteint en raison des grandes longueurs d'ancrage testées).

Le banc d'arrachement *in situ* est montré dans la Figure 8 ci-dessous.

Du fait de l'utilisation d'une barre rallonge pour pouvoir installer les outils nécessaires à l'arrachement, les valeurs de déplacement mesuré W_{brut} doivent être corrigées afin de s'affranchir du déplacement dû à l'élasticité de cette barre rallonge. Le déplacement corrigé W^* est calculé moyennant l'équation

$$W^* = W_{brut} - \frac{FL_{rallonge}}{E_{rallonge} \pi R_{rallonge}^2} \quad 1$$

dans laquelle $L_{rallonge}$ est la longueur de la barre rallonge, $E_{rallonge}$ est son module d'élasticité et $R_{rallonge}$ son rayon.



- (1) Plaque d'appui ;
- (2) Chaise d'appui ;
- (3) Barre rallonge ;
- (4) Vérin hydraulique ;
- (5) Plaques de répartition et de centrage ;
- (6) Cellule de charge ;
- (7) Trépied ;
- (8) Potentiomètre ;
- (9) Pompe manuelle ;
- (10) Système d'acquisition de données

Figure 8 : banc d'arrachement *in situ* (image adaptée de (Dénécé, Leleu, & Beth, 2009)).

La Figure 9 montre la comparaison entre les résultats bruts et les résultats corrigés.

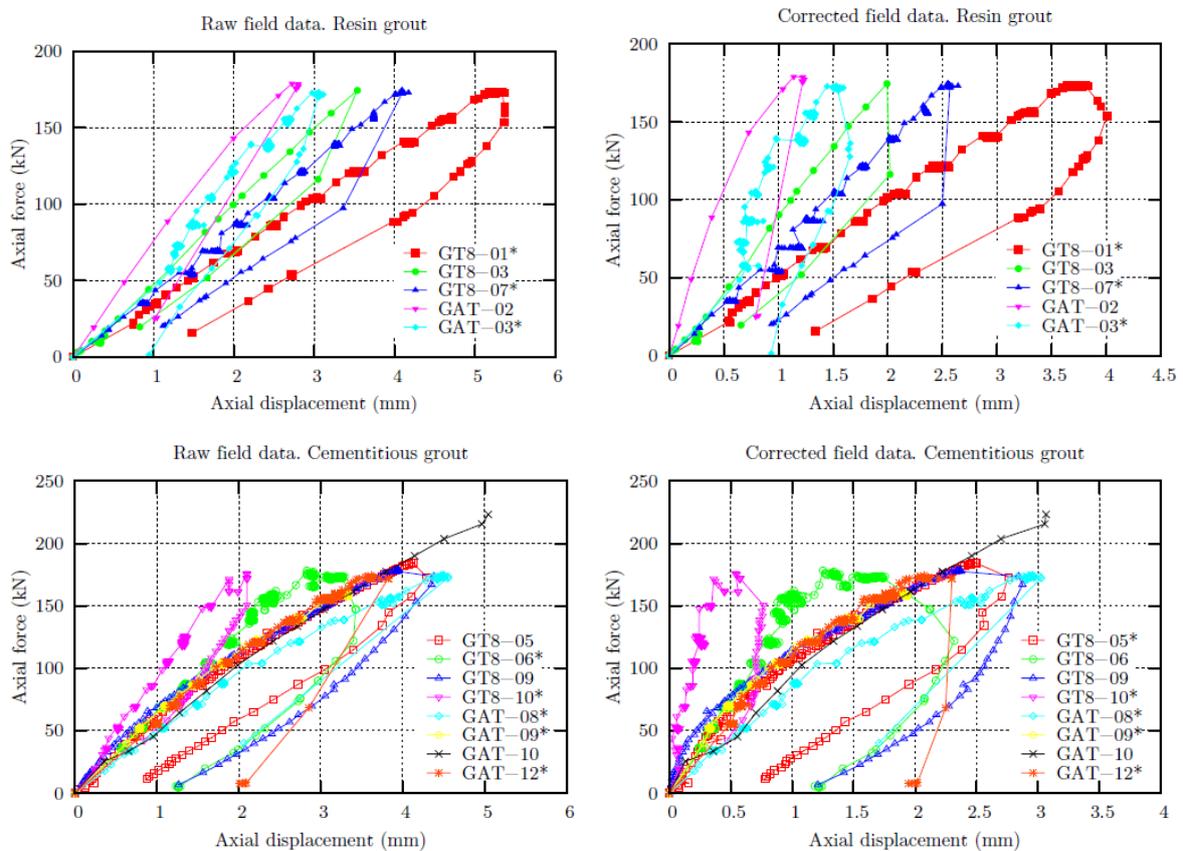


Figure 9 : résultats *in situ* pour les boulons HA25. Les astérisques représentent les essais par paliers.

En général, les résultats des essais *in situ* sont cohérents, malgré les différences qu'ils présentent par rapport aux essais en laboratoire, montrés dans l'annexe. A ce sujet, il est important de remarquer que les longueurs testées en laboratoire et *in situ* sont très différentes (il est montré dans le mémoire de thèse que la longueur d'ancrage a un effet très important sur les résultats force-déplacement des essais). Par ailleurs, les conditions aux limites ne sont pas les mêmes ; en effet, en laboratoire les essais ont été effectués soit à pression de confinement constante, soit à rigidité radiale extérieure constante (à $r=R_r$), tandis qu'*in situ*, la seule condition possible (car imposée par le milieu environnant) est « rigidité radiale constante en paroi du trou borgne (*i.e.*, à $r=R_g$) ».

Dans quelques essais, on a enregistré la décharge finale, mais on n'a pas effectué des cycles de charge-décharge. Enfin, les essais ont été arrêtés à de faibles valeurs de déplacement axial ($W < 5$ mm) en raison des grandes longueurs d'ancrage utilisées et dans le but de ne pas plastifier les tiges. En conséquence, la relation expérimentale contrainte de cisaillement-glisement $\tau_b(W)$, obtenue grâce à l'outil analytique décrit en détail dans le mémoire de thèse, a été dérivée à partir des données terrain seulement de façon partielle. Les relations $\tau_b(W)$ telles qu'obtenues à partir des résultats corrigés de la figure 9 sont présentés dans la Figure 10.

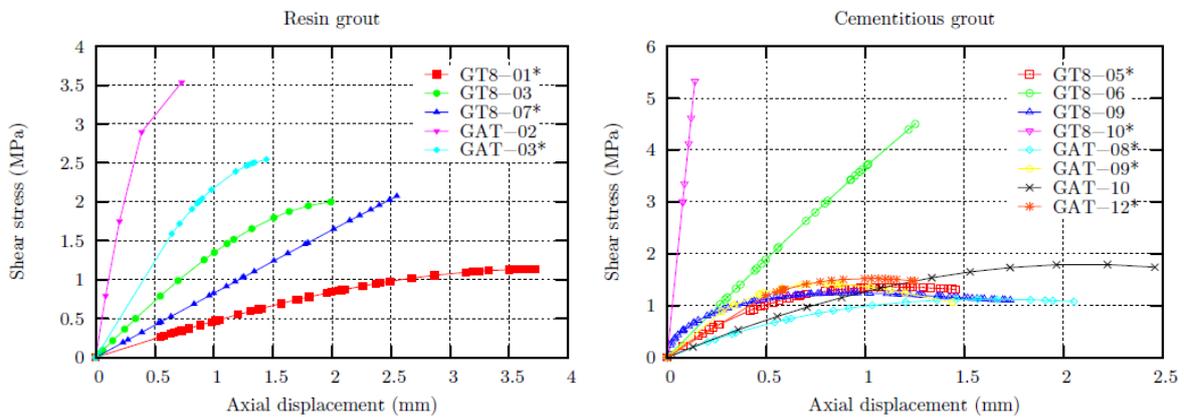


Figure 10 : relations $\tau_b(W)$ obtenues à partir des données expérimentales corrigées montrées dans la Figure 9.

Étant donné que les essais à petite échelle en laboratoire fournissent plus d'information sur le comportement de l'interface (dans la direction radiale particulièrement), l'analyse orientée vers la définition d'une loi de comportement pour l'interface barre-scellement s'est basée sur les essais à petite échelle. Cette analyse est montrée dans la partie suivante.

3. Analyse des résultats et modélisation

Les résultats obtenus à petite échelle en laboratoire (essais d'arrachement effectués sur les boulons au Centre de Géosciences) ont été analysés. L'analyse a été orientée vers la définition d'une loi de comportement pour l'interface barre-scellement. Cette étude a été entreprise de façon analytique car l'outil numérique dont on dispose (logiciel VIPLEF) ne permet pas de traiter de grands glissements au niveau des discontinuités. La raison est que le maillage n'est pas modifié entre chaque étape de calcul. En conséquence, toute l'analyse des résultats a été conduite analytiquement en deux dimensions et dans le cadre de la théorie de l'élasticité linéaire.

Comme expliqué dans l'Introduction, l'interface est définie selon deux directions : une direction tangentielle ou axiale, coïncidant avec l'axe de la barre, et une direction normale ou radiale, orthonormale à l'axe du boulon. La Figure 11 montre un schéma de l'interface, ainsi que les variables qui la définissent : le cisaillement τ_b et le déplacement axial W dans la direction tangentielle et la pression p_b et l'ouverture radiale Δu_{rb} dans la direction normale.

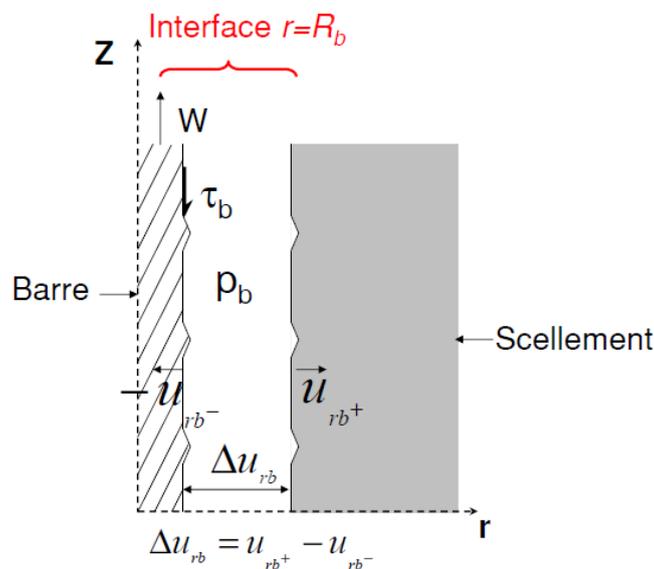


Figure 11 : schéma de l'interface avec les variables qui la définissent.

La loi de comportement de l'interface est alors définie par les relations $\tau_b(W, p_b)$ et $\Delta u_{rb}(W, p_b)$. Les variables indépendantes sont le déplacement axial W (car imposé et mesuré pendant les essais) et la pression normale p_b (non mesurée mais imposée par les conditions aux limites).

Étant donné que l'on ne peut pas accéder directement au comportement de l'interface (*i.e.*, on ne peut mesurer directement que le déplacement axial W), il est nécessaire de « transformer » les variables mesurables dans les matériaux environnants (force axiale F , pression de confinement p_r et déplacement radial de l'échantillon u_{rr}) en variables d'interface. La Figure 12 montre les variables mesurables pendant un essai d'arrachement dans les matériaux environnants et les variables d'interface.

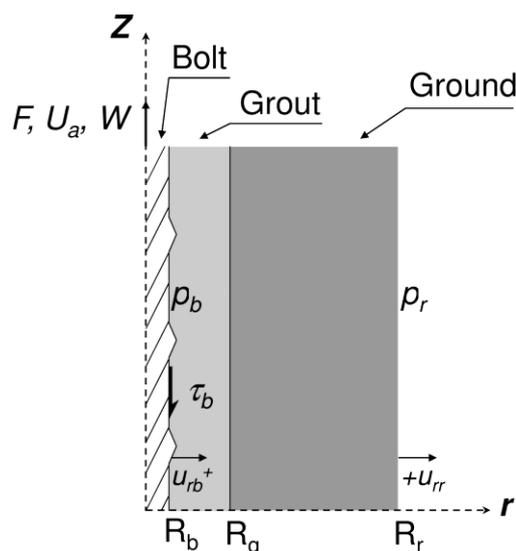


Figure 12 : schéma des matériaux environnants (barre, scellement et roche) avec les variables mesurables et les variables d'interface.

Afin de faire le lien entre les variables mesurables et les variables d'interface, il faut maîtriser le comportement des matériaux environnants (barre, scellement et roche). Dans cet esprit, il est souhaitable que pendant les essais le scellement et la roche ne se cassent pas radialement (le processus de fracturation est difficile à étudier, en particulier de façon analytique) et que le boulon reste dans le domaine élastique.

L'étude analytique de l'interface à partir de la réponse des matériaux environnants (équilibre et comportement [élastique]) s'effectue d'une façon simple si l'hypothèse de Popov (Popov, 1976) est prise en compte. En effet, cette hypothèse permet de simplifier les équations d'équilibre du scellement et de la roche et de séparer les directions axiale et radiale, de sorte que l'on puisse mener deux études unidimensionnelles (axiale et radiale) indépendantes.

Dans la direction tangentielle, le lien entre la force (mesurée dans le boulon) et le cisaillement (relatif à l'interface) a été développé et présenté en détail dans le mémoire de thèse, le rapport 2010 et dans une publication dans le journal *Construction and Building materials* (Blanco Martin, Tijani, & Hadj-Hassen, 2011). Quant à la direction radiale (lien entre p_r , u_{rr} et p_b , Δu_{rb}), l'approche classique en contraintes planes a été adoptée. Étant donné que dans les essais effectués au laboratoire le déplacement radial u_{rr} n'a pas été mesuré directement, une procédure analytique pour l'obtenir à partir de la variation volumique du fluide confinant a été développée. La variation volumique, lorsqu'elle n'est pas mesurée directement à l'aide d'un injecteur de pression ou d'un débitmètre, peut être calculée moyennant l'équation d'état du fluide confinant. Dans cette recherche, cette dernière méthode a été retenue, ce qui a limité le nombre d'essais exploitables à ceux effectués à rigidité radiale constante (*i.e.*, masse d'huile constante dans la cellule triaxiale classique pendant l'essai, pour pouvoir utiliser l'équation d'état). Ainsi, seulement les essais d'arrachement effectués à rigidité radiale extérieure constante et dans lesquels aucune fracture radiale n'a été observée ont été sélectionnés pour l'analyse.

La procédure analytique décrite ci-dessus a permis de calculer la pression à l'interface, p_b . La comparaison entre la variation de pression et le cisaillement (calculé grâce à l'outil analytique

développé pour relier F et τ_b , cf. (Blanco Martin, Tijani, & Hadj-Hassen, 2011)) est montrée dans la Figure 13 pour un boulon HA25 (graphique de gauche) et pour un boulon FRP (graphique de droite).

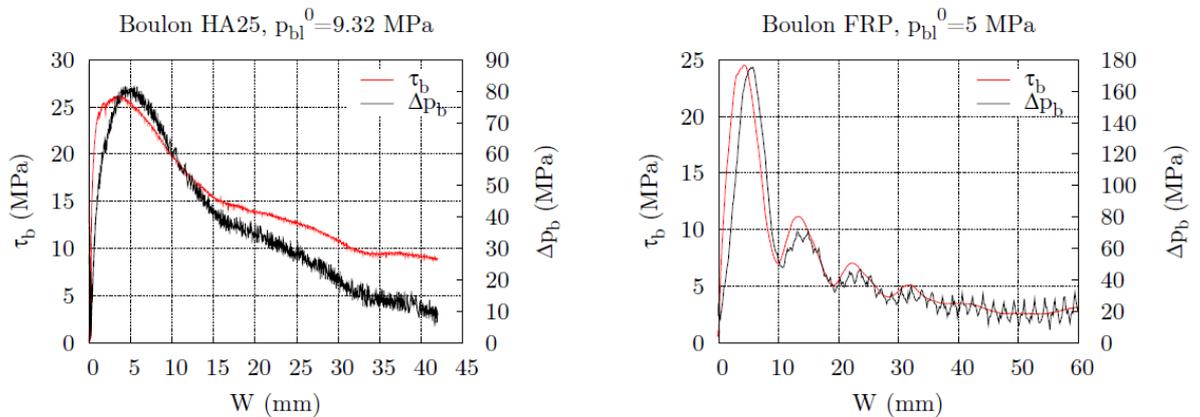


Figure 13 : comparaison entre le cisaillement et la variation de la pression normale à l'interface (valeurs expérimentales).

D'après ces graphiques, les faits suivants peuvent être constatés :

- les valeurs calculées de pression sont assez élevées. La procédure analytique utilisée a été validée *via* une simulation aux éléments finis (logiciel VIPLEF) de la cellule et l'échantillon. On croit que ces fortes valeurs pourraient être dues aux simplifications effectuées dans l'équation d'état de l'huile hydraulique; ainsi, on a supposé que la température de l'huile reste constante car elle n'a pas été mesurée, mais rien ne garantit cet aspect. Pour cette raison, le modèle proposé ci-dessous n'est pas définitif (en particulier, les valeurs des paramètres) ;
- l'allure de deux courbes est très similaire (*i.e.*, il y a une ressemblance entre τ_b et Δp_b). Il est important de noter que le cisaillement a été calculé à partir de la force (donc, selon la *réponse tangentielle*), tandis que la pression a été calculée à partir de la *réponse radiale* de l'échantillon (pression de confinement et variation volumique de l'huile). Les deux grandeurs ont ainsi été calculées différemment, mais montrent de grandes similitudes ;
- la pression p_b commence à augmenter pour des valeurs de déplacement axial très faibles, $W \approx 0$;
- le premier pic de τ_b et Δp_b ne sont pas en phase (τ_b atteint son pic pour une valeur de W inférieure à celle de Δp_b), tandis que les deuxièmes et ultérieurs pics sont bien en phase, ce qui suggère une proportionnalité entre les deux grandeurs, τ_b et Δp_b ;
- le profil des barres est reflété dans les courbes $\tau_b(W)$ et $\Delta p_b(W)$ *via* les oscillations. Par ailleurs, l'amplitude de ces oscillations diminue lorsque la pression augmente.

L'augmentation de la pression avant le pic de τ_b et la différence de phase initiale entre τ_b et Δp_b pourraient être liées à la formation et le développement du joint (c'est-à-dire $u_{rb}^+ \neq u_{rb}^-$). Ainsi, avant le premier pic l'interface, bien que non totalement couplée, est encore partiellement attachée, de sorte que non seulement le frottement mais aussi l'adhésion et le blocage mécanique (dû au profil de la barre) contribuent au cisaillement. Au pic, l'interface est désolidarisée et le joint complètement développé. Au-delà du pic, le frottement devient la composante principale de τ_b et en conséquence le cisaillement et la pression deviennent davantage proportionnels.

Compte tenu de ces interprétations, un modèle pour le cisaillement a été proposé. Dans ce modèle, le cisaillement τ_b a deux composantes :

- une composante proportionnelle à la variation de la pression normale, qui tient compte de la proportionnalité observée entre τ_b et p_b . Cette composante a été désignée τ_v ;
- une composante indépendante de la variation de la pression, qui tient principalement compte de l'adhésion et de l'effet du profil de la barre (blocage mécanique). Cette composante a été désignée τ_c .

Le cisaillement τ_b est alors donné par

$$\tau_b(\Delta p_b, W) = \tau_v(\Delta p_b) + \tau_c(W) \quad 2$$

où

$$\tau_v(\Delta p_b) = \Delta p_b \tan \varphi \quad 3$$

est la composante proportionnelle à la variation de la pression, et

$$\tau_c(W) = \begin{cases} \frac{\tau_p}{W_p} W & 0 \leq W \leq W_p \\ \tau_r + (\tau_p - \tau_r) \left(\frac{W_r - W}{W_r - W_p} \right)^2 & W_p \leq W \leq W_r \\ \tau_r & W \geq W_r \end{cases} \quad 4$$

est la composante définie à pression constante (l'indice p désigne le pic et l'indice r désigne la phase résiduelle [voir les courbes magenta dans la Figure 14]).

La Figure 14 montre une comparaison entre le cisaillement expérimental τ_b (obtenu à partir de la force grâce à l'outil analytique tangentiel) et le cisaillement modélisé, $\tau_c + \tau_v$. Les deux composantes τ_c et τ_v ont été dessinées pour apprécier leur poids respectif.

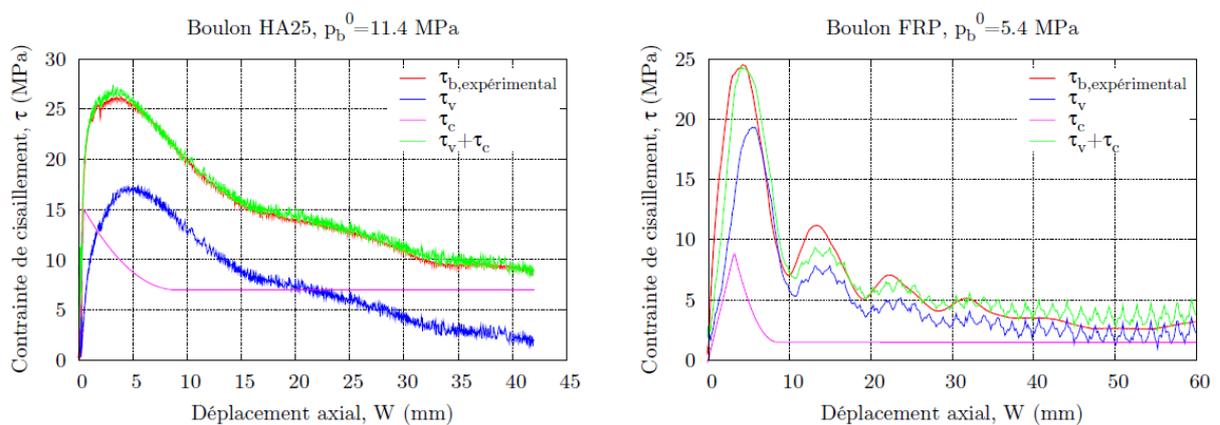


Figure 14 : comparaison entre le cisaillement expérimental (courbe rouge) et le cisaillement modélisé (courbe verte).

Même s'il ne s'agit que d'une première tentative pour modéliser le comportement tangentiel de l'interface, il faut noter que le modèle proposé reproduit de façon très satisfaisante le cisaillement expérimental. Afin de valider et compléter ce modèle, plus d'essais sont nécessaires (le nombre

exploitable d'essais jusqu'au présent reste limité). A l'heure actuelle, le modèle pour τ_b compte avec cinq paramètres : τ_p , τ_r , W_p , W_r et φ . Les valeurs de ces paramètres ne sont pas affichées dans ce rapport parce que plus d'essais sont nécessaires pour les vérifier. Elles sont montrées dans le mémoire de thèse.

L'ouverture radiale Δu_{rb} a été calculée une fois la pression p_b déterminée. En utilisant l'approche classique, l'expression qui permet de calculer Δu_{rb} s'exprime

$$\Delta u_{rb} = u_{rb^+} - u_{rb^-} = (\alpha_T + \beta_b) R_b \Delta p_b - \beta_T R_{bl} \Delta p_{bl} \quad 5$$

où l'indice b désigne le boulon, l'indice T désigne la partie non massive de l'échantillon (*i.e.*, présence de résine et de roche dans la direction radiale) et l'indice bl désigne la surface extérieure de la jaquette, où la pression de confinement est strictement appliquée. Le détail de l'équation 5 se trouve dans le mémoire de thèse.

L'ouverture radiale correspondant aux deux essais montrés dans la Figure 14 est représentée dans la Figure 15 (courbes cyan). Comme on peut le voir, l'ouverture est différente pour chaque type de boulon, car elle dépend macroscopiquement du profil de chaque barre. Pour cette raison, l'ouverture Δu_{rb} a été modélisée différemment pour les boulons HA25 et FRP. Les expressions retenues sont décrites respectivement par les équations suivantes :

$$\Delta u_{rb} = b \sqrt{\frac{W}{c}} \exp\left(1 - \frac{W}{c}\right) + \frac{d_f}{1 + a/5W} \quad 6$$

$$\Delta u_{rb} = b \exp\left(-\frac{W}{c}\right) \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{W}{a}\right)\right) + \frac{d_f}{1 + a/5W} \quad 7$$

Ces expressions sont empiriques (*i.e.*, elles ont été retenues parce qu'elles reproduisent bien l'ouverture radiale expérimentale). Par ailleurs, elles sont incomplètes car elles ne sont exprimées qu'en fonction du glissement W ; en effet, les données disponibles à présent ne permettent pas de séparer les contributions de p_b et W (dans le cas du cisaillement, τ_b et p_b ont été calculés différemment, ce qui rend la comparaison entre les deux grandeurs possible; cependant, l'ouverture Δu_{rb} a été calculée à partir de la pression p_b , rendant toute comparaison entre les deux grandeurs inutile). La réalisation et l'analyse de plus d'essais pourraient permettre de compléter les expressions 6 et 7. A ce stade, les paramètres nécessaires pour décrire l'ouverture radiale sont : la longueur d'onde a (ce n'est pas un paramètre d'ajustement, mais une caractéristique géométrique de chaque barre), l'amplitude initiale b , l'inverse de la constante de décroissance exponentielle c et le déplacement final d_f . Comme pour le cisaillement, les valeurs obtenues pour ces paramètres ne sont pas montrées dans ce rapport (*cf.* (Blanco Martin L. , 2012)).

Le modèle actuel pour l'ouverture radiale est représenté dans la Figure 15 (courbes oranges) pour les boulons HA25 et FRP. Comme l'on peut constater ces modèles, bien que non définitifs, reproduisent l'ouverture expérimentale de façon assez satisfaisante.

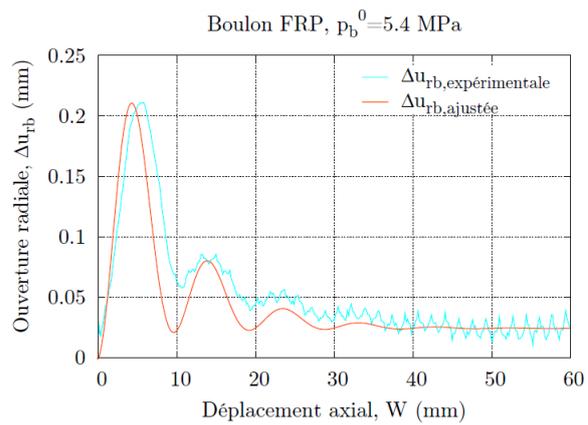
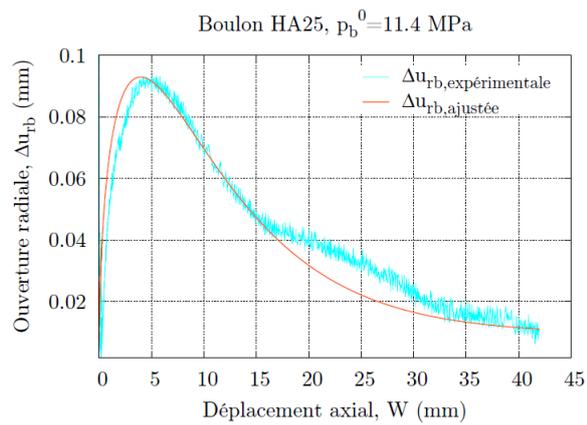


Figure 15 : comparaison entre l'ouverture radiale expérimentale (courbe cyan) et l'ouverture modélisée (courbe orange).

4. Conclusions et perspectives

Une étude de l'interface barre-scellement a été menée théorique et expérimentalement. L'étude expérimentale a été principalement effectuée à petite échelle en laboratoire, à l'aide d'un banc expérimental d'arrachement conçu et mis au point au Centre de Géosciences MINES ParisTech. Les essais *in situ* effectués sur les boulons HA25 dans le laboratoire de l'Andra en Meuse-Haute Marne ont été analysés, car ces boulons ont aussi été testés à petite échelle. Cependant, dans le but d'étudier l'interface, les essais à petite échelle en laboratoire sont préférés parce qu'ils permettent d'acquérir plus de mesures, en particulier dans la direction radiale. Dans cet esprit, il est nécessaire d'améliorer le banc d'arrachement actuel afin de pouvoir mesurer soit le déplacement radial de l'échantillon, soit la variation volumique de l'huile de confinement. Ces mesures supplémentaires vont permettre de mieux étudier la réponse normale à l'interface, non bien maîtrisée jusqu'à présent.

A l'heure actuelle, des boulons HA25, FRP (fibres de verre) et des tiges lisses ont été testés. Des câbles de type « Flexible » et « Mini-Cage » ont également été testés. Le but principal de ces derniers essais n'a pas été d'étudier l'interface câble-scellement, mais de mettre au point le dispositif conçu pour empêcher le phénomène de rotation qui pourrait fausser les résultats lorsque l'on arrache des câbles. Le dispositif ayant été mis au point, l'étude de l'interface câble-scellement constitue une des perspectives de ce travail.

D'un point de vue théorique, une approche analytique permettant de relier les variables mesurables (force et déplacement axiaux, pression et déplacement radiaux) aux variables d'interface (cisaillement, glissement, pression normale et ouverture radiale) a été développée. L'utilisation de cette méthode prouve l'importance de bien connaître la réponse des matériaux environnants (barre, scellement et roche) lorsque l'on s'intéresse à ce qui se passe au niveau de l'interface. Ainsi, il est souhaitable que pendant les essais d'arrachement tous les matériaux environnants restent dans le domaine élastique. Par ailleurs, cette méthode d'accès à l'interface a l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur le comportement de celle-ci; en effet, dans certaines études préalables (Hyett, Bawden, Macsporrán, & Moosavi, 1995; Yazici & Kaiser, 1992), on admettait certaines ressemblances non prouvées entre le comportement des joints rocheux et celui de l'interface barre-scellement. Cette recherche constitue ainsi une méthode innovante pour étudier l'interface. Le nombre limité d'essais disponibles à l'heure actuelle ne permet pas de proposer une loi de comportement complète et définitive, d'autant plus que la réponse radiale n'est pas bien maîtrisée. A ce stade, il s'agit plutôt d'une méthode qui permet de déterminer un modèle d'interface à partir de résultats d'essais d'arrachement et d'outils analytiques simples. Le modèle proposé devra être complété par la suite moyennant d'autres résultats et la compréhension de plus de mécanismes.

D'autre part, et dans le but de valider les résultats obtenus à petite échelle en laboratoire, l'idéal serait d'effectuer des essais *in situ* à échelle réelle. Ces essais seraient dimensionnés à partir des résultats obtenus à petite échelle en laboratoire, et la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de la modélisation pour de grandes longueurs (possible grâce à l'outil analytique développé pour la direction tangentielle, cf. (Blanco Martin, Tijani, & Hadj-Hassen, 2011)) pourrait alors aider à évaluer la recherche menée à échelle réduite.

Enfin, une fois la loi de comportement de l'interface déterminée pour une combinaison barre-scellement donnée, elle devrait être implémentée dans un code de calcul numérique; la comparaison entre les prédictions numériques et les données de terrain (des mesures de convergence et d'extensométrie provenant d'un ouvrage renforcé par des boulons et des câbles à ancrage réparti) permettrait d'examiner la capacité de la nouvelle loi à reproduire l'action du soutènement. En outre, les simulations numériques sont des outils très pratiques pour concevoir des schémas de boulonnage/câblage, d'où l'importance de bien modéliser ces éléments et leur interaction avec le terrain.

Bibliographie

AFNOR. (1993). NF P94-242-1: Renforcement des sols. Essai statique d'arrachement de clou soumis à un effort axial de traction. Essai à vitesse de déplacement constante.

Benmokrane, B., Chennouf, A., & Mitri, H. (1995). Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* , 633 - 642.

Blanco Martin, L. (2012). Etude théorique et expérimentale du boulonnage à ancrage réparti sous sollicitations axiales. *Mémoire de thèse* . MINES ParisTech.

Blanco Martin, L., & Hadj-Hassen, F. (2010). *Projet MIBOULAND - Deuxième Rapport*.

Blanco Martin, L., & Hadj-Hassen, F. (2009). *Projet MIBOULAND - Premier Rapport*.

Blanco Martin, L., Hadj-Hassen, F., Tijani, M., & Noiret, A. (2011). A new experimental and analytical study of fully grouted rockbolts. *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* .

Blanco Martin, L., Tijani, M., & Hadj-Hassen, F. (2011). A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests. *Construction and Building Materials* , 749 - 755.

Dénécé, D., Leleu, A., & Beth, M. (2009). *Essais de traction boulons d'ancrage. Campagne octobre 2009. Rapport des essais Sol Data*.

Hyett, A., Bawden, W., & Reichert, R. (1992). The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* , 503 - 524.

Hyett, A., Bawden, W., Macsporrán, G., & Moosavi, M. (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 & Geomechanics Abstracts* , 11 - 36.

Popov, E. (1976). *Mechanics of Materials*. Prentice Hall.

Verderame, G., Ricci, P., De Carlo, G., & Manfredi, G. (2009). Cyclic bond behaviour of plain bars. Part I: Experimental investigation. *Construction and Building Materials* , 3499 - 3511.

Yazici, S., & Kaiser, P. (1992). Bond strength of grouted cable bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* , 279 - 292.

Annexe : essais d'arrachement effectués sur les boulons

Boulons HA25

Scellement à la résine. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,84 mm/s, sans plaque.

- L=130 mm

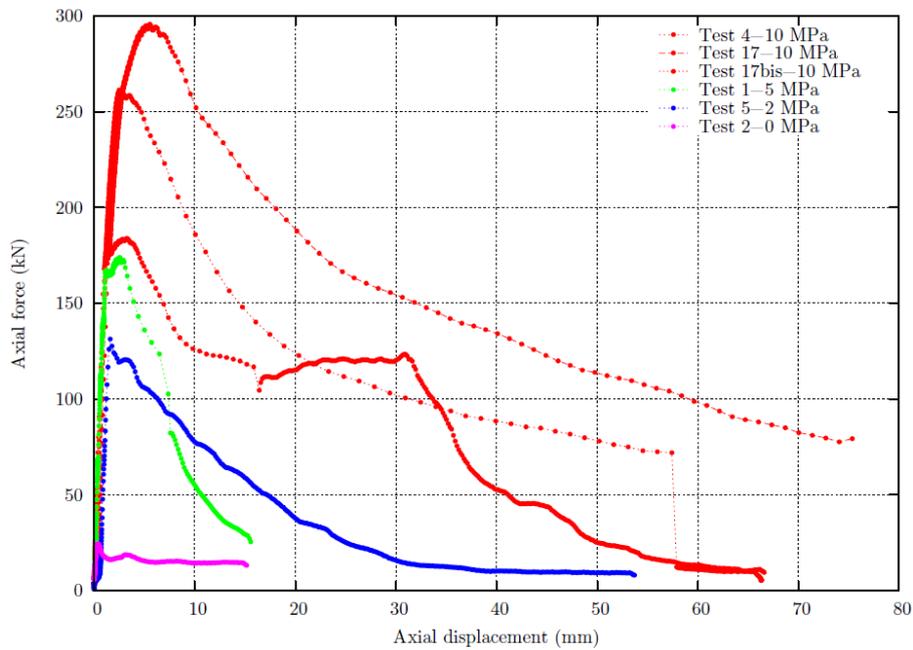


Figure A.1 : courbes de charge.

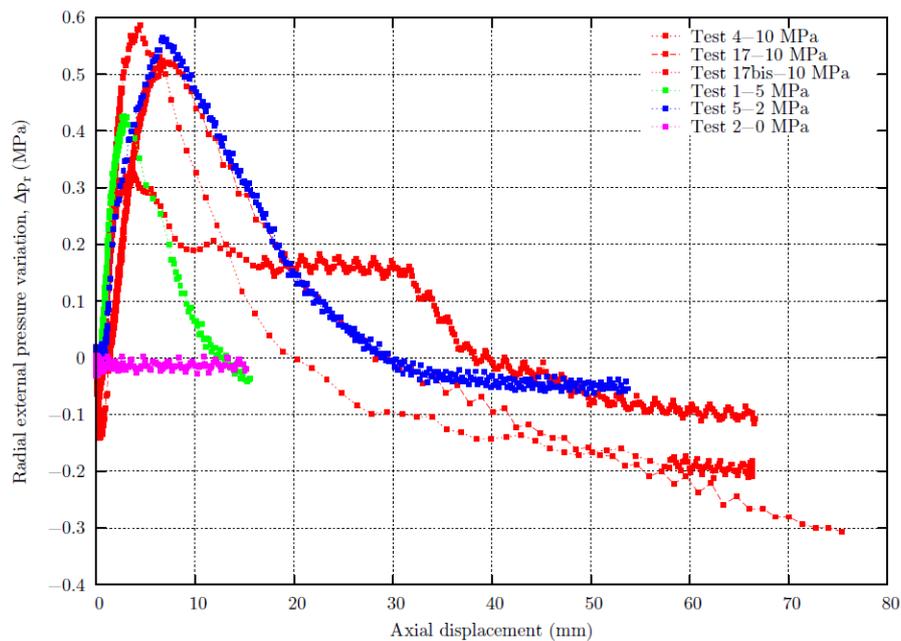


Figure A.2 : variation de la pression de confinement.



Figure A.3 : vue de quelques échantillons après les essais.

Commentaires : les essais 1 et 2 ont été arrêtés à de faibles valeurs de déplacement axial. Dans l'essai 17bis, la rupture a commencé à l'interface roche-scellement et a continué à l'interface boulon-scellement au-delà de 33 mm de déplacement axial.

- L=90 mm

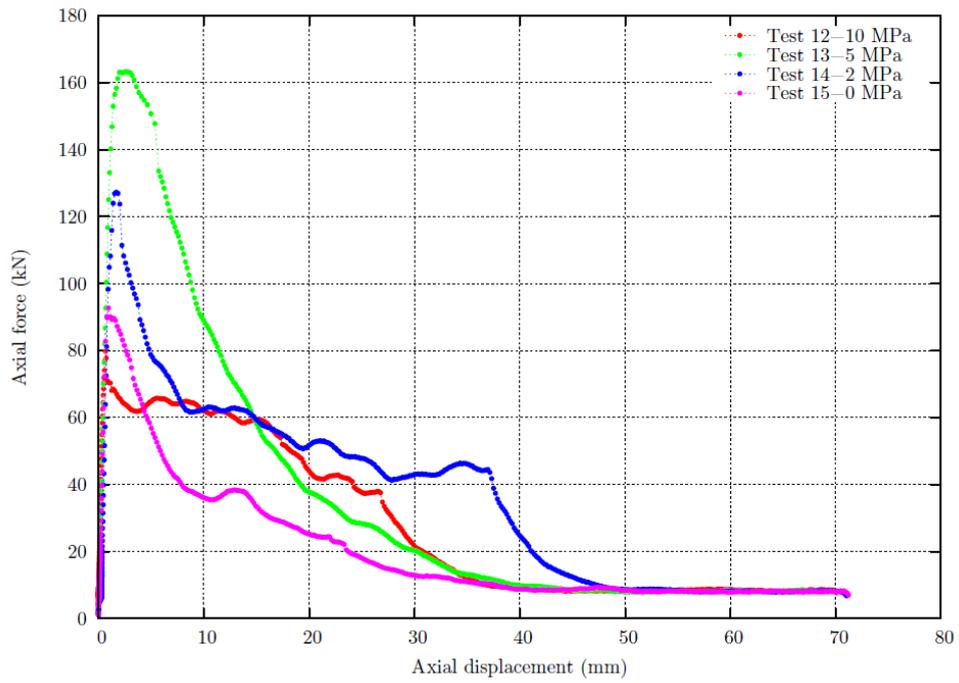


Figure A.4 : courbes de charge.

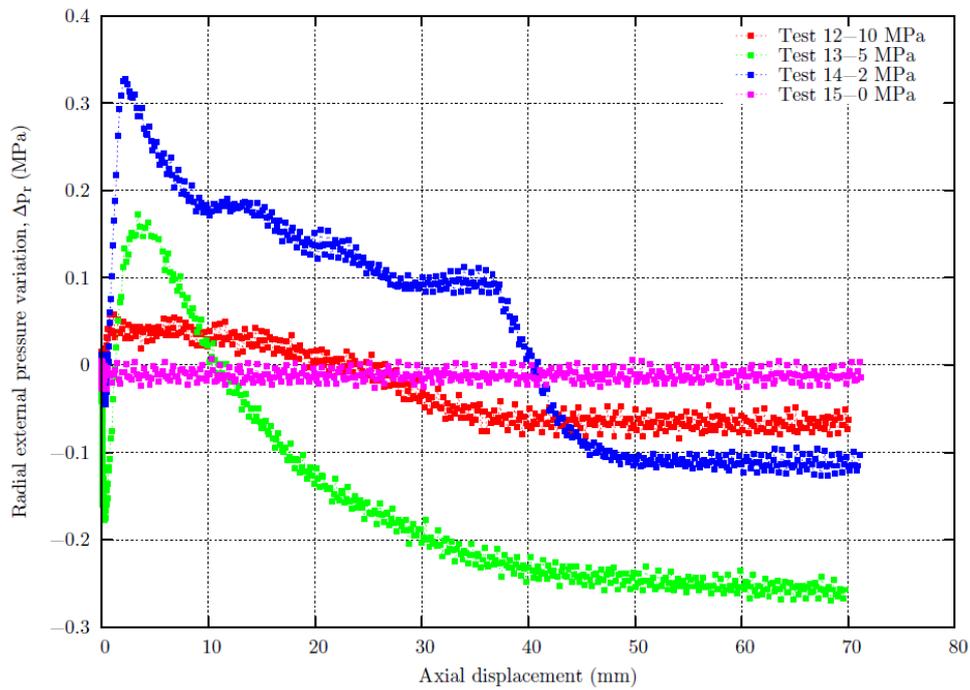


Figure A.5 : variation de la pression de confinement.

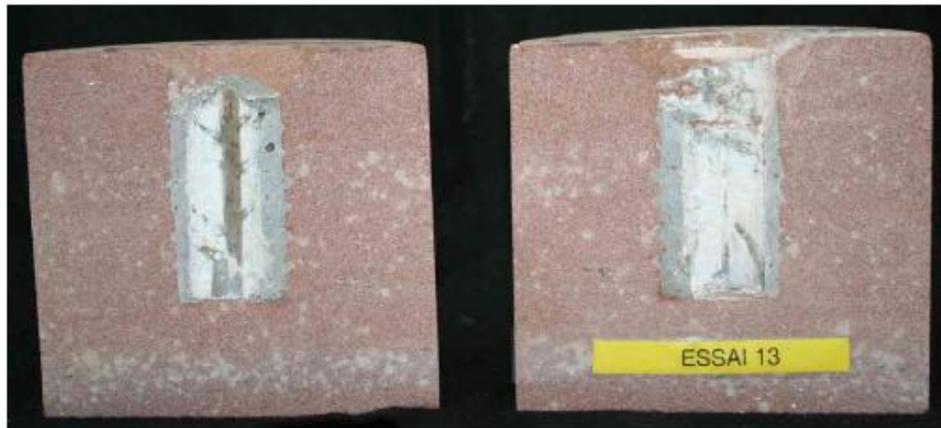


Figure A.6 : vue de l'échantillon correspondant à l'essai 13.



Figure A.7 : vue des échantillons correspondant aux essais 12, 14 et 15.

Commentaires : dans les essais 12, 14 et 15 la rupture n' pas eu lieu à l'interface barre-scèlement. Dans l'essai 13, la résine proche à la gueule du trou a été arrachée avec le boulon.

- L=150 mm

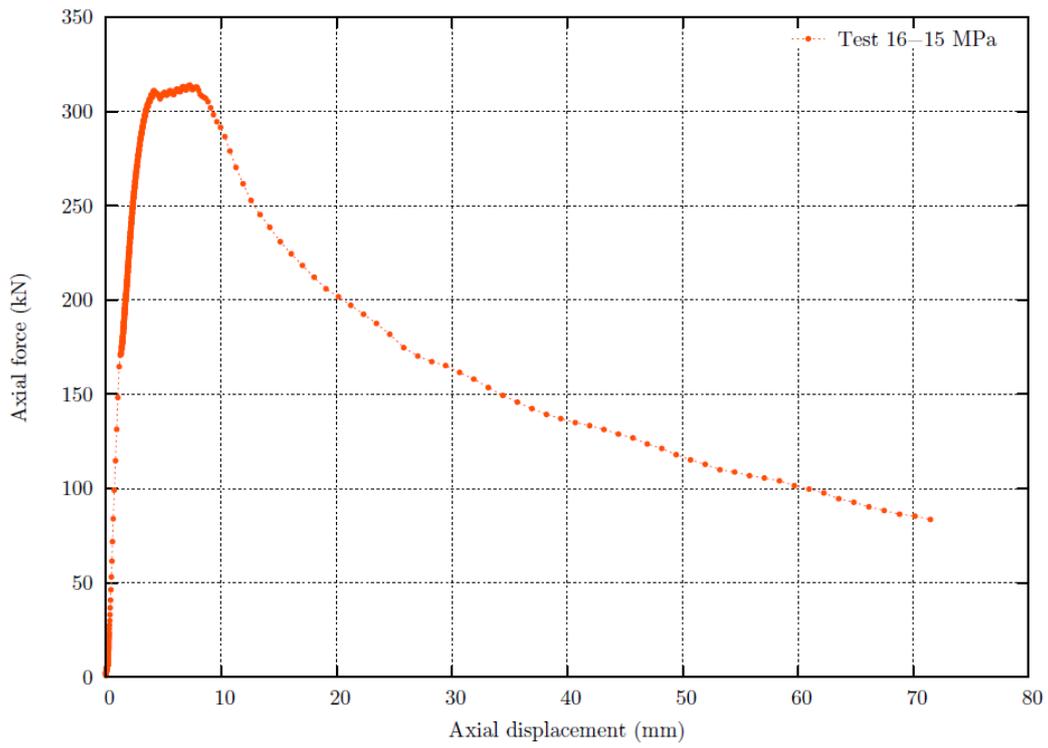


Figure A.8 : courbe de charge.

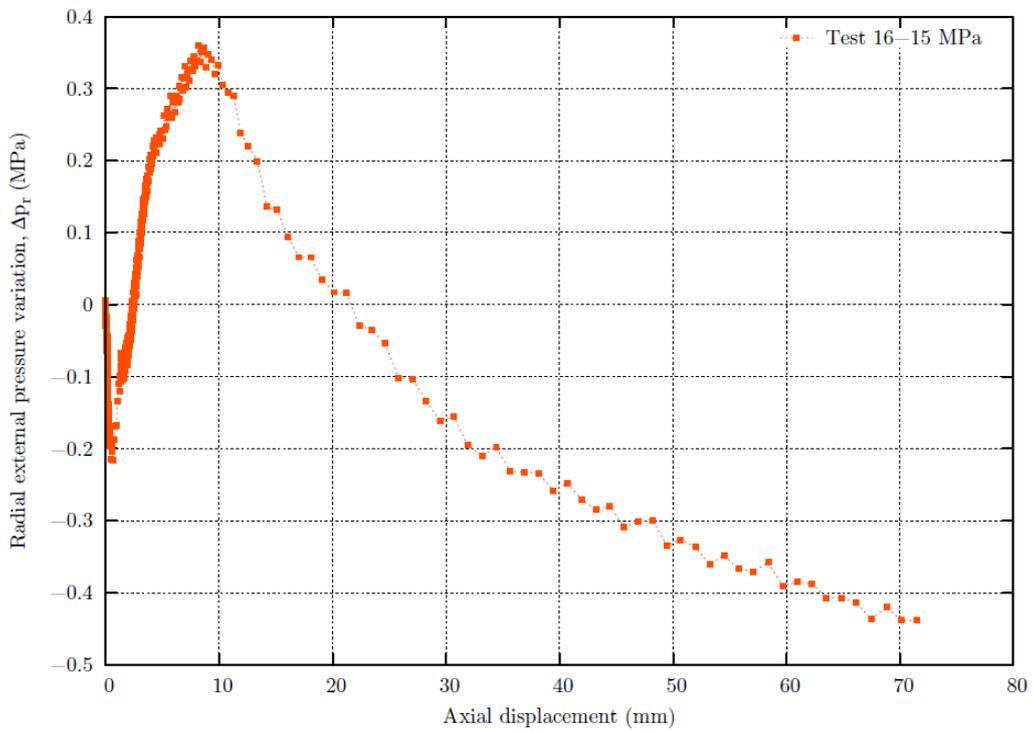


Figure A.9 : variation de la pression de confinement.

Scellement à la résine. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque, tube non scellé.

- L=130 mm

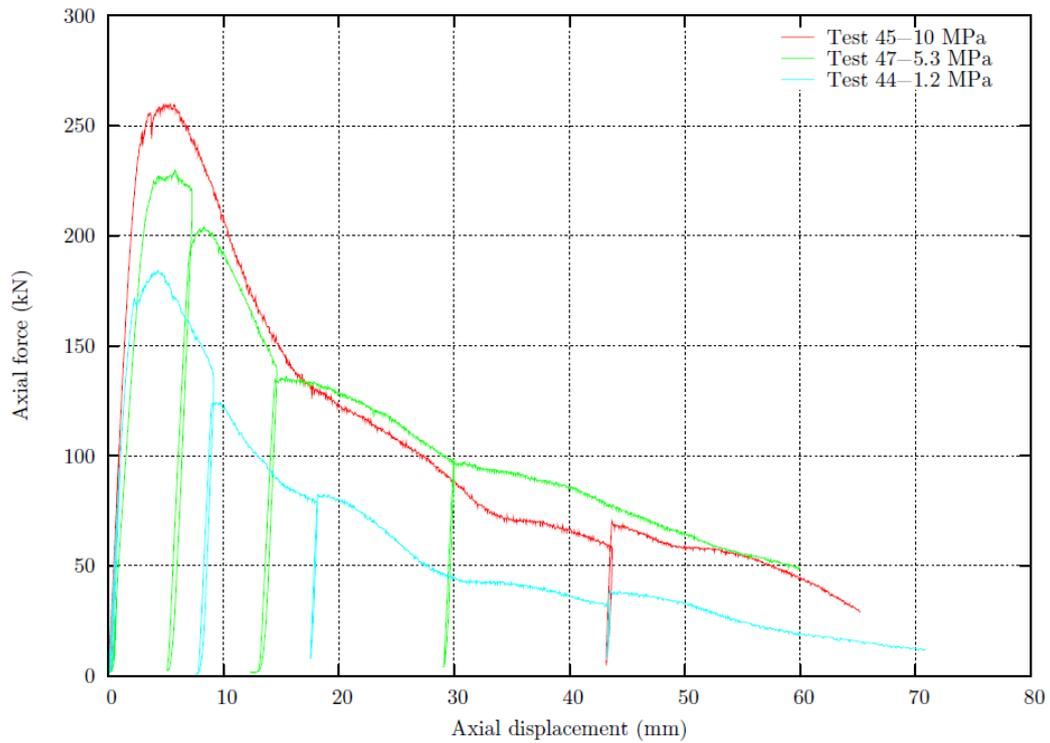


Figure A.10 : courbes de charge.

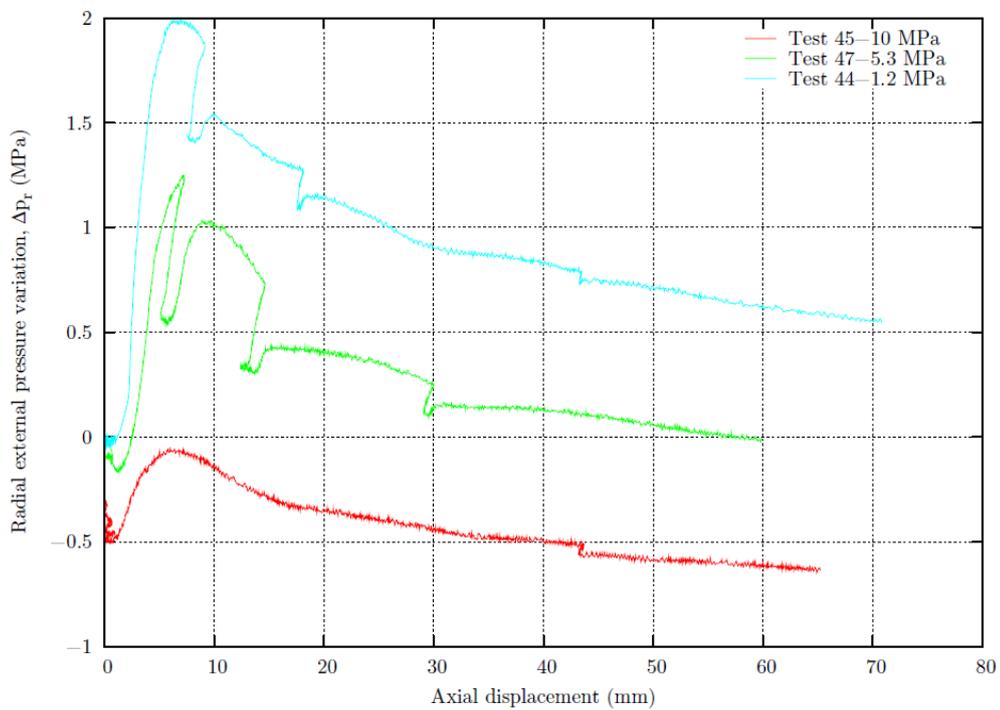


Figure A.11 : variation de la pression de confinement.



Figure A. 12 : vue des échantillons correspondant aux essais 45, 47 et 44, de gauche à droite.

Commentaires : aucune fracture n'a été identifiée après l'essai 45 (image de gauche). Dans ces essais, effectués après l'étalonnage du banc, le tube n'était pas scellé au boulon, mais retenu moyennant un anneau métallique soudé au boulon, en haut du tube. Le principal but de ces essais a été d'étudier l'influence de l'ancrage supérieur sur les résultats. Par ailleurs, on a testé la viabilité de simplifier la procédure de préparation des échantillons.

Scellement à la résine. *Modus operandi* : confinement constant, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque.

- L=130 mm

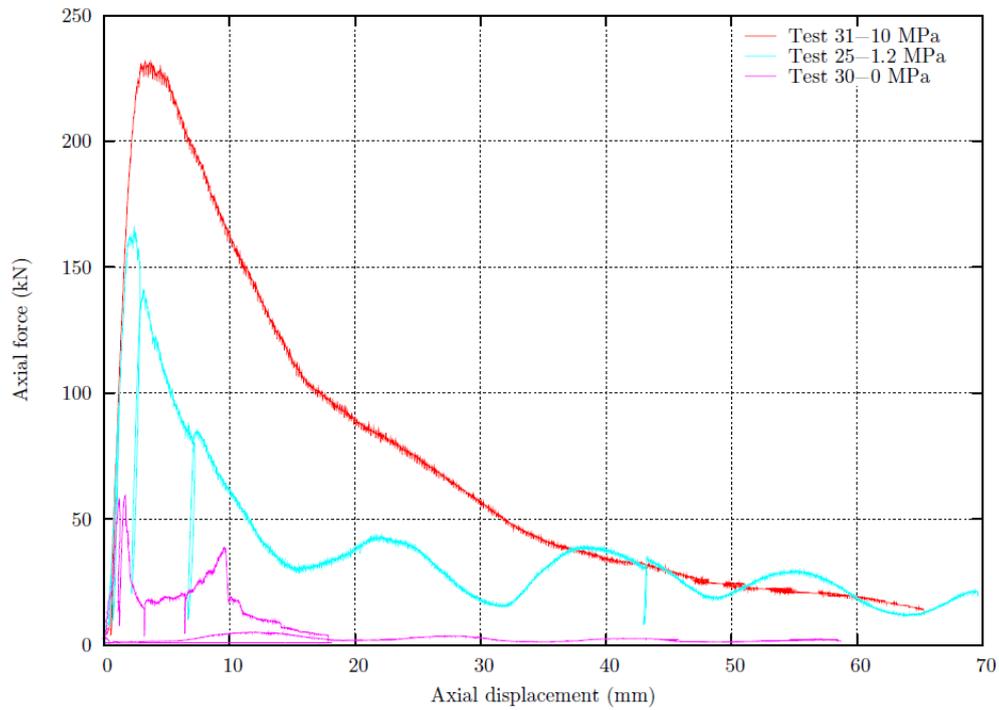


Figure A.13 : courbes de charge.

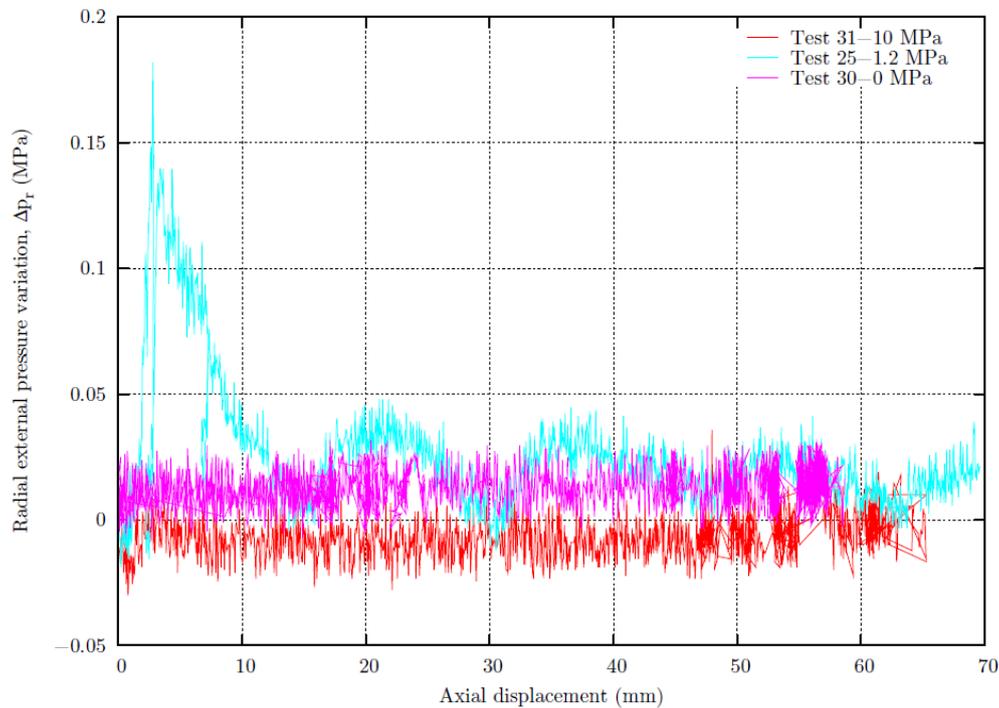


Figure A.14 : variation de la pression de confinement.

Commentaires : dans l'essai 30, au bout d'environ 17 mm de déplacement axial, on a replacé le boulon en fond du trou (Z=0) et recommencé l'essai.

- L=90 mm

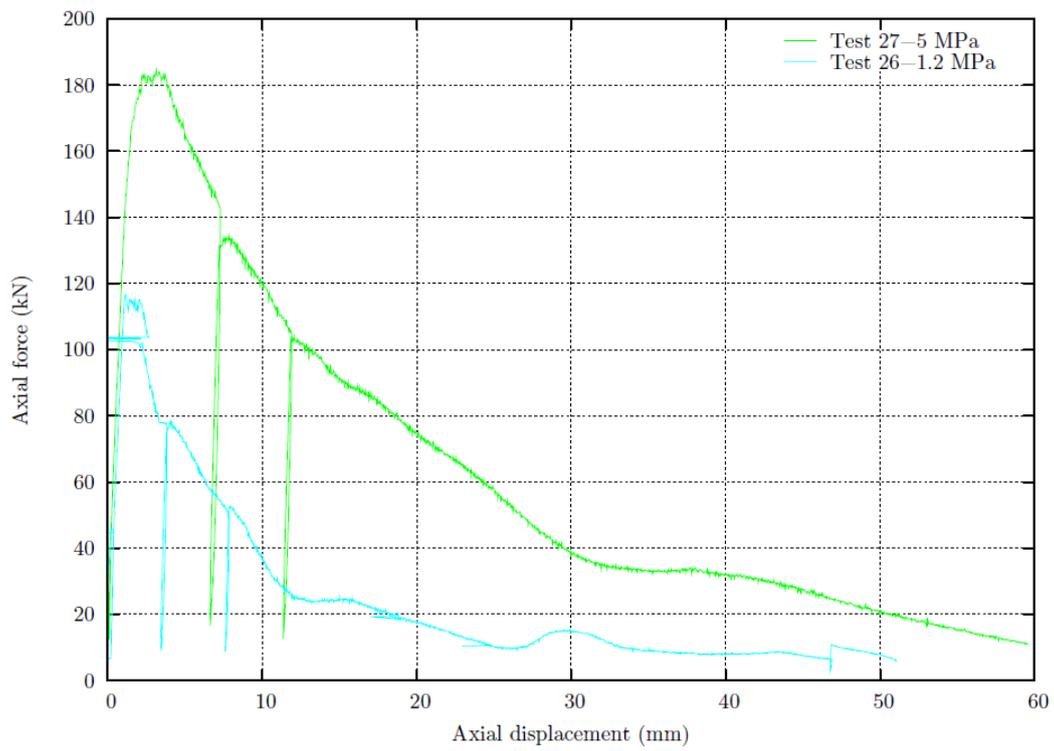


Figure A.15 : courbes de charge.

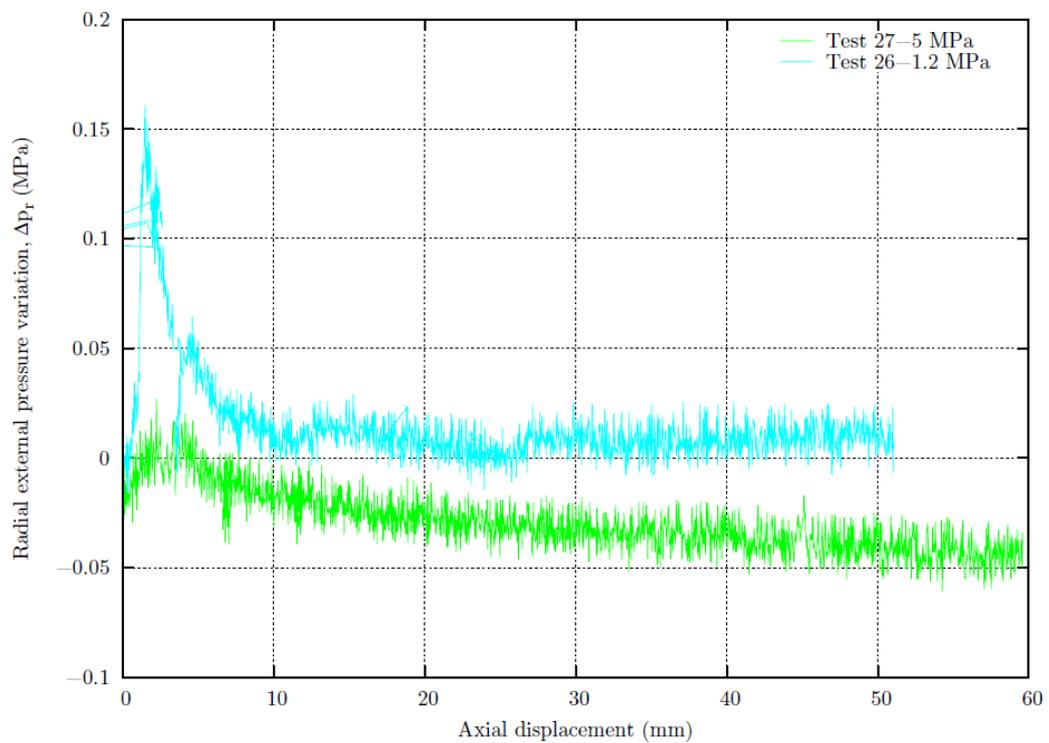


Figure A.16 : variation de la pression de confinement.



Figure A.17 : vue des échantillons correspondant aux essais 26 et 27, de gauche à droite.

Commentaires : dans l'essai 26, certaines valeurs mesurées de déplacement axial sont aberrantes (dans l'essai 31 aussi). Ceci pourrait être dû soit à un mal fonctionnement d'un ou plusieurs capteurs LVDT, soit à la fracturation de la roche.

Scellement à la résine. *Modus operandi* : confinement constant, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque, tube non scellé.

- L=130 mm

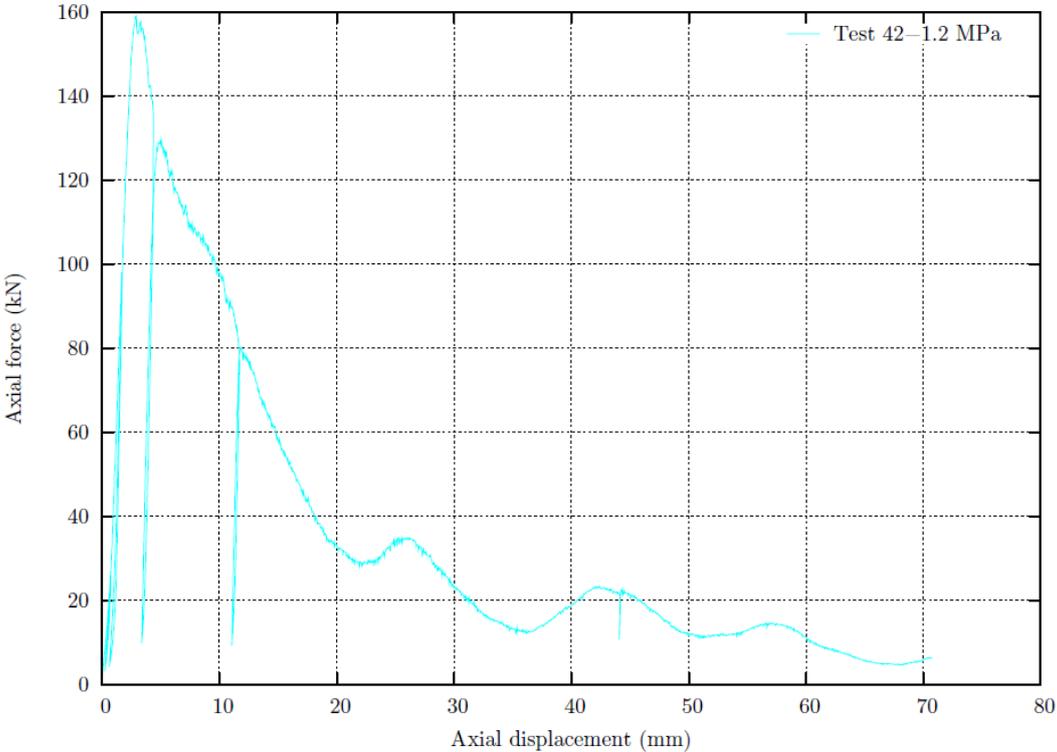


Figure A.18 : courbe de charge.

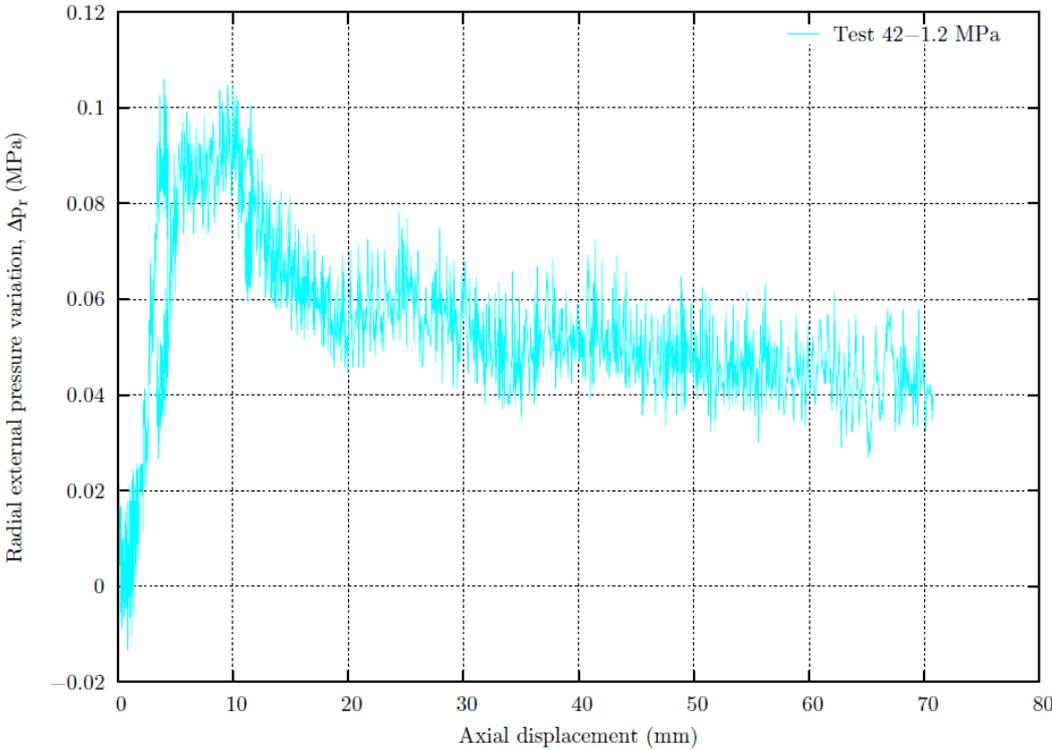


Figure A.19 : variation de la pression de confinement.



Figure A.20 : vue de l'échantillon correspondant à l'essai 42.

Commentaires : dans cet essai, le tube n'était pas scellé au boulon. La comparaison des résultats entre les cas tube non scellé et tube scellé (voir Figure A.13, essai 25) montre clairement la distorsion introduite par l'ancrage supérieur et le besoin de corriger les mesures de déplacement axial (en particulier en phase pré-pic) lorsque le tube est scellé à la barre. Dans le cas tube non scellé, le déplacement dû à la déformation élastique de la longueur libre du boulon a été retranchée du déplacement mesuré.

Scellement au ciment. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,84 mm/s, sans plaque.

- L=130 mm

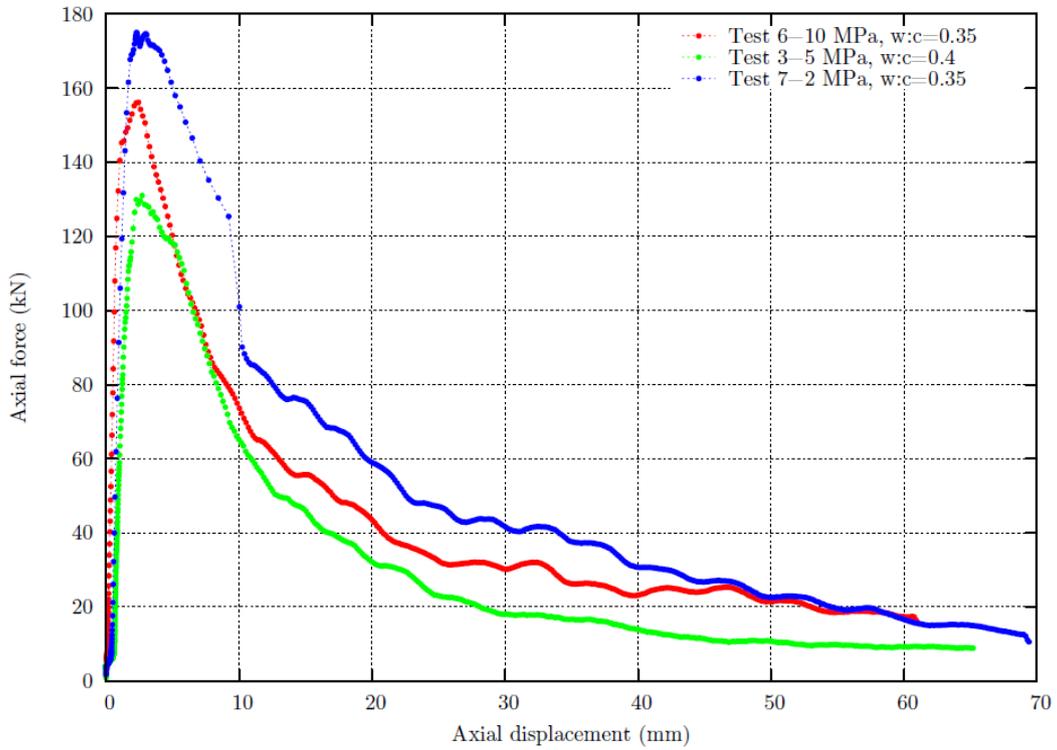


Figure A.21 : courbes de charge.

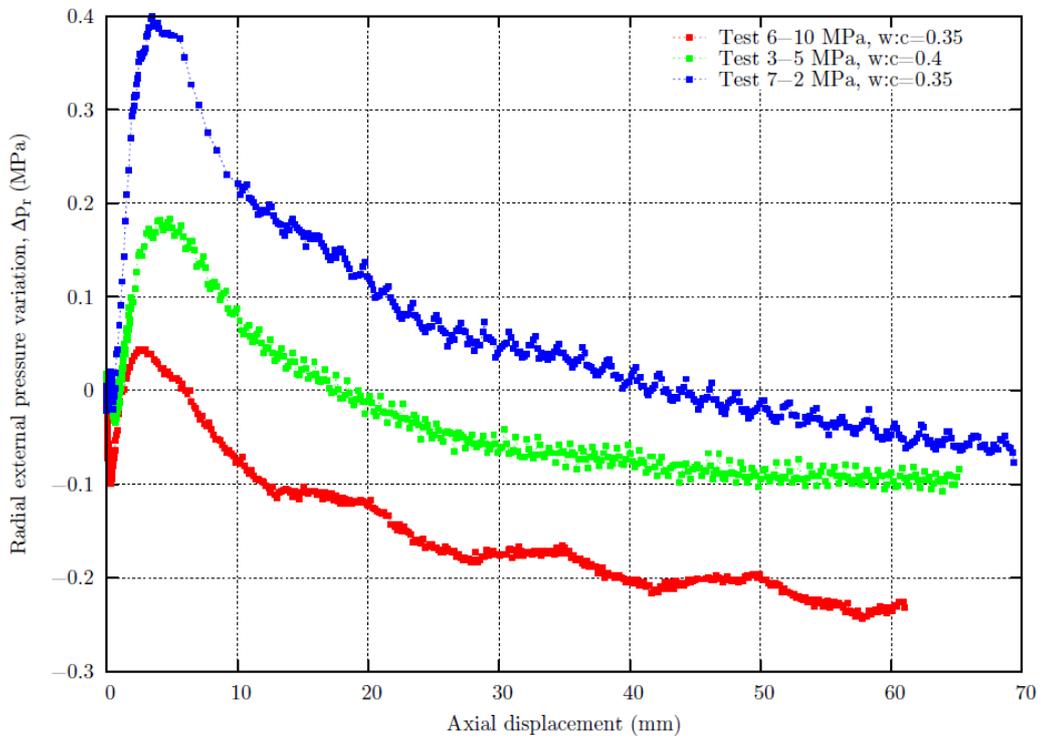


Figure A.22 : variation de la pression de confinement.



Figure A.23 : vue des échantillons correspondant aux essais 6, 3 et 7, de haut en bas.

Commentaires : la force maximum pour $p_r=2$ MPa (essai 7) est supérieure que pour $p_r=10$ MPa (essai 6). Ceci est probablement dû à la plus forte augmentation de pression durant l'essai 7. Un troisième essai est nécessaire pour clarifier ce point.

Boulons FRP

Scellement à la résine. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,84 mm/s, sans plaque.

- L=130 mm

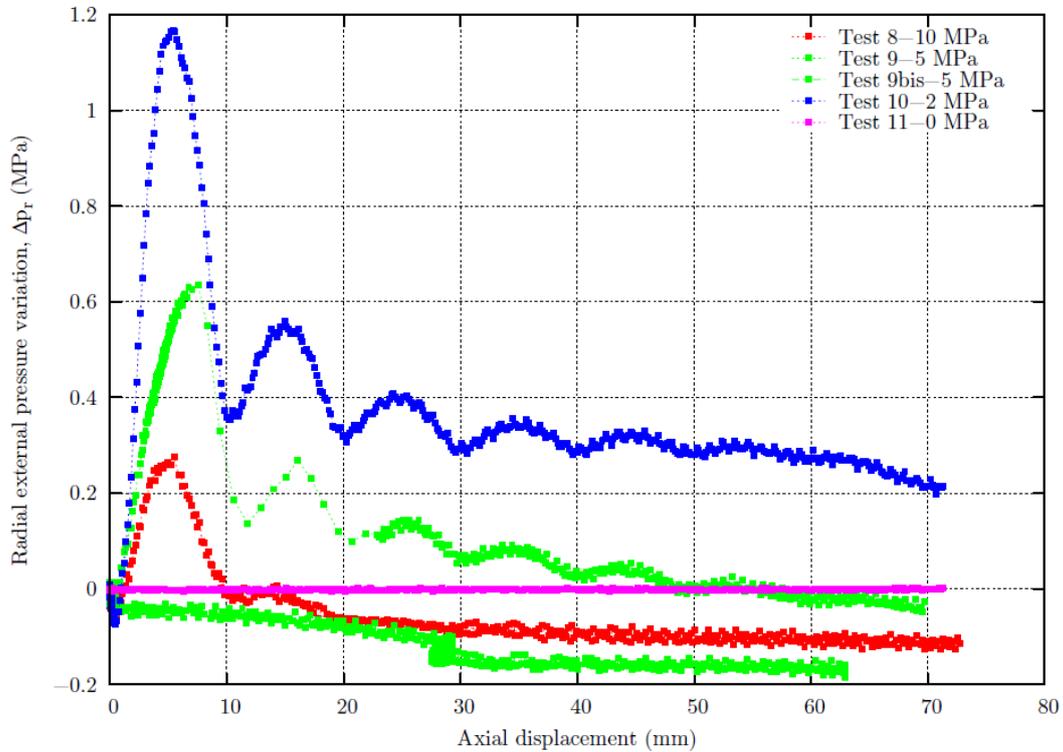


Figure A.24 : courbes de charge.

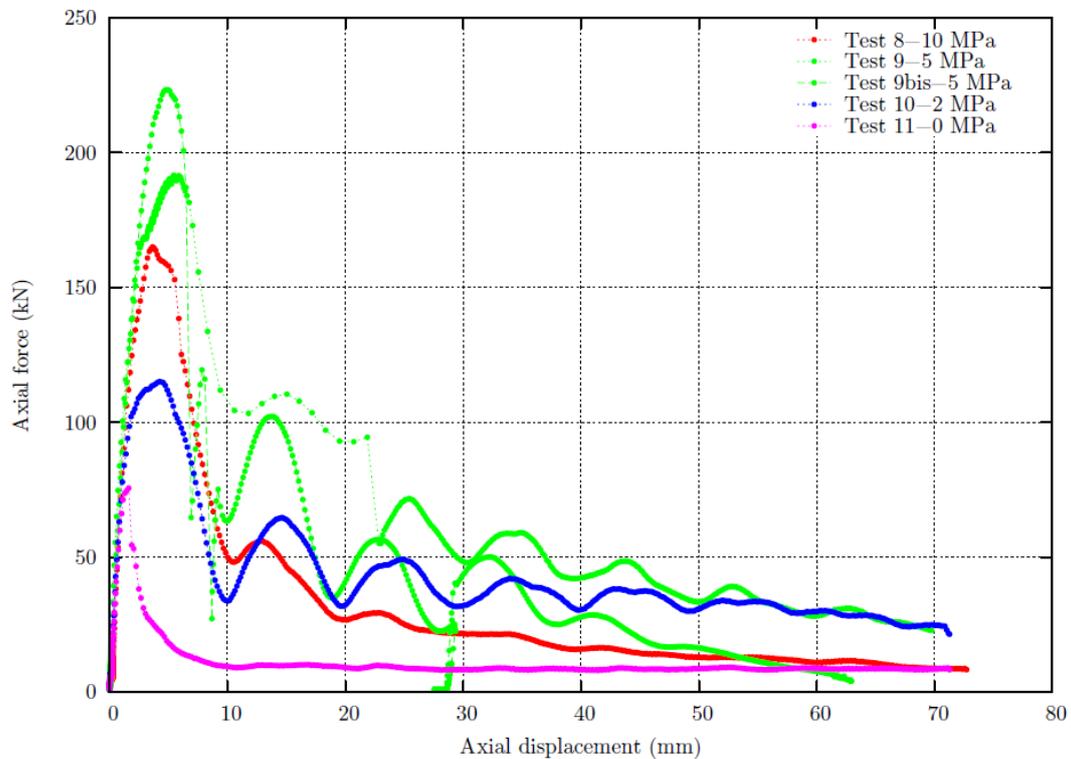


Figure A.25 : variation de la pression de confinement.

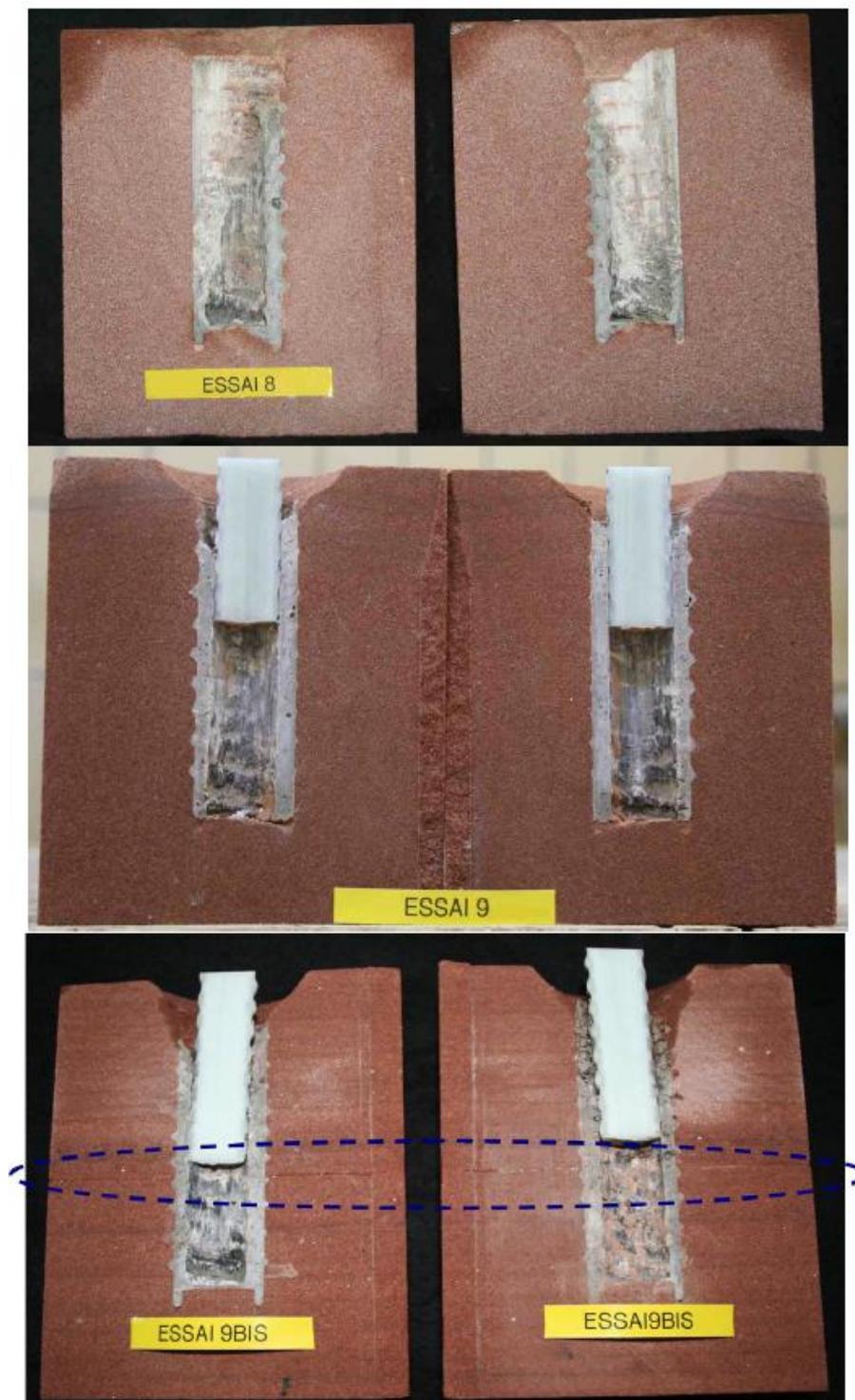


Figure A.26 : vue des échantillons correspondant aux essais 8, 9 et 9bis, du haut en bas.

Commentaires : comme montré dans l'image supérieure, une partie de la résine a été arrachée avec le boulon dans l'essai 8. Dans l'essai 9bis, le boulon s'est cassé (désolidarisation du revêtement extérieur). La roche et le scellement montrent par ailleurs un plan de rupture à $Z \approx 43$ mm (voir image du bas). Ces faits pourraient être la cause de la chute de force durant l'essai et de l'allure de l'évolution de la pression de confinement. Enfin, dans cet essai la pompe électrique a été arrêtée intentionnellement lorsque $Z \approx 29$ mm.

- L=90 mm

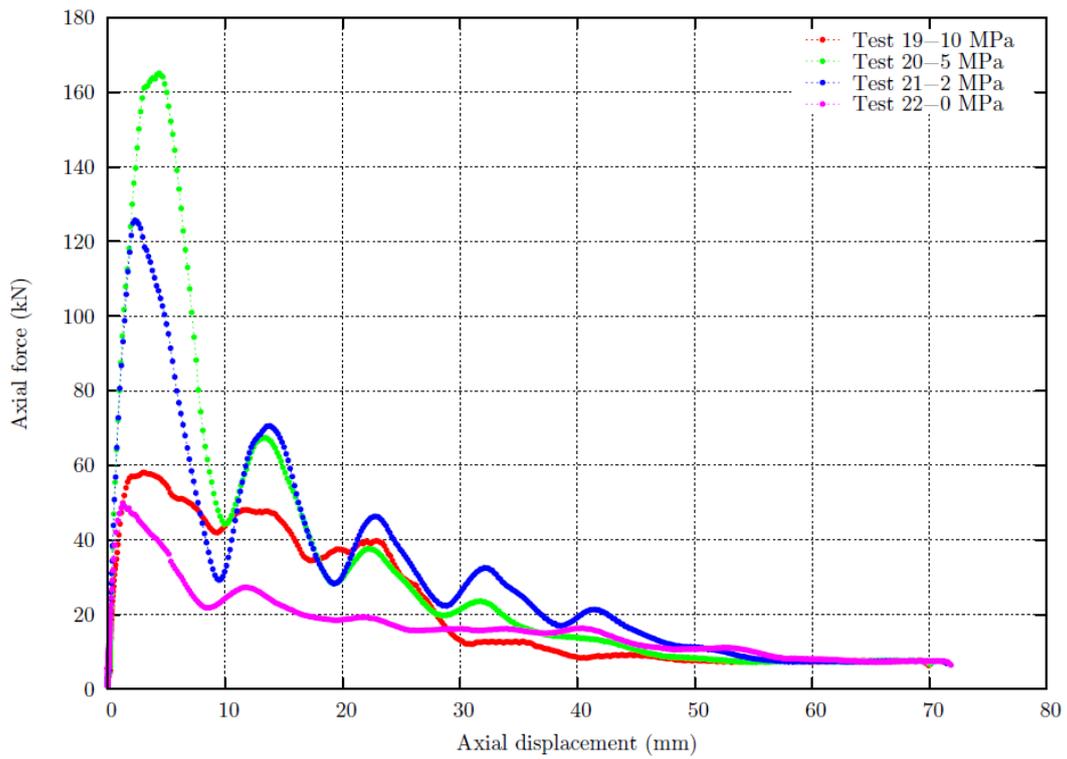


Figure A.27 : courbes de charge.

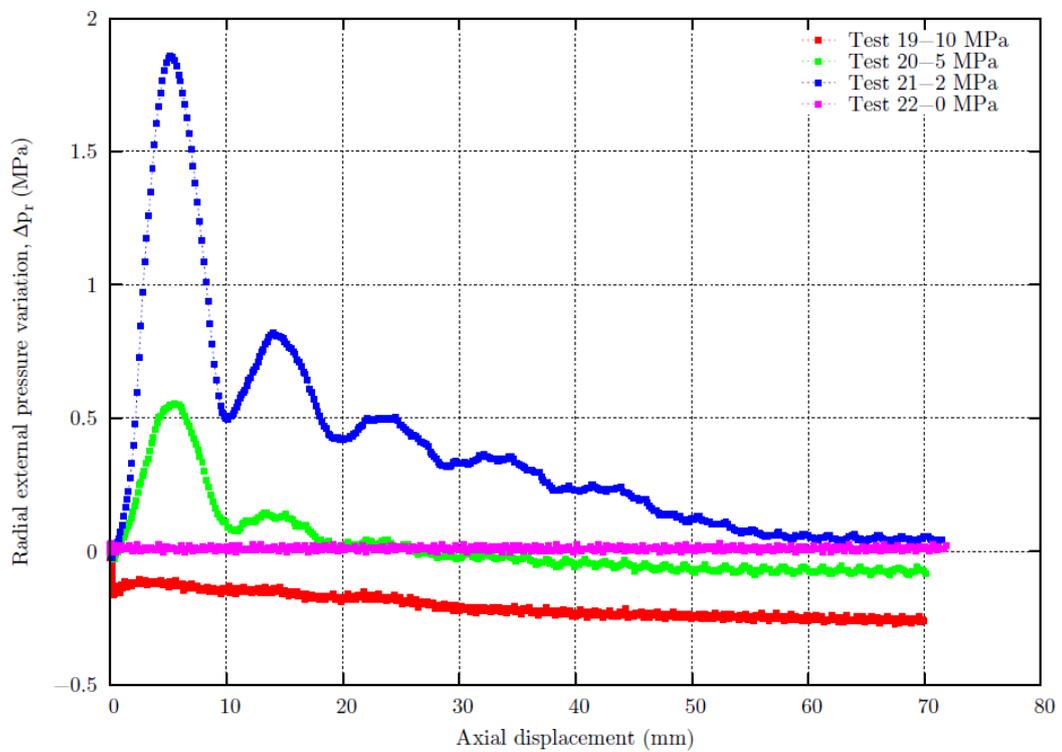


Figure A.28 : variation de la pression de confinement.

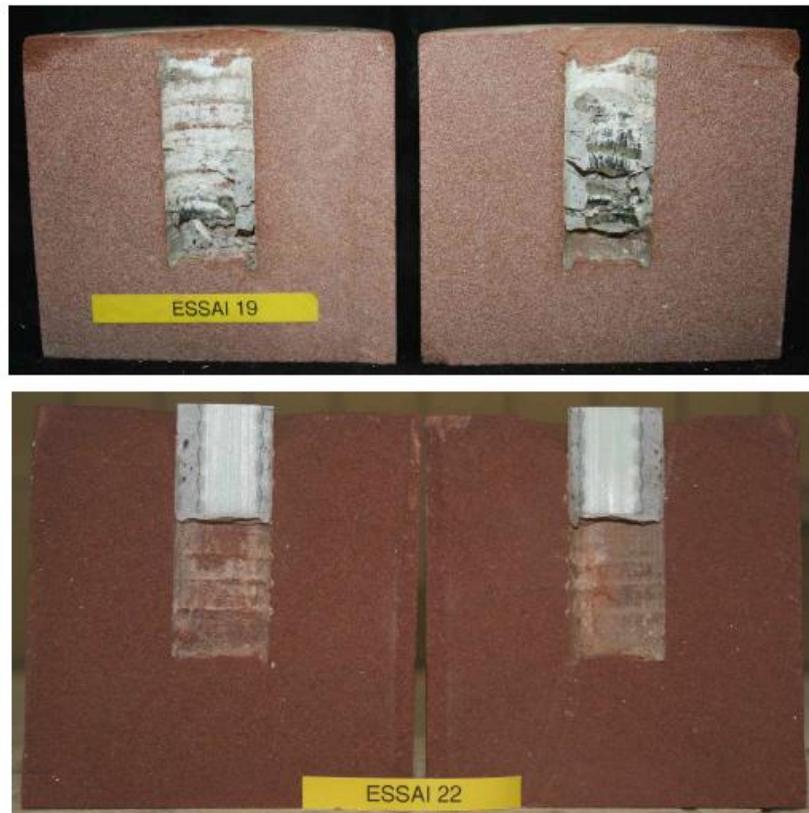


Figure A.29 : vue des échantillons correspondant aux essais 19 et 22, du haut en bas.

Commentaires : dans l'essai 19, la rupture n'a pas eu lieu de façon propre à l'interface barre-scellement. Dans l'essai 22, la rupture a eu lieu à l'interface scellement-roche. Les essais 20 et 21 sont satisfaisants.

Scellement à la résine. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque.

- L=90 mm

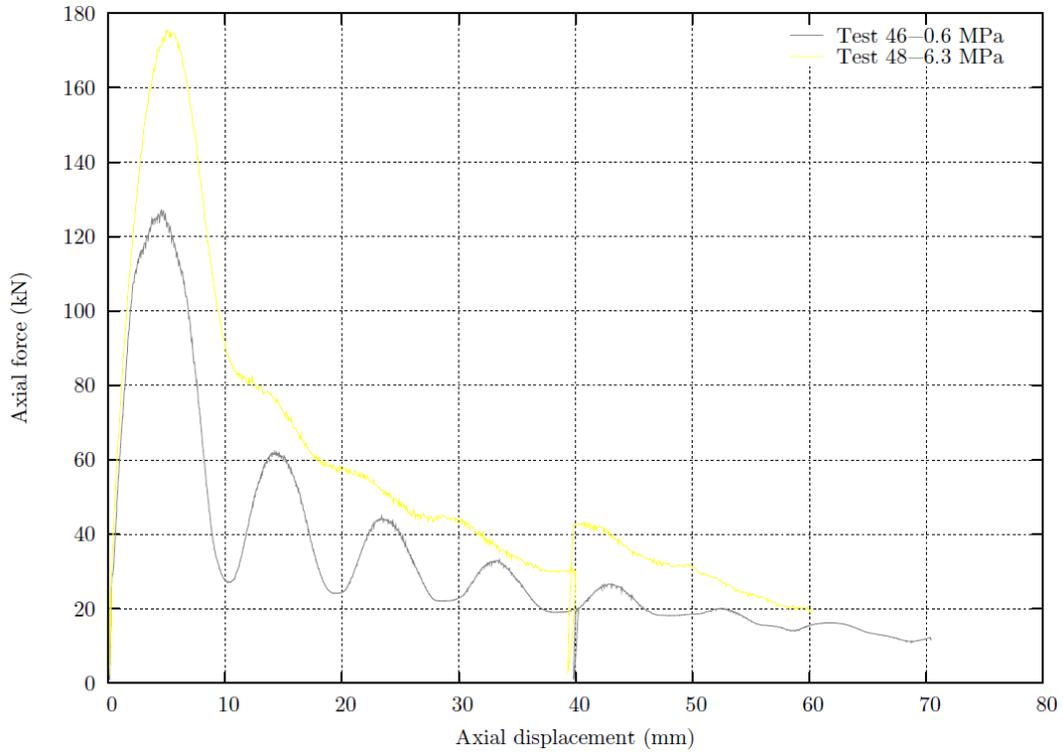


Figure A.30 : courbes de charge.

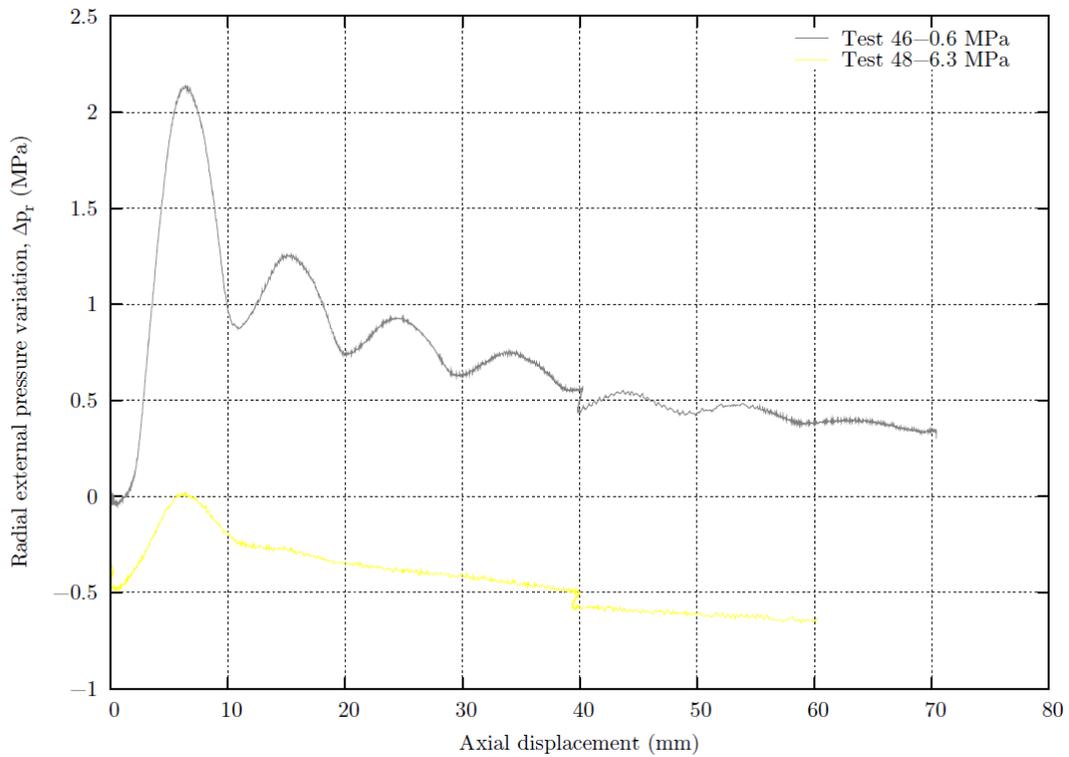


Figure A.31 : variation de la pression de confinement.

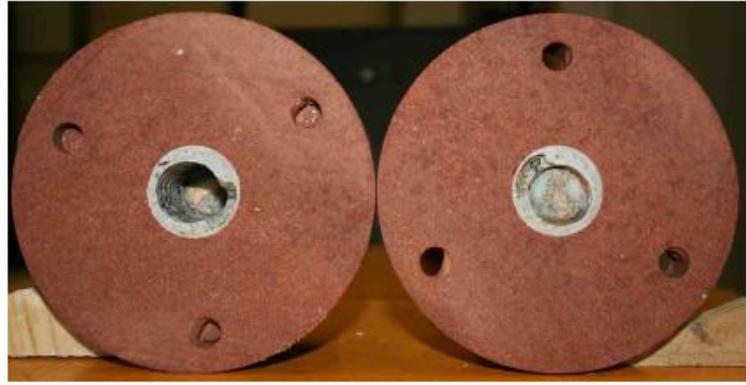


Figure A.32 : vue des échantillons correspondant aux essais 46 et 48, de gauche à droite.

Commentaires : la roche et la résine étaient fracturées radialement après l'essai 46 (image de gauche), mais intactes après l'essai 48 (image de droite).

Scellement à la résine. *Modus operandi* : confinement constant, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque.

- L=90mm

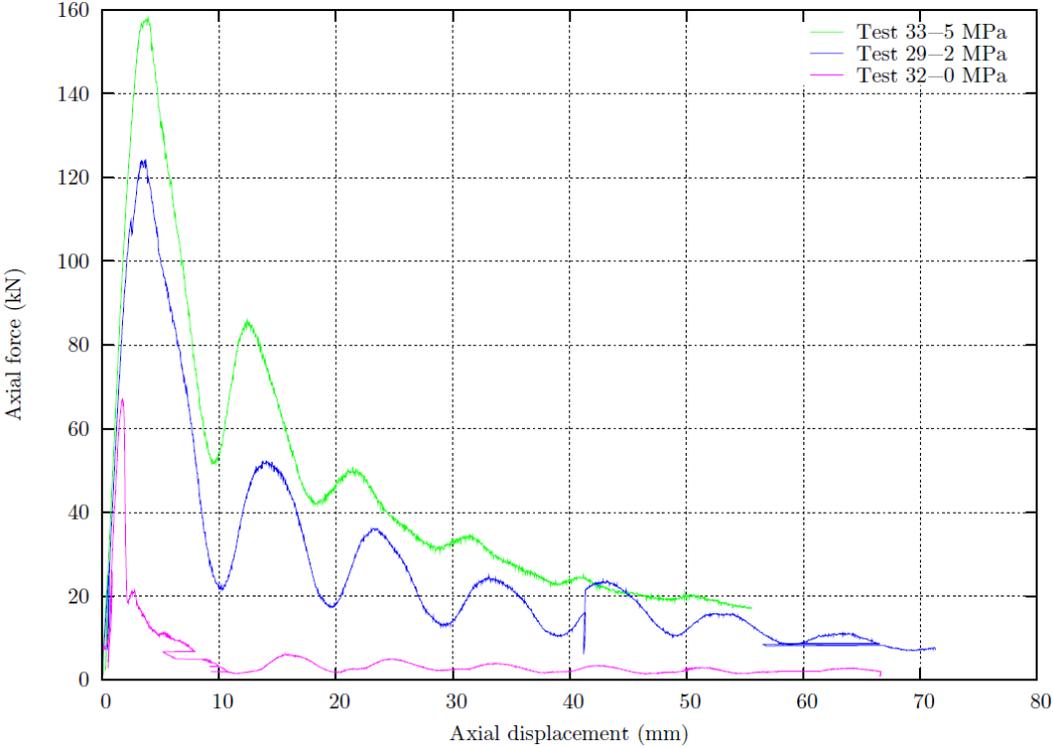


Figure A.33 : courbes de charge.

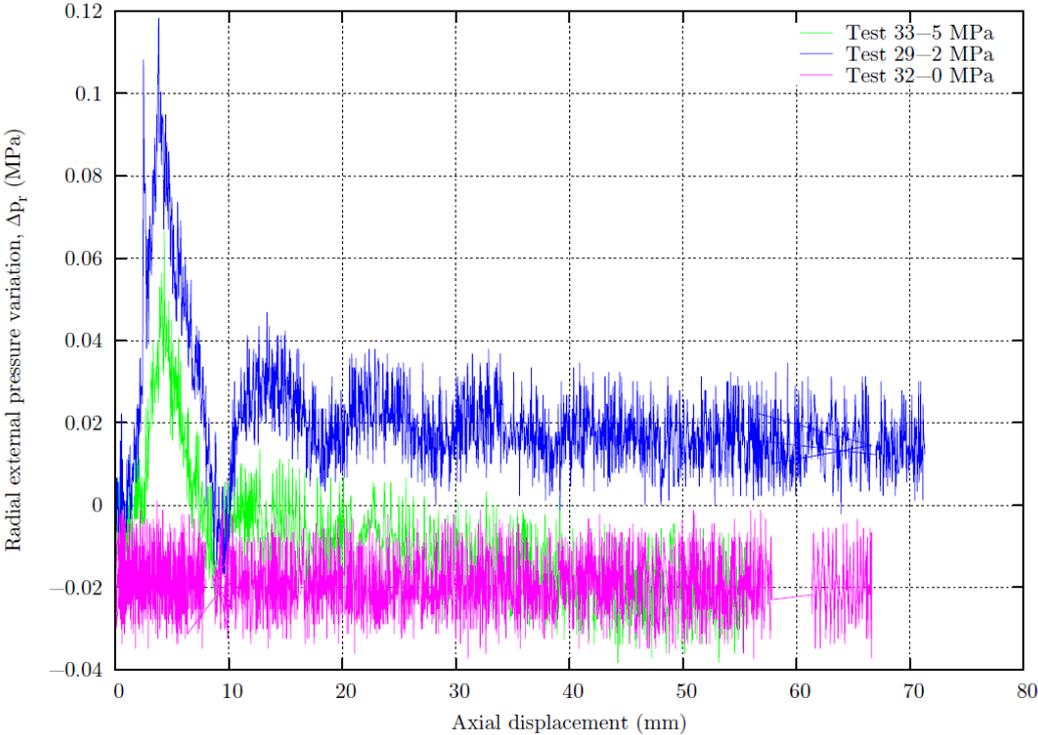


Figure A.34 : variation de la pression de confinement.

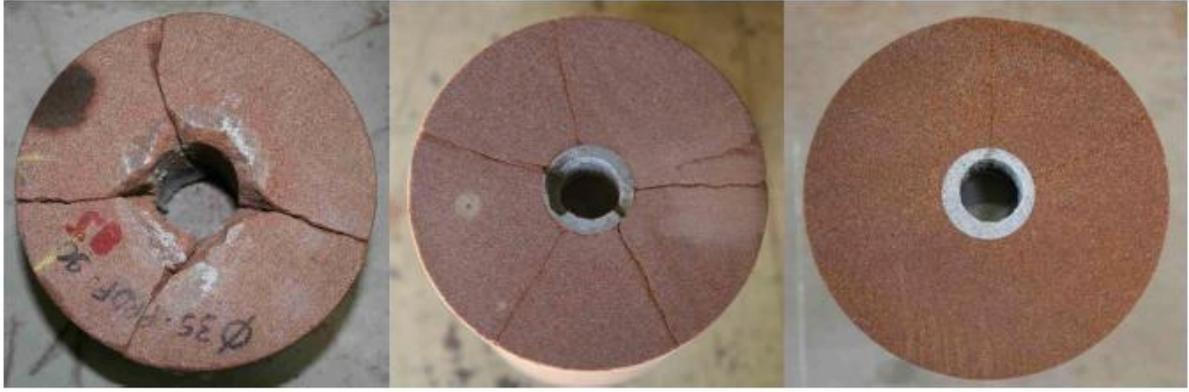


Figure A.35 : vue des échantillons correspondant aux essais 32, 29 et 33, de gauche à droite.

Commentaires : dans l'essai 32, comme dans l'essai 26, quelques mesures de déplacement semblent aberrantes. Les raisons sont les mêmes qu'évoquées précédemment.

Scellement au ciment. *Modus operandi* : rigidité constante, vitesse 0,84 mm/s, sans plaque.

- L=130 mm

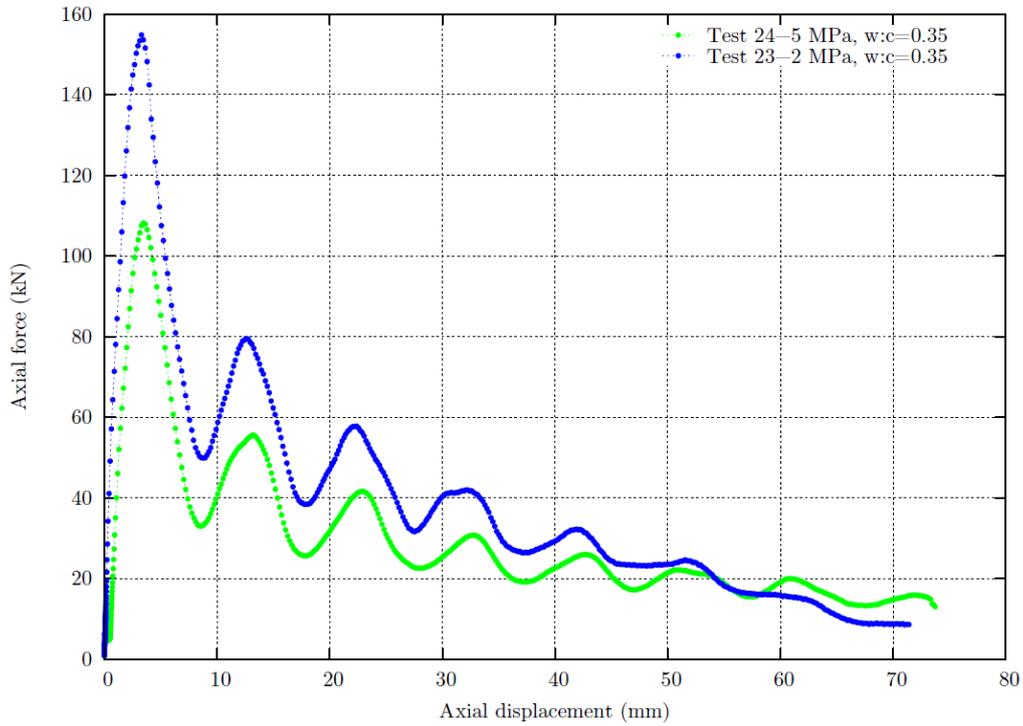


Figure A.36 : courbes de charge.

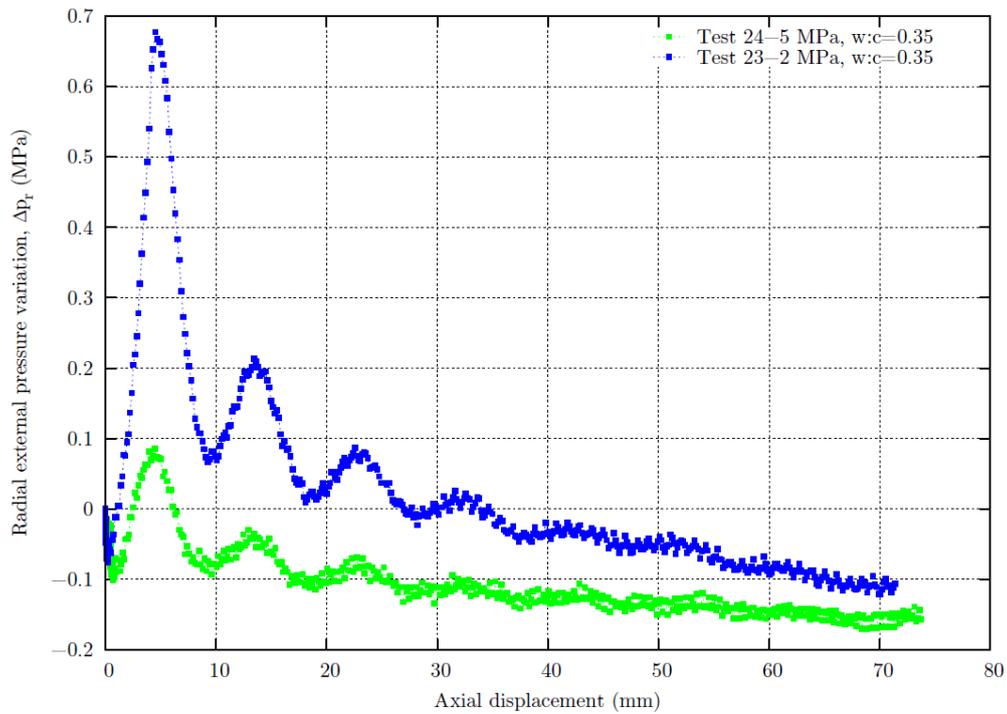


Figure A.37 : variation de la pression de confinement.

Commentaires : comme dans le cas des boulons HA25, la force maximum est supérieure pour $p_r=2$ MPa (essai 23) que pour $p_r=5$ MPa (essai 24). La cause pourrait être la même, à savoir la plus forte augmentation du confinement pendant l'essai 23.

Scellement au ciment. *Modus operandi* : sans confinement, vitesse 0,02 mm/s, sans plaque.
Eprouvette instrumentée (jauges de déformation).

- L=130 mm (jauges à Z=30 mm)

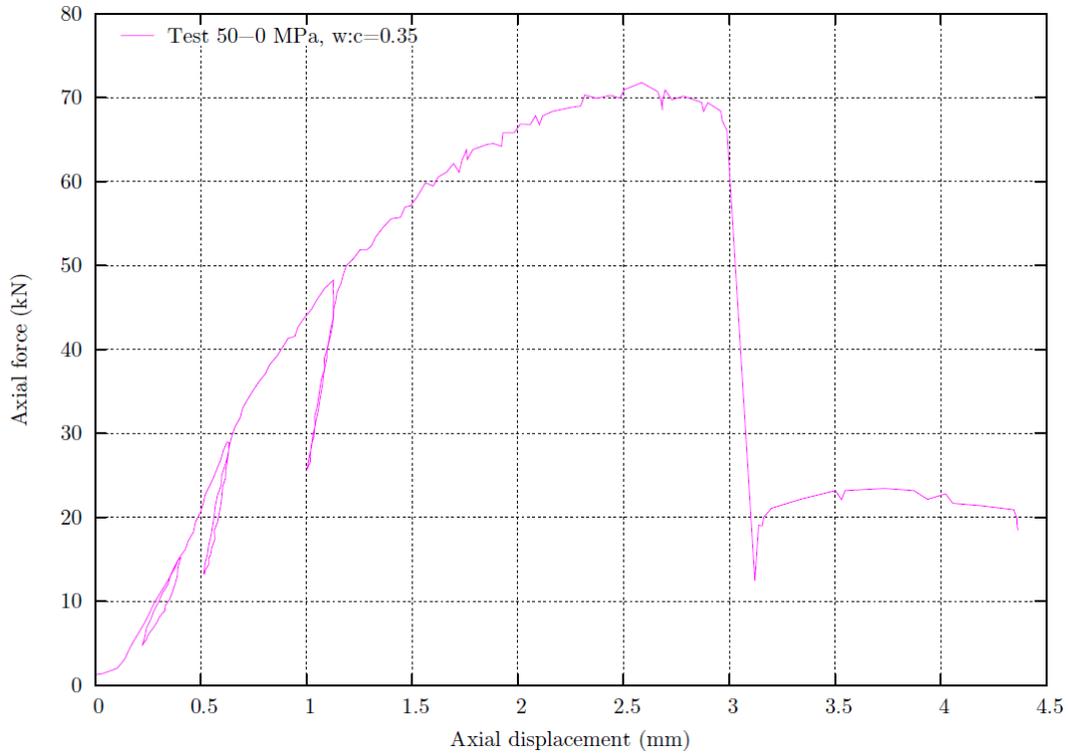


Figure A.38 : courbe de charge.

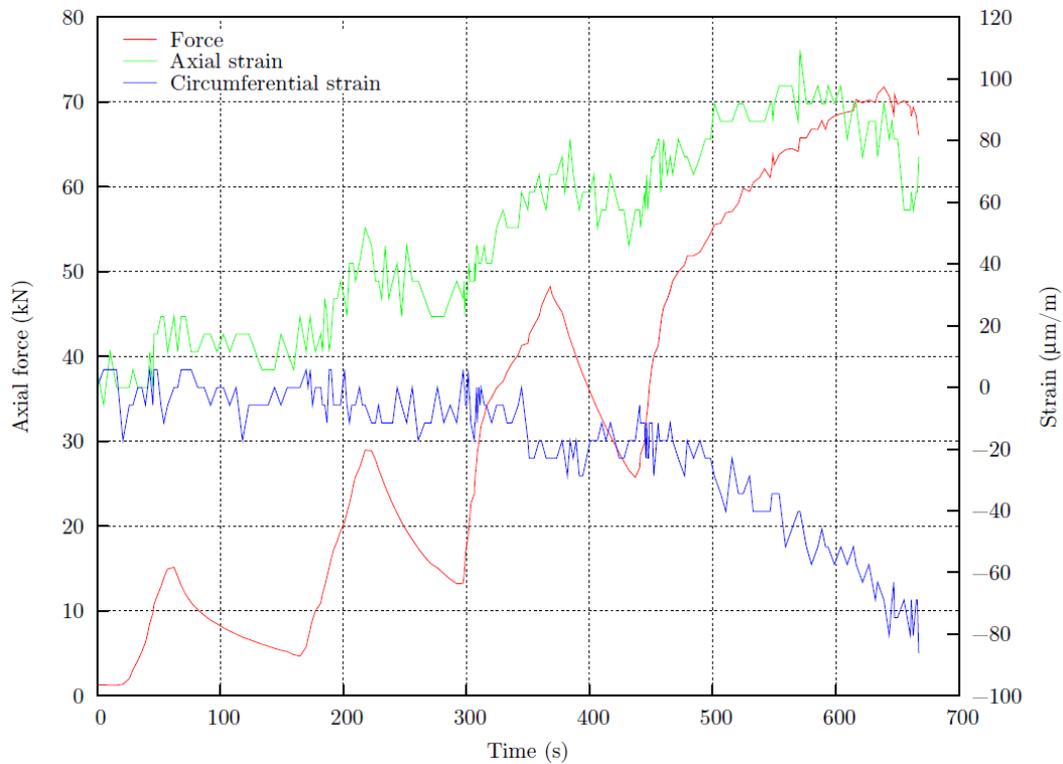


Figure A.39 : force axiale sur le boulon et déformation de l'échantillon de roche pendant l'essai.

- L=90 mm (jauges à Z=60 mm)

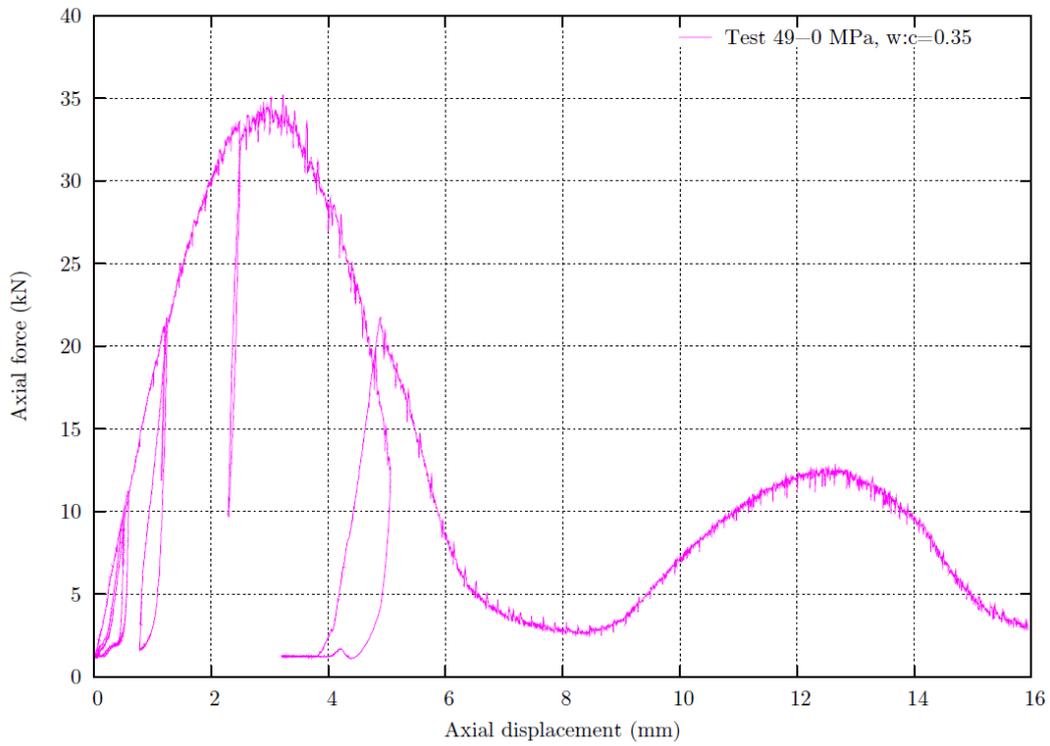


Figure A.40 : courbe de charge.

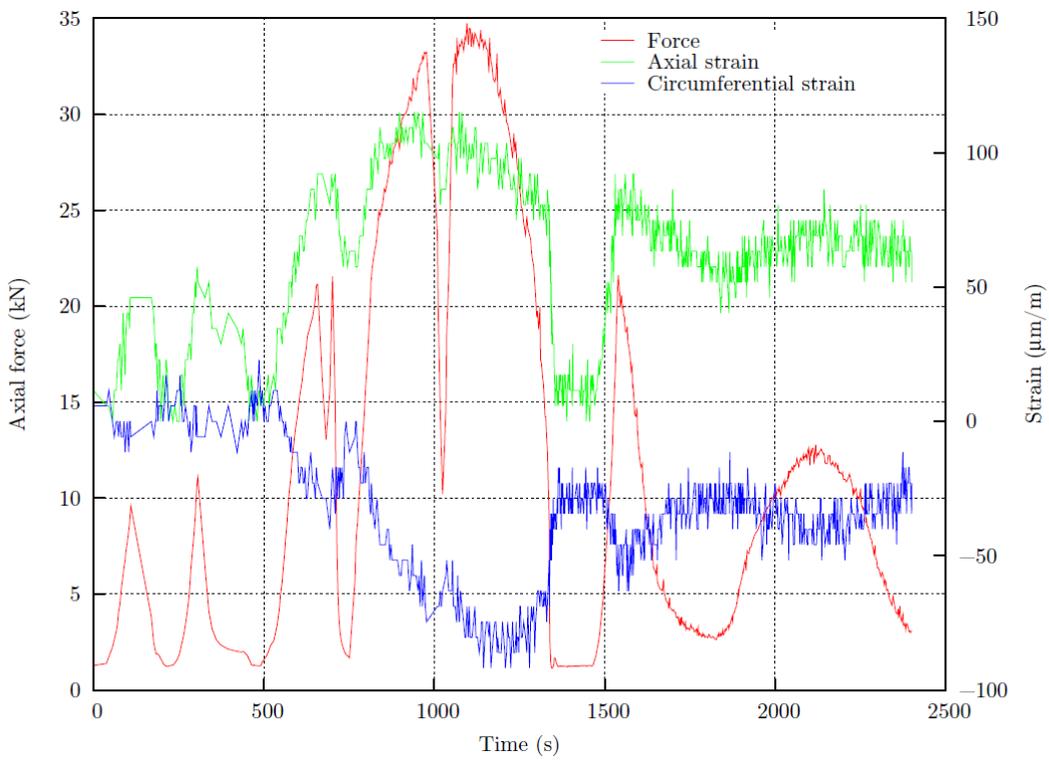
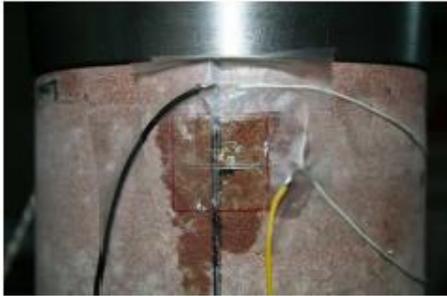


Figure A.41 : force axiale sur le boulon et déformation de l'échantillon de roche pendant l'essai.



Radial fracture

Figure A.42 : vue des échantillons correspondant aux essais 49 et 50, de gauche à droite.

Commentaires : ces essais ont été effectués pour analyser l'effet local de la réaction du vérin sur le comportement de la roche. Les résultats montrent clairement que cette réaction altère les résultats, d'autant plus que la longueur d'ancrage est faible.

Par ailleurs, il faut noter que les cycles effectués pendant l'essai 49 ne sont pas précis du fait du positionnement du pont des capteurs LVDT.

Tiges lisses

Scellement à la résine. *Modus operandi* : confinement constant, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque.

- L=130 mm

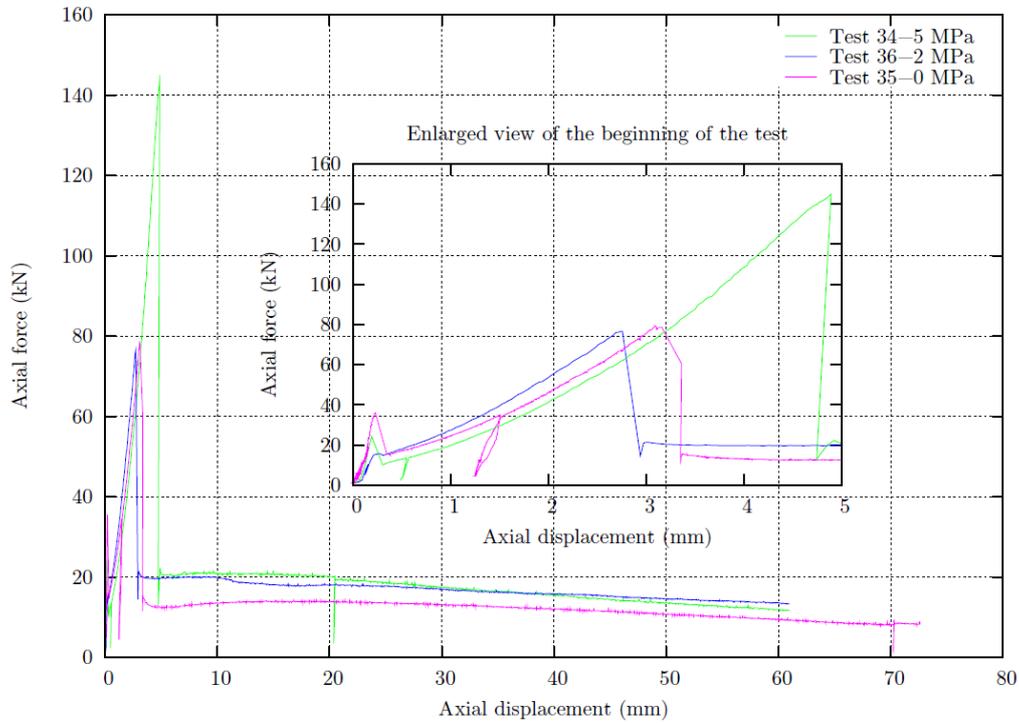


Figure A.43 : courbes de charge.

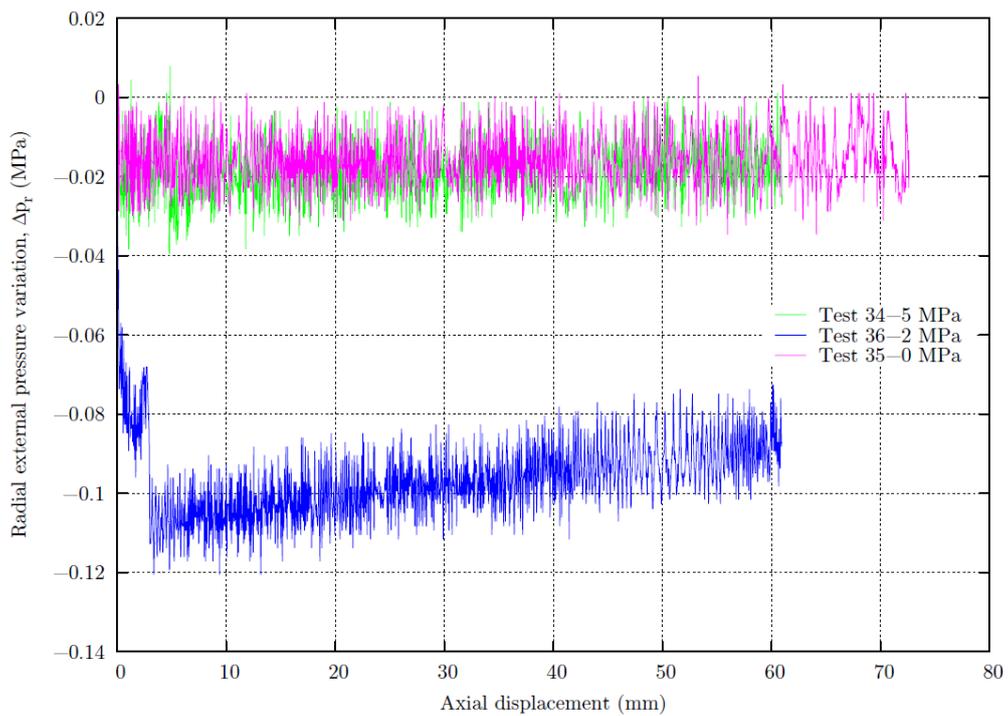


Figure A.44 : variation de la pression de confinement.

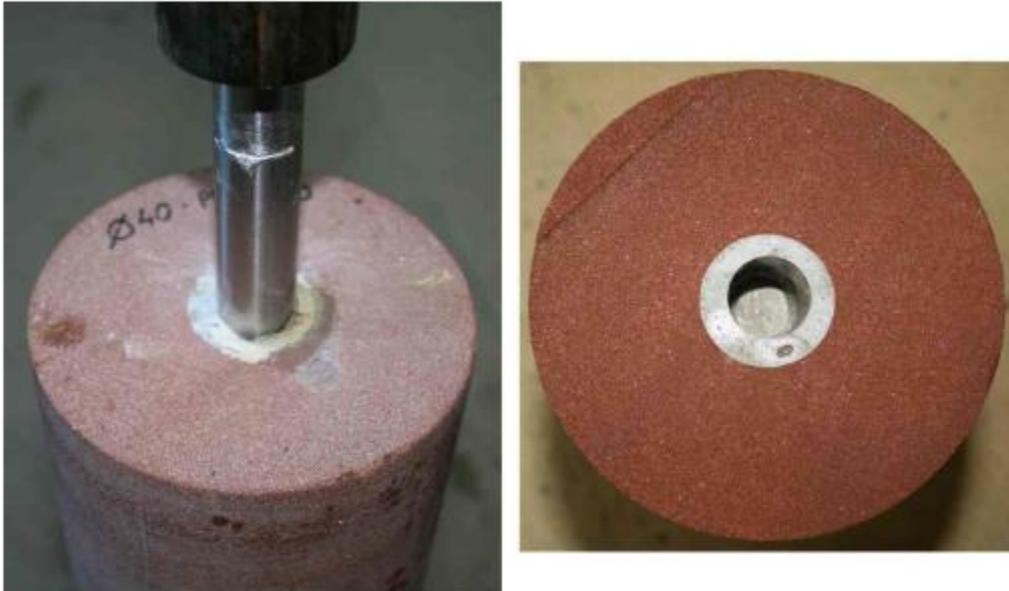


Figure A.45 : vue de l'échantillon correspondant à l'essai 36.

Commentaires : aucune fracture n'a été identifiée après les essais d'arrachement effectués sur les tiges lisses.

- $L=100$ mm, $R_b=10$ mm, $R_g=15$ mm

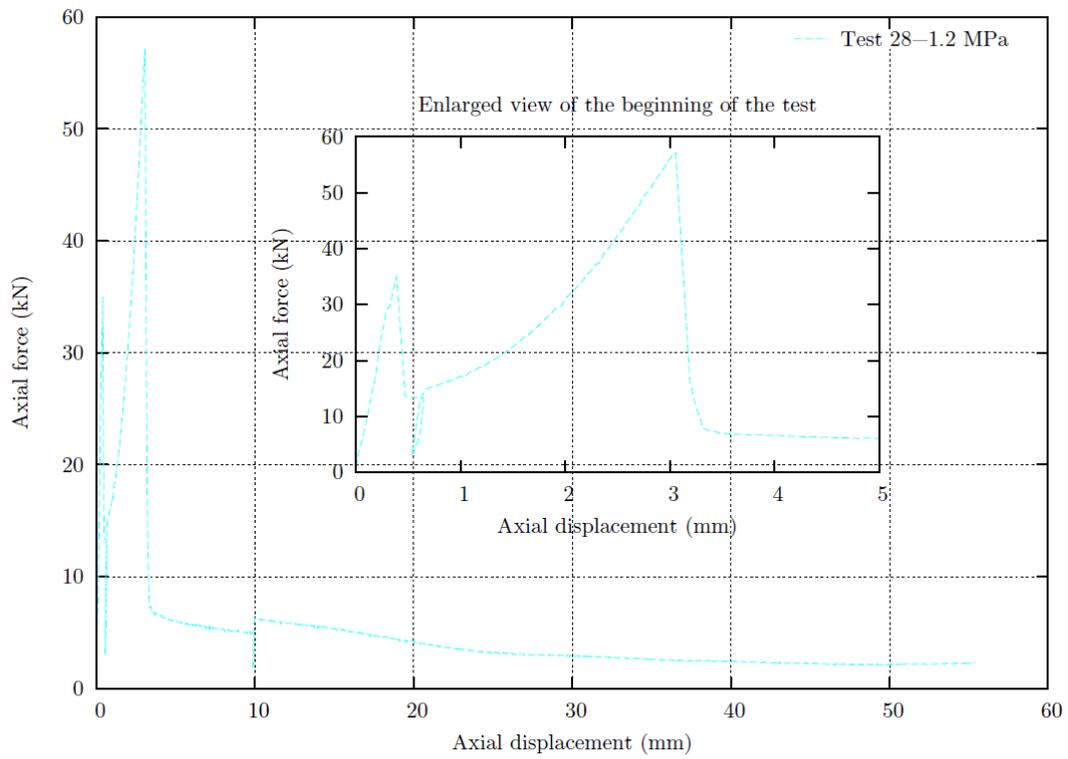


Figure A.46 : courbe de charge.

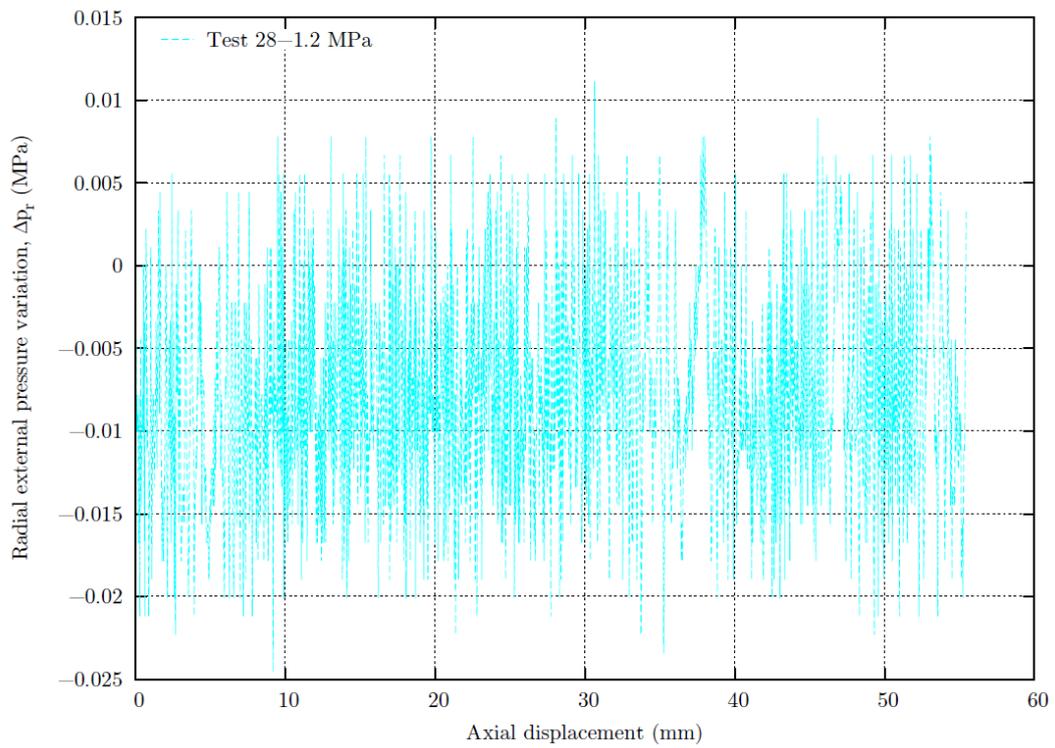


Figure A.47 : variation de la pression de confinement.

Scellement à la résine. *Modus operandi* : confinement constant, vitesse 0,02 mm/s, avec plaque, tube non scellé.

- L=130 mm

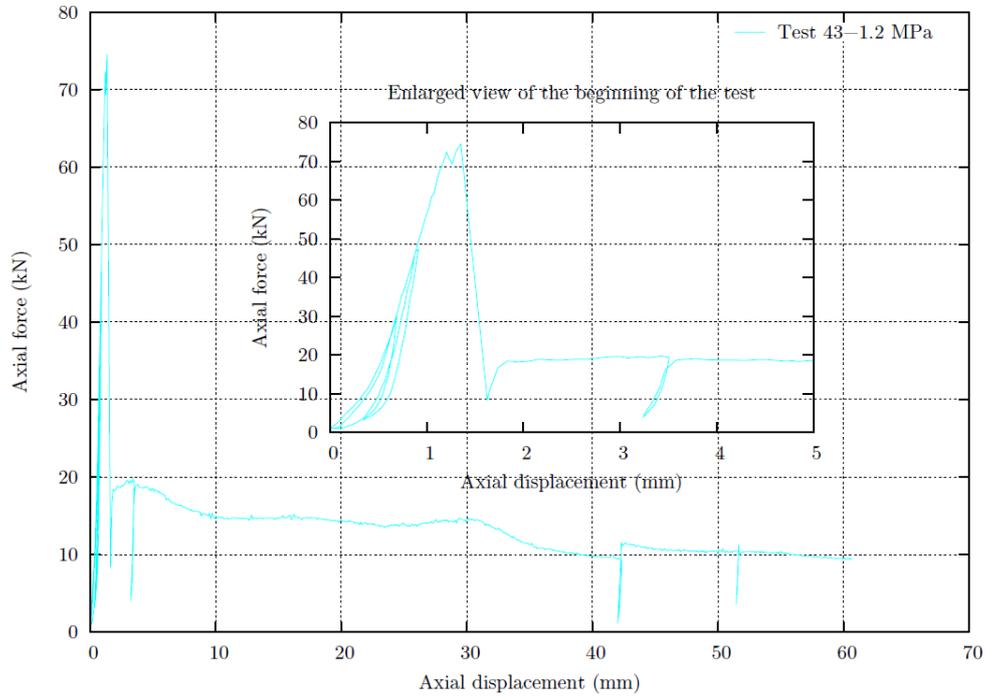


Figure A.48 : courbe de charge.

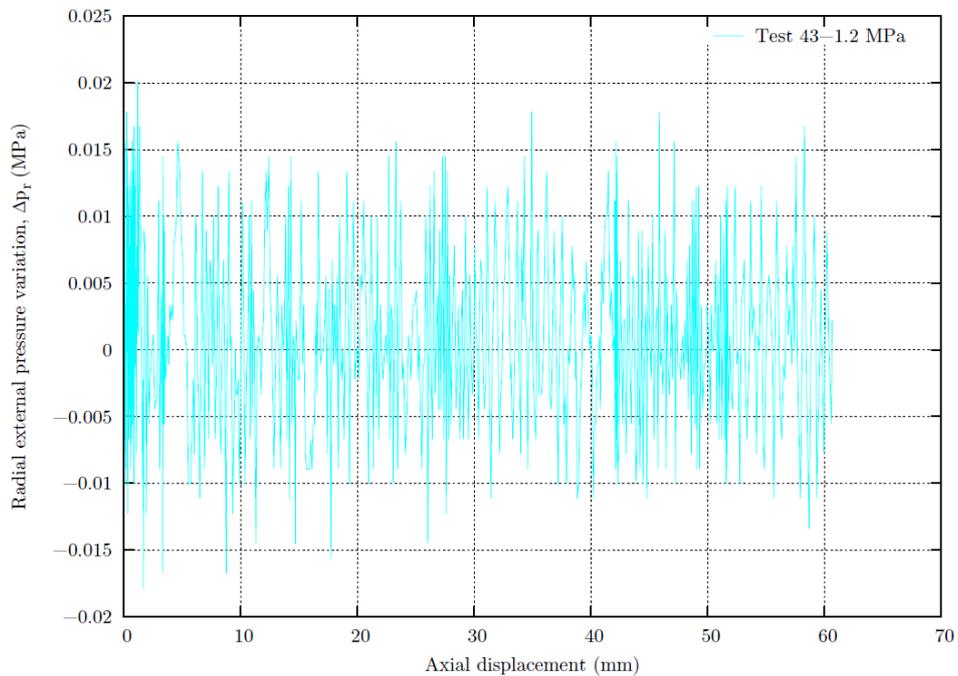


Figure A.49 : variation de la pression de confinement.

Commentaires : du fait que le tube n'était pas scellé à la tige durant cet essai, seulement un pic de force a eu lieu (dans la Figure A.43, le premier pic est attribué au descelllement entre le tube et la barre).