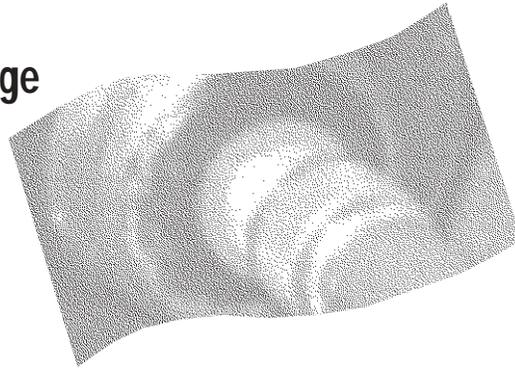


Conception et développement d'un nouveau mesureur de charge des boulons d'ancrage

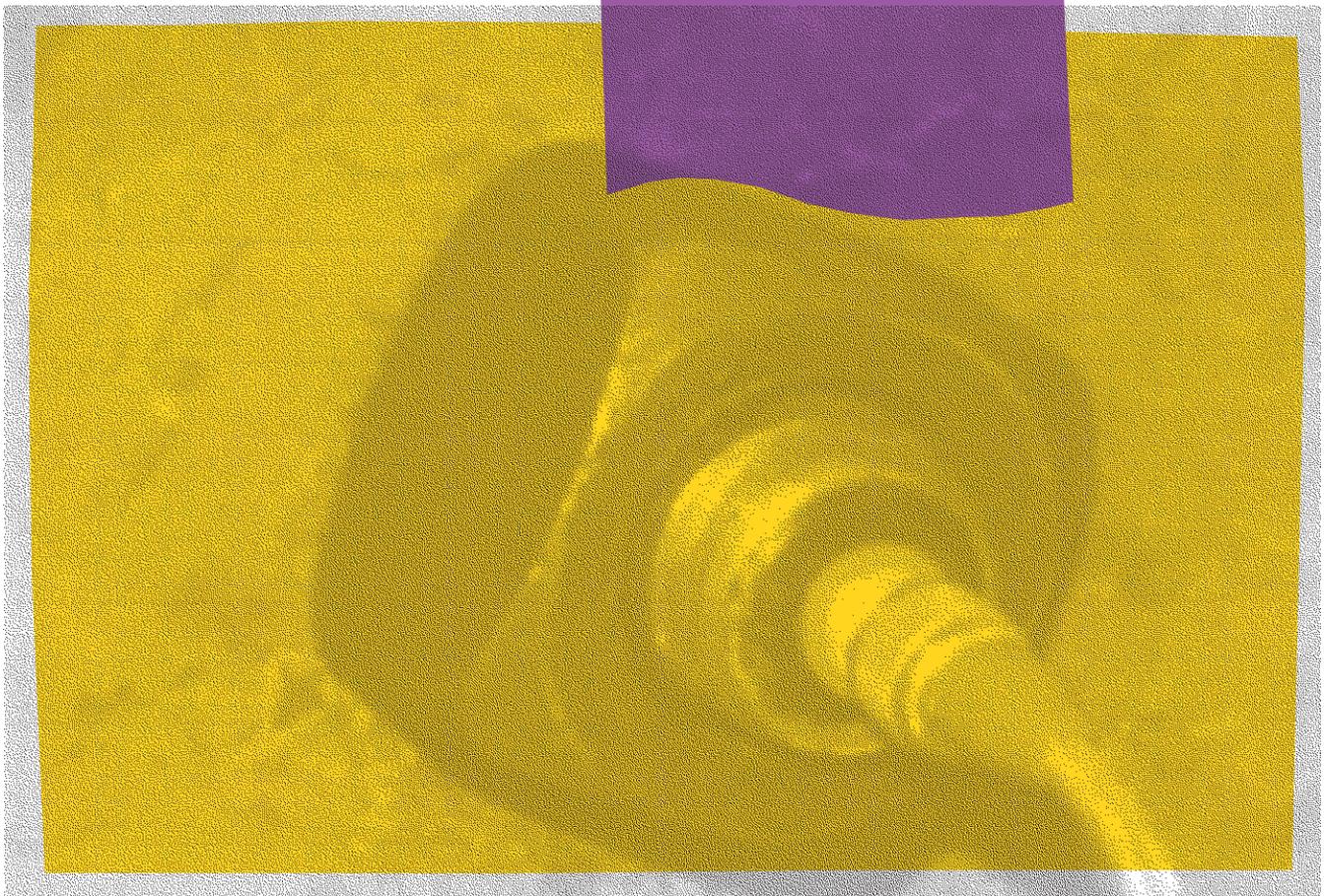


Hani S. Mitri

Juillet 2002

R-307

RAPPORT



La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et subventionne des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut, en téléphonant au 1-877-221-7046.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications ou gratuitement sur le site de l'Institut.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2002

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
juillet 2002.

Conception et développement d'un nouveau mesureur de charge des boulons d'ancrage

Hani S. Mitri,
Département de génie minier et métallurgique et des matériaux, Université McGill

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Internet de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles de l'auteur.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	II
RÉSUMÉ	1
1. INTRODUCTION.....	2
2. REVUE DES TECHNIQUES PERMETTANT DE SUIVRE LA CHARGE DES BOULONS D'ANCRAGE	2
3. OBJECTIFS.....	6
4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI	7
5. PRINCIPES SOUS-JACENTS DE LA TECHNIQUE DE MESURE DES CHARGES	10
6. OPTIMISATION DU CONCEPT EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT MINIER AFIN DE CONTRER LES EFFETS DE LA CORROSION, DES ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ET DE TOUTE MANUTENTION BRUTALE.....	15
7. PREMIER PROGRAMME PILOTE <i>IN SITU</i>	22
8. MODIFICATION ET OPTIMISATION SUBSÉQUENTES DU SYSTÈME SAFEBOLT A LA LUMIÈRE DES ESSAIS PILOTES <i>IN SITU</i>	32
9. DEUXIÈME PROGRAMME PILOTE <i>IN SITU</i>	38
10. CONCLUSIONS.....	43
ANNEXE A : GUIDE D'UTILISATION DU SYSTÈME SAFEBOLT.....	45

Remerciements

Ce projet a été rendu possible grâce à l'appui financier de l'*Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)*, et nous lui en sommes très reconnaissants. J'aimerais par ailleurs adresser mes plus sincères remerciements aux membres de mon groupe de recherche pour leur aide précieuse : Joseph Marwan, attaché de recherche en génie minier à McGill, pour son dévouement et ses efforts incessants tout au long du projet; Wilfrid Comeau, professeur adjoint, pour son rôle déterminant dans la conception et la construction du banc d'essai; et James Davison, assistant à la recherche, pour son aide relativement à de nombreux aspects du projet, notamment en ce qui a trait à la conception et à l'assemblage du module d'affichage.

La démonstration et la validation sur le terrain de la technologie SAFEBOLT ont été rendues possibles grâce à la participation des mines souterraines Bousquet, Doyon et Niobec du Québec. J'aimerais tout particulièrement remercier messieurs Paul Gauthier et Alain Mercier de la mine Bousquet, messieurs André Harvey et Robert Marchand de la mine Doyon, et messieurs Martin Lanctôt et Steve Thivièrge de la mine Niobec. J'ai en outre grandement apprécié l'assistance et la coopération des opérateurs souterrains lors de nos passages dans les mines.

Hani Mitri

Résumé

Une nouvelle technologie permettant de mesurer la charge axiale des boulons d'ancrage mécaniques et des « rebar » (boulons à la résine) dans les mines souterraines a été conçue et développée en laboratoire. Cette technologie repose sur un système désigné du nom de SAFEBOLT (Stress And Force Evaluator in BOLTs), qui réunit trois composantes : 1) le mesureur de charge SAFEBOLT installé dans la tête des boulons, 2) un module d'affichage et 3) un câble de raccordement. Un banc d'essai adapté a été construit en laboratoire afin d'assurer le calibrage et la vérification des boulons instrumentés avant qu'ils ne soient envoyés dans les mines pour y être utilisés.

Trois mines souterraines ont pris part au projet, soit les mines Doyon, Bousquet et Niobec. Aussi bien des boulons à ancrage mécanique que des boulons à la résine ont été instrumentés et installés sur le terrain. Nous avons fabriqué et monté avec succès les instruments SAFEBOLT sur des boulons d'ancrage et des « rebar » d'une longueur de 5 pi (1,5 m) à 7 pi (2,1 m). Les leçons tirées des premiers essais sur le terrain ont permis d'améliorer la conception du dispositif monté sur la tête des boulons de telle sorte qu'ils résistent à la manutention brutale dont ils font l'objet en cours d'installation, de même qu'aux effets subséquents des dynamitages survenant dans les parages.

Les installations effectuées sur le terrain démontrent que la technologie SAFEBOLT promet de devenir un excellent outil de suivi de la charge des boulons, dans la mesure où elle est simple à utiliser, où elle s'est révélée fiable et où elle bénéficie désormais d'une construction robuste. Le présent rapport souligne les caractéristiques et les limites de la technologie SAFEBOLT. Un guide d'utilisation a également été joint en annexe.

1. INTRODUCTION

Les éboulements qui se produisent dans les mines souterraines risquent le plus souvent de causer de graves blessures, sinon de faire des victimes. On utilise dans ces mines un grand nombre de boulons d'ancrage servant essentiellement à retenir la masse rocheuse de manière à créer un milieu de travail plus sûr. On en installe notamment dans les puits, les rampes, les galeries, les travers-bancs et les points de soutirage, de même qu'aux intersections. En génie civil, les boulons d'ancrage sont également très utilisés dans des projets de tunnels de toute sorte ainsi que dans la construction de centrales hydroélectriques. Compte tenu de leur importance à titre d'éléments de soutènement primaires de la masse rocheuse, il s'avère souvent primordial, pour des raisons de sécurité, de veiller à ce qu'ils ne subissent pas une charge excessive et ne soient pas en voie de rupture. De nombreuses situations justifient une telle précaution dans les mines souterraines, par exemple dans les installations permanentes – tel un entrepôt souterrain où les hommes travaillent sous un toit boulonné – et aux intersections importantes ou dans les galeries principales, où les mineurs passent régulièrement à chaque quart de travail.

Le seul test utilisé à ce jour dans les mines consiste à vérifier l'efficacité du boulon d'ancrage en appliquant un couple de serrage à la tête (ou à l'écrou) du boulon au moyen d'une clé dynamométrique. On augmente le couple jusqu'à ce que l'écrou commence à tourner, puis on utilise la mesure ainsi obtenue pour en déduire indirectement la charge du boulon. Cela dit, on a rarement recours à cette méthode dans les mines métallifères car, plus souvent qu'autrement, le test en question fait sauter la tête du boulon sous l'effet de la rouille, ce qui en cause la perte.

Les chercheurs ont depuis longtemps reconnu la nécessité de mesurer la charge des boulons d'ancrage, si bien que de nouvelles techniques de mesure ont peu à peu été développées et commercialisées avec succès. Néanmoins, on n'en fait pratiquement aucun usage dans les mines souterraines du Québec. Une récente étude réalisée par l'auteur du présent rapport (Mitri, 1998) sur les instruments de mesure de la charge des boulons d'ancrage *in situ* disponibles sur le marché a révélé que les produits existants sont tantôt inadaptés aux applications minières, tantôt trop coûteux pour une mine en exploitation, et tantôt l'un et l'autre.

2. REVUE DES TECHNIQUES PERMETTANT DE SUIVRE LA CHARGE DES BOULONS D'ANCRAGE

2.1 Boulons d'ancrage instrumentés à fil vibrant

On utilise du fil vibrant dans les boulons d'ancrage instrumentés depuis les années soixante-dix. La conception même du fil vibrant exige que les extrémités en soient ancrées à l'intérieur de la partie creuse d'un bâti de jauge cylindrique pourvu d'un membre inférieur ajustable (voir Figure 1) dont la rotation fait varier la tension du fil et, par conséquent, sa fréquence vibratoire. Le bâti de la jauge est fixé au boulon d'ancrage, et les forces agissant sur le boulon enchâssé dans le roc provoquent un allongement du boulon et du bâti (et donc du fil vibrant). En notant les écarts de fréquence vibratoire du fil par rapport à une valeur de référence initiale, on peut établir l'amplitude des forces auxquelles le boulon d'ancrage est soumis. Une pointe rotative peut être insérée par un orifice du membre inférieur ajustable pour pincer mécaniquement le fil, et l'on

peut mesurer les vibrations du fil ainsi pincé à l'aide d'un stéthoscope de mécanicien maintenu contre le bâti, ou d'une tête à pince électrique agissant sur le fil vibrant.

Boulons IRB

Le boulon d'ancrage instrumenté de type IRB a recours à la technologie du fil vibrant pour assurer le suivi de la charge. L'IRB peut remplacer les cellules de charge à cylindre creux lorsqu'il s'agit de mesurer les transferts de charge entre le toit et les parois dans les applications d'ancrage sous tension. L'IRB est un boulon à coquille d'expansion régulier, à ancrage mécanique. Son principe repose sur une jauge de contraintes à fil vibrant installée dans une cavité de l'axe central du boulon.

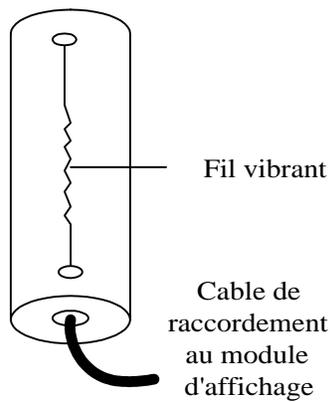


Figure 1 : Jauge de contraintes à fil vibrant type

2.2 Cellules de charge à fil vibrant

Les cellules de charge à fil vibrant se composent de trois jauges à fil vibrant montées en parallèle à égale distance l'une de l'autre dans un anneau placé à l'intérieur d'un cylindre en alliage d'acier trempé. Lorsqu'une charge est appliquée à la cellule, le changement de tension que subissent les jauges modifie la fréquence induite par une bobine ou un aimant. On obtient la charge moyenne de l'ancrage en faisant la moyenne des valeurs enregistrées par les capteurs, ce qui réduit l'incidence de toute charge excentrée. Un boîtier en acier muni de joints toriques recouvre la cellule et protège les jauges contre les chocs et les infiltrations d'eau. Pour plus de fiabilité, les faces supérieures et inférieures des plaques d'appui doivent être à plat, perpendiculairement à l'ancrage, et ce dernier doit être centré. Les plaques d'appui favorisent ainsi la distribution de la charge imposée à l'ancrage pour éviter qu'il ne ploie ou cède. En cas de montage latéral, il convient d'utiliser un câble parafoudre pour protéger le capteur contre tout choc électrique, de même qu'un dispositif thermorégulateur destiné à compenser toute variation de température des capteurs. On a recours aux cellules de charge à fil vibrant pour mesurer la charge des ancrages sous tension, des fixations, des poussards, des boulons et des affûts.

2.3 Boulons d'ancrage à résistance électrique (voir Figure 2)

Boulons d'ancrage de suivi de type Sentinel

La gamme Sentinel des dispositifs de suivi de l'intégrité des boulons repose sur une armature de renforcement modifiée de manière à signaler un bris éventuel, de même que son emplacement, à l'opérateur minier. Un boulon peut céder sous l'effet d'une surcharge ou de la corrosion. Une fois en place, l'intégrité d'un boulon Sentinel peut être mesurée en insérant une simple sonde reliée à un tensiomètre dans un culot à manchon protecteur situé à l'extrémité du boulon. Le tensiomètre fournit alors une indication claire de l'intégrité du boulon.

Boulons d'ancrage à jauge de contraintes

On utilise des boulons d'ancrage à jauge de contraintes pour mesurer la distribution des charges imposées aux boulons dans les systèmes entièrement encapsulés. Neuf paires de jauges diamétralement opposées sont montées le long de la surface du boulon d'ancrage de manière à fournir des profils de contrainte aussi bien axiale que de flexion. Les longueurs standard des boulons d'ancrage à jauge de contraintes sont de 6 pi (1,8 m), 7 pi (2,1 m) et 8 pi (2,4 m).

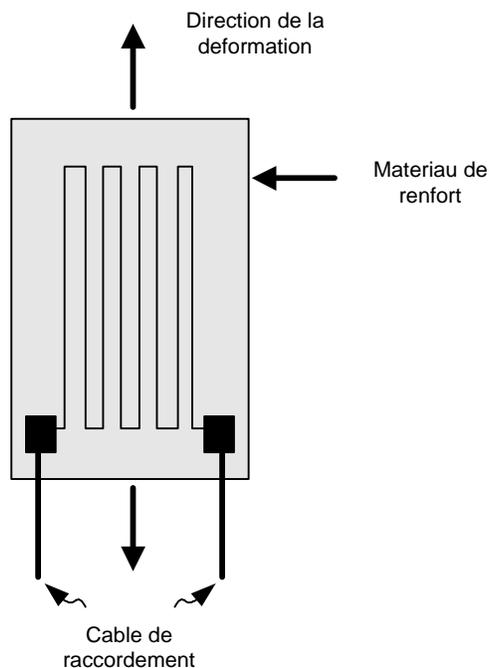


Figure 2 : Jauge de contraintes à résistance électrique type

2.4 Cellules de charge à résistance électrique

Les cellules de charge à jauge de contraintes reposent dans un bâti cylindrique ou annelé, et usiné avec précision dans un matériau tel que l'acier inoxydable. La taille du bâti détermine la déformation dont elles font l'objet sous charge, et par conséquent leur coefficient de capacité.

Ainsi les cellules de charge conçues pour capter des forces plus élevées sont-elles physiquement plus grosses que les cellules de charge de faible capacité. Le capteur de charge revêt la forme d'une bobine d'acier trempé à haute résistance capable de soutenir les rudes conditions normalement associées aux activités de construction. Les jauges de contraintes à résistance électrique sont disposées en pont Wheatstone à la périphérie de la bobine afin d'assurer le maintien de leur température et de compenser toute charge excentrée. Lorsqu'une charge est appliquée à la cellule, les jauges de contraintes émettent un signal électrique proportionnel à la fluctuation de sa résistance, et ce signal est transmis au module d'affichage, qui le traite de manière à fournir une lecture. Les cellules de charge sont conçues pour résister aux conditions les plus rudes et pour fournir des lectures fiables à long terme. Un connecteur multibroche est fixé à l'extrémité du câble de raccordement, et la cellule de charge est équipée d'un filtre antiparasites ainsi que d'un câble parafoudre monté à l'intérieur même de la cellule. En génie, les cellules de charge à résistance électrique servent notamment à mesurer la charge des pousards, des ancrages sous tension, des boulons et des fixations.

2.5 Boulons d'ancrage instrumentés à jauge mécanique

Rotabolts

Le fonctionnement des Rotabolts repose sur le principe d'allongement proportionnel à la charge du boulon. Les Rotabolts sont équipés d'un capuchon sensible aux charges monté au sommet de leur tête de fixation, et le capuchon en question se bloque et perd sa capacité de rotation lorsque la charge de boulon voulue est atteinte.

Un ardillon du même matériau de base que la fixation mère est solidement ancré dans un petit orifice percé au centre de celle-ci, et l'indicateur de rota-charge, qui pivote librement sur l'ardillon, se trouve séparé de la tête de la fixation usinée par un espace d'air préétabli. L'importance de l'espace d'air en question dépend de la limite d'élasticité choisie. L'assemblage est protégé de toute souillure par un capuchon moleté solidement fixé à l'indicateur de rota-charge qu'on peut faire tourner à la main ou à l'aide d'un outil jusqu'à ce que la charge voulue soit atteinte. À l'intérieur du capuchon, l'intégrité des composantes essentielles se voit préservée par une graisse appropriée. Lorsque la fixation atteint sa charge, l'espace d'air se referme sous l'effet de l'allongement qui en résulte. Lorsqu'on ne peut plus faire tourner l'indicateur de rota-charge à la main, c'est que la charge voulue a été atteinte.

2.6 Mesure de la charge des boulons aux ultrasons

Bolt Mike II, Bolt Gage III et StressTel

Le StressTel BoltMike de type SMII est un instrument de suivi de charge à ultrasons indépendant qui permet de mesurer la charge avec précision dans la zone élastique de tout matériau de fixation. Ce dispositif est équipé d'une barre de calibrage interne étalonnée selon les normes du NIST.

2.7 Conclusions

Nous avons tenté, dans le résumé qui précède, de classifier les techniques de suivi de la charge des boulons en fonction des principes de mesure sur lesquels elles reposent. Nous n'avons nullement cherché à comparer les caractéristiques et limites des instruments de suivi de charge offerts par différents fabricants, une telle démarche débordant le cadre du présent rapport.

Ainsi que nous pouvons le constater, la charge d'un boulon d'ancrage peut généralement être évaluée en installant à l'intérieur du boulon un dispositif à même d'en mesurer la contrainte axiale ou l'allongement sur une longueur donnée, ou encore en attachant à la tête du boulon un dispositif externe conçu pour capter la force de compression exercée par la charge du boulon sur une plaque de réaction.

Aux fins de récapitulation, la charge d'un boulon d'ancrage peut être suivie en faisant appel à l'une ou l'autre des technologies suivantes :

- a. Dispositifs à fil vibrant
 - Boulons IRB
 - Cellules de charge à fil vibrant
- b. Jauges de contraintes à résistance électrique
 - Boulons d'ancrage de suivi de type Sentinel
 - Boulons d'ancrage à jauge de contraintes
 - Cellules de charge à résistance électrique
- c. Boulons d'ancrage instrumentés à jauge mécanique
 - Rotabolts
- d. Dispositifs à ultrasons
 - Bolt Mike II, Bolt Gage III et StressTel

Le présent rapport traite de la conception et du développement d'un nouvel instrument de mesure de la charge des boulons d'ancrage du nom de SAFEBOLT (Stress And Force Evaluator in BOLTs). Comme l'explique brièvement notre rapport, cette technologie repose sur l'insertion d'une jauge de contraintes à résistance électrique dans la tête du boulon. Quant aux détails de conception et de fabrication du dispositif, il s'agit de renseignements protégés en vertu d'une demande de brevet américain (Mitri, 2001), de sorte qu'ils ne peuvent être divulgués dans ce document.

3. **OBJECTIFS**

Les recherches effectuées visaient la conception et le développement d'une nouvelle technologie instrumentale du nom de SAFEBOLT (Stress And Force Evaluator in BOLTs), afin de mesurer la charge axiale des boulons d'ancrage et des « rebar » *in situ*, soit après leur installation sous terre. Le système SAFEBOLT réunit trois composantes : 1) le dispositif SAFEBOLT installé dans la tête du boulon, 2) un module d'affichage et 3) un câble de raccordement. L'objectif à long terme de notre recherche est de commercialiser le système SAFEBOLT à un coût raisonnable

après de l'industrie minière québécoise tout en conservant les atouts qui le rendent particulièrement attrayant, à savoir sa simplicité d'emploi, sa fiabilité, sa précision et sa résistance aux rudes conditions associées à l'exploitation des mines souterraines. Suivent les principaux jalons de notre recherche :

1. Conception et construction d'un banc d'essai permettant d'évaluer et de calibrer le nouveau dispositif après son insertion dans la tête d'un boulon d'ancrage.
2. Établissement des principes sous-jacents, du degré de précision et des seuils de tolérance de la technique de mesure des charges.
3. Optimisation du concept en fonction de l'environnement minier afin de contrer les effets de la corrosion, des écarts de température et de toute manutention brutale.
4. Programme d'installation pilote. Installation de boulons d'ancrage instrumentés dans trois mines souterraines en exploitation du Québec. Formation du personnel minier quant au suivi de la charge des boulons d'ancrage.
5. Modification et optimisation subséquentes du système SAFEBOLT à la lumière des résultats de suivi fournis par les essais pilotes.
6. Second programme d'installation pilote portant sur les boulons d'ancrage instrumentés SAFEBOLT après modification.
7. Revue finale de conception.
8. Élaboration du guide d'utilisation.

4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Un banc d'essai a été conçu et construit en laboratoire afin de procéder à l'essai et au calibrage des boulons d'ancrage et des « rebars » instrumentés SAFEBOLT. Le banc d'essai en question possède une armature entièrement faite d'acier, et comporte trois barres de réaction équidistantes l'une de l'autre dont chacune des extrémités est fixée à une plaque de réaction circulaire percée d'un orifice central (voir Figure 3). Cet appareil affiche une capacité de 32 t (36 t impériales), de sorte qu'il peut servir à l'évaluation d'un large éventail de boulons d'ancrage et de « rebars » commerciaux utilisés dans les mines souterraines. Comme l'indique la Figure 4, le banc d'essai est disposé et utilisé à l'horizontale afin de faciliter la manutention du boulon instrumenté, qu'on insère du côté du vérin hydraulique pour ensuite le faire traverser la plaque du fond. Une fois le boulon d'ancrage ou le « rebar » en place dans l'appareil, on ajoute une plaque de réaction et on visse un contre-écrou à la tête du boulon (voir Figure 4). L'autre extrémité du boulon se voit retenue par une plaquette de fixation derrière la plaque de réaction circulaire (voir Figures 5 et 6). Des plaquettes de fixation ont spécialement été fabriquées pour les boulons d'ancrage de 5/8 po (16 mm) et les « rebars » de 3/4 po (19 mm).

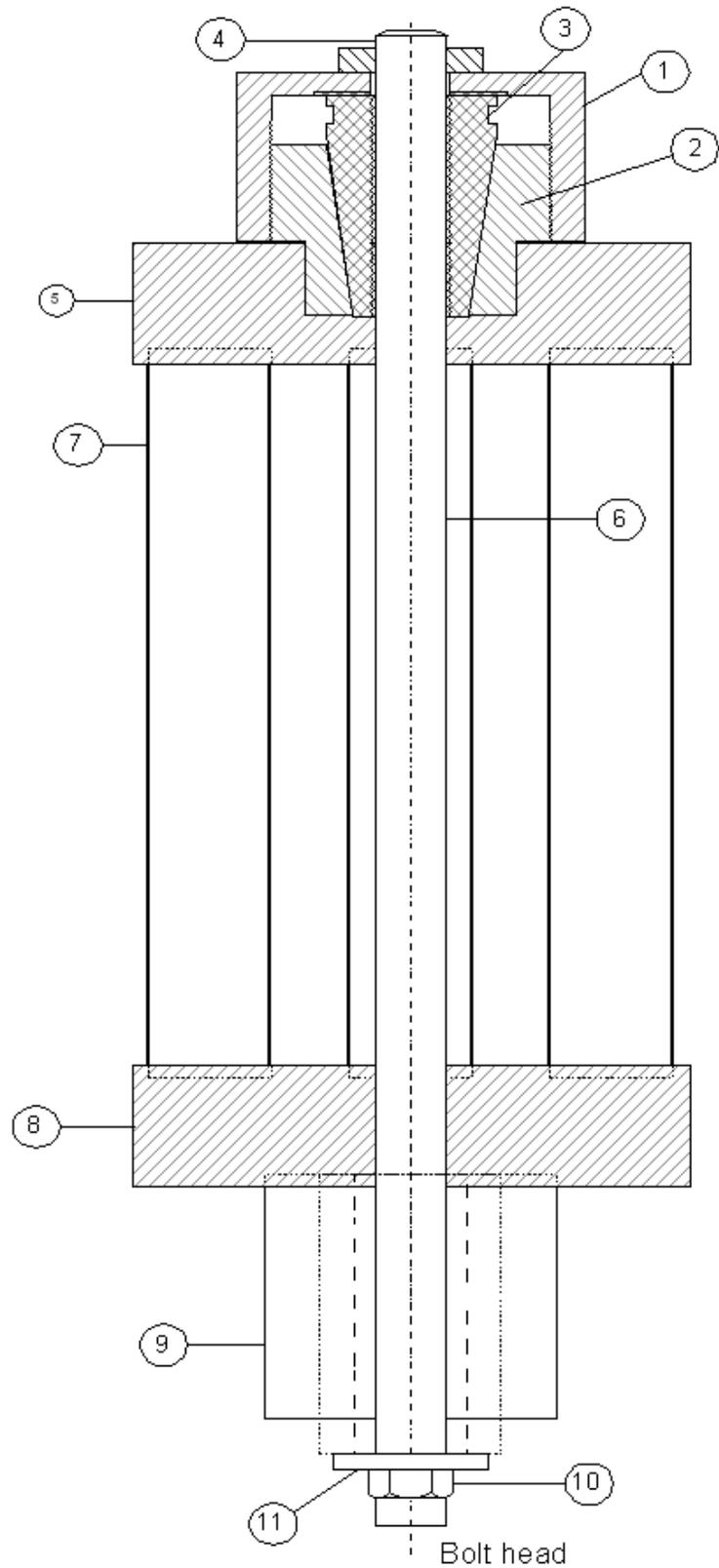


Figure 3 : Banc d'essai à auto-réaction pour le calibrage des boulons d'ancrage et des « rebar » instrumentés SAFEBOLT

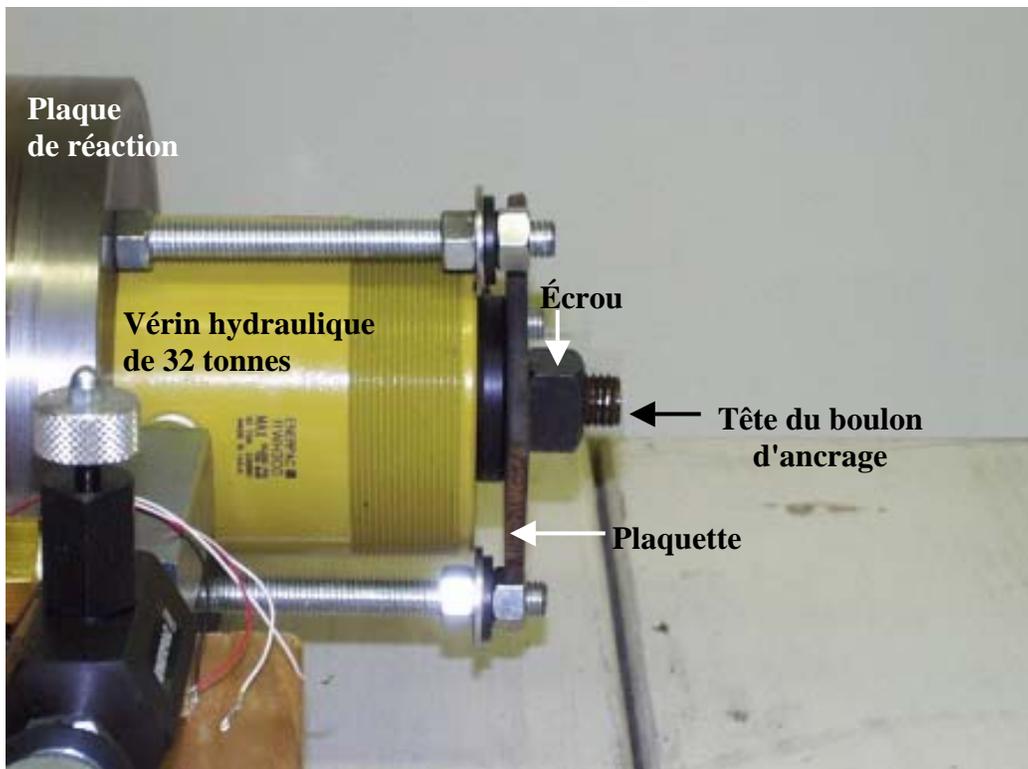


Figure 4 : Plaque de réaction et vérin hydraulique

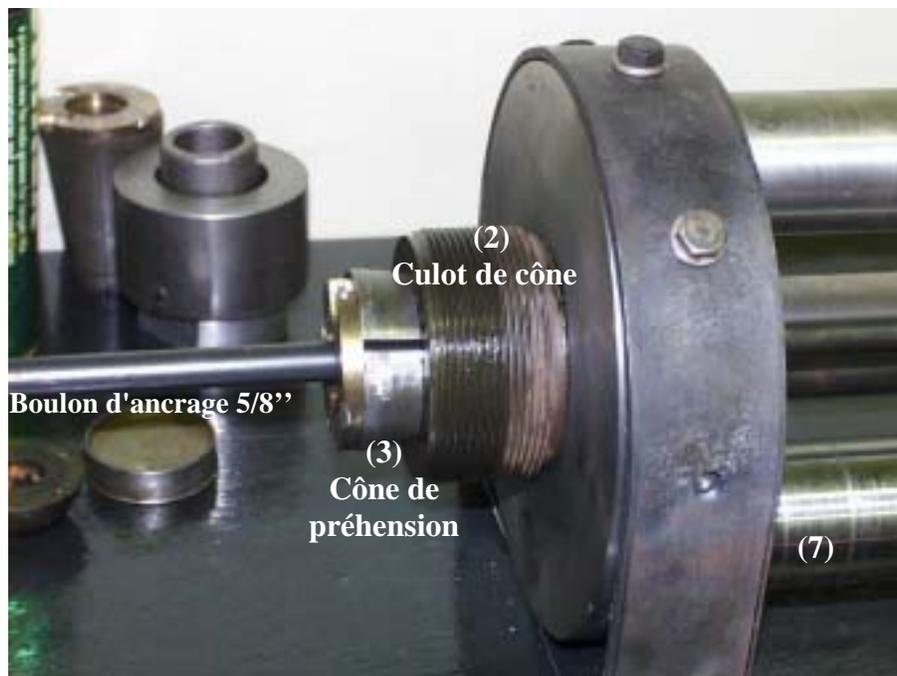


Figure 5 : Représentation du système SAFE BOLT et du banc d'essai

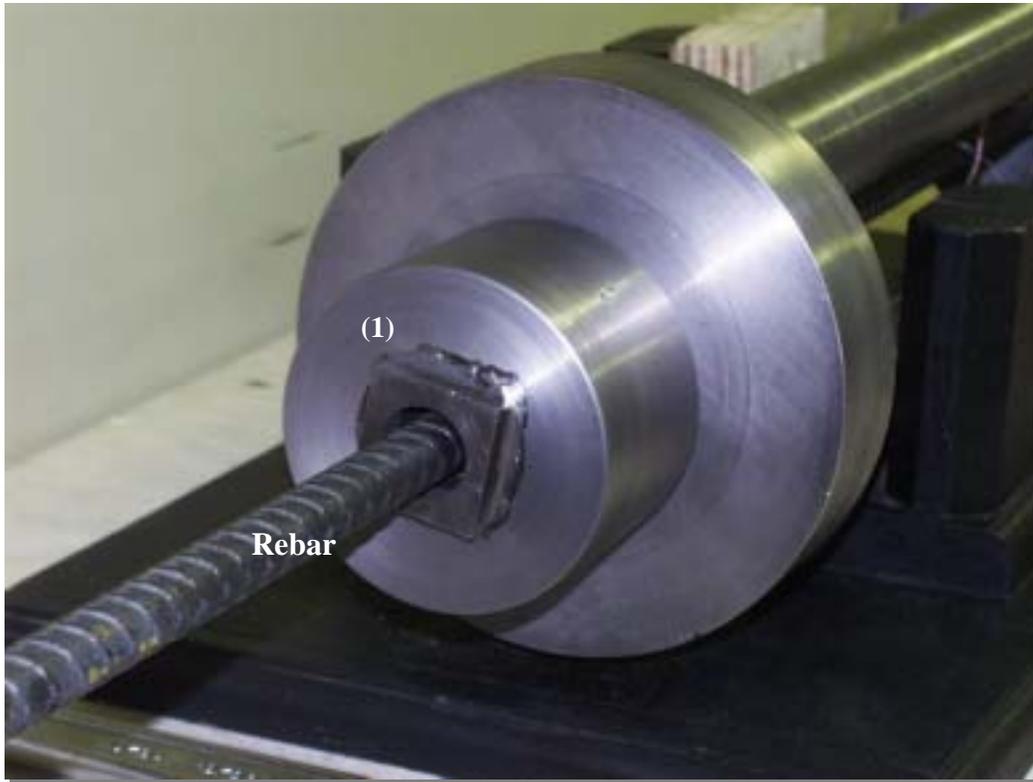


Figure 6 : Dispositif de fixation spécial pour « rebar »

5. PRINCIPES SOUS-JACENTS DE LA TECHNIQUE DE MESURE DES CHARGES

5.1 Calcul de la charge

Lorsqu'on connaît la contrainte axiale (ε) à la tête du boulon, on peut calculer la charge axiale (P) comme suit (Popov, 1978) :

$$P = \varepsilon \cdot E_b \cdot A_b \quad [1]$$

A_b étant l'aire de la section transversale du boulon et E_b , le coefficient d'élasticité du matériau dont est fait le boulon. La technologie SAFEBOLT repose fondamentalement sur le suivi de la contrainte axiale à la tête du boulon. Une fois cette valeur mesurée, la charge axiale peut être calculée pour un boulon d'une taille et d'une composition données.

5.2 Composantes du système SAFEBOLT

La Figure 7 illustre une excavation souterraine au plafond de laquelle des éléments de soutènement ont été installés. Le système SAFEBOLT réunit les composantes suivantes :

1. un dispositif de mesure installé dans la tête du boulon (Figure 8);
2. un module d'affichage portable, qui est à toute fin utile un indicateur de signal (Figure 9);
3. un câble de raccordement tissé relié en permanence au module d'affichage (Figure 8).

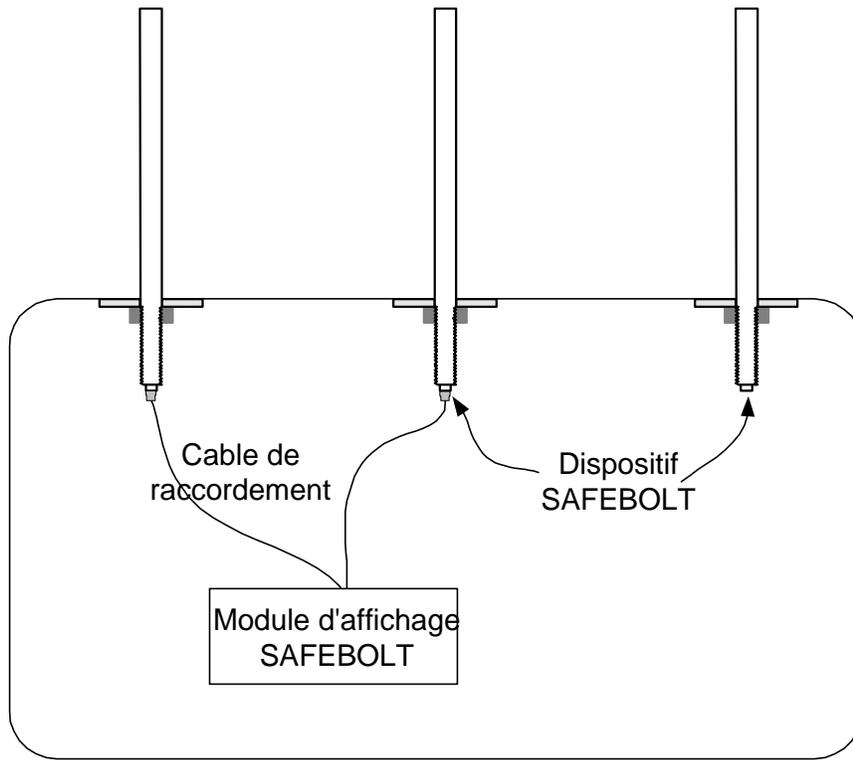


Figure 7 : Composantes du système SAFEBOLT

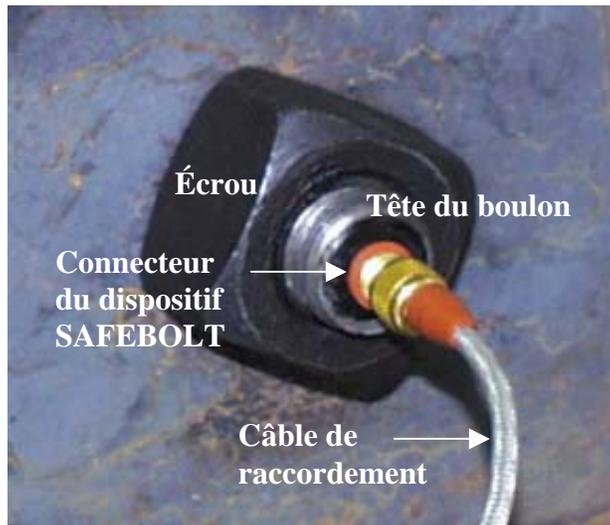


Figure 8 : Dispositif SAFEBOLT enchâssé dans la tête du boulon et raccordé au câble



Figure 9 : Module d'affichage

5.3 Fonctionnement

Pour suivre la charge axiale d'un boulon instrumenté SAFEBOLT, on relie tout d'abord la tête du boulon au module d'affichage au moyen du câble de raccordement de manière à obtenir une lecture initiale (A) préalable à l'installation du boulon, c'est-à-dire avant qu'il ne subisse une charge. Le signal ainsi obtenu représente le coefficient de contrainte nulle, ou d'équilibre de jaugeage. Lorsqu'une charge est appliquée au boulon (en laboratoire ou sur le terrain), le module d'affichage renvoie un signal de magnitude R. Ainsi la contrainte axiale résultant de la charge appliquée est-elle représentée par la valeur R-A. La contrainte axiale peut alors être exprimée comme une fonction de (R-A), de telle sorte que :

$$\varepsilon = F [(R-A)] \quad [2]$$

Relativement à l'Équation [1], la charge axiale (P) peut donc être formulée comme suit :

$$P = F [(R-A), A_b, E_b] \quad [3]$$

Cette équation, qui permet de calculer la charge axiale (P) du boulon, peut être reformulée comme suit :

$$P \text{ (tonnes)} = [R-A] \times B \quad [4]$$

où :

A = Coefficient d'équilibre du pont de jauge, fourni par la lecture initiale lors du branchement du dispositif SAFEBOLT, avant qu'une charge ne soit appliquée. La valeur de A peut être positive ou négative.

B = Constante d'étalonnage du module d'affichage, obtenue en calibrant le dispositif SAFEBOLT tel qu'expliqué ci-dessous. B est fonction de A_b et E_b .

Il convient de noter que l'Équation [4] est linéaire, et n'est valide qu'à l'intérieur de la zone d'élasticité linéaire du boulon sous charge. La charge de rupture du boulon (P_e) peut par contre modifier l'équation précitée de manière à définir la limite d'élasticité (R_e), au-delà de laquelle le boulon peut être considéré en zone de rupture. Pour un type de boulon donné, la charge de rupture (P_e) est connue, de sorte que :

$$R_e = P_e/B + A \quad [5]$$

5.4 Calibrage du dispositif SAFEBOLT et précision de l'instrument

Le calibrage du dispositif a pour but d'établir la valeur de la constante B. On utilise tout d'abord un tensiomètre pour effectuer un test de vérification, de manière à s'assurer que le dispositif remplit bien sa fonction de capteur de contraintes après avoir été installé dans la tête du boulon.

Aux fins de l'essai de calibrage, le boulon instrumenté est inséré dans l'appareil de test, fixé aux deux extrémités, puis soumis à une charge axiale au moyen d'un vérin hydraulique relié à une pompe, telle qu'illustré à la Figure 10. La charge est appliquée de façon progressive, et directement mesurée à l'aide d'un manomètre. Afin d'éviter toute déformation permanente (plastique) du boulon, la charge maximale ne doit pas dépasser 80 % de la limite d'élasticité ou de la charge de rupture nominale. On a recours au module d'affichage pour lire le signal R du dispositif SAFEBOLT après chaque augmentation de la charge. À l'origine, nous appliquions un cycle de charge pour obtenir les points de données nécessaires au calibrage. Cependant, compte tenu des commentaires formulés par les mines quant à la répétabilité des résultats de laboratoire sur le terrain, il fut convenu d'appliquer deux cycles de charge au cours des essais de calibrage de manière à s'assurer que les lectures de signaux obtenues étaient bien reproductibles. Tel qu'espéré, l'application d'un deuxième cycle de charge a démontré que les barres d'acier n'affichaient aucune hystérésis pour la fourchette de charges testée. Tous les boulons calibrés dans le cadre du second programme pilote *in situ* l'ont été à partir de points de données obtenus par l'application de deux cycles de charge.

Les points de données sont reportés sur un diagramme de coordonnées XY où l'axe des X correspond à la fonction de charge axiale (R-A) de l'Équation 3, et l'axe des Y, à la charge (P) proprement dite, directement mesurée au niveau du vérin hydraulique.

Les valeurs nettes des mesures obtenues (R-A) sont ainsi reliées à la charge appliquée pour chaque boulon d'ancrage instrumenté SAFEBOLT. On a alors recours à une régression linéaire pour obtenir une droite d'ajustement correspondant à l'équation de charge du boulon. À l'origine, la régression servait à obtenir une droite d'ajustement pour l'équation suivante :

$$Y = bX + C \quad [6]$$

où :

Y = Charge appliquée

X = (R-A)

b = B tel que défini dans l'Équation 4.

Ce type de régression faisait appel à une constante C correspondant au point d'interception de la droite d'ajustement avec l'axe des Y. Tous les résultats d'essai de calibrage des boulons du premier programme pilote *in situ* ont été ajustés par le biais de l'Équation [6].

En théorie, cependant, lorsque $R-A = 0$, la charge (P) doit également être nulle. Par conséquent, il fut décidé, pour tous les boulons du second programme pilote *in situ* (et de nos travaux ultérieurs), d'adopter une équation d'ajustement du type suivant (voir Figure 11) :

$$Y = bX \quad [7]$$

L'erreur-type (ET) d'évaluation de la charge (Y) est calculée pour chaque boulon calibré.

En moyenne, il s'avère que $ET = \pm 0,05$ t.

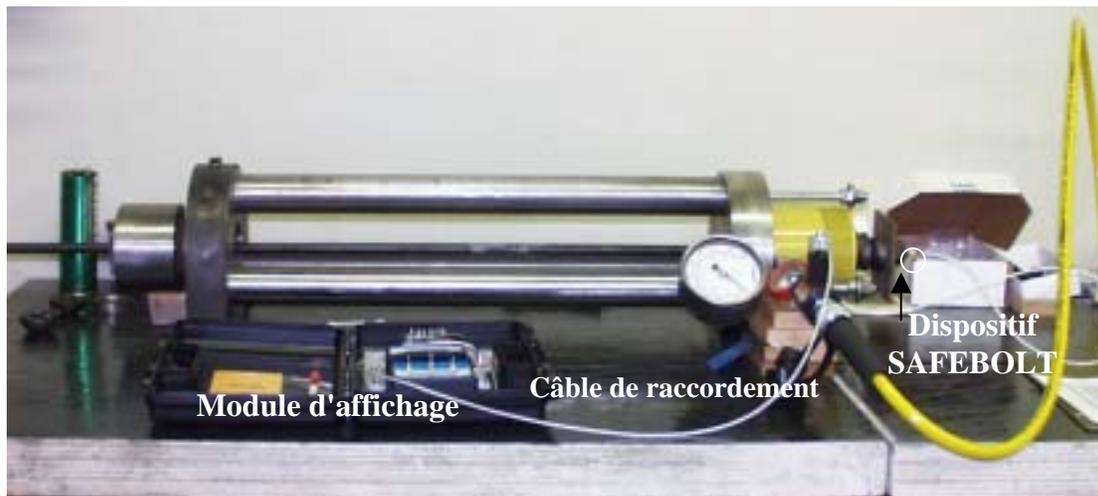


Figure 10 : Installation de calibrage du système SAFEBOLT

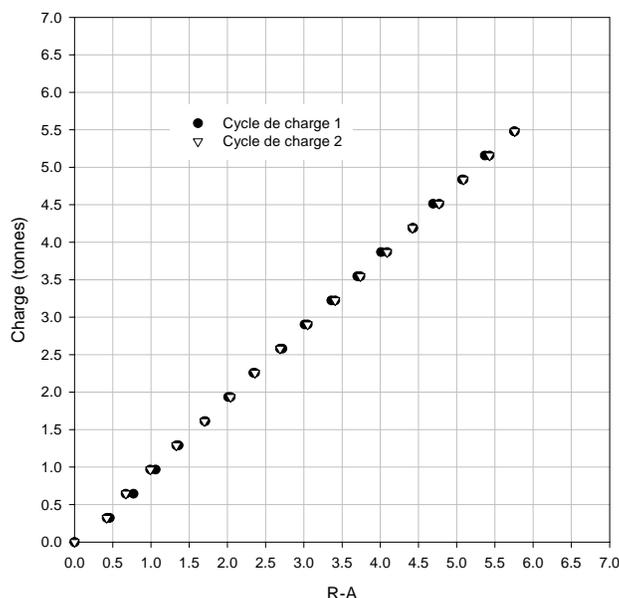


Figure 11 : Obtention de la constante B par ajustement de la régression linéaire des données d'essai de calibrage

6. OPTIMISATION DU CONCEPT EN FONCTION DE L'ENVIRONNEMENT MINIER AFIN DE CONTRER LES EFFETS DE LA CORROSION, DES ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ET DE TOUTE MANUTENTION BRUTALE.

6.1 Effet de la corrosion

Plus souvent qu'autrement, l'environnement des mines souterraines est hautement corrosif. Cela est particulièrement le cas en présence de minerai sulfuré. Par conséquent, il fallait veiller à ce que le dispositif SAFEBOLT résiste de façon satisfaisante à la corrosion. Étant donné que le dispositif est entièrement encapsulé dans la tête du boulon, nous n'avions guère à craindre que le capteur à proprement parler se corrode. Néanmoins, les mesures s'effectuent sur la tête même du boulon au point de contact du câble de raccordement qui, lui, est exposé. Afin de prévenir toute corrosion éventuelle du raccord (voir Figure 8), nous avons opté pour un connecteur plaqué or équipé d'un capuchon vissable lui-même plaqué or. De plus, une fine bague de caoutchouc disposée à la base du connecteur garantit que le capuchon vissable protégera entièrement la tête du dispositif contre toute corrosion possible.

6.2 Effet des écarts de température

Tous les essais de calibrage ont été effectués en laboratoire sous des températures variant entre 24 et 26 °C. D'importants écarts de température sur le terrain pourraient sérieusement nuire à la précision des calculs de charge, si bien que le facteur de contrainte non mécanique lié à une baisse de température (contraction) ou à une hausse de température (allongement) doit être pris

en compte. Si le calibrage s'effectue à une température T_c et que la température ambiante de la mine est de T_a , la contrainte thermique ε_T imposée à la jauge s'obtient par la formule :

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad [8]$$

où α représente le coefficient d'expansion thermique du matériau de la jauge de contraintes, et où :

$$\Delta T = T_a - T_c \quad [9]$$

La charge apparente (ou artificielle) résultant de ce facteur de contrainte et devant être éliminée du calcul de la charge est fournie par la formule :

$$\Delta P = \varepsilon_T \cdot E \cdot A_{net} \quad [10]$$

où :

E = module d'élasticité du matériau du boulon d'ancrage

A_{net} = aire nette de la section transversale du boulon à l'emplacement de la jauge de contraintes.

La charge corrigée est alors calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P(\text{corrigée}) = (R - A) \cdot B - \Delta P \quad [11]$$

Les valeurs de charge apparente ont été calculées pour un boulon d'ancrage de 5/8 po (16 mm) et un « rebar » de 3/4 po (19 mm) pour une fourchette de températures ambiantes en mine variant entre 10 et 40 °C. Les données suivantes ont ensuite été utilisées :

$$\begin{aligned} \alpha &= 16,7 \times 10^{-6} \\ E &= 200\,000 \text{ MPa} \\ T_c &= 25 \text{ °C} \end{aligned}$$

En substituant ces données aux variables correspondantes, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \Delta P \text{ (en tonnes métriques)} &= 0,056 (T_a - 25) && \text{pour le boulon d'ancrage de 5/8"} && [12] \\ &= 0,087 (T_a - 25) && \text{pour le « rebar » de 3/4"} && [13] \end{aligned}$$

La Figure 12 présente le tracé des équations qui précèdent. Comme le révèle ce diagramme, la charge apparente (ΔP) peut atteindre jusqu'à 1,3 t pour le « rebar » de 3/4 po (19 mm) lorsque la température ambiante est de 40 °C.

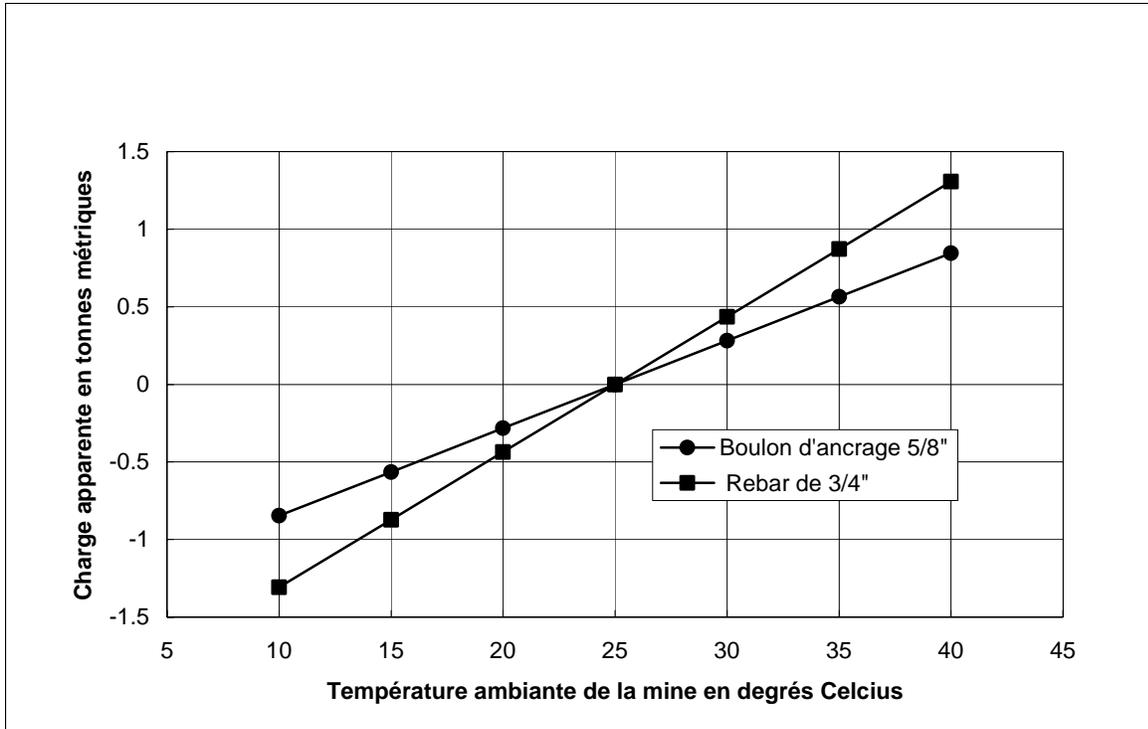


Figure 12 : Charges apparentes (artificielles) résultant des écarts de température en mine par rapport à la température en laboratoire (25 °C)

6.3 Protection contre toute manutention brutale

Chaque boulon instrumenté a été non seulement recouvert d'un capuchon vissable plaqué or, mais également doté d'une bague de caoutchouc ajustée, tel qu'illustré à la Figure 15. Ainsi que nous l'expliquerons dans une section ultérieure, ces précautions se sont avérées insuffisantes sur le terrain. Plusieurs boulons instrumentés ont en effet été endommagés en cours d'installation, et certains même avant (pour avoir frappé contre la plateforme du camion qui les transportait).

6.4 Effet du test de vérification de la méthode d'installation

Les boulons d'ancrage et les « rebar » sont installés au moyen d'outils manuels, tels qu'un « stopper », une foreuse à béquilles ou encore un boulonneur à même d'en assurer l'installation complète. On installe un boulon d'ancrage en le poussant dans le trou foré jusqu'à ce que la plaque d'appui entre en contact avec le roc. On lui imprime alors une rotation jusqu'à ce qu'un couple de serrage prédéfini soit atteint. Cette pratique a pour effet d'ouvrir et d'ancrer dans le roc la coquille d'expansion à l'extrémité supérieure du boulon. Plus souvent qu'autrement, les opérateurs s'en remettent à leur expérience pour déterminer le couple de serrage adéquat. Dans le cas du « rebar », une ou plusieurs cartouches de résine sont insérées dans le trou foré. Le boulon est ensuite poussé dans le trou à l'aide d'un outil approprié, après quoi on lui imprime une rotation pour permettre aux éléments résineux de s'amalgamer. Au bout de 30 à 40 secondes, la résine à prise rapide se solidifie, et on serre l'écrou du boulon en fonction d'un couple prédéfini.

Dans un cas comme dans l'autre, au moment de l'installation, un couple est appliqué à la tête du boulon, que ce soit pour le serrer ou pour le soumettre à une charge initiale. Cela dit, les essais de calibrage en laboratoire font appel à un vérin hydraulique pour appliquer une charge axiale directe sur le boulon instrumenté. Il s'avérait donc nécessaire de procéder à un test de vérification en laboratoire en appliquant au boulon instrumenté une charge comparable à celle à laquelle il serait soumis sur le terrain, en utilisant une clé dynamométrique pour serrer la tête du boulon de manière à induire une charge axiale.

Le test en question a été effectué sur un boulon d'ancrage de 5/8 po (16 mm). Afin de vérifier la linéarité des mesures fournies par le capteur SAFEBOLT, une jauge de contraintes externe a été installée à la surface du boulon et reliée par câble à un tensiomètre P-3500. Au moment d'appliquer le couple, nous avons ainsi pu en mesurer l'effet à la tête du boulon, tel que transmis au module d'affichage, et à la jauge de contraintes installée à la surface du boulon, tel que transmis au tensiomètre P-3500. La Figure 13 présente les éléments utilisés lors des tests de vérification. Voici les données relatives aux boulons testés :

- Type de boulon : M-58-04
- Diamètre nominal : 5/8 po (16 mm)
- Longueur : 4,5 pi (1,4 m)
- Qualité de l'acier : Classe 400
- Diamètre de l'orifice central : 1/8 po (3 mm)

La procédure de vérification comportait deux tests :

Premier test : Ce premier test servait à vérifier le bon fonctionnement des deux jauges, et à s'assurer qu'elles fournissaient l'une comme l'autre des données linéaires cohérentes quant aux charges axiales. Le boulon était mis sous charge par le biais du vérin hydraulique. Les mesures fournies par le capteur SAFEBOLT et la jauge de contraintes externe étaient simultanément enregistrées après chaque augmentation de 100 psi de la pression du vérin hydraulique jusqu'à l'atteinte de la charge de 6,5 t.

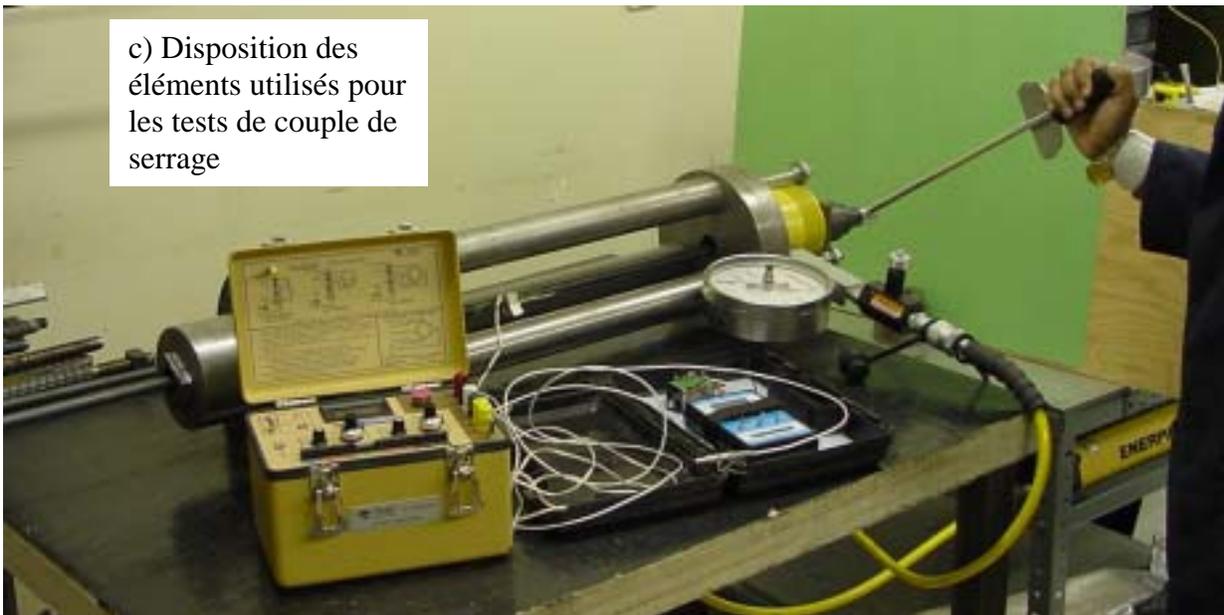
Deuxième test : Ce deuxième test visait à vérifier si le couple appliqué à la tête du boulon risquait d'endommager le capteur SAFEBOLT ou d'en altérer la précision. Le boulon était mis sous charge au moyen d'une clé dynamométrique. Les mesures fournies par le capteur SAFEBOLT et la jauge de contraintes externe étaient simultanément enregistrées après chaque augmentation de la déformation (par tranche d'environ 100 $\mu\epsilon$). Tel qu'illustré à la Figure 14, la déformation a été augmentée jusqu'à environ 1 000 $\mu\epsilon$ ce qui correspond à un couple de 85 lb-pi.



a) Tensiomètre P-3500



b) Clé dynamométrique
utilisée pour les tests



c) Disposition des
éléments utilisés pour
les tests de couple de
serrage

Figure 13 : Éléments utilisés lors des essais de couple de serrage aux fins de vérification de la méthode d'installation



Figure 14 : Application d'une charge axiale au boulon à l'aide d'une clé dynamométrique

La Figure 15 présente les résultats du premier test de vérification sous forme graphique. Comme on peut le constater, et le dispositif SAFEBOLT et les jauges de contraintes installées à la surface des boulons ont réagi de façon linéaire aux charges appliquées, confirmant ainsi leur bon fonctionnement. La Figure 16 présente quant à elle les résultats du second test de vérification. Elle révèle que le capteur SAFEBOLT a continué de réagir de façon linéaire aux charges appliquées par le biais de la clé dynamométrique. Une analyse de régression linéaire a fourni un coefficient de corrélation de 0,99. On peut donc en conclure que l'application d'un couple de serrage à la tête du boulon en guise de charge initiale n'endommage pas le capteur SAFEBOLT, non plus qu'elle ne réduit sa sensibilité aux charges axiales.

Il convient de noter que, dans le cadre du test visé, les résultats n'ont pas été représentés en termes de couple, dans la mesure où il s'avérait difficile d'en déterminer les valeurs exactes compte tenu de l'échelle de gradation de la clé dynamométrique utilisée (voir Figure 14).

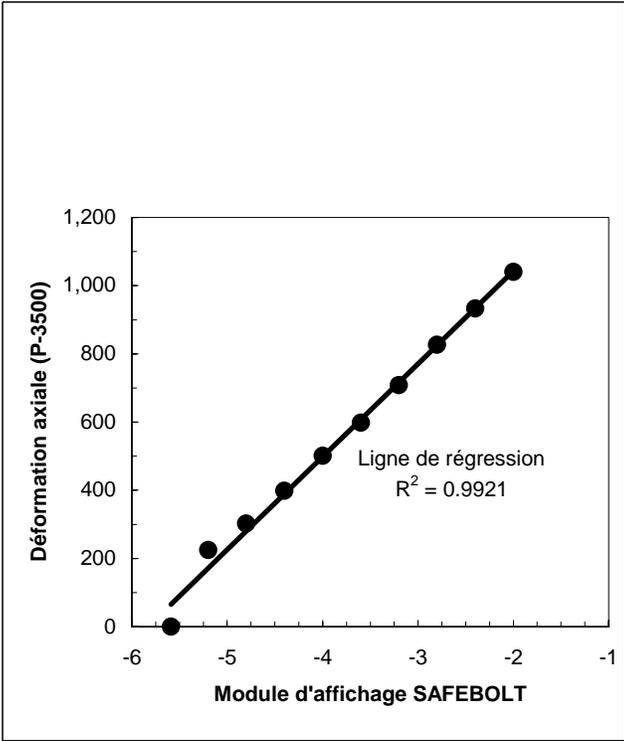
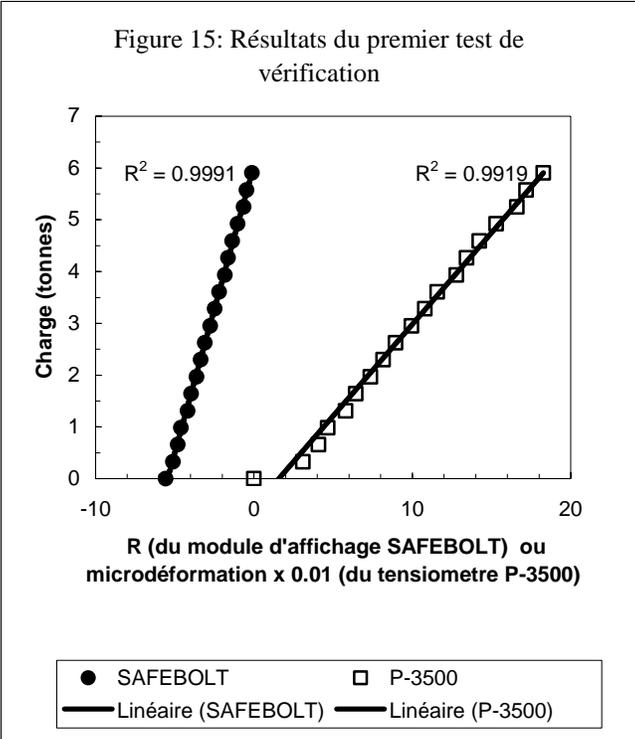


Figure 16 : Vérification à l'aide d'un tensiometre P-3500, de la linéarité de réactions du capteur SAFEBOLT à l'application d'un couple de serrage progressif

7. PREMIER PROGRAMME PILOTE *IN SITU*

Le premier programme pilote *in situ* avait principalement pour but de valider la technologie SAFEBOLT dans un environnement souterrain, pour ensuite améliorer la conception du dispositif à la lumière de l'expérience ainsi acquise et des commentaires fournis par les mines elles-mêmes. Les premiers essais *in situ* portaient sur l'installation de boulons d'ancrage et de « rebar » instrumentés SAFEBOLT dans trois mines souterraines en exploitation du Québec, à savoir les mines Niobec, Doyon et Bousquet. Il s'agissait par ailleurs de former le personnel minier au suivi des charges axiales imposées aux boulons. La Figure 17 illustre l'application visée de la technologie SAFEBOLT à l'intérieur des mines. Comme on peut le constater, les boulons ont été installés près du front d'avancement d'une galerie. Il s'agissait là d'une application devant normalement soumettre les boulons instrumentés à des charges variables au gré de l'avancement du front. On pouvait également s'attendre à ce que les boulons instrumentés soient exposés à de rudes conditions compte tenu de la proximité de la zone de dynamitage.

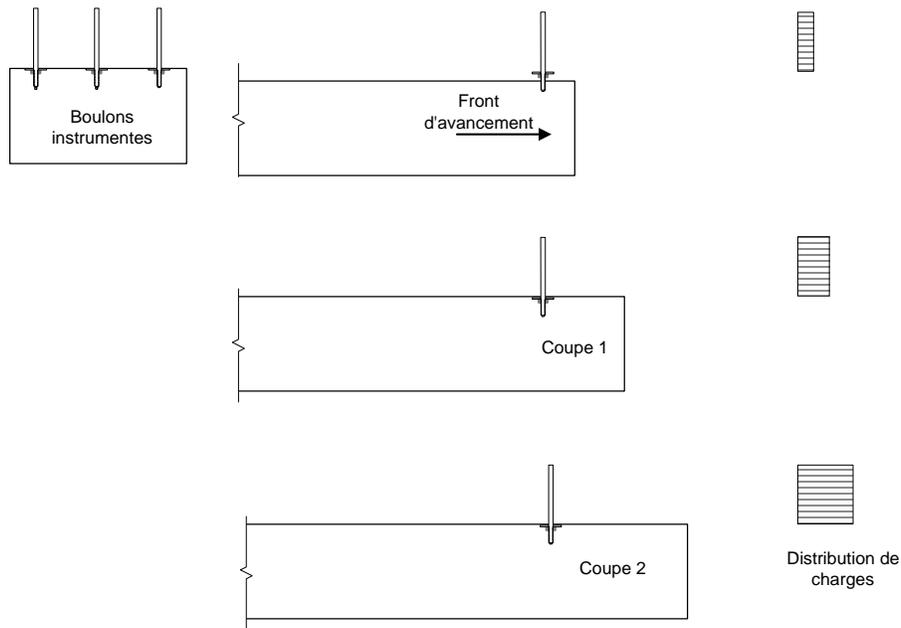


Figure 17 : Application de la technologie SAFEBOLT dans une galerie en construction

7.1 Mine Niobec

La Figure 18 montre la section transversale de la galerie du niveau 900 de la mine Niobec, où s'est déroulé le programme d'installation pilote. Les essais portaient sur six « rebar » instrumentés de 3/4 po (19 mm) d'une longueur de 5 pi (1,5 m) et d'une charge portante nominale de 8,95 t (20 040 lb).

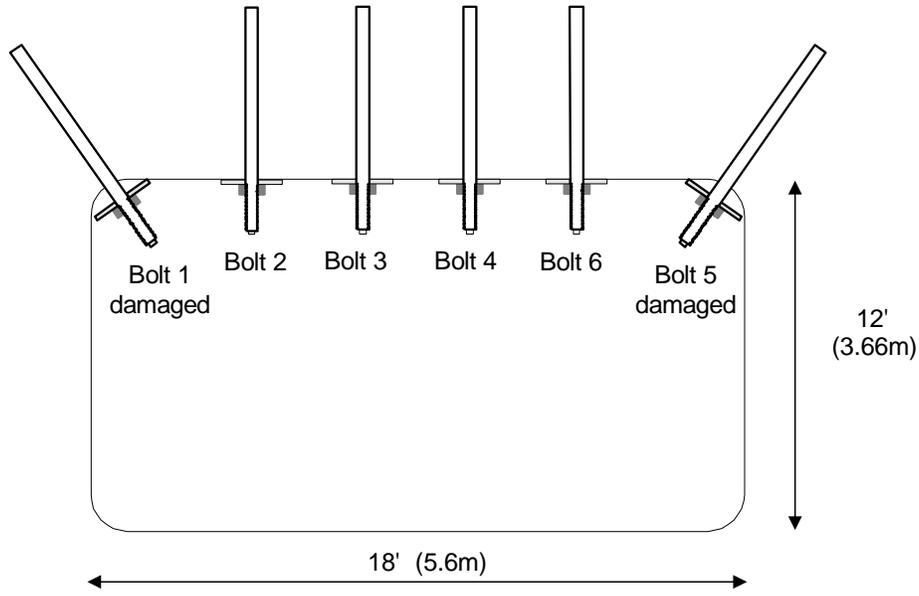


Figure 18 : Installation des « rebars » instrumentés SAFEBOLT à la mine Niobec

Les « rebars » instrumentés ont été marqués à la peinture blanche et dotés de capuchons protecteurs en caoutchouc, tel qu'illustré à la Figure 19. Après installation, les charges initiales des « rebars » ont été enregistrées au moyen du système SAFEBOLT (voir Figure 20).

Ces charges, qui variaient entre 2,19 et 9,22 t, sont reproduites au Tableau 1. Comme on peut le constater, seulement quatre des six « rebars » instrumentés ont pu être installés sans endommager le dispositif. Il s'agit des « rebars » n° 2, 3, 4 et 6.

Tableau 1 : Charges axiales des boulons de la mine Niobec après leur installation

Boulon 2		Boulon 3		Boulon 4		Boulon 6	
R	P	R	P	R	P	R	P
2,2	2,86	0,78	2,19	0,13	2,48	5,86	9,22

Les charges axiales mesurées suggèrent que la précontrainte appliquée à chaque boulon au moment de son installation n'était pas constante.



Figure 19 : « Rebars » instrumentés SAFEBOLT avant leur installation



Figure 20 : Mesure des charges axiales dans la mine de Niobec à l'aide du système SAFEBOLT

Bien que les « rebarbs » d'angle n° 1 et 5 aient été introduits avec succès dans le roc, leurs connecteurs ont été endommagés au cours de l'opération. Ce bris est dû à l'inégalité de la pression exercée sur le contre-écrou et la plaque d'appui par la douille porte-foret lorsque le boulon est fortement incliné par rapport à la surface du roc, tel qu'illustré à la Figure 21. Nous en avons conclu qu'il serait pour le moins difficile d'installer avec succès un boulon instrumenté sur un plan fortement incliné sans gravement endommager la tête du boulon, et par le fait même le connecteur du dispositif. Cela dit, aucun des autres boulons instrumentés (n° 2, 3, 4 et 6) n'avait été installé de façon parfaitement verticale, et le dispositif n'en avait pas pour autant été endommagé.

Bien qu'aucune mesure d'angle n'ait été prise, l'expérience de la mine Niobec s'est tout de même avérée profitable. Il va sans dire que, sous des conditions similaires, nous ne recommanderions pas l'installation de boulons instrumentés SAFEBOLT sur des plans fortement inclinés. Néanmoins, lorsque l'écart de perpendicularité par rapport à la surface du roc n'est pas trop prononcé, comme ce fut le cas pour les boulons n° 2, 3, 4 et 6, l'installation de tels boulons ne pose aucun problème. Les résultats obtenus nous ont amenés à effectuer un test de vérification en laboratoire afin d'étudier l'incidence des inclinaisons sur les boulons. Il en sera fait état dans une section ultérieure.

Selon la mine Niobec, 3 des 4 boulons installés avec succès ont cessé de fournir des données après dynamitage du front d'avancement de la galerie, tandis que le quatrième s'est mis à fournir des données incohérentes. Il était donc évident qu'il fallait doter le dispositif d'une protection accrue dans le voisinage des zones de dynamitage. Aucune protection supplémentaire n'a toutefois été fournie avant le dynamitage du front d'avancement de la galerie.

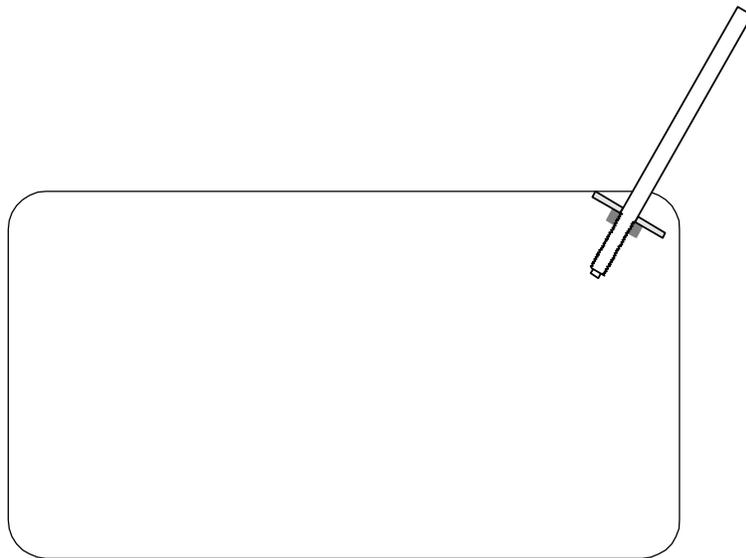


Figure 21 : Dommages causés au connecteur SAFEBOLT du fait d'une installation en plan incliné

7.2 Mine Bousquet

La Figure 22 montre une vue en plan de la section de mine où les boulons d'ancrage instrumentés SAFEBOLT ont été installés. Trois boulons à ancrage mécanique d'un diamètre de 5/8 po (16 mm) et d'une longueur de 7 pi (2,1 m) ont été installés dans une galerie du niveau 900. Leur charge portante nominale était de 6,28 t (14 070 lb). Les Figures 23 et 24 présentent des photographies prises après l'installation des boulons. Comme on peut le constater, les boulons ont été peints à l'aérosol après leur installation, de manière à en faciliter le repérage aux fins de suivi. Le connecteur du boulon n° 3 a été endommagé du fait d'une manutention brutale lors de son installation. Nous en avons conclu que le capuchon en caoutchouc n'offrait pas une protection suffisante contre une manutention brutale du boulon au moment de son installation. Il convient par ailleurs de noter que les conditions étaient particulièrement défavorables à l'intérieur de la galerie, ainsi qu'en témoignent les photos. Le plafond était en effet largement fracturé, de sorte que les boulons d'ancrage perdaient leur prise sous l'effet d'un glissement de la coquille d'expansion. Les boulons instrumentés n° 1 et 2 ont été installés avec succès. Les charges initiales calculées pour ces deux boulons n'étaient que de 1,06 t et 0,57 t, respectivement. Cela n'avait d'ailleurs rien d'étonnant compte tenu des nombreuses fractures du plafond. Quoi qu'il en soit, les connecteurs des boulons ont malheureusement été détruits lors de la ronde subséquente de dynamitage (Coupe 1 de la Figure 22). Le Tableau 2 résume les résultats de cet essai. Nous en avons conclu qu'il fallait doter les boulons instrumentés d'une protection supplémentaire lorsqu'ils étaient appelés à être installés dans le voisinage d'une éventuelle zone de dynamitage.

Tableau 2 : Charges axiales des boulons de la mine Bousquet après leur installation

Boulon 1		Boulon 2		Boulon 3
R	P	R	P	Connecteur endommagé en cours d'installation
-0,71	1,06	-1,53	0,57	

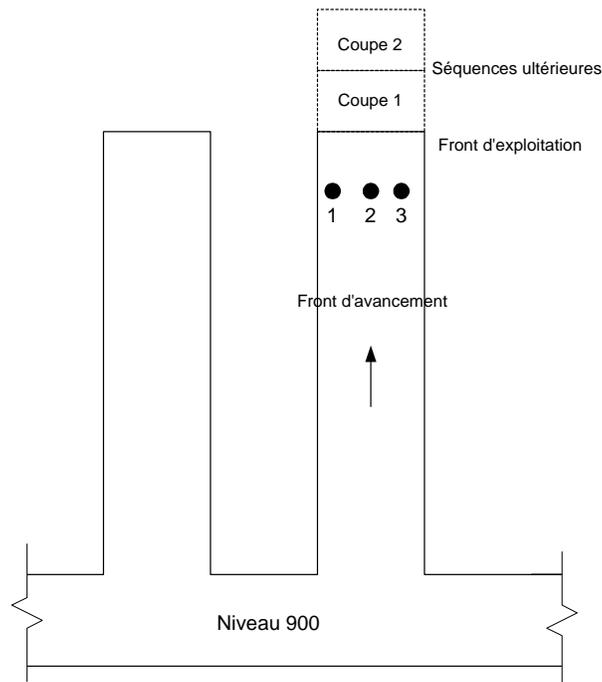


Figure 22 : Vue en plan du site d'essai de la mine Bousquet



Figure 23 : Boulons d'ancrage instrumentés SAFEBOLT de 5/8"



Figure 24 : Marquage à l'aérosol des boulons instrumentés

7.3 Mine Doyon

La Figure 25 montre une vue en plan de la section de la mine Doyon où les boulons d'ancrage instrumentés SAFEBOLT ont été installés. Cinq boulons à ancrage mécanique d'un diamètre de 5/8 po (16 mm) et d'une longueur de 5 pi (1,5 m) ont été installés dans une galerie du niveau 1100. Leur charge portante nominale était de 6,08 t (13 600 lb). Quatre des boulons d'ancrage (n° 2, 3, 4 et 5) ont été installés avec succès; le connecteur du boulon n° 1 a toutefois été endommagé en cours d'installation.

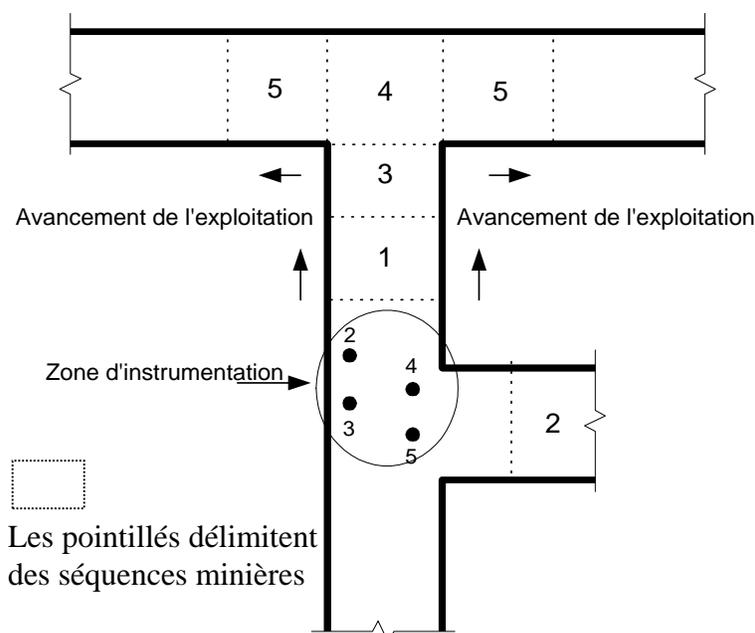


Figure 25 : Installation des « rebars » instrumentés SAFEBOLT au niveau 1100 de la mine Doyon relativement à six séquences d'exploitation

Ainsi qu'en témoigne la photographie de la Figure 26, de précédents dynamitages avaient considérablement endommagé la tête du boulon. Il fut donc décidé de visser l'écrou d'une coquille d'expansion à la tête du boulon afin d'en protéger le connecteur (voir Figure 27). De plus, il fut décidé de coussiner chaque boulon instrumenté au moyen d'une paire de blocs en bois ancrés au plafond en périphérie du boulon. Ces blocs, d'une épaisseur de 50 mm, mesuraient environ 250 mm sur 250 mm. Comme les boulons n° 4 et 5 se trouvaient à l'intersection de deux fronts d'avancement perpendiculaires, chacun d'eux fut doublement coussiné au moyen de deux paires de blocs en bois, comme on peut le voir à la figure 28. Les charges initiales de chacun des boulons furent ensuite calculées en fonction de leur coefficient de calibrage. Les résultats obtenus figurent au Tableau 3.

Tableau 3 : Charges axiales des boulons de la mine Doyon après leur installation

Boulon 2		Boulon 3		Boulon 4		Boulon 5	
R	P	R	P	R	P	R	P
3,85	3,26	17,68	6,08	-0,82	1,54	3,87	1,74



Figure 26 : Dommage causé à la tête d'un boulon de la mine Doyon par suite de dynamitage



Figure 27 : Protection du dispositif SAFEBOLT au moyen de l'écrou d'une coquille d'expansion



Figure 28 : Coussinage des boulons instrumentés au moyen de blocs en bois pour les protéger des effets de dynamitages ultérieurs

Le personnel de la mine Doyon a procédé au suivi des charges pendant environ 6 semaines. Les résultats obtenus, en six étapes, sont représentés sous forme graphique aux Figures 29 à 31, et expliqués ci-dessous.

- Boulon n° 2 : Installé avec une charge initiale de 3,26 t. La charge n'a connu que de faibles variations alors que le front d'avancement des galeries s'éloignait. Cependant, la diminution de la charge ne concorde pas avec cet éloignement. Cela peut s'expliquer par le fait que le boulon avait été installé près de la paroi murale, de sorte que l'avancement du front de la galerie ne l'a soumis à aucune charge supplémentaire. La faible chute de charge enregistrée aux étapes 2 et 5 peut être attribuée à un léger relâchement de la coquille d'expansion du boulon sous l'effet des vibrations provoquées par les dynamitages.
- Boulon n° 3 : Initialement contraint à la limite de sa charge portante nominale de 6 t. Ce boulon a par la suite été perdu sous l'effet des dynamitages.
- Boulon n° 4 : Installé avec une charge initiale de 1,54 t, par la suite augmentée de 3,74 t avec l'avancement des fronts. Ce résultat était à prévoir dans la mesure où le boulon se trouvait à l'intersection de la travée centrale d'excavation.
- Boulon n° 5 : Installé avec une charge initiale de 1,74 t. Perdu sous l'effet des dynamitages.

Boulon 2

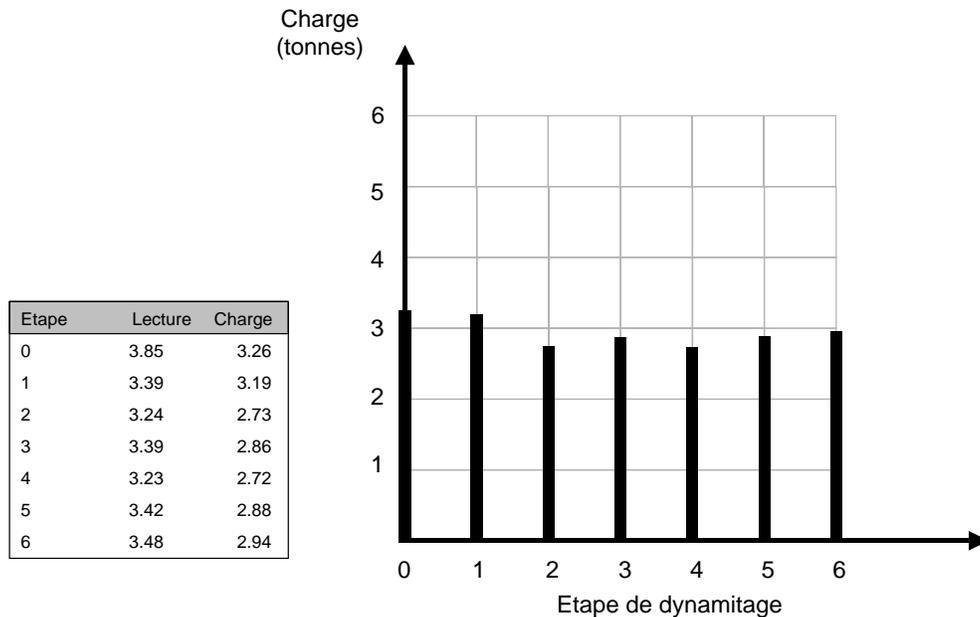


Figure 29 : Charges axiales du boulon n° 2 par rapport à l'avancement de l'exploitation (voir Figure 25)

Boulon 3

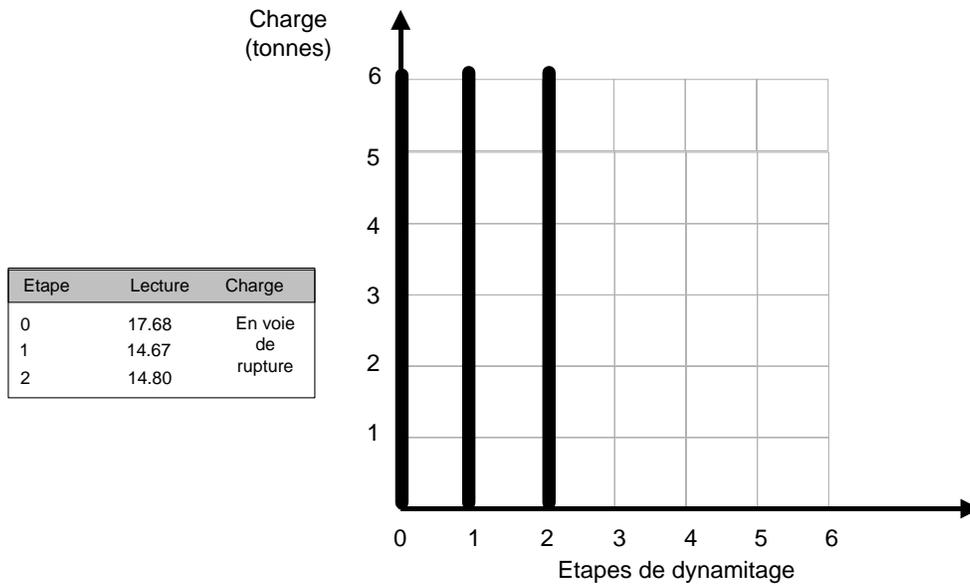


Figure 30 : Charges axiales du boulon n° 3 par rapport à l'avancement de l'exploitation (voir Figure 25)

Boulon 4

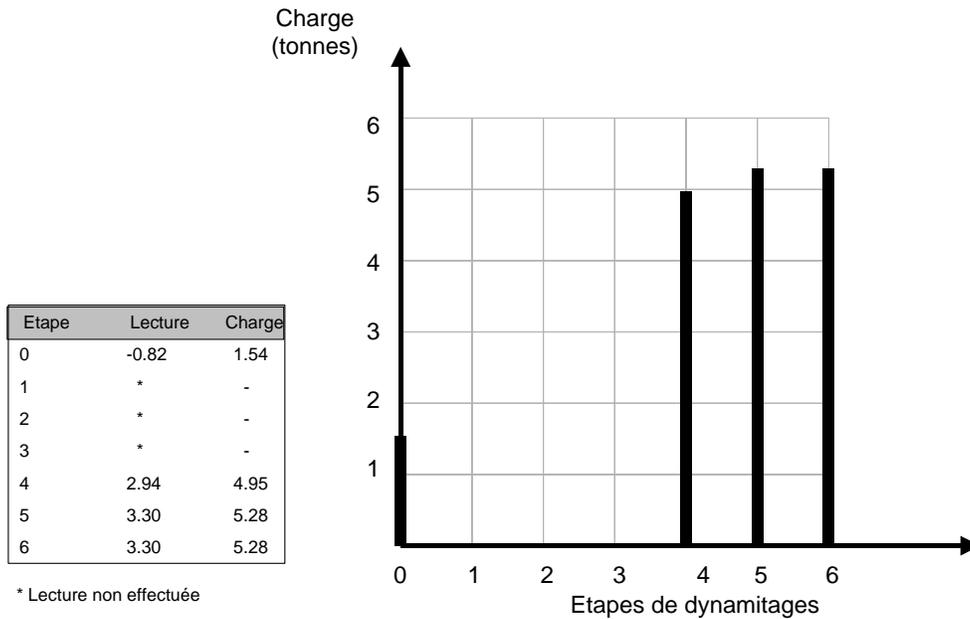


Figure 31 : Charges axiales du boulon n° 4 par rapport à l'avancement de l'exploitation (voir Figure 25)

8. MODIFICATION ET OPTIMISATION SUBSÉQUENTES DU SYSTÈME SAFEBOLT À LA LUMIÈRE DES ESSAIS PILOTES *IN SITU*

À la lumière de l'expérience acquise dans le cadre du premier programme pilote *in situ*, des modifications ont été apportées à la conception du système SAFEBOLT afin d'en accroître l'efficacité dans l'environnement des mines souterraines.

8.1 Capuchon métallique

La première amélioration a porté sur l'ajout d'un capuchon métallique vissable destiné à protéger le connecteur du dispositif (voir Figure 32). Le capuchon en question est usiné à partir d'une barre en acier disponible sur le marché. Comme le montre la Figure 32, il est plus petit que l'écrou du boulon, de sorte qu'il n'a pas à être retiré au moment de l'installation.

8.2 Conception du connecteur

La nouvelle conception du connecteur, destinée à en accroître la protection, fait en sorte qu'il s'enfonce de 2 mm supplémentaires dans la tête du boulon (voir Figure 33).

Nous estimions que les mesures qui précèdent fourniraient une résistance adéquate à la manutention brutale dont le boulon fait l'objet au cours de son installation. Néanmoins, une protection accrue des boulons instrumentés contre les éclats de roc dans les zones de dynamitage nécessitait l'adoption de mesures supplémentaires sur place, comme à la mine Doyon.

Aux fins de suivi, il fut décidé qu'on utiliserait désormais la formule de l'Équation [7] pour calculer la charge axiale des boulons. Cette équation s'harmonise en effet davantage avec la théorie, et fait appel à seulement deux constantes (A et B) plutôt qu'à trois.

8.3 Angle d'inclinaison des boulons

Les essais de la mine Niobec ont révélé que lorsque le boulon ne peut être installé dans un axe quasi perpendiculaire à la surface du roc, la tête du boulon, et par le fait même le connecteur du dispositif SAFEBOLT peuvent s'en trouver endommagés. Une solution possible à ce problème consisterait à faire usage de cales obliques. De telles cales sont disponibles sur le marché, notamment auprès de fournisseurs tels que Williams. Une cale oblique présente un effilement dans l'épaisseur et peut offrir un angle variant entre 5° et 11°, ce qui permet au contre-écrou de s'ajuster de façon quasi perpendiculaire à la tête du boulon, et donc de réduire les variations de pression de la douille porte-foret (voir Figure 34).

Étant donné que, sur le terrain, les boulons ne sont jamais parfaitement perpendiculaires à la surface du roc ou à la plaque d'appui, on s'est interrogé sur la précision des données fournies par le système SAFEBOLT dans de telles conditions. Il s'avérait donc nécessaire de procéder à un test de vérification en laboratoire. Ce test a été effectué sur un boulon à ancrage mécanique dont voici les caractéristiques :

- Type de boulon : M-58-05
- Diamètre nominal : 5/8 po (16 mm)
- Longueur : 4,5 pi (1,4 m)
- Qualité de l'acier : Classe 400
- Diamètre de l'orifice central : 1/8 po (3 mm)



Figure 32 : Capuchon de protection métallique vissable



Figure 33 : Position initiale (à droite) et modifiée (à gauche) du raccord

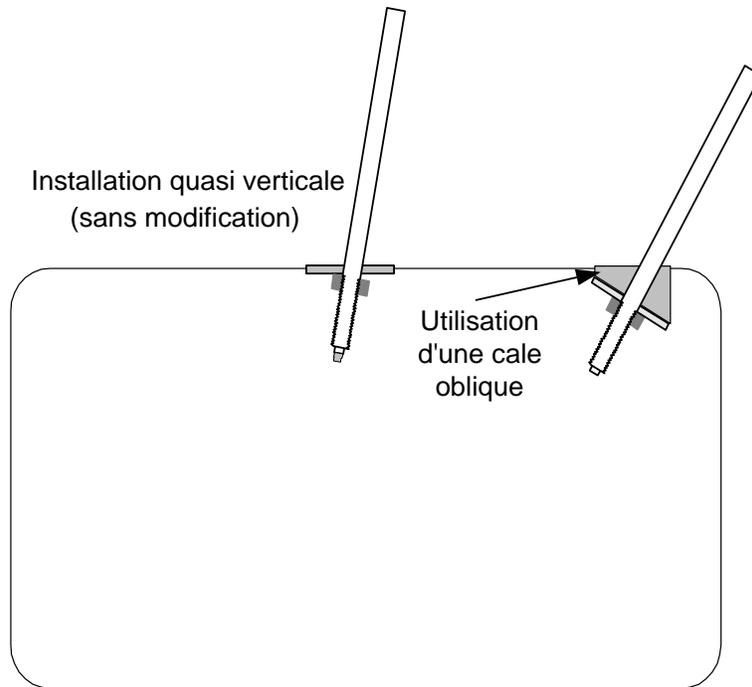


Figure 34 : Résolution possible des problèmes d'installation en plan incliné au moyen d'une cale oblique

Afin de simuler l'inclinaison du boulon par rapport à la plaque d'appui (ou la surface du roc), nous avons conçu une méthode permettant de créer en laboratoire un angle d'inclinaison θ , tel qu'illustré à la Figure 35. Pour ce faire, nous avons inséré des plaquettes de compensation entre deux plaques d'appui. Nous avons ensuite procédé à trois essais, dont voici la description :

1. aucune plaquette de compensation – boulon perpendiculaire à la plaque d'appui.
2. une plaquette de compensation offrant un angle $\theta = 7^\circ$ (voir Figure 36).
3. deux plaquette de compensation offrant un angle $\theta = 10^\circ$ (voir Figure 37).

Les essais avaient pour but de vérifier la sensibilité du capteur SAFEBOLT aux écarts d'angle de l'axe du boulon par rapport à la plaque d'appui. L'angle d'inclinaison θ correspond à l'écart entre la perpendiculaire et l'axe du boulon, tel qu'illustré à la Figure 35. Deux des tests portaient sur $\theta = 7^\circ$ et $\theta = 10^\circ$, respectivement, tel qu'illustré aux Figures 36 et 37. Comme on peut le constater, ces inclinaisons ont été obtenues en laboratoire en insérant des plaquettes de compensation entre deux plaques d'appui.

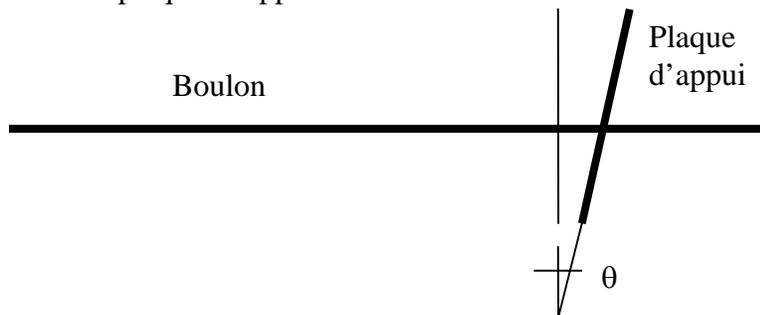


Figure 35 : Définition de l'angle d'inclinaison θ

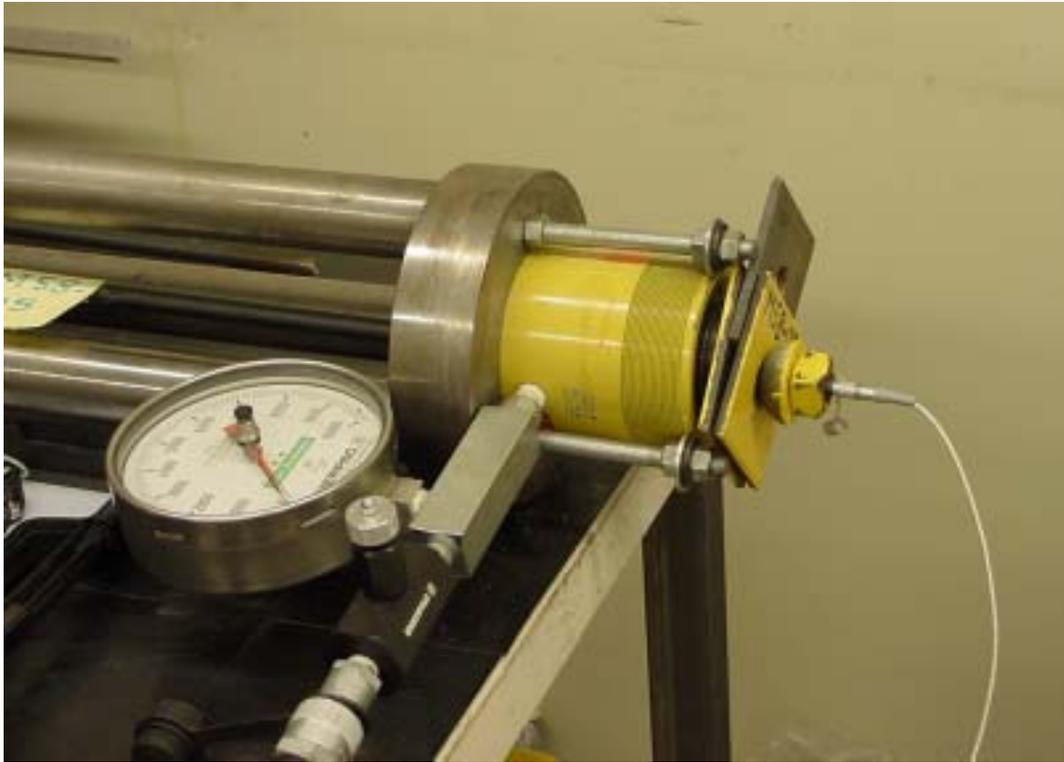


Figure 36 : Configuration d'essai pour $\theta = 7^\circ$

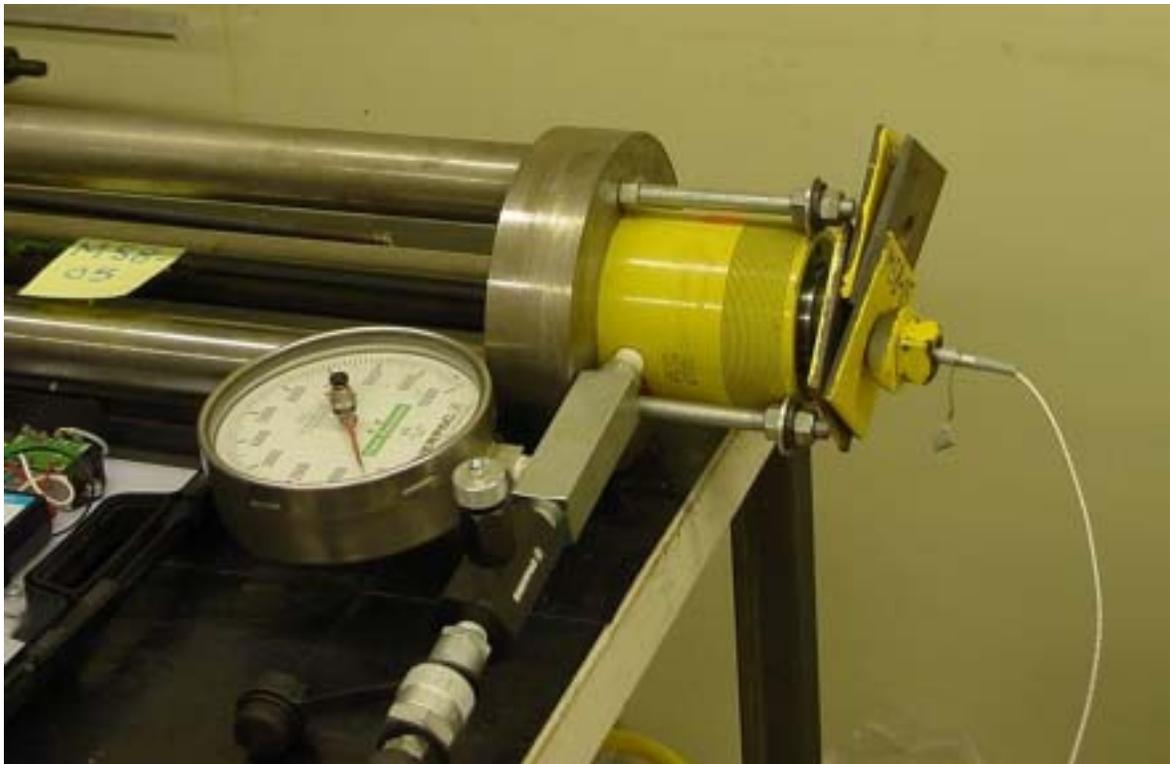


Figure 37 : Configuration d'essai pour $\theta = 10^\circ$

Dans chacun des tests, la pression a été appliquée par tranche de 100 psi à l'aide d'un vérin hydraulique. La pression a été augmentée jusqu'à 1 300 psi, correspondant à une charge de 4,26 t. Les résultats des trois tests sont exprimés en termes de charge axiale, telle que fournie par le module d'affichage SAFEBOLT (R), par rapport à la charge appliquée en tonnes (voir Figure 38). Les résultats de chacun des tests ont ensuite fait l'objet d'une régression linéaire. Il en a résulté les équations SAFEBOLT qui suivent :

$$\text{Charge (sans compensation)} = (R - 0,0312) \times 2,659 \quad [12]$$

$$\text{Charge (1 plaquette de compensation)} = (R + 0,0053) \times 2,464 \quad [13]$$

$$\text{Charge (2 plaquettes de compensation)} = (R + 0,0055) \times 2,433 \quad [14]$$

Afin d'évaluer l'erreur d'estimation de la charge due à l'inclinaison du boulon, les équations prévisionnelles qui précèdent ont été appliquées pour R = 1, 2 et 3, respectivement, et les résultats obtenus figurent au Tableau 4.

Tableau 4 : Charges axiales estimées pour différentes valeurs de R

Charge estimée	R = 1	R = 2	R = 3
Sans compensation	2,577	5,236	7,895
1 plaquette de compensation (7°)	2,477	4,941	7,401
2 plaquettes de compensation (10°)	2,447	4,88	7,313

Les résultats ainsi obtenus suggèrent les conclusions suivantes :

- Les Équations [13] et [14] sous-estiment la charge axiale du boulon, ce qui signifie que, lorsque le boulon n'est pas perpendiculaire à la plaque d'appui, l'équation SAFEBOLT aura tendance à sous-estimer la charge axiale du boulon.
- L'erreur d'estimation de la charge augmente avec l'angle d'inclinaison.
- L'erreur d'estimation de la charge augmente avec la magnitude de R (la charge appliquée).
- La sous-estimation de la charge varie entre 3,9 % et 7,4 %.

De manière à quantifier l'erreur d'estimation de la charge, une analyse de régression a été effectuée pour les trois valeurs de R, et la Figure 39 en présente les résultats. L'analyse de régression fournit les équations suivantes pour les pourcentages d'erreur E1 (1 plaquette de compensation, ou 7° d'angle) et E2 (2 plaquettes de compensation, ou 10° d'angle).

$$E1 = 2,611 + 1,381 R \quad [15]$$

$$E2 = 4,075 + 1,168 R \quad [16]$$

Ainsi la valeur de charge corrigée peut-elle être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Charge corrigée} = \text{Charge calculée de l'Équation [4]} \times (1 + E_i) \quad [17]$$

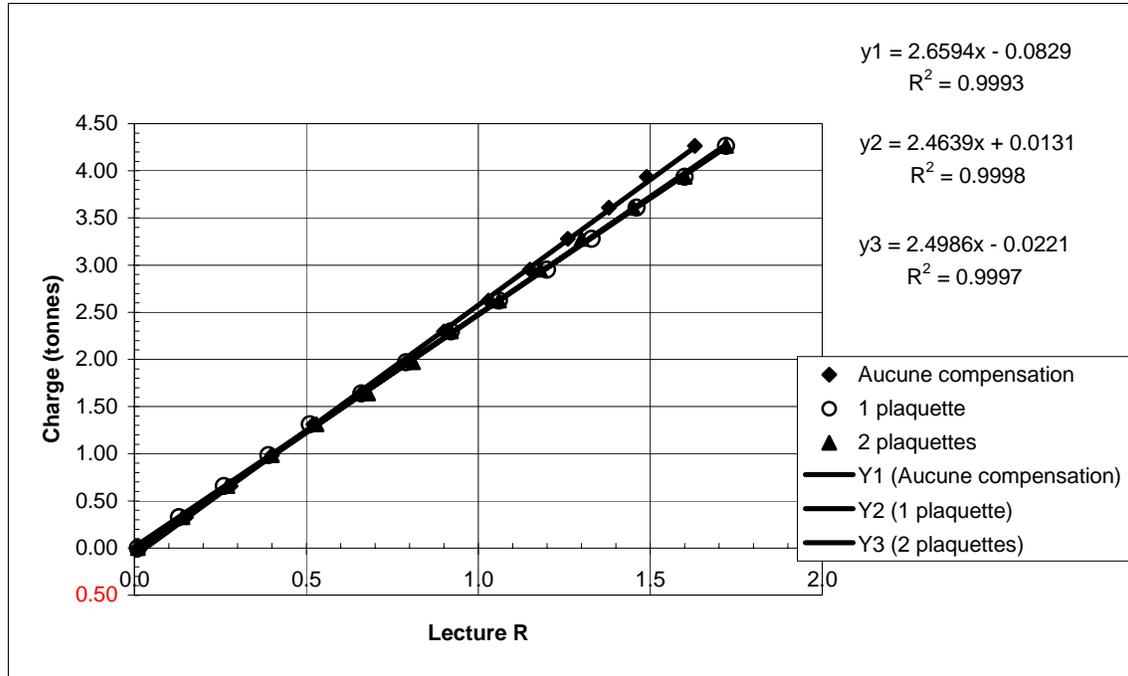


Figure 38 : Effet de l'angle d'inclinaison du boulon

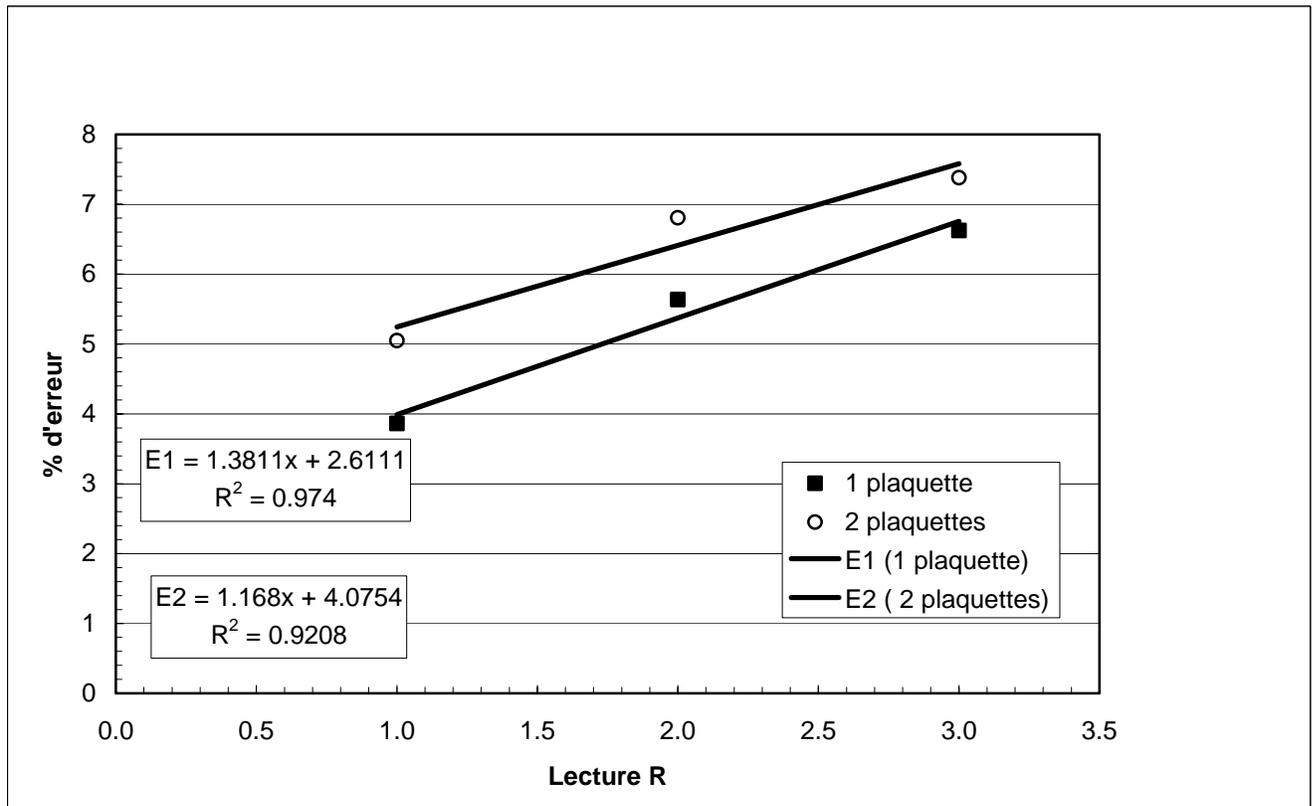


Figure 39 : Erreur d'estimation de charge due à l'inclinaison du boulon

9. DEUXIÈME PROGRAMME PILOTE *IN SITU*

9.1 Mine Niobec

La mine Niobec a malheureusement décidé de ne pas participer à la deuxième phase du programme pilote. Par conséquent, aucun autre essai n'a pu y être effectué.

9.2 Mine Bousquet

Quatre boulons à ancrage mécanique ont été pourvus du dispositif SAFEBOLT et livrés à la mine Bousquet dans le cadre du deuxième programme pilote. Il s'agissait de boulons d'un diamètre nominal de 5/8 po (16 mm), d'une longueur de 7 pi (2,1 m) et d'une charge portante nominale de 6,07 t.

L'installation des boulons instrumentés *in situ* n'a pu être programmée au moment de leur livraison. À ce jour, trois des boulons ont été installés, à savoir les n° 7, 8 et 9, et ce, à l'intérieur de la station électrique (voir plan du site à la Figure 40). Ainsi qu'en témoigne la photographie de la Figure 41, le cadre de la porte qui donne accès à la station présente des déformations visibles.

Selon la mine Bousquet, les boulons n° 8 et 9 ont pu être installés avec succès. Le boulon n° 7 n'émettait toutefois aucun signal après son installation, de sorte qu'il fut retiré. La Figure 42 présente une photographie du boulon n° 8 après son installation.



Figure 40 : Plan du site du deuxième programme *in situ* à la mine Bousquet



Figure 41 : Vue de la station électrique de la mine Bousquet



Figure 42 : Boulon instrumenté SAFEBOLT n° 8

Un suivi à long terme était prévu. Les signaux ont été relevés en moyenne une fois par mois après l'installation des boulons. Les lectures obtenues (voir Figures 43 et 44) nous amènent à faire les trois observations suivantes :

1. Les charges initiales dépassaient 80 % de la charge portante nominale de 6,07 t.
2. Les charges axiales des boulons demeurent plus ou moins stables au fil du temps.
3. Une faible diminution de la charge enregistrée peut s'expliquer par un léger glissement de la coquille d'expansion.

Boulon 8

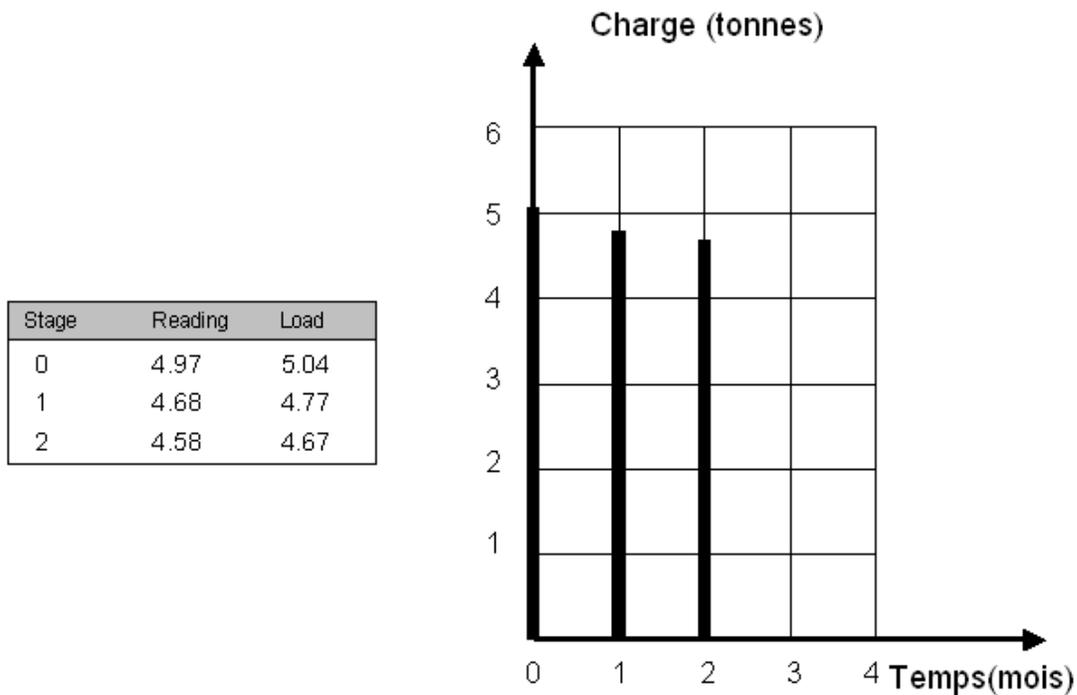


Figure 43 : Suivi des données fournies par le boulon n° 8 à la mine Bousquet

Boulon 9

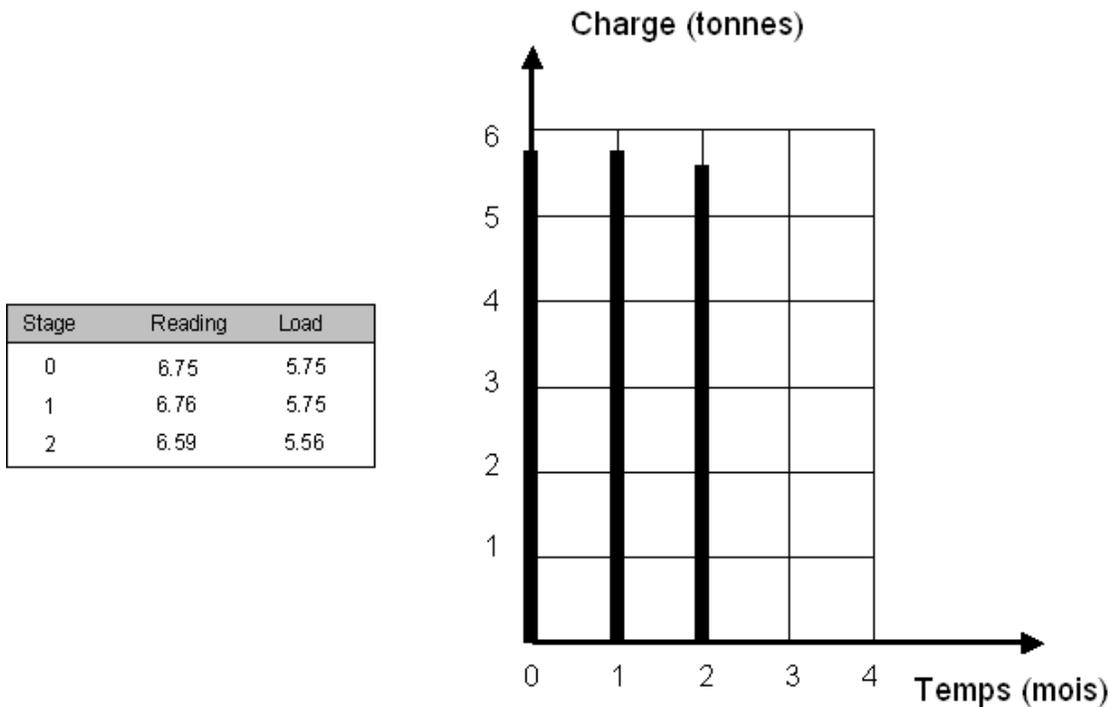


Figure 44 : Suivi des données fournies par le boulon n° 9 à la mine Bousquet

9.3 Mine Doyon

Cinq « rebars » ont été pourvus du dispositif SAFE Bolt et préparés en vue du deuxième programme pilote à la mine Doyon. Il s'agissait de boulons d'un diamètre nominal de 3/4 po (19 mm), d'une longueur de 5 pi (1,5 m) et d'une charge portante nominale de 8,95 t. Chaque « rebar » a été équipé d'un écrou demi-dôme destiné à agir comme tampon, ou atténuateur de serrage, afin de favoriser la rotation du boulon et le mélange des éléments résineux au moment de l'installation (voir Figure 45). Les « rebars » ont été installés dans une galerie du niveau principal.

Les « rebars » de la mine Doyon ont été installés avec des cartouches de résine pleine colonne, de telles cartouches s'insérant sur toute la longueur du trou de mine. Le boulon est ensuite poussé dans le trou à l'aide d'un « stopper ». L'écrou se voit placer dans la douille du « stopper », puis vissé sur la tête du boulon jusqu'à ce que sa partie arrondie frappe contre celle-ci, ce qui a pour effet d'en arrêter la course et de faire tourner le boulon dans le trou. Cette rotation du boulon permet un mélange adéquat des éléments résineux. Après un bref laps de temps (30 à 40 secondes), la résine se solidifie, et l'on applique un couple de serrage plus élevé à l'écrou jusqu'à en faire sauter le demi-dôme. L'écrou s'enfonce alors jusqu'à la plaque d'appui posée contre la surface du roc, et resserre ainsi le boulon.

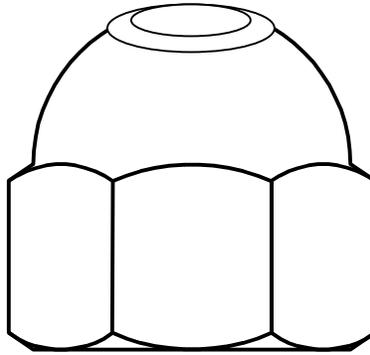


Figure 45 : Écrou demi-dôme utilisé sur les « rebars » de la mine Doyon

Bien que les cinq « rebars » aient été fournis avec des capuchons de protection métalliques, tel qu'illustré à la Figure 32, ces capuchons durent être enlevés pour permettre la mise en place des écrous demi-dômes. Cette opération a eu deux effets négatifs sur le connecteur du dispositif : 1) il a perdu sa protection contre toute manutention brutale, et 2) il s'est trouvé directement exposé à la face intérieure du dôme de l'écrou. Ces deux facteurs ont contribué à endommager le connecteur du dispositif. Comme on pouvait s'y attendre, la pression appliquée par le dôme sur la tête du boulon au moment du serrage final a complètement abîmé le connecteur du dispositif. Nous en avons conclu que le dispositif SAFE BOLT ne pouvait résister à ce genre d'installation.

En dernier recours, les deux derniers boulons ont été installés avec des écrous conventionnels (leur demi-dôme ayant été retiré avant installation). Sans endommager le connecteur du dispositif, cette méthode n'a toutefois pas permis de serrer le boulon convenablement.

10. CONCLUSIONS

Une nouvelle technologie du nom de SAFEBOLT (Stress And Force Evaluator in BOLTs) a été développée afin d'assurer le suivi des charges axiales imposées aux éléments de soutènement des masses rocheuses souterraines, tels que les boulons d'ancrage et les « rebars » installés dans les mines et galeries souterraines. Un banc d'essai a été conçu et construit en laboratoire afin de permettre le calibrage et la vérification des prototypes de boulons d'ancrage et de « rebars » instrumentés avant leur installation sur le terrain. Des boulons d'ancrage et « rebars » instrumentés SAFEBOLT ont été installés dans trois mines souterraines en exploitation du Québec, à savoir les mines Bousquet, Doyon et Niobec.

10.1 Caractéristiques

Bien que tous les essais pilotes *in situ* se soient déroulés dans des mines souterraines, le système de suivi SAFEBOLT peut tout aussi bien servir à des projets de génie civil, tels que tunnels, fondations, murs de soutènement, etc.

Le système SAFEBOLT possède plusieurs caractéristiques qui en font un attrayant instrument de suivi des charges auxquelles sont soumis les éléments de soutènement des masses rocheuses. Entre autres :

1. il peut être installé sur n'importe quel type de boulon d'ancrage ou « rebar » normalisé;
2. il ne requiert aucun filage; son capteur est entièrement intégré au boulon, ce qui lui procure par ailleurs une bonne protection;
3. il est facile à utiliser;
4. le connecteur plaqué or du dispositif offre une excellente protection contre la corrosion;
5. le capuchon en acier posé sur la tête du boulon l'assure d'une protection adéquate au moment du transport ou de l'installation;
6. les boulons peuvent continuer d'être installés à l'aide d'un simple « stopper »;
7. le dispositif est en mesure de suivre les charges imposées au boulon jusqu'à la limite élastique;
8. le système ne risque pas d'être endommagé en ayant recours aux méthodes d'installation qui appliquent un couple de serrage à la tête du boulon afin de bien en coincer l'écrou.

10.2 Limites

La technologie SAFEBOLT possède par contre un certain nombre de limites. Entre autres :

1. le calcul des charges en tonnes métriques par le biais de l'Équation SAFEBOLT [4] est sujet à une marge d'erreur de $\pm 0,05$ tonnes;
2. le dispositif, testé en laboratoire à 25°C, est sensible aux écarts de température; l'Équation [11] doit être utilisée pour corriger les calculs de charge sous différentes températures;
3. le dispositif est sensible aux écarts d'angle avec la surface du roc; l'Équation [17] peut être utilisée pour corriger les calculs d'estimation des charges, mais seulement pour des angles d'inclinaison de 10° ou moins;
4. l'utilisation d'un écrou demi-dôme pour installer un « rebar » a pour effet d'endommager le dispositif; il faut plutôt utiliser un écrou conventionnel sur un « rebar » pourvu d'un interrupteur de pas de vis;

5. il est impossible de garantir le suivi des charges jusqu'à la limite portante du boulon, dans la mesure où la jauge de contraintes peut se briser avant que la charge de rupture ne soit atteinte;
6. le système ne peut être adapté aux éléments de soutènement tels que Split-Set, Swellex ou boulon serre-câble.

Nous avons tiré plusieurs leçons des essais pilotes sur le terrain. Entre autres :

- l'installation d'un boulon en plan incliné peut endommager le connecteur du dispositif; l'utilisation de cales obliques permet toutefois de résoudre ce problème jusqu'à un certain point; reste qu'il n'est pas recommandé d'installer des boulons instrumentés dans un angle prononcé par rapport à la surface du roc;
- le dynamitage de zones voisines des boulons d'ancrage instrumentés peut en endommager le dispositif de mesure; l'utilisation de blocs en bois ancrés au plafond à la périphérie des boulons instrumentés semble néanmoins en protéger les capteurs contre les effets du dynamitage;
- il s'avère impossible d'installer avec succès des « rebars » instrumentés immobilisés au moyen d'écrous demi-dômes; le dôme écrase en effet le connecteur du dispositif lors du serrage final du boulon.

RÉFÉRENCES

- Mitri, H.S.; « Review of monitoring technologies for axially loaded rock supports » Technical Report, Mining Engineering (MGMM-01-98), 1998.
- Mitri, H.S.; « Rockbolt load measuring device », demande de brevet américain provisoire n° 60/258,890 (janvier 2001).
- Popov, E.P.; « Mechanics of materials », 2^e édition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1978.

ANNEXE A

Guide d'utilisation du système SAFEbolt



1. Module d'affichage

- Le module d'affichage doit être conservé dans un endroit sec et tempéré.
- Le module d'affichage nécessite une pile alcaline de 9 volts. Il est fortement recommandé d'avoir recours à un voltmètre pour s'assurer que la pile fournit au moins 8 volts.
- En actionnant le commutateur de mise sous tension, si vous voyez une flèche pointer en direction de l'indicateur « LO » (voir Figure A-1), c'est que la pile est faible et doit être remplacée avant d'utiliser le module.
- Lors de la mise sous tension (ON), l'écran du module doit afficher 1. (et non 1.00). Si tel est bien le cas, le module fonctionne normalement. Éteignez le module (OFF).
- Le commutateur central (SHUNT/CAL) n'est pas utilisé.
- Assurez-vous que le commutateur de droite se trouve bien en position TRACK (voir Figure A-1).

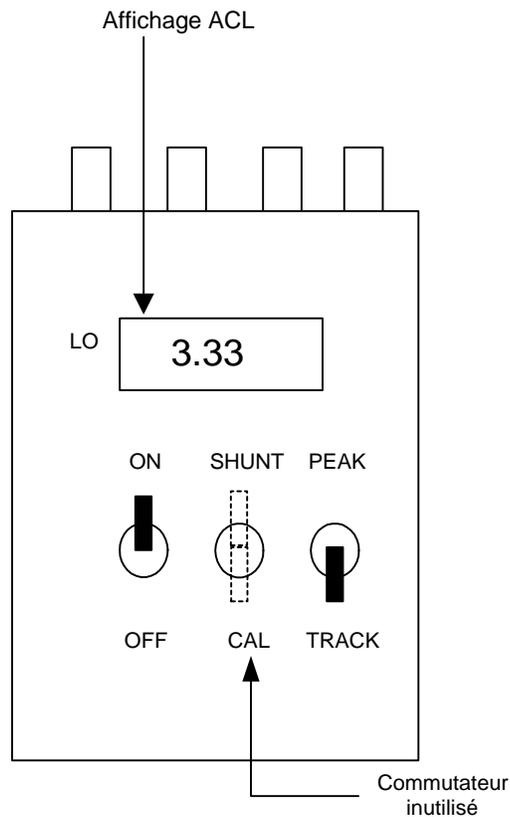


Figure A-1 : Schéma du module d'affichage SAFEBOLT

2. Prise de mesures

- Avant de procéder à une lecture de signal, assurez-vous que vos mains soient propres et sèches. Gardez un linge propre et sec sur vous.
- Avant de procéder à la lecture des données fournies par des boulons instrumentés installés sous terre, acclimitez le module d'affichage à l'environnement pendant au moins 30 minutes pour lui permettre d'atteindre la température ambiante.
- Préparez le boulon instrumenté à la lecture – Dévissez et retirez le capuchon de protection métallique de la tête du boulon instrumenté SAFEBOLT, et mettez-le dans une de vos poches. Prenez note que le capuchon se dévisse par la gauche. S'il est humide, essuyez-le avant de le retirer.
- Tirez sur le capuchon du dispositif et mettez-le dans votre poche. S'il est humide ou souillé, essuyez-le avant de le retirer. Par contre, n'essuyez pas le culot du connecteur pour ne pas risquer de contaminer ce dernier.
- Ouvrez le boîtier du module d'affichage, retirez-en le câble et assurez-vous qu'il se rend bien jusqu'à la tête du boulon. Enlevez le capuchon qui protège la prise du câble (voir Figure A-2).
- Insérez la prise dans le connecteur du dispositif SAFEBOLT. La prise dispose de trois fiches, et ne s'insère que dans un sens. Tenez la prise tel qu'illustré à la Figure A-3, et faites-la pivoter sur le connecteur jusqu'à ce que vous la sentiez en position de contact. Lorsque tel est le cas, enfoncez la prise dans le connecteur en droite ligne. **NE LUI IMPRIMEZ ALORS AUCUNE ROTATION.**
- Mettez le commutateur du module en position « ON », et procédez à la lecture; notez la mesure fournie, puis éteignez le module.
- Pour débrancher le câble, tenez la prise tel qu'illustré à la Figure A-4. Cela aura pour effet de relâcher un ressort. **N'IMPRIMEZ AUCUNE ROTATION À LA PRISE.**
- Remettez le capuchon protecteur sur la prise et rangez immédiatement le câble dans le boîtier du module d'affichage.
- Notez la mesure enregistrée (R) dans le calepin qui se trouve à l'intérieur du module d'affichage, de même que le numéro d'identification du boulon et la date de la lecture.
- Fermez le boîtier du module d'affichage.
- Remettez le capuchon protecteur du dispositif en l'enfonçant dans son culot.
- Remettez le capuchon métallique en place. Vissez-le et serrez-le à la main.

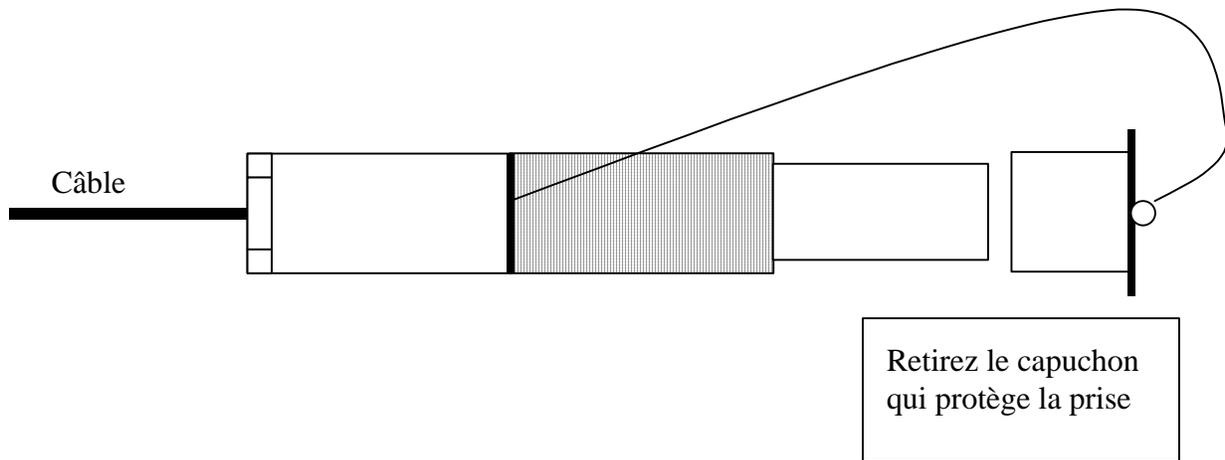


Figure A-2 : Retrait du capuchon qui protège la prise

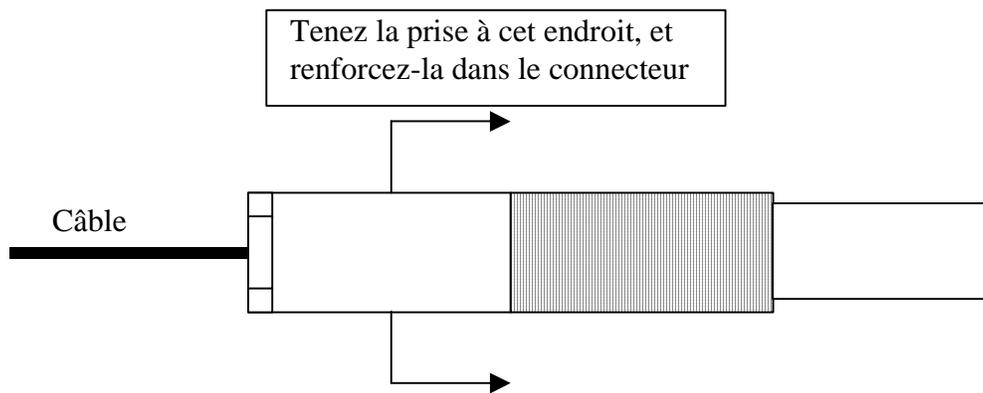


Figure A-3 : Comment tenir la prise pour l'insérer dans le connecteur
 NOTA : Tournez délicatement la prise jusqu'à ce que vous la sentiez prête à s'engager dans le connecteur, et enfoncez-la en droite ligne, sans lui imprimer de rotation.

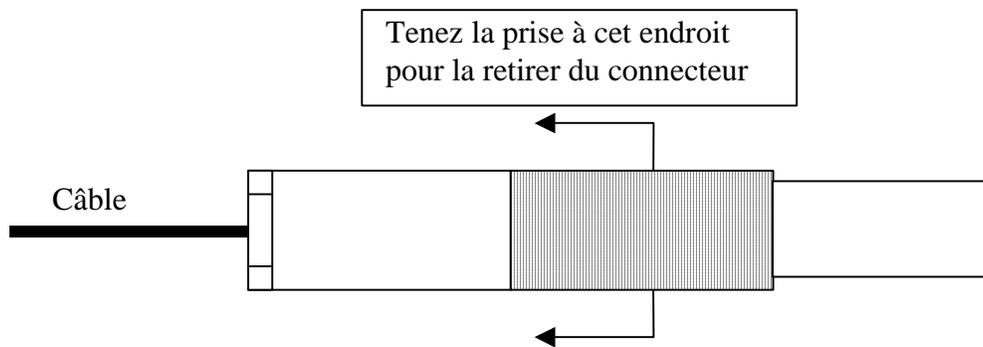


Figure A-4 : Comment tenir la prise pour dégager le ressort qui la retient au connecteur

3. Calcul de la charge axiale d'un boulon

- Reportez-vous au rapport de calibrage des boulons instrumentés SAFEBOLT pour obtenir les constantes A et B. Assurez-vous d'utiliser les valeurs applicables en vérifiant le numéro d'identification du boulon.
- Calculez comme suit la charge axiale (P) du boulon en fonction des unités précisées dans le rapport de calibrage :

$$P = [R - A] \times B \quad [1]$$

où R correspond à la mesure obtenue du module d'affichage.

- Consignez le numéro d'identification du boulon, la date de la lecture, la mesure fournie et toute remarque pertinente. Suit un modèle d'enregistrement suggéré :

N° d'ident. Du boulon	DATE	A	B	R	P	Remarques
Galerie 2700-1	2001-02-15	1.12	.96	3.15	1.95	Date d'installation près du front d'avancement
	2001-03-21			4.56	3.30	Avancement de la galerie de 2,8 m
	2001-04-04			5.32	4.03	Tout juste après création du travers-banc

- Si la température ambiante de la mine diffère de 25°C, la charge calculée doit être corrigée à l'aide de l'équation suivante :

$$P \text{ (corrigée)} = (R - A) \cdot B - \Delta P \quad [2]$$

où :

$$\begin{aligned} \Delta P \text{ (en tonnes métriques)} &= 0,056 (T_a - 25) && \text{pour le boulon d'ancrage de 5/8"} \\ &= 0,087 (T_a - 25) && \text{pour le « rebar » de 3/4"} \end{aligned}$$

- Si le boulon n'est pas perpendiculaire à la surface du roc, son angle d'inclinaison (θ) par rapport à la verticale de la plaque d'appui doit être mesuré. La charge calculée au moyen de l'Équation [1] doit alors être corrigée comme suit :

$$\text{Charge corrigée} = \text{Charge calculée à partir de l'Équation [1]} \times (1 + E_i) \quad [3]$$

où, pour $i = 1$ et 2 :

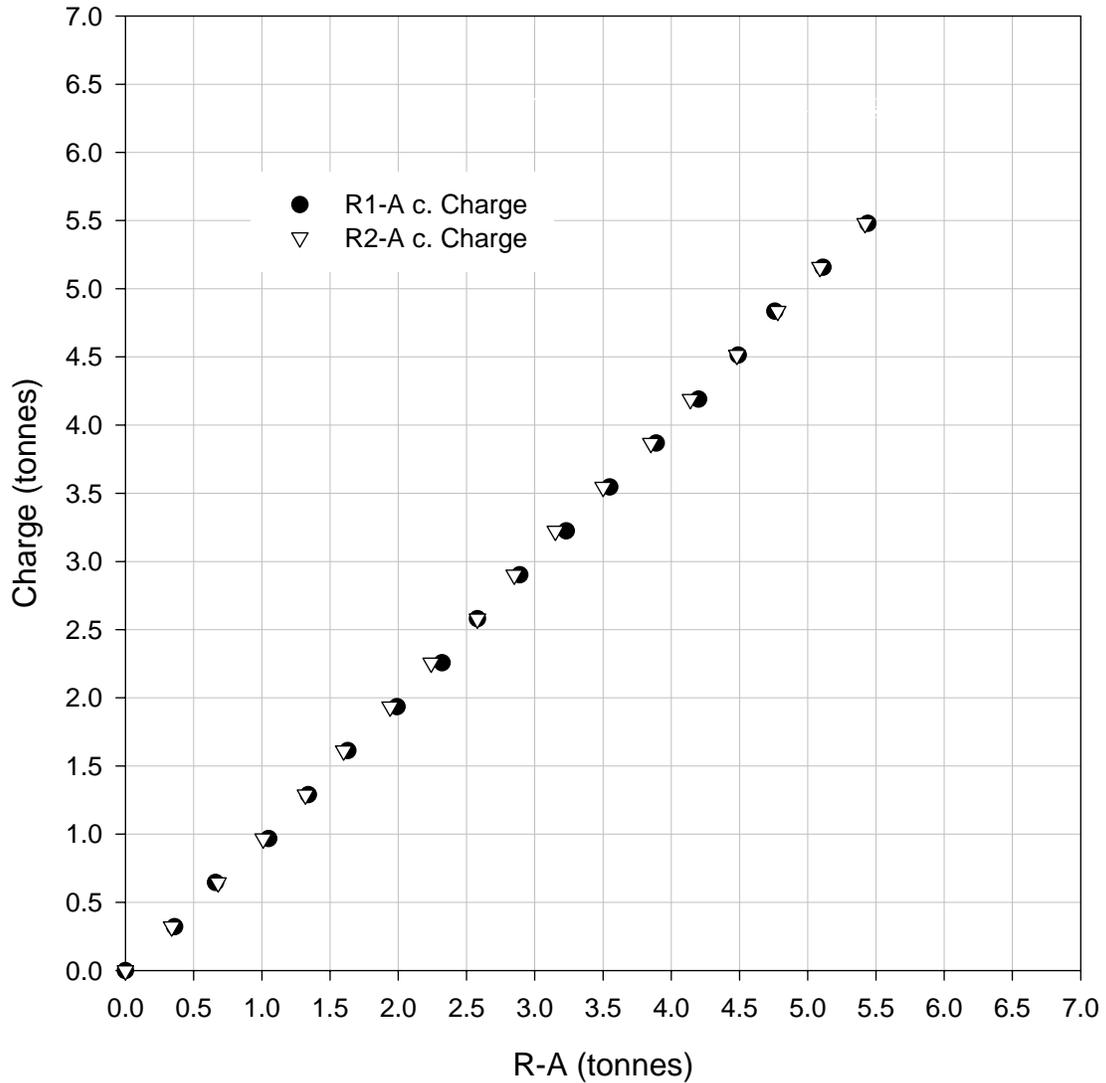
$$\begin{aligned} E_1 &= 2,611 + 1,381 R && \text{pour } \theta = 7^\circ \\ E_2 &= 4,075 + 1,168 R && \text{pour } \theta = 10^\circ \end{aligned}$$

Fiche technique

Identification: Boulon 7- mine Bousquet

Type de boulon: 5/8 po (15,2mm) -ancrage mécanique $\phi=3.2\text{mm}$

Charge de limite élastique nominale= 6.28 tonnes (14 070 lbs)



[Charge P (tonnes)]

$$P = (R-A) * B$$

$$A = 1.10$$

$$B = 1.00$$

Figure A-3 : Fiche technique type d'un boulon SAFEBOLT

4. Limites

- Le calcul des charges en tonnes métriques par le biais de l'Équation [1] est sujet à une marge d'erreur de $\pm 0,05$ tonnes.
- Le dispositif est sensible aux écarts d'angle du boulon par rapport à la surface du roc. Le dispositif n'est pas recommandé pour les écarts d'angle supérieurs à 10° .
- L'utilisation d'un écrou demi-dôme pour installer un « rebar » a pour effet d'endommager le dispositif. Il faut plutôt utiliser un écrou conventionnel sur un « rebar » pourvu d'un interrupteur de pas de vis.
- Il est impossible de garantir le suivi des charges jusqu'à la limite portante du boulon, dans la mesure où la jauge de contraintes peut se briser avant que la charge de rupture ne soit atteinte.
- Le système ne peut être adapté aux éléments de soutènement tels que Split-Set, Swellex ou boulon serre-câble.

5. Soutien technique et commandes

Vous trouverez de l'information en ligne sur la technologie SAFEBOLT et ses applications relativement aux projets de génie à l'adresse suivante : <http://www.safebolt.com>.

Pour toute commande ou soutien technique, veuillez consulter notre site Web ou communiquer avec :

RocTek R&D
1347 Victoria Street
St. Lambert, Québec
Canada J4R 1R4
Tél. : (450) 671-1986

(*) En vertu d'une entente avec l'Université McGill, RocTek R&D est habilitée à promouvoir, à commercialiser et à poursuivre la recherche et le développement relatifs à la technologie SAFEBOLT.