

INJECTION D'ANCRAGES DANS LE ROC GELÉ DU GRAND NORD À L'AIDE D'UN COULIS À BASE DE CIMENT PORTLAND

Gérard BALLIVY¹, Brahim BENMOKRANE¹, Pedro HERNANDEZ² et Pierre-Claude AITCIN¹

¹ Laboratoire de mécanique des roches et matériaux, Département de génie civil
Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke (Québec) J1K 2R1
² Roche Limitée, 2535, Boul. Laurier Sainte-Foy, (Québec) G1V 4M3

Résumé

Actuellement on ne scelle pas des ancrages dans le roc gelé à l'aide de coulis de ciment conventionnels, car ces derniers sont inefficaces ou détériorés par la présence de lentilles de glace consécutives au gel de l'eau de gâchage. On contourne le problème en forant plus profondément dans le massif rocheux, atteignant ainsi la partie non gelée, lorsque celle-ci est accessible, ou en adoptant des systèmes de protection thermique du coulis, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. Des économies substantielles peuvent être réalisées en scellant l'ancrage dans le roc gelé, sur la longueur nécessaire et suffisante pour assurer la résistance de l'ouvrage, en utilisant un coulis antigel à base de ciment portland, et sans recours à la protection thermique. Dans ce contexte, sont présentés ici les résultats d'une étude menée dans le Grand Nord, comprenant des essais d'arrachement d'ancrages scellés, dans un roc gelé à -12 °C, à l'aide d'un coulis à base de ciment portland. La résistance au gel du coulis de ciment utilisé a été obtenue grâce à l'utilisation d'un adjuvant chimique antigel, en l'occurrence le nitrite de sodium (NaNO₂), ce qui a permis l'installation des ancrages sans chauffage des barres d'acier, du roc ou du coulis. Les résultats obtenus montrent que le coulis de ciment utilisé peut être considéré comme un produit de scellement efficace pour la conception des ancrages injectés dans le roc gelé ou le pergélisol du Grand Nord canadien.

Abstract

At present, conventional cement grouts perform poorly for sealing anchors in frozen rock masses due to the formation of ice lenses from the mixing water. Instead, the necessary holes are drilled below the depth of frost penetration, when possible, or grout heating systems, involving additional costs, are used. Antifreeze portland-cement grouts, however, constitute a highly economical and effective means for fixing anchors in frozen rock without heating systems. This paper discusses the findings of a study carried out in Canada's Far North dealing with anchors sealed in rock masses at -12 °C with an antifreeze portland-cement grout. The grout's antifreeze characteristics derive from a chemical admixture, NaNO₂, which obviates the need for heating the steel bars, rock, or grout. The findings demonstrate that such grout is effective for anchoring in frozen rock or the permafrost in the Far North.

Introduction

Au Canada, selon la latitude à laquelle on se trouve (Fig. 1), on peut être dans l'obligation d'effectuer des travaux d'injection ou de scellement d'ancrages dans des massifs rocheux ou de béton soumis à l'action temporaire ou permanente du gel (pergélisol). Par exemple, l'érection d'infrastructures dans le Nord ou l'Arctique canadien (installations de communications, installations industrielles ou portuaires, lignes de transport hydro-électriques,...) comporte souvent des ancrages installés dans le roc gelé ou le pergélisol (Johnston and Ladanyi, 1972; Kast and Skermer, 1986; Laflèche *et al.*, 1987). Dans l'Arctique canadien, ce dernier peut atteindre jusqu'à 1000 m de profondeur à des températures aussi basses que -15 °C, dans sa partie la plus septentrionale.

Bien que la couche superficielle soumise aux cycles de gel et dégel puisse varier entre 0,3 et 5 m d'épaisseur, selon la conductivité thermique et la qualité du roc, le coulis, une fois injecté, doit atteindre sa prise finale dans un milieu où la

température environnante se maintient plusieurs degrés sous le point de congélation. Aussi, il est impossible, à l'heure actuelle, de sceller systématiquement des ancrages dans la roche gelée à l'aide de coulis de ciment conventionnels, car ces derniers sont inefficaces ou détériorés par la présence de lentilles de glace consécutives au gel de l'eau de gâchage. Cela entraîne une absence de contrôle sur la prise finale du coulis et des baisses catastrophiques de résistance à l'arrachement lors du dégel, pouvant mener au relâchement complet des ancrages.

Le problème est contourné en forant plus profondément dans le massif rocheux, atteignant ainsi la partie non gelée lorsque celle-ci est accessible. La longueur de forage et la longueur des barres d'ancrage sont alors au moins doublées ce qui, de ce fait, augmente le coût des opérations. Sinon, il faut alors envisager l'utilisation de produits de scellement autres que les coulis de ciment conventionnels ou adopter des systèmes de protection thermique du coulis (chauffage des ingrédients du coulis, de la barre d'acier, du roc et du coulis après l'injection) afin d'assurer à ce dernier des

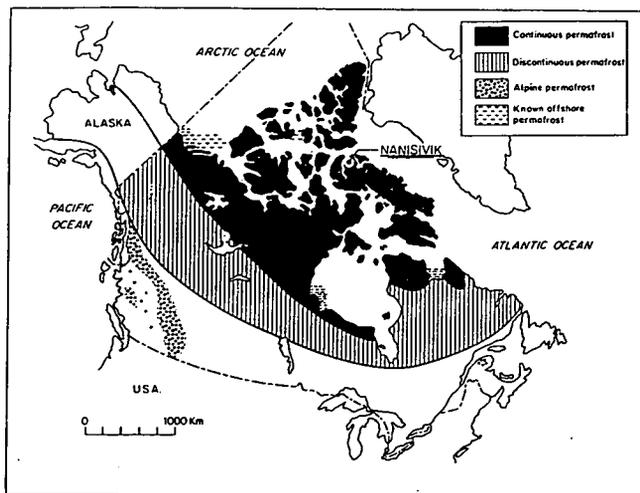


Figure 1. Distribution du pergélisol au Canada.

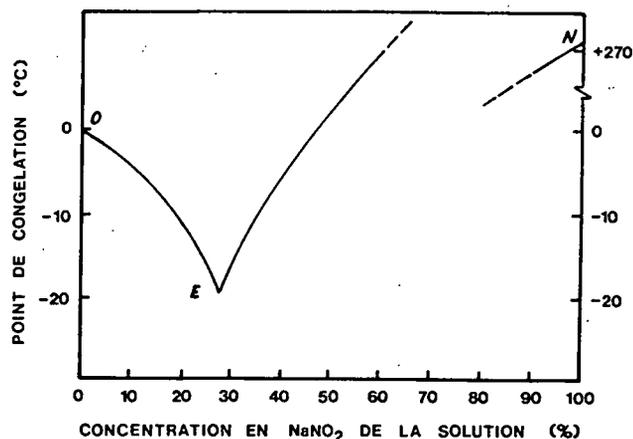


Figure 2. Comportement thermique du système binaire eau-NaNO₂ (d'après Ratinov et Rozenberg, 1986).

conditions de mûrissement lui permettant d'atteindre sa résistance critique sans danger de gel. Là aussi, ces solutions entraînent des coûts supplémentaires tout en diminuant la facilité des opérations en plus d'exiger une infrastructure de protection encombrante.

Des économies substantielles peuvent être réalisées en scellant l'ancrage dans le roc gelé, sur la longueur nécessaire et suffisante pour assurer la résistance de l'ouvrage, en utilisant un coulis antigel à base de ciment portland, et sans recours à la protection thermique du système d'ancrage. Dans ce contexte, il est présenté ici les résultats d'une étude menée dans le Grand Nord, à Nanisivik (extrême nord de la Terre de Baffin), comprenant des essais d'arrachement d'ancrages scellés, dans une roche gelée à -12°C, à l'aide d'un coulis à base de ciment portland. La résistance au gel du coulis de ciment utilisé a été obtenue grâce à l'utilisation d'un adjuvant chimique, en l'occurrence le nitrite de sodium (NaNO₂), ce qui a permis l'installation des ancrages sans chauffage des barres d'ancrage, du roc ou du coulis. Après une période de mûrissement de 14 jours, période durant laquelle la température du coulis de scellement au fond des trous a varié entre -12°C et -5°C, les douze ancrages installés ont été soumis à des essais d'arrachement pour évaluer leur résistance. En premier, il est présenté une description du coulis de ciment antigel utilisé pour le scellement des ancrages, incluant sa composition et ses propriétés déterminées lors de son développement en laboratoire.

Description du coulis de ciment antigel utilisé

COMPOSITION DU COULIS

Le coulis de ciment antigel utilisé pour le scellement des ancrages a été préalablement développé en laboratoire (Hernandez, 1988) à partir d'un mélange de ciment portland Type 30 (ciment à haute résistance initiale), de fumée de

silice, d'agent expansif (poudre d'aluminium), de superplastifiant et de nitrite de sodium (adjuvant chimique antigel). On retrouve au tableau 1 le dosage de chaque constituant et ce, par rapport à la masse de ciment.

La particularité principale de ce coulis à base d'un ciment portland réside dans l'utilisation, dans la composition, d'un adjuvant chimique antigel qui est le nitrite de sodium (NaNO₂); sinon, il serait analogue aux coulis de ciment que l'on a identifiés lors de travaux antérieurs sur des ancrages injectés (Ballivy, *et al.*, 1986; Benmokrane *et al.*, 1987), et qui sont constitués de ciment portland (Types 10 ou 30) et d'ajouts suivants: fumée de silice, superplastifiant, agent expansif. Le nitrite de sodium est un produit chimique, bien connu dans la confection de bétons antigel, pour le bétonnage par temps froid (Kivekaës et Leivo, 1985; Ratinov et Rozenberg, 1986). Ce produit permet en effet d'éviter le gel de l'eau de gâchage en diminuant le point de congélation de la phase liquide du mélange de ciment. La figure 2 montre le diagramme de phases du système binaire eau-NaNO₂ en terme de comportement thermique de la solution. La courbe OEN représentée dans cette figure montre que pour chaque concentration en NaNO₂, il existe une température minimale au-dessus de laquelle la solution reste liquide, c'est-à-dire qu'elle ne gèle pas en un mélange

Tableau 1.

Composition du coulis antigel à base de ciment portland utilisé pour le scellement des ancrages.

Ciment portland Type 30	(C)	1
Eau	(E)	0,44
Fumée de silice	(F)	0,10
Poudre d'aluminium		0,7 x 10 ⁻⁴
Superplastifiant*		0,03
Nitrite de sodium	(N)	0,12
Rapport E/C + F		0,4
Rapport N/N + E		0,21

*De marque DISAL

(le dosage de chaque constituant est donné en fonction de la masse du ciment)

de glace et de cristaux de $\text{NaNO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; le point le plus bas, en température, que l'on peut atteindre correspond à $-19,6^\circ\text{C}$ pour une concentration en NaNO_2 de 28 % (le point E de la courbe OEN). Ici, la concentration en NaNO_2 considérée est égale à 21 % (tableau 1), ce qui permet d'éviter complètement le gel de l'eau de gâchage pour une température d'environ -12°C (Fig. 2).

Le nitrite de sodium est aussi un composé chimique qui n'occasionne pas la corrosion électrochimique. Cette propriété particulièrement importante pour l'utilisation du coulis en tant que produit de scellement d'ancrages (corrosion des barres injectées), a été examinée (Hernandez, 1988) selon une méthode électrochimique simple et conforme à la norme ASTM C876-80. En effet, des essais réalisés selon cette méthode qui consiste à observer la présence d'un phénomène de pile entre deux électrodes: une tige d'acier noyée dans le coulis et une tige de cuivre qui baigne dans une solution de sulfate de cuivre, ont montré que le coulis considéré ici est non corrosif.

RÉSULTATS D'ESSAIS DE CARACTÉRISATION DU COULIS EN LABORATOIRE

Des essais de caractérisation, incluant la détermination de propriétés du coulis à l'état frais et de propriétés mécaniques, ont été réalisés en laboratoire. Les conditions de confection et de mûrissement du coulis considérées dans la réalisation de ces essais sont:

- Confection du coulis: toutes les poudres, incluant le ciment, la fumée de silice, la poudre d'aluminium, le superplastifiant et le nitrite de sodium, sont mélangées ensemble durant cinq minutes. Puis, le mélange en poudre est ajouté à l'eau de gâchage pour être malaxé durant cinq minutes. L'opération ainsi que les ingrédients du coulis sont à la température du laboratoire (21°C). Ce mode de préparation est analogue à celui effectué, par la suite en chantier, pour l'injection des ancrages, avec les conditions de température de laboratoire devenant celles du lieu de confection du chantier.
- Prise et mûrissement: il a été procédé à la prise et au mûrissement des échantillons confectionnés, dans un congélateur réglé à une température égale de -10°C . Les échantillons sont conservés dans des sacs en plastique hermétiquement fermés afin de garder un taux d'humidité constant. Les moules destinés à

recevoir le coulis, sont préalablement entreposés dans le congélateur à -10°C et ce, 24 heures avant la confection du coulis.

Propriétés du coulis à l'état frais

Au moment de l'injection du coulis dans les moules, celui-ci était à une température de 24°C , soit une température voisine de celle de l'eau de gâchage. En effet, le nitrite de sodium n'ayant pas d'influence sur la chaleur d'hydratation, la température du coulis lors du malaxage suit celle de l'eau de gâchage. La légère hausse de température pouvant subvenir plusieurs minutes après le début du malaxage est due uniquement à l'hydratation du ciment, qui dans ce cas est un ciment fin, très réactif (ciment portland de type 30) et dont le dégagement de chaleur engendré par son hydratation est plus rapide et plus marqué que celui d'un ciment normal (ciment portland de Type 10).

D'autre part le temps d'écoulement au cône (cône ACNOR) est de 13 secondes, ce qui en fait un coulis fluide pouvant être injecté à l'aide d'une pompe à coulis. À titre comparatif, l'eau, dans un essai semblable, a un temps d'écoulement de 11 secondes.

Le temps de prise finale du coulis s'effectue en trois jours lorsqu'entreposé à une température de -10°C .

Lors du démoulage, aucune variation volumétrique (expansion ou retrait) ni ressuage du coulis n'ont été observés.

Les caractéristiques physiques du coulis à l'état frais sont présentées au tableau 2.

Propriétés mécaniques

On retrouve au tableau 3 le résumé des propriétés mécaniques du coulis suite à différents essais réalisés au laboratoire sur des échantillons âgés de 7, 14, 28 et 56 jours.

Durant les 28 premiers jours, les échantillons étaient conservés au congélateur à une température de -10°C et les essais se sont déroulés sans faire décongeler les échantillons. Après 28 jours, le reste des échantillons a été retiré du congélateur et entreposé dans une chambre humide à une température constante de 22°C , pour une nouvelle période de 28 jours.

Comme on peut le constater sur la figure 3, le gain de résistance en compression du coulis maintenu à une

Tableau 2. Caractéristiques du coulis à l'état frais.

Température en $^\circ\text{C}$		Temps d'écoulement ⁽¹⁾ au cône (sec.)	Temps ⁽²⁾ de prise (jours)	Variations volumétriques ⁽³⁾ Expansion/Retrait
Eau de gâchage	Coulis			
21	24	13	3*	Nul*

* Échantillons conservés dans un congélateur à -10°C

(1), (2), (3): Essais réalisés selon la norme

(1) CAN A232-1B

(2) ASTM C191

(3) CAN A232-1B

Tableau 3.
Résumé des caractéristiques mécaniques du coulis.

	Age du coulis (jours)	Résistance à ⁽¹⁾ la compression σ_c (MPa)	Résistance à ⁽²⁾ la traction σ_t (MPa)	Module de Young ⁽³⁾ E (GPa)
Mûrissement dans un congélateur (-10°C)	7	10,3 ± 0,32 [8]	—	—
	14	25 ± 4,31 [8]	1,8 ± 0,2 [4]	13,0 ± 0,3 [3]
	28	30,4 ± 3,7 [8]	2,1 ± 0,3 [4]	—
Échantillons sortis du congélateur à 28 jours et mûrissement dans une chambre humide (22°C)	56	74,0 ± 7,8 [8]	4,3 ± 0,3 [4]	—

[] : Nombre d'échantillons

(1): Essais sur cubes (5 cm x 5 cm) réalisés selon la norme ASTM C109-77

(2): Essais sur disques (diam. 5 cm, élanement = 2) réalisés selon la norme ASTM D3967-86

(3): Essais sur cylindres (diam. 5 cm, hauteur 10 cm) réalisés selon la norme ASTM D3148-86

température de -10°C s'effectue normalement si bien qu'après 28 jours, on mesure une résistance en compression simple de 30,4 MPa comparable à des coulis usuels maintenus dans des conditions normales.

Lors du dégel, soit du passage du congélateur à la chambre humide, ces propriétés mécaniques, non seulement se sont maintenues, mais ont progressé plus rapidement pour atteindre 74,0 MPa après le 56e jour, soit plus du double de valeur à 28 jours (30,4 MPa).

Il en va de même pour la résistance à la traction dont le rapport de cette dernière sur la résistance en compression

simple varie entre 6 et 7%, ce qui est normal pour de tels matériaux.

Ces résultats montrent bien que le coulis antigel ne subit pas une perte de résistance après une période de dégel. Les basses températures ralentissent l'hydratation de la pâte de ciment. L'hydratation peut alors mieux se compléter; ceci se traduit par des hausses rapides et significatives de résistance du coulis advenant une hausse de température de ce dernier. Une période de dégel contribuera donc à augmenter la résistance du coulis, l'effet contraire n'étant pas à craindre.

Résistance au gel du coulis

Le congélateur devant recevoir les moules et les échantillons de coulis était réglé de façon à ce qu'il maintienne une température de -10°C. Toutefois, durant la majeure partie des essais, la température du congélateur a fluctué de façon régulière entre -9°C et -12°C. Les minimums et maximums enregistrés au cours des essais sur de courtes périodes de temps, sont de -15°C et -6°C. Ainsi, bien que le dosage en nitrite de sodium corresponde à une température de service de -12°C, le coulis ne subit aucune détérioration et résiste bien au gel pour une température de -15°C, ce qui est d'ailleurs conforme aux recommandations tirées de la littérature (Ratinov et Rozenberg, 1986) concernant la réduction de dosage des adjuvants antigel pour une température de service donnée.

Les caractéristiques du coulis illustrées au tableau 3 sont celles correspondant à une température de service de -10°C. En opérant à des températures comprises entre -10°C et -15°C, les caractéristiques mécaniques seront inférieures. Au-delà de -15°C, le coulis résistera difficilement au gel. Ces conditions seront acceptables dans la mesure où la résistance au gel ou le gain de résistance mécanique sera le facteur considéré lors de la conception des ancrages.

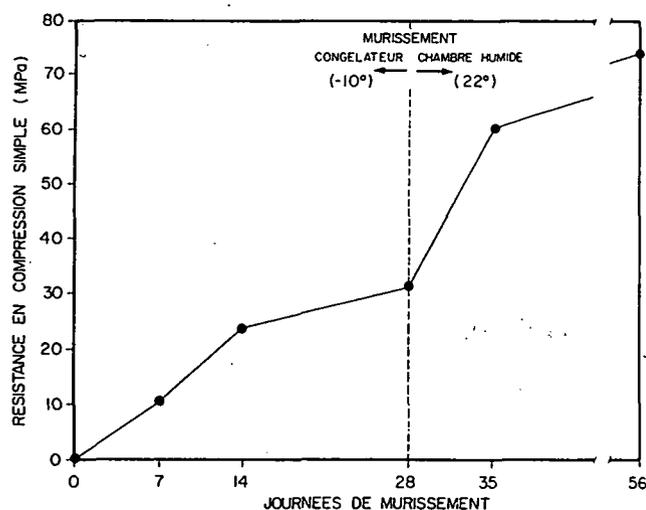


Figure 3. Évolution de la résistance en compression simple du coulis (mûrissement dans un congélateur suivi par un mûrissement dans une chambre humide).

Tableau 4.
Températures moyennes mensuelles à Arctic Bay.

T°(C)	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
	-29,7	-31,2	-28,7	-20,3	-8,0	+1,5	+5,6	+4,6	-1,7	-11,4	-22,4	-27,4

Essais en chantier sur des ancrages installés à Nanisivik dans le grand nord

Les travaux de développement du coulis antigel en laboratoire ont été poursuivis par une campagne d'injection et d'arrachement d'ancrages menée à Nanisivik dans le Grand Nord. Cette campagne, qui a été réalisée grâce à l'excellente collaboration de la compagnie Nanisivik Mines, qui exploite une mine de zinc et plomb à Nanisivik, à l'extrême nord de la Terre de Baffin (Fig. 1), avait pour but d'examiner le comportement du coulis antigel, décrit plus haut, en fonction des points suivants:

- Étant donné que dans le sud du Québec, en hiver, il est difficile d'enregistrer des températures dans le roc inférieures à -5°C , un site d'essais comme Nanisivik pourrait nous permettre de vérifier l'efficacité du coulis antigel pour des températures de chantier (roc) voisines de sa température limite d'utilisation.
- Est-ce que le transport et l'entreposage des produits ainsi que la fabrication du coulis en conditions hivernales influencent les performances de ce dernier lors des essais d'arrachement ?

DESCRIPTION DU SITE

Le village de Nanisivik est situé à environ 20 km au nord du village inuit d'Arctic Bay, dans les Territoires du Nord-Ouest (Ile de Baffin) aux environs du 73e parallèle nord.



Figure 4. Le coulis fraîchement malaxé est versé par gravité au fond des trous.

La population de Nanisivik est approximativement de 300 personnes et sa fondation en 1974 est due à la présence de la Nanisivik Mines Ltd qui exploite un gisement de zinc et plomb.

Le site sur lequel se sont déroulés les travaux d'injection d'ancrages est une plate-forme rocheuse de composition dolomitique située à proximité de l'usine de traitement des minerais.

Le massif rocheux à l'intérieur duquel les ancrages ont été scellés est très compétent, en partie à cause du pergélisol qui atteint plus de 300 m et qui fait que la température de la roche peut descendre jusqu'à -12°C . La température moyenne annuelle de l'air enregistrée en 1986 se situait aux environs de -14°C (tableau 4).

INSTALLATION ET INJECTION DES ANCRAGES

Les travaux de chantier comprenaient l'installation, l'injection de douze ancrages et l'arrachement complet de ces derniers après 14 jours de mûrissement.

Les travaux se sont déroulés du 20 mai au 3 juin 1987. On a utilisé des barres d'ancrages d'acier crénelé de type "Dywidag", ayant un diamètre nominal de 36 mm et des charges à la limite élastique et à limite de rupture égales à 860 et 1000 kN, respectivement.

Les douze trous dans lesquels les ancrages ont été injectés furent forés lors d'une étude précédente (Benmokrane *et al.*, 1987). Les trous verticaux ont été forés par percussion afin d'obtenir une surface des plus rugueuses sur une longueur d'environ 1400 mm et avec un diamètre de 76,2 mm.

Deux séries d'injection de six ancrages chacune ont été réalisées. Les poudres devant servir à confectionner le coulis sur place (ciment, fumée de silice, nitrite de sodium, superplastifiant et poudre d'aluminium) furent pré-mélangées à Sherbrooke, puis expédiées à Nanisivik où elles furent entreposées dans un hangar trois jours avant l'injection. La température d'entreposage s'est maintenue en moyenne aux environs de -8°C .

Le coulis a été malaxé pendant 5 minutes afin d'assurer une bonne homogénéisation du mélange. La quantité de coulis désirée a été versée par gravité dans chaque trou de forage, à partir de la surface (Fig. 4) puis la barre d'ancrage fut mise soigneusement en place en s'assurant qu'elle était bien centrée dans le trou. Les barres furent maintenues fixes durant le mûrissement du coulis en se servant de coins de bois.

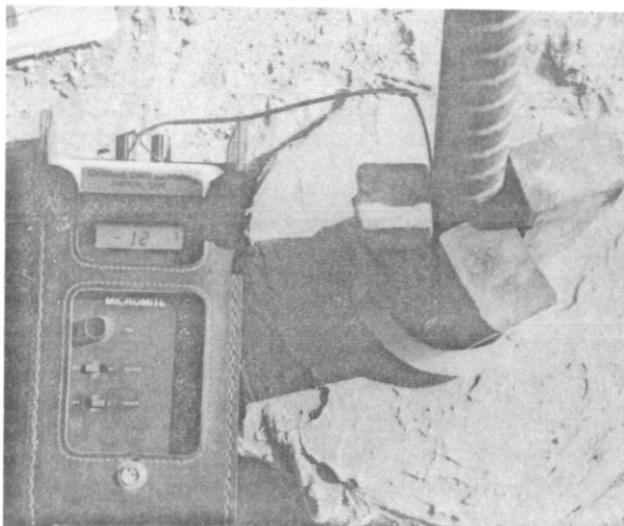


Figure 5. Vue d'un fil de thermocouple pour la prise de température du coulis injecté. Ici, l'appareil indique -12°C pour la température du coulis prise 48 heures après injection.

Injection des ancrages N-1 à N-6

La température de l'eau de gâchage était de 6°C et le coulis avant injection avait une température de 3°C . La viscosité du coulis évaluée au cône d'écoulement (cône ACNOR, norme CAN A232-1B) était de 26 sec., ce qui n'a donné aucune difficulté à verser le coulis dans les trous.

Injection des ancrages N-7 à N-12

La température de l'eau de gâchage était de 1°C , ce qui fait que le coulis au moment de l'injection avait une température de 0°C . On a dû malaxer 5 minutes supplémentaires et ajouter du superplastifiant afin de réduire la viscosité du coulis. Bien qu'un temps de 60 secondes fut obtenu au cône d'écoulement, on n'a pas eu de difficulté à verser le coulis dans les trous. Les longueurs ancrées des ancrages N-1 à N-12, mesurées lors de l'installation des barres d'ancrages, varient entre 230 et 450 mm. Le temps écoulé, pour les deux séries d'injections, entre la fin du malaxage et l'injection sur le site était d'environ 30 minutes et le tout a eu lieu le 20 mai 1987.

La température du coulis au fond des trous a été suivie tout au long du mûrissement grâce aux fils de thermocouple collés sur quatre barres d'ancrages (Fig. 5). Au moment de l'injection, la température au fond des trous était de -12°C , tandis que la température ambiante sur les lieux de l'injection était de -15°C .

Durant les 14 jours écoulés entre l'injection et l'arrachement de tous les ancrages, la température de ces derniers a varié entre -12°C et -5°C et ce, de la façon suivante (fig. 6): durant les 7 premiers jours, la température moyenne fut de -10°C et de -7°C pour les 7 jours suivants. Cette dernière correspond à la température moyenne lors de l'arrachement de tous les ancrages. La période d'ensoleillement à Nanisivik, pour cette période de l'année, est de 24

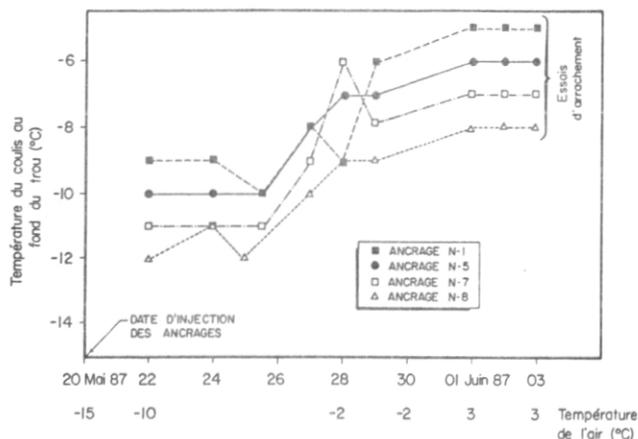


Figure 6. Suivi des températures du coulis au fond des trous pour quatre ancrages.

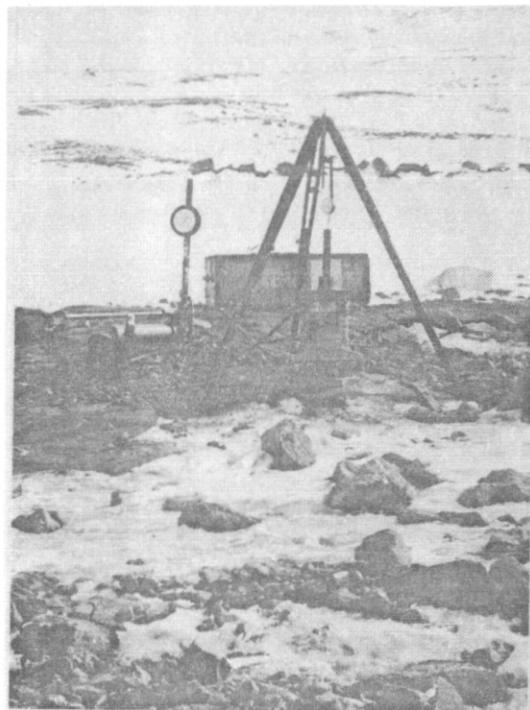


Figure 7. Vue du montage utilisé lors des essais d'arrachement.

heures et la température du rocher au niveau du scellement demeure constante.

Il est important de noter qu'aucun chauffage des barres, du roc ou du coulis n'a été réalisé, que ce soit durant l'injection des ancrages ou le mûrissement du coulis de scellement.

Résistance à l'arrachement des ancrages installés

La procédure d'essai appliquée pour les essais d'arrachement est celle recommandée par International Society for Rock Mechanics (1974); elle consiste à augmenter la tension dans l'ancrage jusqu'à l'arrachement.

Les charges furent appliquées avec un vérin évidé d'une capacité de 1000 kN et le déplacement en tête de la barre a été observé avec un comparateur à 0,01 mm près et le taux de chargement a été de 40 kN/min. La figure 7 illustre le montage utilisé lors d'un essai d'arrachement.

Tous les ancrages ont été arrachés la même journée du 3 juin 1987, soit 14 jours après leur injection.

La compétence de la roche en présence et la rugosité des parois du trou obtenue par le forage par rotation et percussion, ont fait que les ruptures à l'arrachement des douze ancrages se sont produites au niveau du contact barre-coulis, tel que prévu. Dans le tableau 5, on peut voir que la résistance moyenne au cisaillement à la rupture au niveau du contact barre-coulis a varié entre 5,7 et 8,6 MPa (valeur moyenne égale à $7,1 \pm 1,0$ MPa) et il n'y a pas de distinction marquée entre les résultats obtenus lors de la première et de la seconde série d'injections. Ces résultats montrent une résistance à l'arrachement comparable à celle que l'on obtient en zone tempérée en utilisant des coulis de ciment conventionnels (Ballivy et Dupuis, 1979; Ballivy *et al.*, 1986), même si les conditions d'opération étaient difficiles. En effet, le coulis ayant été préparé dans un hangar non chauffé, de température d'environ -8°C , et il a fallu parcourir une distance d'environ 300 m entre cet endroit et les ancrages à injecter et ce, à une température ambiante de -15°C .

La figure 8 illustre un exemple type de la variation de la charge d'arrachement en fonction du déplacement en tête de la barre.

Conclusion

La présente étude montre qu'il est possible d'utiliser un coulis antigel à base de ciment portland pour l'injection

d'ancrages dans un roc gelé jusqu'à -12°C , et ce sans chauffage des barres, du roc ou du coulis. Les résultats des essais mécaniques en laboratoire et des essais d'arrachement en chantier ont montré aussi que ce coulis permet, dans de telles conditions, d'atteindre des résistances comparables à celles de coulis de ciment conventionnels.

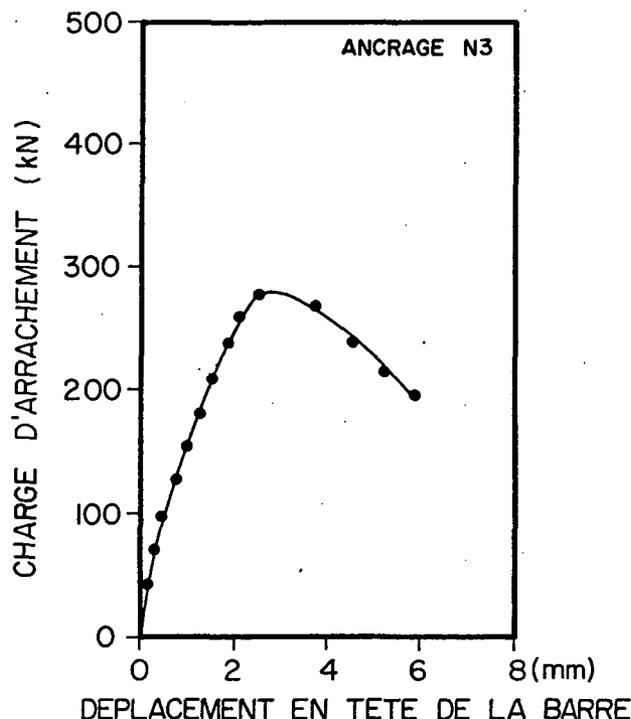


Figure 8. Exemple de variation de la charge d'arrachement en fonction du déplacement en tête de la barre (Arrachement de l'ancrage N3).

Tableau 5.
Résultats des essais d'arrachement d'ancrages.

Ancre No	LA (mm)	$P_{rupt.}$ (kN)	τ_{ult} barre/coulis (MPa)	τ roc/coulis (MPa)
N-1	280	182	5,9	2,7
N-2	290	225	7,0	3,2
N-3	320	281	8,0	3,7
N-4	270	187	6,3	2,9
N-5	310	237	6,9	3,2
N-6	310	242	7,1	3,3
N-7	300	187	5,7	2,6
N-8	300	248	7,5	3,4
N-9	230	171	6,8	3,1
N-10	450	407	8,2	4,5
N-11	370	352	8,6	4,8
N-12	270	215	7,2	3,3

P_{rupt} : charge d'arrachement à la rupture de l'ancrage

LA : longueur ancrée ou injectée

τ_{ult} barre/coulis : contrainte de cisaillement moyenne à la rupture au contact barre/coulis de scellement = $P_{rupt}/\pi \times d \times LA$ (d = diamètre de la barre)

$\tau_{roc/coulis}$: contrainte de cisaillement moyenne au contact roc/coulis à la rupture de l'ancrage = $P_{rupt}/\pi \times D \times LA$ (D = diamètre du trou)

L'adjuvant chimique antigél utilisé, en l'occurrence le nitrite de sodium, est aussi un composé chimique qui n'occasionne pas la corrosion électrochimique, contrairement à d'autres produits antigél tels que les sels ou les chlorures de calcium (Hernandez, 1988); il n'y a donc aucun risque de corrosion des barres d'ancrages injectées.

Les travaux réalisés en chantier ont montré que ce coulis antigél peut être facilement préparé et mis en place sur le terrain à partir d'un pré-mélange des poudres (ciment, fumée de silice, poudre d'aluminium, superplastifiant et nitrite de sodium) auquel il suffit d'ajouter l'eau de gâchage. Ce pré-mélange est économique et peut être conservé plusieurs mois, car il est constitué de matériaux secs et durables.

Enfin, ce produit de scellement s'avère le plus simple parmi les produits considérés (Hernandez, 1988) et il est aussi particulièrement intéressant, en condition arctique, lorsque de petites quantités de coulis sont requises (réparation d'ouvrages, travaux d'étanchéité, ...).

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce à des subventions de recherche pour dépenses courantes et supplément pour le Grand Nord canadien du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, du ministère de l'Éducation du Québec (Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche, programme: Action structurante) et de la société Hydro-Québec.

Les auteurs profitent de l'occasion pour remercier la compagnie Nanisivik Mines pour son support efficace dans la réalisation de cette expérience. L'instrumentation a été réalisée grâce à la collaboration active de monsieur Alain Nadeau, technicien au Laboratoire des matériaux de l'Université de Sherbrooke.

Références

- BALLIVY, G. AND DUPUIS, M. (1980). Laboratory and Field Evaluation of the Bonding Strength of Grouted Rock Anchors. 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto (Ontario), CIM Special, 22: 97-102.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B. ET AITCIN, P.-C. (1986). Rôle du scellement dans les ancrages actifs injectés dans le rocher. Revue canadienne de géotechnique, 23 (4): 481-489.
- BENMOKRANE, B., BALLIVY, G. ET AITCIN, P.-C. (1987). Injection d'ancrages à base de ciment portland dans l'Arctique. Revue canadienne de génie civil, 14 (5): 690-694.
- HERNANDEZ, P. (1988). Étude des scellements d'ancrages dans les massifs rocheux soumis à l'action du gel. Mémoire de maîtrise (M.Sc.A.), département de génie civil, Université de Sherbrooke (Québec), 140 p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1974). Suggested Method for Rock Bolt Testing. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Document No 2:16
- JOHNSTON, G.H. AND LADANYI, B. (1972). Field Tests of Grouted Rod Anchors in Permafrost. Revue canadienne de géotechnique, 9 (3): 176-194.
- KAST, G. AND SKERMER, N. (1986). Dew Line Anchors in Permafrost. Geotechnical News, 4 (4): 30-34.
- KIVEKAES, L. AND LEIVO, M. (1985). Research and Use of Antifreeze Admixtures in Finland. Third International RILEM Symposium on Winter Concreting, Espoo, Valtion Teknillinen Tutkimus-Keskus, 208-222.
- LAFLECHE, P.T., JUDGE, A.S. AND TAYLOR, A.E. (1987). Applications of Geophysical Methods to Resource Development in Northern Canada. CIM Bulletin, 80 (905): 78-87.
- RATINOV, V.B. AND ROZENBERG, T.I. (1986). Antifreezing Admixtures, Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, 431-479.