



**INFLUENCE DE LA CONGELATION DES
TERRAINS SUR LA STABILITE DES OUVRAGES /
Mines d'uranium de McArthur River et Cigar Lake
(Canada)**

Jean-Félix Hubert

► **To cite this version:**

Jean-Félix Hubert. INFLUENCE DE LA CONGELATION DES TERRAINS SUR LA STABILITE DES OUVRAGES / Mines d'uranium de McArthur River et Cigar Lake (Canada). 2009. hal-00589783

HAL Id: hal-00589783

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00589783>

Submitted on 2 May 2011

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

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

RAPPORT D'OPTION

**INFLUENCE DE LA CONGELATION DES TERRAINS
SUR LA STABILITE DES OUVRAGES**
Mines d'Uranium de McArthur River et Cigar Lake (Canada)

Jean-Felix HUBERT



Rapport d'option

Influence de la congélation des terrains sur la stabilité des ouvrages
Mines d'Uranium de McArthur River et Cigar Lake (Canada)

Jean-Félix HUBERT

Résumé

Les mines d'uranium canadiennes de Cigar Lake et McArthur River sont situées dans un contexte géologique difficile qui les place sous une menace permanente d'ennoyage. Pour se prémunir contre ce risque, la technique de congélation des terrains est employée de manière courante. Elle permet de former des murs de roche congelée imperméables. Ce travail s'intéresse aux effets mécaniques de cette congélation sur les ouvrages.

Une synthèse des travaux antérieurs portant sur la congélation en général, ou plus spécifiquement sur les mines étudiées, permet d'identifier les phénomènes physiques essentiels liés à la congélation : changement de phase, variation des caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux, et mouvements d'eau. On constitue ensuite une synthèse des données de laboratoire et in-situ obtenues dans ces travaux antérieurs. Ceux-ci proposent également des modèles destinés à rendre compte des mesures réalisées. Cette synthèse met en évidence le manque cruel de données exploitables. Les données de laboratoire sont en effet très rares, et les mesures in-situ peu fiables. On distingue aussi la difficulté du développement d'un modèle réaliste, due à la prise en compte du changement de phase et du gonflement de l'eau qui l'accompagne.

Pour contribuer à la détermination des effets de la congélation des terrains sur la stabilité des ouvrages, un modèle est développé en tenant compte des synthèses précédentes. On commence par le mettre au point sur le cas simple (axisymétrique) d'une galerie et d'une collerette de tuyaux de congélation avant de l'appliquer à un cas réel pour lequel on dispose de mesures. Ce cas réel ayant une géométrie en 3 dimensions, il est nécessaire d'adapter le modèle avant de l'appliquer à ce cas.

Le modèle thermique permet d'utiliser des caractéristiques thermiques variables selon la température. Il tient compte de la chaleur latente de solidification de l'eau, et, moyennant l'adaptation de la géométrie, donne des résultats en accord avec les mesures. Le modèle mécanique est un modèle thermoélastique, ne tenant pas compte du soutènement. Ses résultats ont été analysés qualitativement et sont relativement cohérents avec les mesures. La conclusion de ce travail propose quelques perspectives d'amélioration du modèle.

Remerciements

Je tiens à remercier ici tous ceux grâce auxquels ce travail a été mené à bien, permettant d'une part d'obtenir les résultats présents, et d'autre part de poursuivre efficacement ma formation d'ingénieur.

Je citerai en premier lieu les deux personnes chargées d'encadrer ce travail : Mme REJEB (AREVA NC, BU Mines, DRD) et M. HADJ-HASSEN (ENSMP). Mme REJEB a su, grâce à son attention et sa clairvoyance, orienter ce travail de manière sûre. M. HADJ-HASSEN m'aura encadré au quotidien, n'épargnant aucun effort pour m'expliquer les outils et les méthodes nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également MM. TIJANI et ROUABHI pour leur aide précieuse au centre de géosciences de l'ENSMP, aussi bien pour des questions techniques de calcul ou d'utilisation du matériel que pour des questions théoriques sur la congélation, en passant par des questions de méthode.

Je remercie enfin M. GOETZ (ENSMP), professeur responsable de l'option Sol et Sous-sol, pour ses conseils décisifs lors des présentations précédant la soutenance de ce travail.

Introduction

Les gisements d'uranium canadiens de Cigar Lake et de McArthur River, dans lesquels AREVA dispose d'une participation, sont d'une richesse exceptionnelle mais sont situés dans un environnement géologique rendant leur exploitation difficile. Il existe un risque important d'ennoyage de ces mines souterraines à cause de la présence d'un aquifère à leur proximité. Un moyen d'éviter l'infiltration d'eau est de recourir à un procédé de congélation des terrains, afin de créer une barrière étanche entre l'aquifère et les ouvrages. Un tel procédé est déjà mis en œuvre dans la mine de McArthur River, et est envisagé dans la mine de Cigar Lake.

Outre son effet imperméabilisant, la congélation a aussi des effets mécaniques sur les roches environnantes, et donc sur les ouvrages qui les traversent. Le but de ce travail d'option est de proposer un modèle pour déterminer ces effets, en se focalisant sur les aspects permettant de répondre aux exigences opérationnelles les plus urgentes d'AREVA.

Cette étude commencera donc par la présentation détaillée des problèmes qui se posent dans les mines considérées, avant d'établir une synthèse des travaux théoriques sur la congélation et des études portant sur ces mines. Cette synthèse comportera donc trois volets : un rappel des phénomènes physiques liés à la congélation, une synthèse des données disponibles dans les mines étudiées, et une présentation des modèles proposés dans les études correspondantes, destinés à rendre compte des mesures. Un modèle sera alors développé puis évalué sur un cas réel.

1 Présentation du problème

1.1 L'uranium

L'uranium est l'élément de numéro atomique 92. Il en existe plusieurs isotopes, les plus courants étant $^{238}_{92}\text{U}$ et $^{235}_{92}\text{U}$. Ce dernier, présent en des proportions d'environ 1 % dans l'uranium naturel, est le seul élément fissile naturel. C'est ce qui fait toute son importance pour l'industrie du nucléaire et en particulier pour la production d'électricité.

Jusqu'à présent, l'approvisionnement en uranium destiné aux centrales nucléaires était en partie réalisé grâce au désarmement partiel de certains pays possédant un grand nombre d'armes nucléaires, en particulier l'ex-URSS. Mais ces stocks viennent à s'épuiser, et l'extraction minière, avec le recyclage, devient la source essentielle de combustible. Cette extraction est donc appelée à jouer un rôle de plus en plus important avec la croissance de la demande en énergie nucléaire prévue dans les décennies à venir (*Agence Internationale de l'Énergie*, 2008.)

En 2007, la quantité totale extraite a été de 41700 tU, production principalement réalisée au Canada (9500 tU), en Australie, au Kazakhstan, en Russie, en Namibie, au Niger et en Ouzbékistan. Le groupe AREVA a produit 6046 tU, étant ainsi le 3^e producteur mondial d'uranium. Le groupe AREVA est opérateur dans plusieurs gisements de différents types, et possède des participations dans d'autres. La variété de ces gisements conduit le groupe à s'intéresser à des méthodes d'exploitation radicalement différentes selon les mines et les teneurs. Ces teneurs vont en effet de quelques centaines de ppm à 20 % dans quelques mines canadiennes.

1.2 Les mines de McArthur River et de Cigar Lake

1.2.1 Contexte géologique

Les deux mines auxquelles ce travail fait référence sont situées au Canada, au Nord de la province du Saskatchewan (figure 1). Elles se trouvent plus précisément à l'Est du bassin d'Athabasca. La figure 2 est une coupe géologique de ce bassin. On distingue tout d'abord les couches constituées de roche du socle des couches de grès qui les surplombent. Il y a présence d'un aquifère dans celles-ci. Ces deux types de couches géologiques sont séparés par une discordance, au niveau de laquelle se situent les gisements (indiqués en rouge). Cette discordance présente un certain pendage, ce qui explique l'existence de gisements à des profondeurs différentes dans ce bassin, et justifie donc l'utilisation de méthodes d'exploitation

à ciel ouvert ou en souterrain selon leur emplacement. Le gisement représenté à droite est celui de Cigar Lake, et celui représenté à gauche, situé sur une faille, est celui de McArthur River.

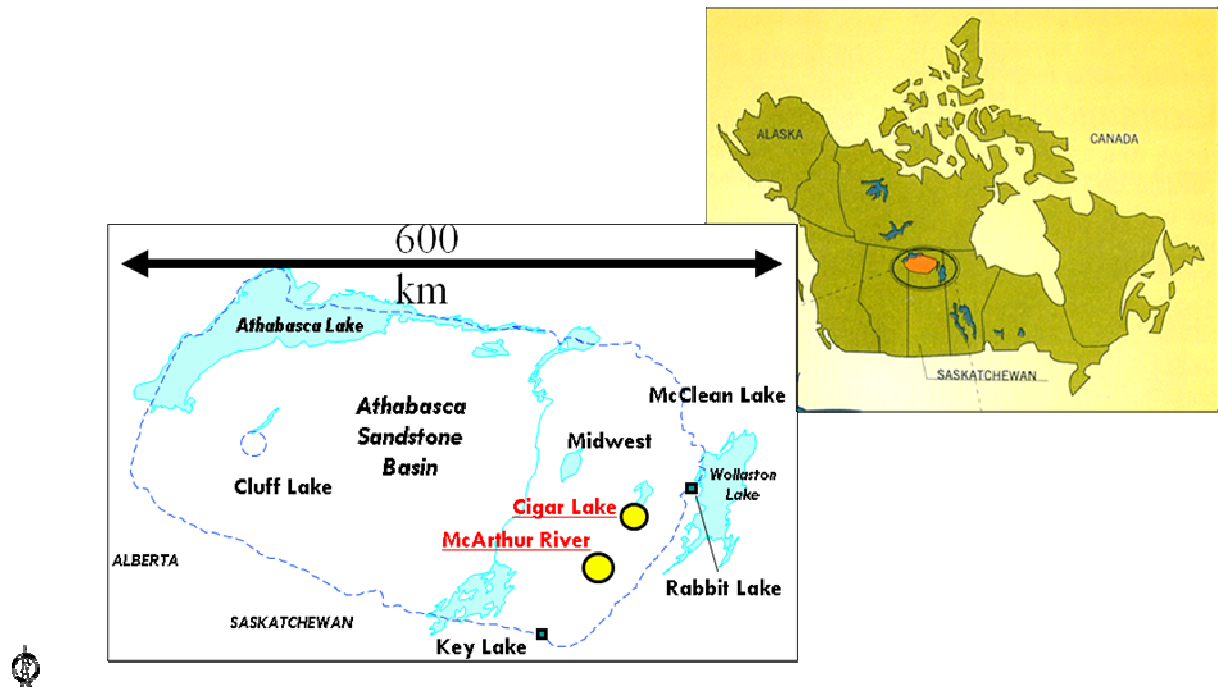


Figure 1 : situation géographique

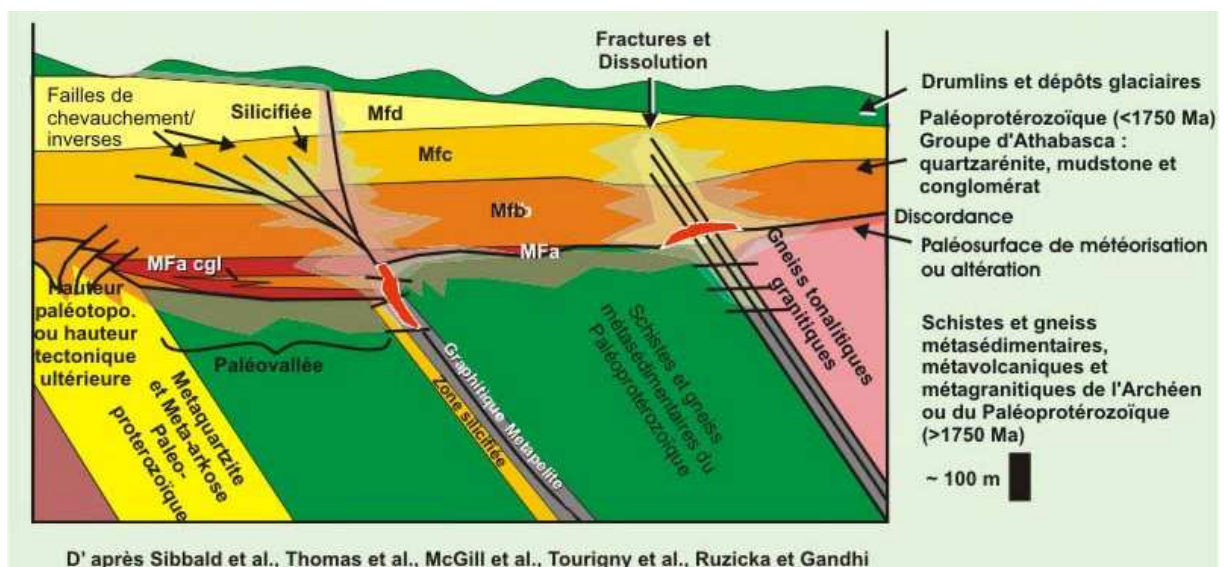


Figure 2 : coupe géologique du bassin d'Athabasca (source : site internet « Ressources naturelles du Canada »)

La formation des deux gisements étudiés s'explique par la rencontre d'un fluide réducteur concentré en uranium en provenance du socle, et d'un fluide oxydant en provenance des couches supérieures. La rencontre de ces deux fluides a tout d'abord provoqué la précipitation de l'uranium dans des pièges structuraux, causant l'apparition de gisements d'une

teneur exceptionnellement élevée (de l'ordre de 20 %.) Mais la seconde conséquence est une altération des roches avoisinantes, ce qui implique que les gisements sont entourés de roches de très faible tenue mécanique.

Les caractéristiques importantes pour l'exploitation de ces gisements sont donc les suivantes : d'abord la profondeur, qui nécessite une méthode d'exploitation en souterrain. Puis la présence d'eau sous une pression hydrostatique forte, qui impose de se prémunir contre les venues d'eau. Ensuite la teneur extrêmement élevée, qui requiert l'emploi de méthodes coûteuses permettant de protéger le personnel et le matériel contre les radiations. Enfin, la très forte altération des roches avoisinantes représente un grand danger pour les ouvrages, à de telles profondeurs et avec la présence d'eau.

1.2.2 La mine de McArthur River

La figure 3 représente le gisement de McArthur River dans lequel AREVA dispose d'une participation, et dont CAMECO est l'opérateur. Il s'agit d'un gisement en amas, situé à environ 530 m de profondeur, ce qui justifie une exploitation en souterrain. En 2006 le tonnage était estimé à 180 kt U_3O_8 avec une teneur moyenne de 21 %. La production en 2004 était de 8,4 kt U_3O_8 soit environ 20 % de la production mondiale (*Areva Resources Canada, site internet*). Ce dernier chiffre illustre l'importance d'une telle mine et la nécessité de la continuité de son exploitation.

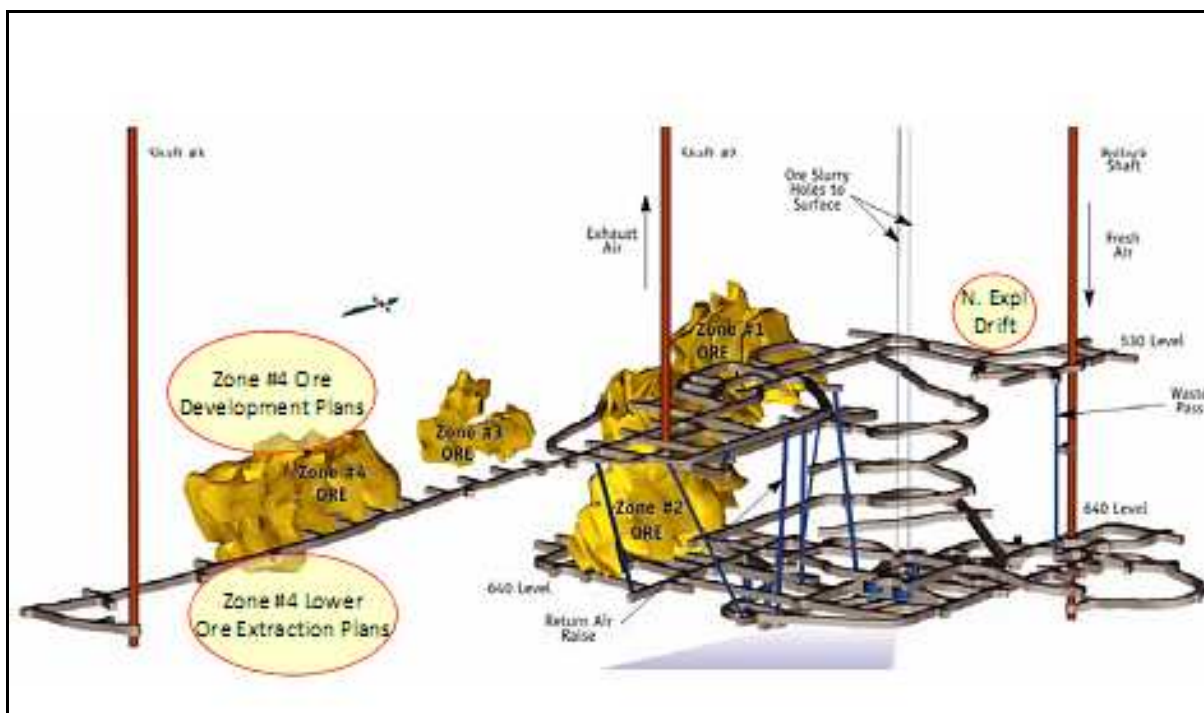


Figure 3 : gisement de McArthur River (source : Brummer, 2007)

La méthode d'exploitation retenue pour McArthur River est celle du raiseboring, illustrée par la figure 4. Elle permet de satisfaire aux exigences imposées par le contexte géologique, et son coût élevé est permis par la forte teneur du gisement. Le principe est le suivant : on commence par ouvrir deux galeries, l'une au dessus de la zone minéralisée, l'autre au dessous. À partir de la galerie supérieure, on fore un trou pilote, dans lequel on insère une tige. À l'extrémité de cette tige on fixe une tête d'alésage que l'on fait remonter, ce qui permet d'abattre le minerai. Le minerai tombe vers la galerie inférieure, où on le récupère à l'aide d'engins guidés à distance. Ceci permet d'éviter une trop grande proximité entre le personnel et le minerai. Une fois l'abattage terminé, le trou est comblé, et l'on peut effectuer un autre forage à proximité.

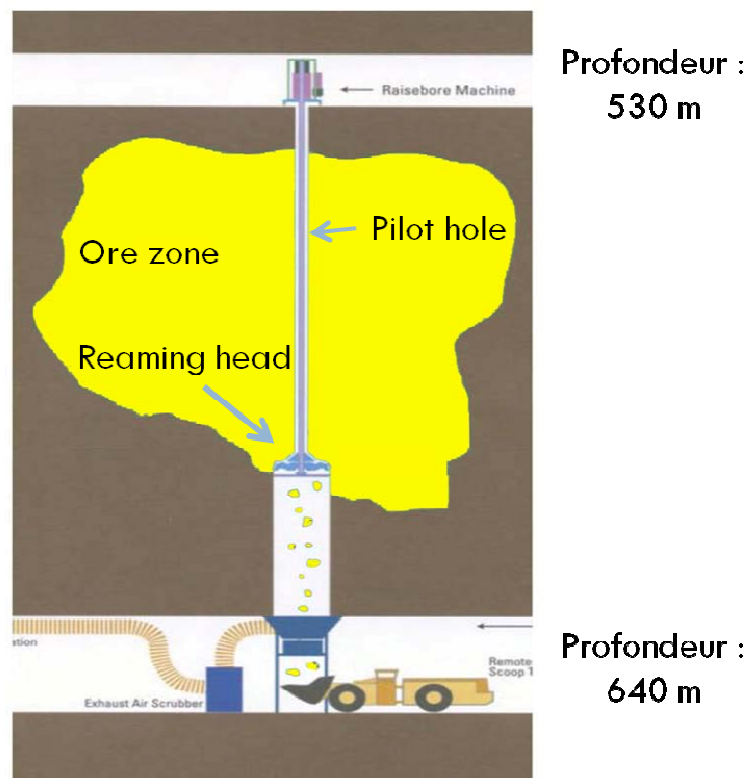


Figure 4 : Méthode du raiseboring (source : *Smith, 2006*)

1.2.3 La mine de Cigar Lake

La figure 5 représente le gisement de Cigar Lake, pour lequel CAMECO est aussi opérateur, et dans lequel AREVA dispose également d'une participation. Il s'agit d'un gisement sous forme de lentille situé à environ 450 m de profondeur, ce qui implique encore une exploitation en souterrain. Le tonnage est estimé à 100 kt U_3O_8 avec une teneur moyenne de 20,7 %. La production prévue une fois l'exploitation lancée serait de 8 kt U_3O_8 par an. On distingue sur la figure 5 que les ouvrages destinés à l'exploitation de la mine sont tous situés

9

d'exploitation. Depuis ce niveau est mise en œuvre la méthode du jetboring. Cette méthode consiste à réaliser un forage depuis la galerie vers la zone minéralisée, et à utiliser un jet d'eau sous pression partant de ce forage pour abattre le minerai. Celui-ci descend alors avec l'eau sous forme de pulpe. On obtient ainsi un abattage sous la forme approximative d'un cylindre, que l'on rebouche par injection de béton avant d'abattre un cylindre voisin. Le niveau inférieur est appelé « niveau de congélation » et permet la mise en œuvre de la technique de congélation des terrains.

Le développement de cette mine a connu plusieurs étapes, et l'impossibilité actuelle de l'exploiter illustre bien les difficultés qui se présentent dans ce contexte géologique particulier, ainsi que les lourdes conséquences qu'elles peuvent avoir. Les premières reconnaissances ont été effectuées dès le début des années 1980. En 1989 et 1990 a été foré le premier puits. Les premiers essais miniers ont eu lieu en 1991 et 1992. Ensuite a eu lieu le creusement du second puits. En 1999 a eu lieu un incident au niveau 465, causant la perte du tunnelier utilisé jusqu'alors. Le creusement a repris en septembre 2006, mais en octobre 2006 la mine a été ennoyée suite à un effondrement.

1.3 La technique de congélation

Cet effondrement à Cigar Lake et l'ennoyage qui s'en est suivi montrent l'attention qu'il faut porter à la faible tenue mécanique des roches traversées par les galeries, mais surtout à la présence d'eau. Cette eau est sous une pression telle que les galeries sont dans la même situation qu'un sous-marin en plongée. La technique de congélation des terrains offre un moyen de se prémunir contre ces difficultés grâce à ses deux effets. Le premier, le plus important, est de rendre le terrain congelé étanche grâce à la présence de glace bouchant ses pores. Le second effet, plus incertain, est de renforcer la roche congelée.

1.3.1 Mise en œuvre : principe

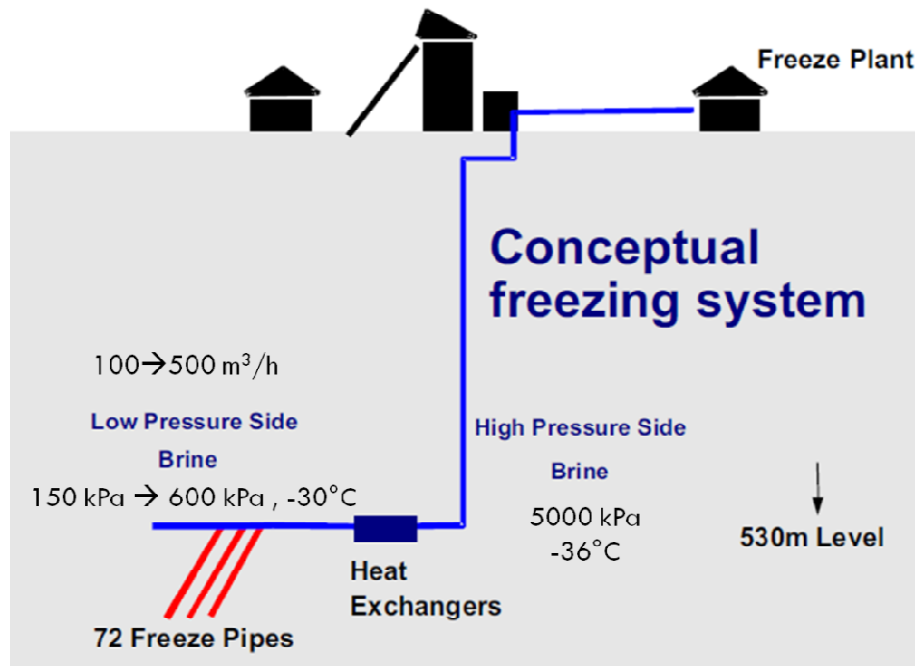


Figure 7 : principe de la mise en œuvre de la congélation (source : Newman, Geoanalysis2000)

Cette mise en œuvre est décrite pour McArthur River par Newman (Geoanalysis2000) et résumée par la figure 7. Une usine de congélation est implantée à la surface. Cette usine refroidit la saumure à une température de -36°C , qui descend vers la zone exploitée en circulant dans un circuit primaire. La pression dans ce circuit primaire est une pression hydrostatique de l'ordre de 50 bar. Afin d'éviter de faire circuler un fluide sous une si forte pression dans la mine, un échangeur de chaleur est placé entre ce circuit primaire et un circuit secondaire. Dans le circuit secondaire, la pression est limitée à 6 bar et la température à -30°C . C'est de ce circuit que partent les tuyaux de congélation, dont la disposition diffère selon la mine considérée.

1.3.2 Mise en œuvre à McArthur River

Les tuyaux sont utilisés par nappes pour former des murs de congélation. La figure 8 montre comment les murs ainsi formés permettent d'isoler la zone minéralisée et les ouvrages de l'aquifère voisin. Afin d'assurer l'étanchéité des murs, même en cas de défaillance d'un tuyau, on en place un tous les 2 m, ce qui impose une installation lourde. La figure 9, qui est une photographie d'une galerie d'où partent les tuyaux de congélation, donne une idée de cette lourdeur.

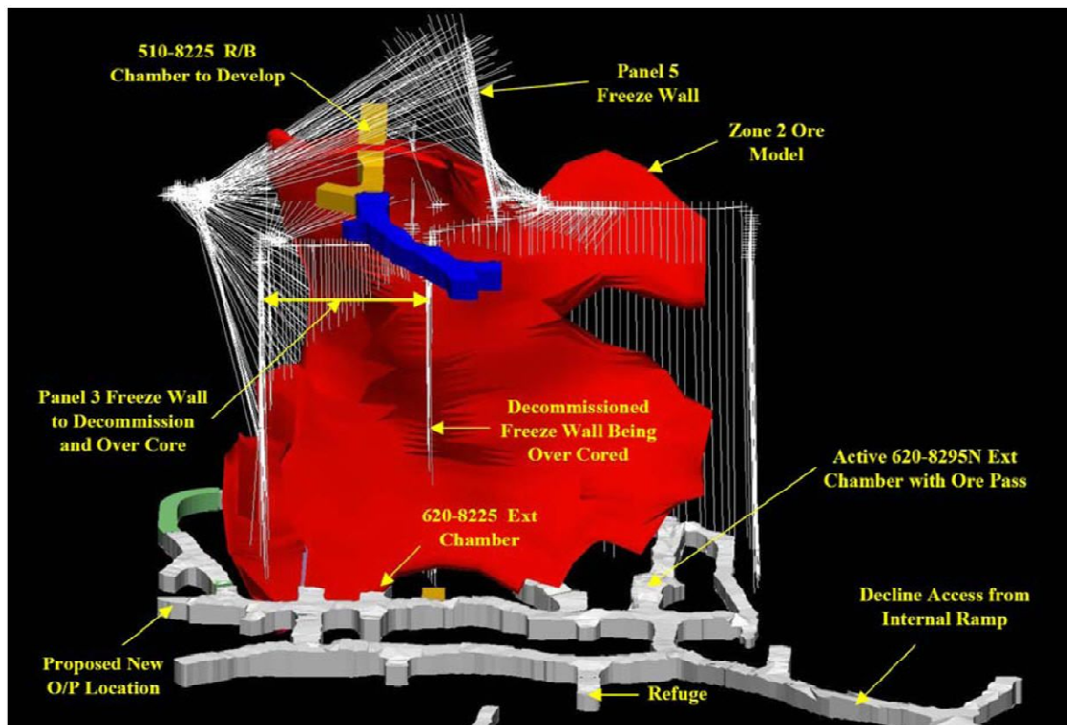


Figure 8 : plans de congélation à McArthur River (source : CAMECO)

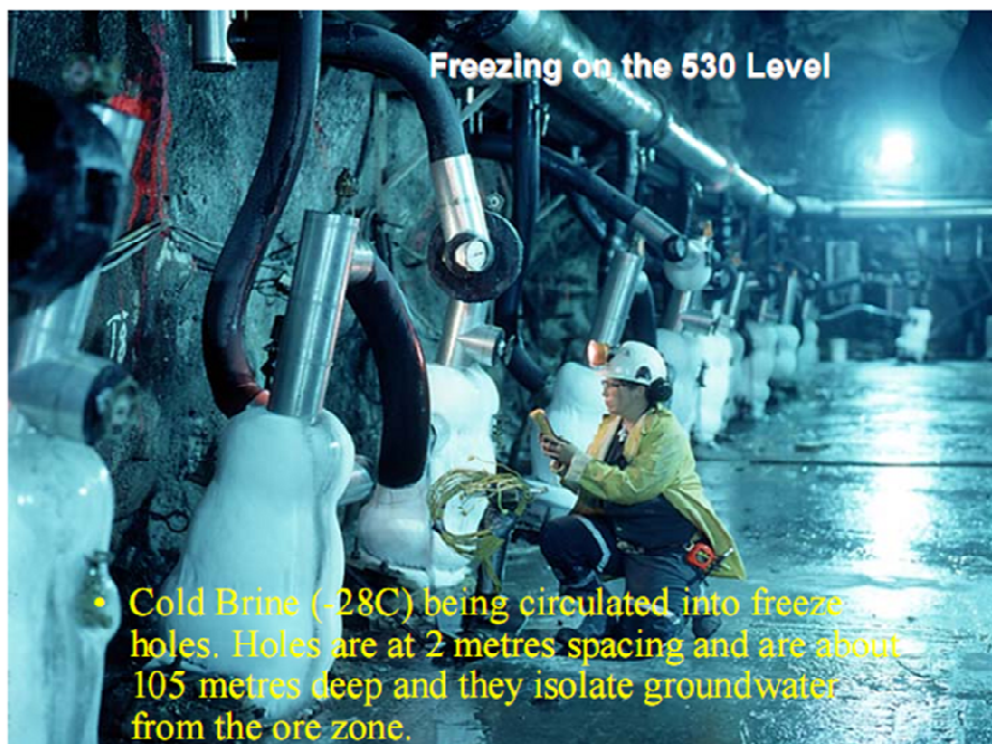


Figure 9 : départ des tuyaux de congélation à McArthur River (source : Smith, 2006)

1.3.3 Mise en œuvre à Cigar Lake

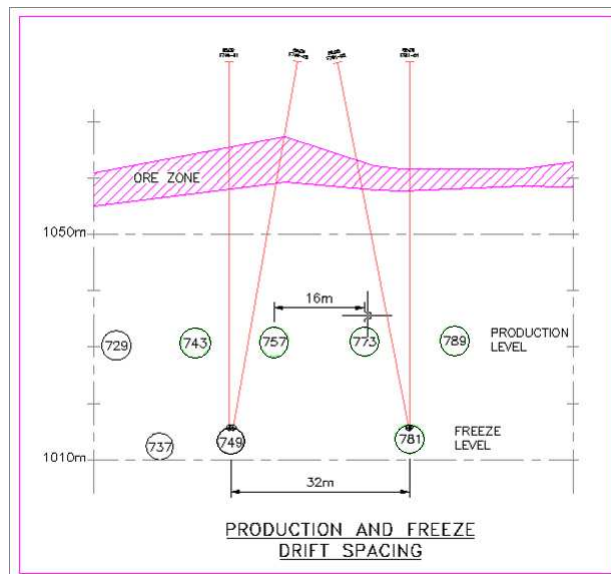


Figure 10 : coupe à Cigar Lake, schéma de congélation (source : CAMECO, 2004)

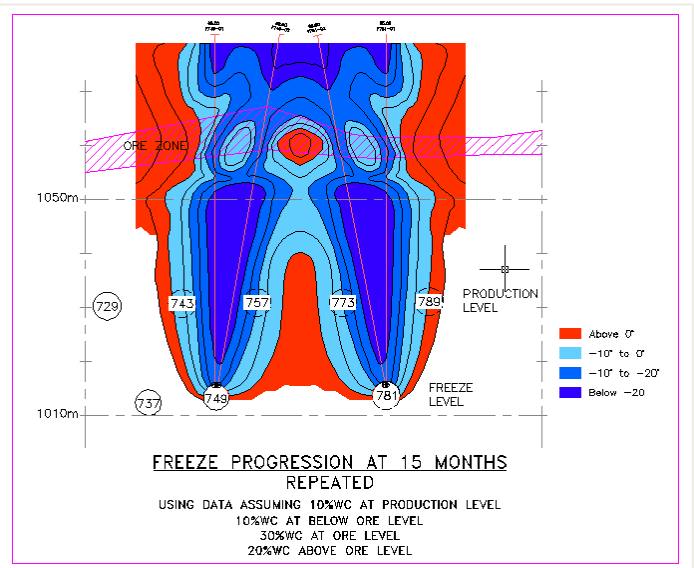


Figure 11 : carte des températures (source : CAMECO, 2004)

A Cigar Lake le principe est légèrement différent, ce qui est dû en particulier à la régularité des galeries d'exploitation et à l'impossibilité d'ouvrir une galerie proche du gisement sans congeler. On commence donc par creuser des niveaux de congélation suffisamment en dessous de l'aquifère et du minerai pour éviter toute venue d'eau. De ces galeries, on fait partir deux faisceaux de tuyaux de congélation (en rouge sur la figure 10), qui vont permettre de congeler non seulement le dessus de la zone minéralisée, mais également tout le niveau de production. On évite ainsi toute venue d'eau malgré l'altération et la fissuration poussées de la roche, et l'on peut procéder à l'excavation ou à l'exploitation en sécurité. La figure 11 donne la carte des températures après 15 mois de congélation. Les zones apparaissant en bleu sont à des températures négatives, ce qui permet de considérer qu'elles sont étanches.

1.3.4 Problématique

La technique de congélation est employée de manière courante, mais ses effets mécaniques sont encore mal connus. On a présenté l'éventualité d'un renforcement de la roche grâce à la congélation, mais celle-ci peut également avoir un effet négatif sur la stabilité des ouvrages dans les mines où elle est mise en œuvre.

Comment déterminer l'influence de la congélation sur cette stabilité des ouvrages ? Ce travail a tenté d'apporter des éléments de réponse selon la méthode suivante. Il s'agit d'abord de poser le problème thermique et le problème mécanique et d'identifier les paramètres à modéliser, tout en s'attachant à obtenir des données in-situ et à les analyser. Ces éléments

permettront de développer et de valider une approche de modélisation afin de répondre aux exigences opérationnelles les plus urgentes d'AREVA.

2 Synthèse des travaux antérieurs

Afin de poser le problème de l'influence de la congélation sur la stabilité des ouvrages, une première partie de ce travail a été consacrée à une synthèse de différents travaux. Les sources bibliographiques étaient de deux types : d'une part des ouvrages portant sur la congélation des sols en général ou sur la thermomécanique des roches. Il s'agit en particulier de *La thermomécanique des roches* (Berest, Weber, 1988) et de *Comportement thermo-hydro-mécanique des géomatériaux poreux: approches expérimentales et numériques* (Côté, 2003.) D'autre part, il existe des études portant spécifiquement sur les mines étudiées, parmi lesquelles on peut mentionner des études thermiques réalisées par Geoslope ou Geoanalysis2000, des études mécaniques réalisées par les cabinets d'études Parsons-Brinkerhoff et Golder, et enfin un mémoire de « Master of Science » réalisé par T. Smith en 2006.

Nous détaillerons, dans un premier temps, les phénomènes physiques à prendre en compte dans le cadre de cette étude, avant de nous intéresser aux études réalisées par le passé sur les mines de McArthur River et Cigar Lake. Ces études sont d'abord une source de données de laboratoire et in-situ, et proposent ensuite des modèles pour expliquer les mesures. Nous reviendrons donc sur ces mesures avant de décrire leur interprétation.

2.1 Phénomènes physiques liés à la congélation

La congélation provoque trois phénomènes principaux. Le premier, objectif même de ce procédé, est le changement de phase de l'eau en glace (solidification.) Le deuxième phénomène est une variation des caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux étudiés. On constate enfin des mouvements d'eau provoqués par la congélation. Nous décrirons ces phénomènes, dont on ne prendra en compte que certains aspects dans les modélisations effectuées afin de simplifier les problèmes posés.

2.1.1 La solidification de l'eau

Dans des conditions normales de température et de pression, l'eau change de phase à 0°C avec une chaleur latente de changement de phase :

$$L_{\text{solidification}} = -L_{\text{fusion}} = -337 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Mais ce phénomène est rendu plus complexe par différents paramètres du problème. Il faut, dans un premier temps, prendre en compte la variation de la température de fusion selon la pression, mais aussi selon les diverses substances dissoutes dans l'eau (par exemple des sels). Par ailleurs, lorsque l'eau est à l'intérieur d'un matériau poreux, le changement de phase n'est pas isotherme : l'eau se solidifie au fur et à mesure que la température baisse. On peut ainsi évaluer une fraction d'eau non gelée en fonction de la température.

Côté (2003) mentionne ainsi différents paramètres ayant une influence sur la fraction d'eau non-gelée : l'aire interne du matériau poreux, la constante diélectrique du liquide, sa tension superficielle et sa salinité, ou encore la minéralogie du matériau poreux. Cette fraction d'eau non-gelée est en effet localisée sur la paroi des pores, avec une épaisseur allant de 100 Å à 1000 Å. On a ainsi les ordres de grandeur suivants de la température à laquelle la totalité de l'eau est gelée :

Granite : -3°C

Grès : -20°C

Certaines argiles : -130°C (par exemple l'argile de Boom contient encore entre 5 % et 10 % d'eau non gelée à -20°C.)

2.1.2 Les modifications des propriétés thermiques et mécaniques

Les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux considérés (massif rocheux et eau) varient avec la température, et, en ce qui concerne l'eau, sont discontinues lors du changement de phase.

Les propriétés thermiques considérées sont la conductivité thermique λ et la capacité thermique c . Il faut principalement tenir compte de la différence des valeurs entre l'eau liquide et la glace.

Les propriétés mécaniques étudiées ne sont pas les mêmes selon le modèle utilisé pour décrire les matériaux. On peut, en guise d'exemple, citer la masse volumique ρ . La diminution de température entraîne une contraction. Pour les matériaux isotropes, on peut évaluer cette contraction en utilisant un coefficient linéaire de dilatation thermique α , tel que pour un élément de longueur l_0 la variation de longueur soit : $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$. α varie également selon la température : ce coefficient diminue avec T pour les roches peu poreuses. On peut aussi considérer des dilatations thermiques anisotropes avec un coefficient matriciel. Ces variations de masse volumique sont à l'origine d'une fracturation thermique, en particulier quand la roche est peu élastique.

Cependant lors du refroidissement, l'eau liquide se dilate dès 4°C, et lors du changement de phase. Au point de congélation, l'eau passe d'une masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ à $\rho = 916,8 \text{ kg.m}^{-3}$ ce qui équivaut à un gonflement de l'ordre de 9 %.

Ces variations causent un couplage entre mécanique et thermique (par exemple : le mouvement provoqué par le gonflement a une influence sur la conduction thermique) qui est très faible dans le cas des solides.

Dans les roches viscoplastiques, la température a une influence prépondérante. En effet la vitesse de déformation viscoplastique est une fonction croissante de la température, en suivant la loi d'Arrhenius. Ceci signifie que la viscosité diminue rapidement quand la température augmente.

2.1.3 Les mouvements d'eau

Dans les milieux poreux, les mouvements d'eau ont une influence sur le problème thermique et le problème mécanique. Il existe donc un fort couplage entre ces phénomènes. La vitesse des écoulements dans un massif dépend de la perméabilité de ce massif. Il est non seulement nécessaire qu'il soit poreux, mais encore que les pores communiquent entre eux.

On peut tout d'abord distinguer les écoulements par gravité. D'autres mouvements d'eau sont provoqués par convection thermique. Cette circulation convective peut devenir dominante dans le problème thermique car la diffusion thermique est très lente. Enfin, le changement de phase induit une variation de pression qui provoque une aspiration de l'eau non-gelée. Cette variation de pression est décrite par l'équation de Clausius-Clapeyron :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_{eau}} - \frac{1}{\rho_{glace}} \right) \cdot T}$$

Ce phénomène est appelé succion cryogénique. Cette succion conduit à la formation de lentilles de glace lorsque l'eau est aspirée vers le front de gel et se solidifie, ce qui a des conséquences mécaniques notables. Ainsi la figure 12 montre cet effet dans le cas d'un sol. La formation des lentilles dépend des propriétés du matériau poreux et des conditions locales. D'après Sheng et Knutsson (1993), les paramètres les plus importants sont la pression géostatique, le gradient de température, la teneur en eau non-gelée dans la frange gelée (en deçà du front de gel) et la perméabilité du sol.

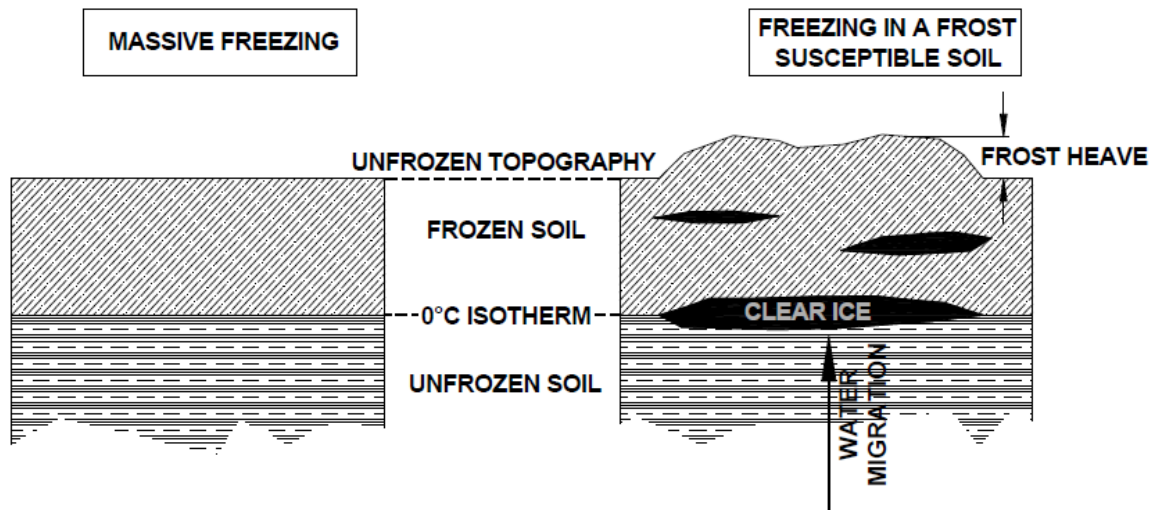


Figure 122 : illustration de la formation de lentilles de glace (source : *Smith, 2006*)

Plus la pression géostatique est forte, moins il y aura formation de lentilles de glace. Ceci s'explique par la nécessité de fissurer la roche pour que la glace occupe ces volumes, ce qui demande une pression d'autant plus forte que la pression de confinement est grande. Côté (2003) exprime la nécessité d'une pression effective nulle.

Un fort gradient de température favorise la formation de lentilles de glace, de même que la perméabilité et la teneur en eau non-gelée dans la zone gelée.

2.2 Études réalisées : mesures

Plusieurs études ont été réalisées par le passé sur la congélation et ces effets dans les mines de Cigar Lake et McArthur River. Ces études, de différentes natures, comportent, d'une part, un volet expérimental, constitué de mesures effectuées en laboratoire ou in-situ, et d'autre part, un volet théorique qui propose une interprétation des données recueillies. Nous allons donc examiner plusieurs études disponibles en nous intéressant d'abord aux données expérimentales, avant de nous pencher sur leur interprétation. Il s'agit ici non seulement de suivre la méthode employée dans ces études, qui consiste à interpréter des données, mais aussi de repérer les données exploitables dans le cadre de ce travail. En effet, le cadre imposé empêchant toute campagne expérimentale, l'évaluation de tout modèle proposé devra reposer sur des données acquises auparavant.

2.2.1 Cigar Lake : Parsons-Brinkerhoff (2007)

Il s'agit ici d'un rapport qui utilise des données obtenues en 1991 et 1992 et un modèle thermomécanique datant de 1999. Ces données reflètent à la fois l'influence de la congélation et de l'excavation. Elles sont donc manifestement difficiles à interpréter.

2.2.2 Cigar Lake : Golder (2000)

Il s'agit ici de l'étude réalisée par le cabinet d'études Golder (*Beddoes, Moffitt, 2000.*) Au cours de cette étude ont été réalisées des mesures en laboratoire et des mesures in-situ.

2.2.2.1 Données de laboratoire

Les données de laboratoire sont destinées à déterminer les propriétés des roches environnant les ouvrages. Cette étude commence par une analyse de calage pour les terrains non gelés. Il s'agit de grès altéré, d'argile ou de minéral, et de trois catégories de roche du socle, classées selon leurs propriétés mécaniques. Pour ces roches, Golder détermine plusieurs propriétés mécaniques en laboratoire : l'angle de frottement, la cohésion, le module élastique, le coefficient de Poisson, et la résistance en compression simple. Ces propriétés font ensuite l'objet d'un calage, qui conduit à modifier légèrement leur valeur.

Par ailleurs, Golder évalue la teneur en eau des différentes roches. Pour cela sont utilisées des données obtenues en laboratoire mentionnées dans la littérature, ainsi que des tests effectués par Golder pour l'une des catégories de roche du socle.

Golder propose enfin une évaluation des propriétés de la roche congelée, mais sans réaliser d'essai en laboratoire. Les estimations sont fondées sur des données obtenues dans la littérature pour d'autres terrains. Il s'agit en l'occurrence de silts tels que le silt de Hanovre, ou d'argile (argile de Suffield). On détermine pour ces matériaux la résistance en compression simple et E_{50} , le module élastique tangentiel à 50 % de la compression simple maximale. Ceci est réalisé pour plusieurs températures négatives, de -1°C à -20°C . À partir de ces données, Golder estime les propriétés des roches présentes à Cigar Lake pour $T > -10^{\circ}\text{C}$ et $T < -10^{\circ}\text{C}$. Les résultats obtenus sont reproduits à la figure 13.

	Moisture Content (%)	E (GPa)		Friction Angle, ϕ (degrees)		Cohesion, c (MPa)		Calculated UCS (MPa)	
		>-10°C	<-10°C	>-10°C	<-10°C	>-10°C	<-10°C	>-10°C	<-10°C
RM1	17	1.25	1.5	34	34	0.9	1.4	3.4	5.3
RM2	12	2.25	2.5	40	40	1.0	1.5	4.3	6.4
Clay/Ore	30	1.25	1.5	25	25	2.2	2.8	6.9	8.8
Sandstone	10	Unfrozen properties							

Figure 13 : propriétés des roches congelées (source : *Beddoes, Moffitt, 2000*)

En raison de la méthode employée pour les obtenir, ces résultats sont discutables. Ils sont en effet établis à partir de résultats obtenus sur des matériaux différents sans aucune vérification. Pour pallier cet inconvénient, Golder mentionne une campagne d'essais à venir. Mais il n'a pas été possible d'obtenir les résultats de cette hypothétique campagne d'essais.

2.2.2.2 Données in-situ

On dispose de résultats d'instrumentation pour les anneaux 109 et 124 situés dans la recoupe 749 (niveau de congélation.) Ces deux anneaux sont situés dans deux types de roches différents (respectivement RM1 et RM2.) Les résultats sont utilisés pour effectuer un calage du modèle dans les terrains non gelés. Ils consistent en des mesures de convergence et de contrainte radiale et sont présentées comme fiables. On dispose des mesures de convergence pour ces deux anneaux. L'instrumentation mise en place à Cigar Lake n'est pas décrite dans le détail. On se réfèrera donc à *Hatley, Smith (2007.)*

Une fois ce calage effectué, Golder utilise les paramètres obtenus pour modéliser l'effet de l'excavation de la recoupe 749 sur la recoupe 737, et compare les résultats du calcul à des mesures effectuées sur les anneaux 36 et 54.

On dispose également de données sur les contraintes radiales, grâce à des cellules de mesure installées de part et d'autre de la galerie, et sur la convergence dans la recoupe 713 (niveau de production.) D'après Golder, ce sont les meilleures pour évaluer les contraintes induites par la congélation. Sur trois cellules de mesure, on n'obtient pas de contrainte sensible, et les résultats de la quatrième sont illustrés par la figure 14.

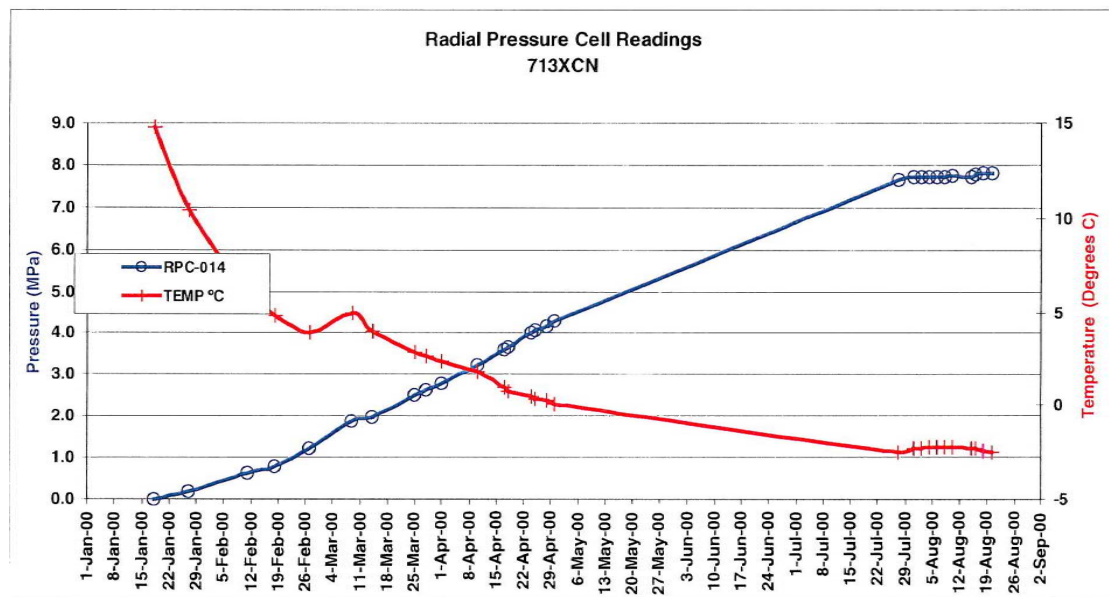


Figure 14 : température et pression radiale à la cellule 14 (source : Beddoes, Moffitt, 2000)

Les ordres de grandeur obtenus sont les suivants pour la cellule de mesure mentionnée dans ce paragraphe :

- Contrainte radiale dans le soutènement : **4 MPa**
- Convergence : **23 mm**

2.2.2.3 Conclusions

On dispose donc bien de quelques mesures à Cigar Lake. Cependant les mesures de laboratoire sont très peu nombreuses et ne concernent que la roche non congelée. Pour ce qui est des mesures in situ, deux problèmes se posent. Le premier est que les mesures effectuées sur les recoupes de congélation ne permettent pas de distinguer les effets de l'excavation et de la congélation. Ceci est dû à une contrainte opérationnelle, et il y a donc peu d'espoir de trouver mieux. Le deuxième problème est le manque de fiabilité des mesures à cause de l'instrumentation elle-même. Il s'agit donc de détailler cette instrumentation.

2.2.3 Cigar Lake : Hatley (2007)

2.2.3.1 Nature de l'instrumentation à Cigar Lake

Dans une présentation réalisée en février 2007 (*Hatley, Smith, 2007*), J. Hatley donne un exemple d'instrumentation mise en œuvre à Cigar Lake. Il s'agit des mesures réalisées sur l'anneau 36 de la recoupe 737.

Cette instrumentation consiste en des cellules de mesure de la pression radiale, des cellules de mesure de la pression longitudinale, et en une mesure de la convergence. Le dispositif est précisé à la figure 15.

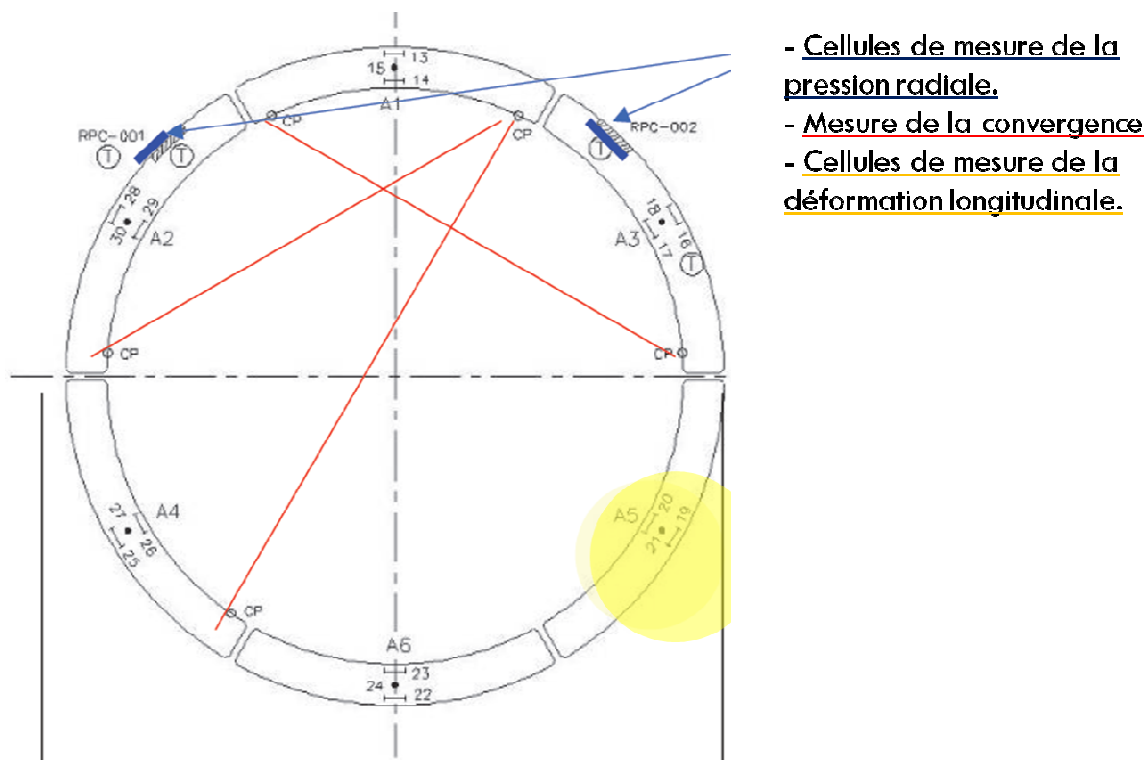


Figure 15 : instrumentation à Cigar Lake (source : *Hatley, Smith, 2007*)

2.2.3.2 Défaits de l'instrumentation

Il convient tout d'abord de mentionner le manque de fiabilité des cellules de mesure de pressions. On peut en effet considérer que ces instruments n'ont jamais fait leurs preuves pour ce qui est de fournir des résultats quantitatifs fiables.

La seule mesure fiable est donc celle de la convergence. Or la figure 15 montre que la mesure de la convergence n'a pas été faite de manière complète, car le dispositif est asymétrique.

Il semble donc que les données obtenues à Cigar Lake sont soit peu fiables, soit incomplètes. Ceci a pour conséquence pratique qu'il faut, dans la mesure du possible, éviter de les exploiter dans le cadre de ce travail.

2.2.3.3 Résultats

On obtient des valeurs de la convergence, de la pression extérieure, de la contrainte radiale dans le soutènement et du moment fléchissant en fonction du temps au cours des années 1998 à 2001. Les ordres de grandeur sont les suivants :

- Pression extérieure : **3,4 MPa**
- Contrainte radiale : **27,4 MPa**
- Moment fléchissant : **$\pm 0,3 \text{ MN.m.m}^{-1}$**

2.2.4 McArthur River : Smith (2006)

2.2.4.1 Données de laboratoire

Les données de laboratoire concernent la roche à proximité de la recoupe 530-8030N (cas d'étude n°2.) On dispose de données sur la porosité et la saturation de plusieurs échantillons à différentes distances de la galerie ainsi que de leurs caractéristiques lithologiques. Les valeurs mesurées de la saturation ont conduit T. Smith à faire l'hypothèse que la roche est toujours saturée. La porosité varie de 2 % à 12 %.

On ne dispose ensuite des propriétés mécaniques que de deux échantillons. À partir de ces deux échantillons, T. Smith détermine la résistance en compression simple, les constantes élastiques E et ν , et le coefficient de dilatation thermique. Elle utilise pour cela un essai de compression simple avec drainage.

Du fait du peu de représentativité de ces quelques mesures, T. Smith utilise des paramètres obtenus dans la littérature pour la modélisation qu'elle propose par la suite.

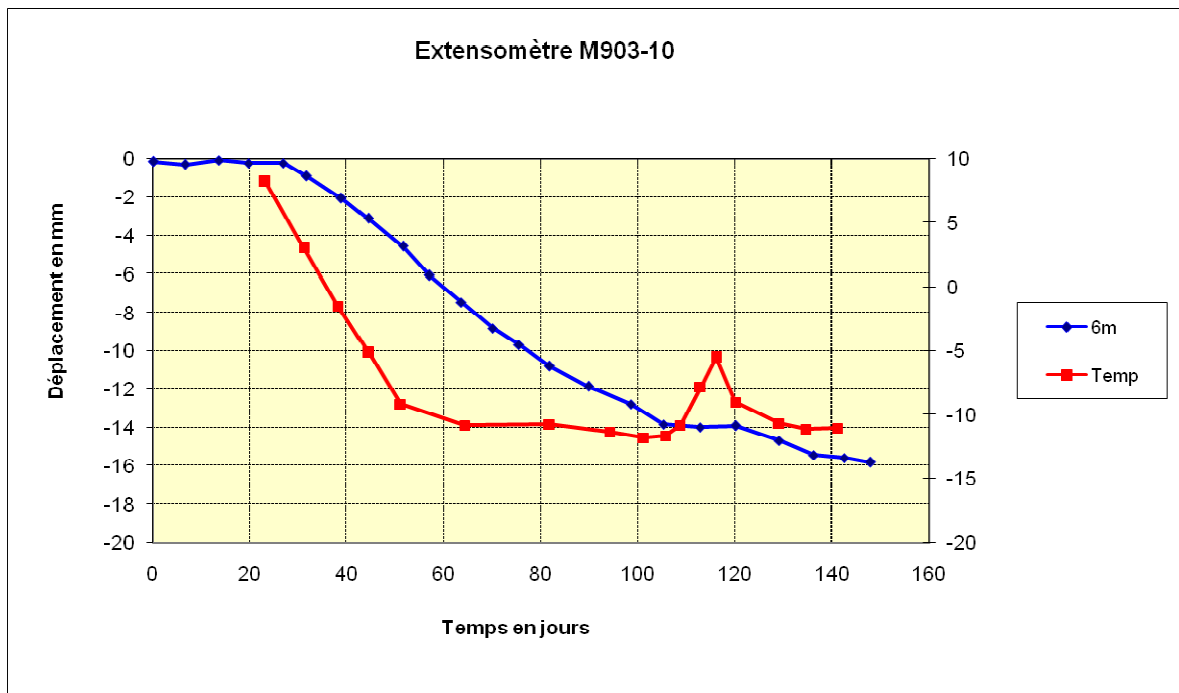
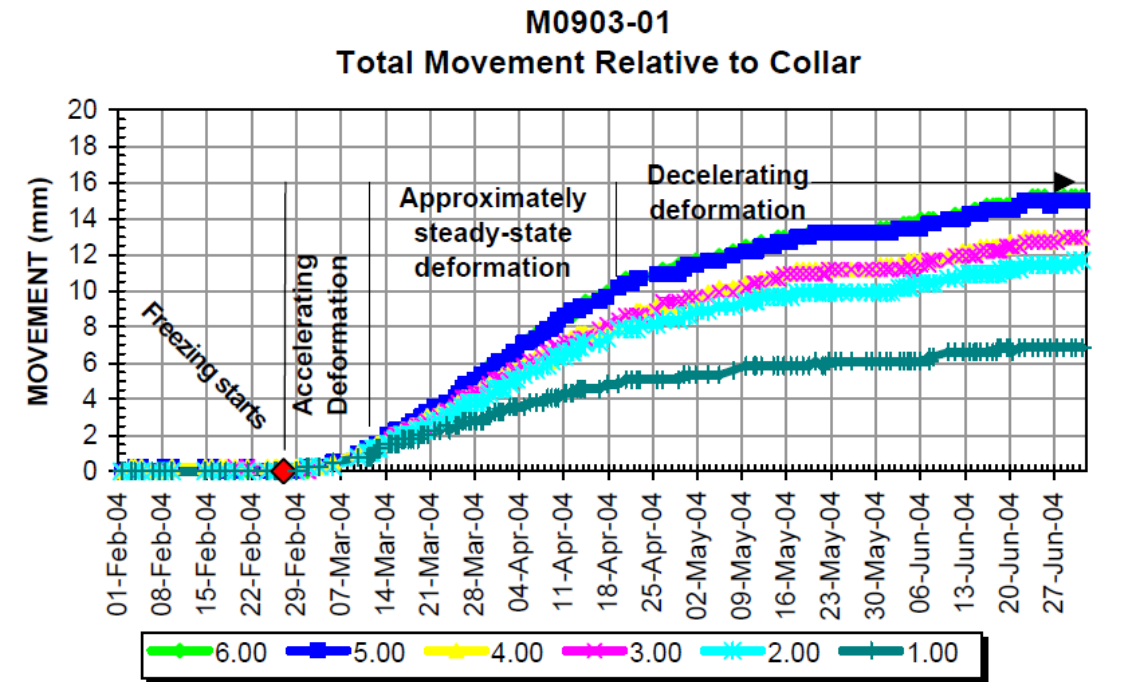
2.2.4.2 Données in-situ

2.2.4.2.1 Cas d'étude n°1

Ce cas correspond à la recoupe de congélation 530-7310E, de laquelle part un faisceau de tuyaux de congélation dans le but de former un mur de congélation. À proximité de cette recoupe ont été placés des extensomètres à plusieurs ancrages, et une ligne de thermocouples. On dispose ainsi de mesures de la température et des déformations au cours de la congélation. Cependant ces données sont difficiles à interpréter car de nombreux paramètres n'ont pas été déterminés dans la zone étudiée, par exemple la nature exacte des terrains et leurs paramètres mécaniques, le drainage et l'avancée exacte du front de gel. En outre, la géométrie est extrêmement complexe. Cependant T. Smith identifie une zone d'influence du mur de congélation d'environ 9 m.

On observe dans ce cas une déformation qui s'expliquera par un gonflement de la glace. La figure 16 montre le déplacement des ancrages de l'un des extensomètres par rapport à l'ancrage situé à la paroi de la galerie. On constate tout d'abord que le déplacement est nul avant le début de la congélation. On peut donc considérer que l'effet des excavations s'est déjà dissipé, et que ce que l'on mesure est uniquement dû à la congélation. On peut ensuite remarquer que le déplacement est d'autant plus grand qu'on s'éloigne de la paroi de la galerie. Il connaît en outre plusieurs phases, se terminant par une stabilisation. On peut alors montrer la relation entre congélation et déplacement grâce à la figure 17, représentant la température et le déplacement en fonction du temps (en deux points différents.) On constate tout d'abord que le déplacement commence à apparaître lorsque la congélation commence, et ensuite que le déplacement se stabilise lorsque la congélation s'arrête (la température augmente suite à un incident.)

Ce cas sera étudié plus en détail lorsque l'approche retenue pour ce travail sera développée.



2.2.4.2.2 Cas d'étude n°2

Pour éliminer ou mesurer les paramètres inconnus dans le cas n°1, un nouvel emplacement est choisi pour mener une campagne de mesures. Le but de celle-ci est de

mesurer l'augmentation de contrainte dans le massif au fur et à mesure que le front de gel avance, et de mesurer les déformations qui en résultent. La géométrie est sensiblement plus simple (figure 18). Les instruments utilisés sont donc des extensomètres, une ligne de thermocouples et des jauges de contrainte (qui comprennent aussi des thermistors).

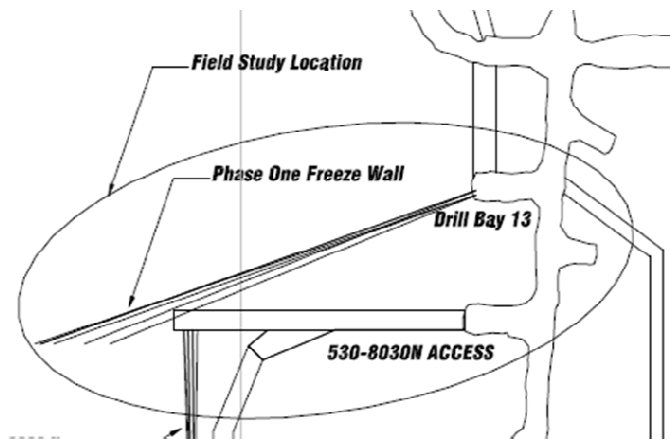


Figure 18 : plan de la zone étudiée au cas n°2 (source : *Smith, 2006*)

Malgré les efforts réalisés, de nombreux instruments de mesure donnent des résultats non fiables. Il en est ainsi des jauges de contrainte qui ne fonctionnent pas à des températures négatives. De même, la plupart des ancrages des extensomètres ne sont pas fiables et donc écartés de l'analyse. En outre les résultats sont étonnants : on observe des déplacements très petits par rapport au cas précédent, et des contraintes de traction au lieu de contraintes de compression. Ainsi la figure 19 montre qu'en dehors d'événements particuliers le déplacement par rapport à la paroi est faible. La figure 20 montre les résultats obtenus par les jauges de contrainte.

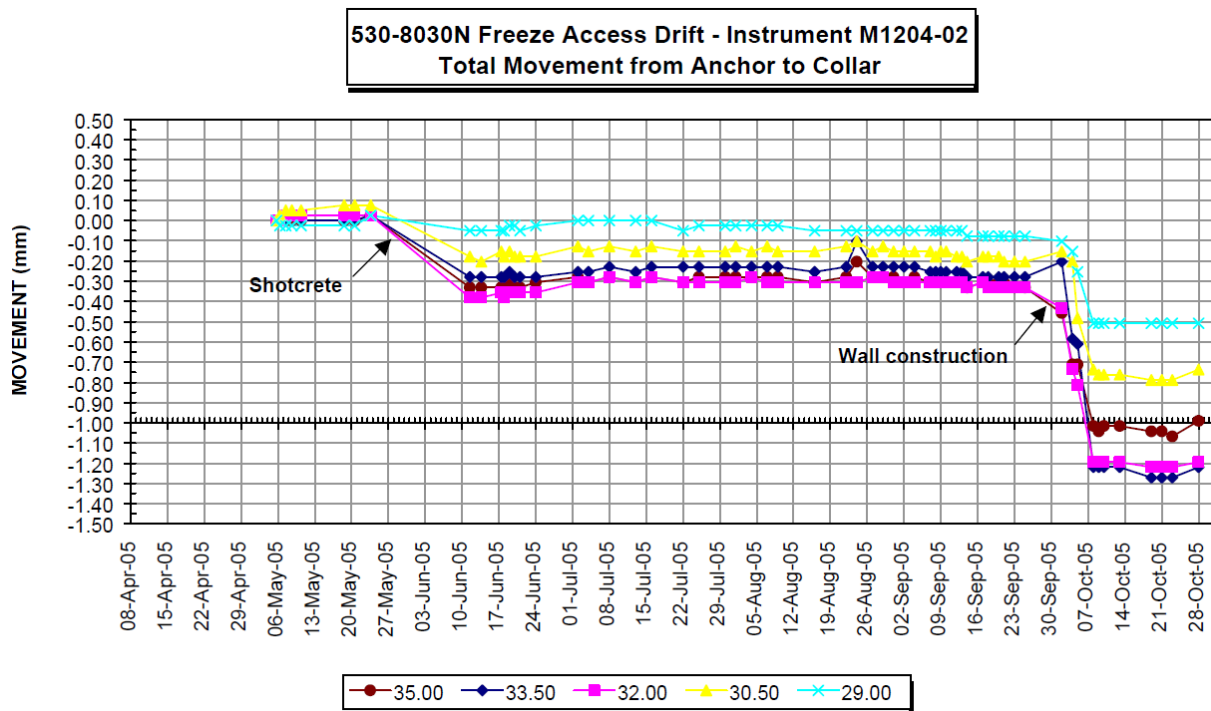


Figure 19 : mesure des déformations dans le cas n°2 (source : *Smith, 2006*)

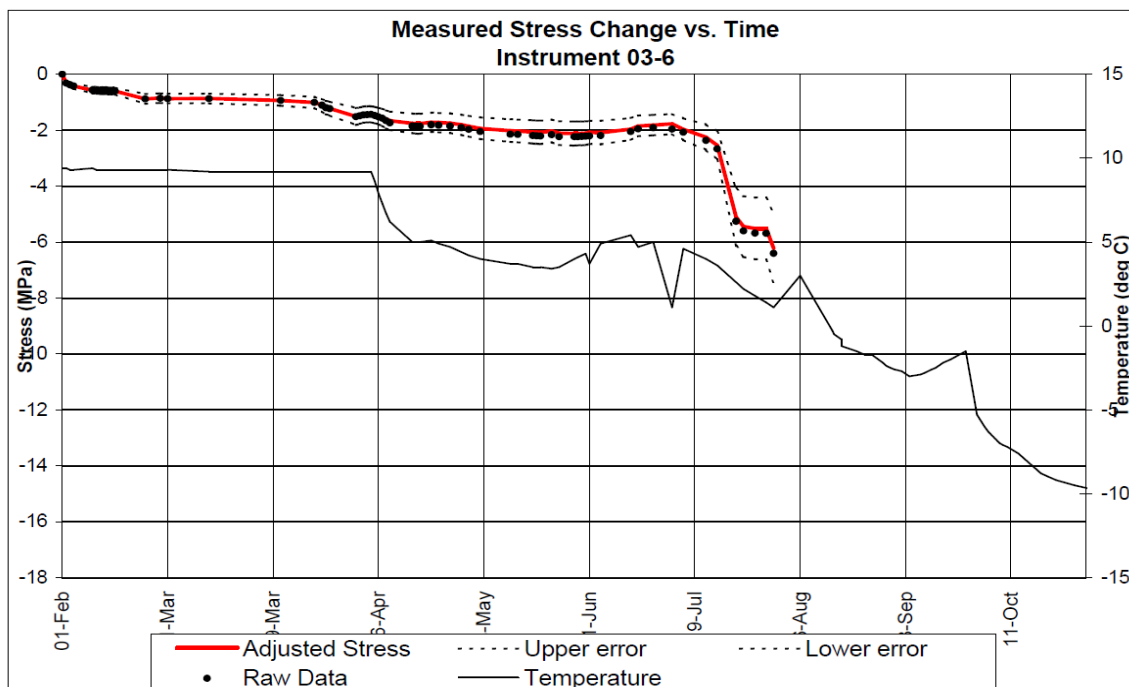


Figure 20 : contrainte et température en fonction du temps (source : *Smith, 2006*)

Il sera par la suite proposé une explication pour un tel comportement (contraction thermique de la roche.) Cependant, même confirmée par l'expérience en d'autres lieux, cette interprétation reste hasardeuse. Ainsi ce cas n°2, malgré une géométrie plus simple et une instrumentation mieux pensée que dans le cas n°1, donne des résultats difficiles à utiliser pour une modélisation ultérieure.

2.2.5 McArthur River : Hatley, Smith (2007)

Cette présentation, réalisée en 2007, présente tout d'abord des mesures de déplacement réalisées dans la continuité du cas n°1 du MSc de T. Smith (*Smith, 2006.*) Les résultats sont représentés sur la figure 21. On constate, malgré de nombreux artefacts, que le déplacement, qui semblait s'être stabilisé, se poursuit néanmoins sans sembler s'arrêter complètement. Ceci évoque la présence d'un éventuel phénomène différé, sur lequel cette présente étude ne se prononcera pas.

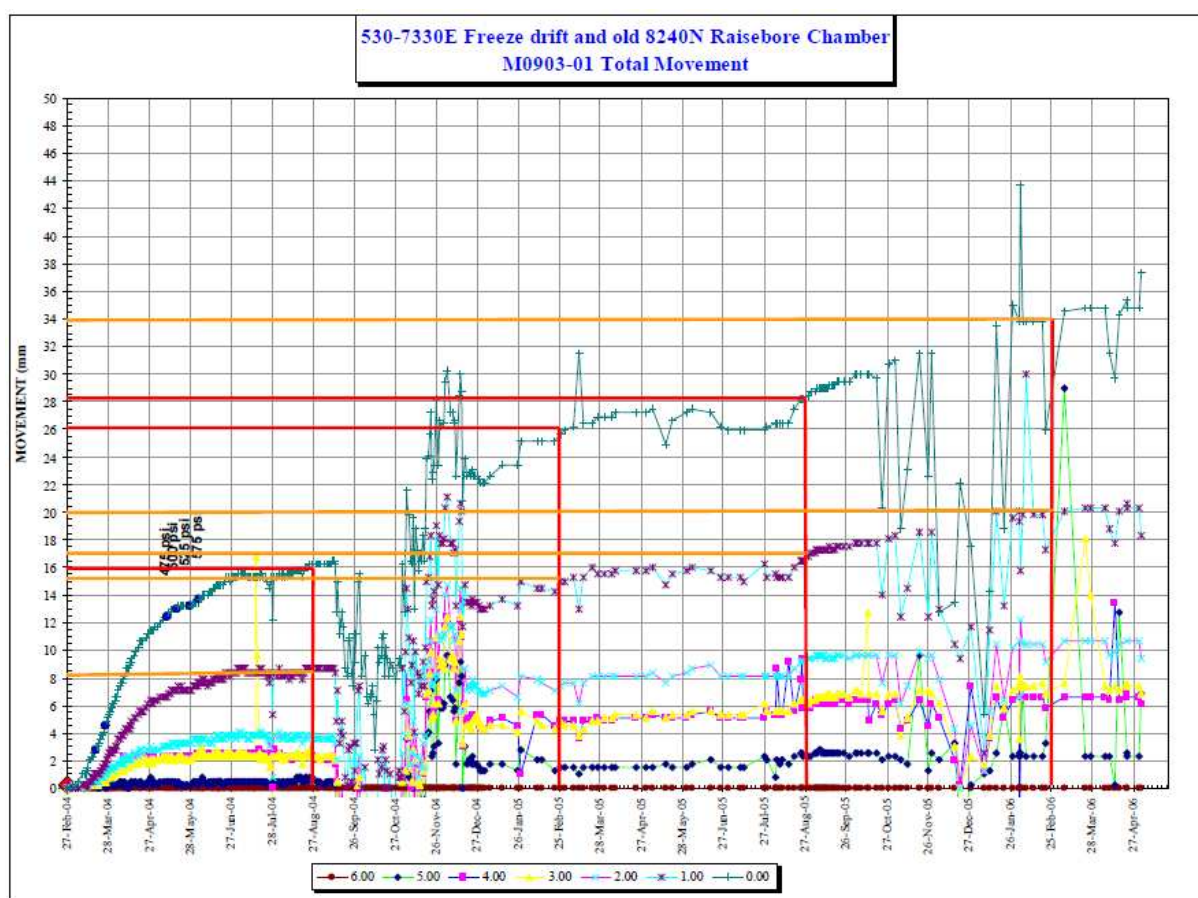


Figure 21 : mesure des déplacements (source : *Hatley, Smith, 2007*)

2.2.6 McArthur River : Brummer (2007)

Dans sa présentation, Brummer évoque des mesures réalisées lors d'une venue d'eau dans la recoupe de congélation 7300E. On ne dispose que de très peu d'éléments, si ce n'est de valeurs de la pression hydrostatique depuis l'aquifère jusqu'à la paroi de la galerie et de ce qui semble être des hypothèses sur l'évolution de cette pression dans l'espace. La figure 22 montre ce type d'information.

Là encore on ne dispose que d'une source d'informations incomplète, et qu'il n'a pas été possible de compléter dans le cadre de ce travail.

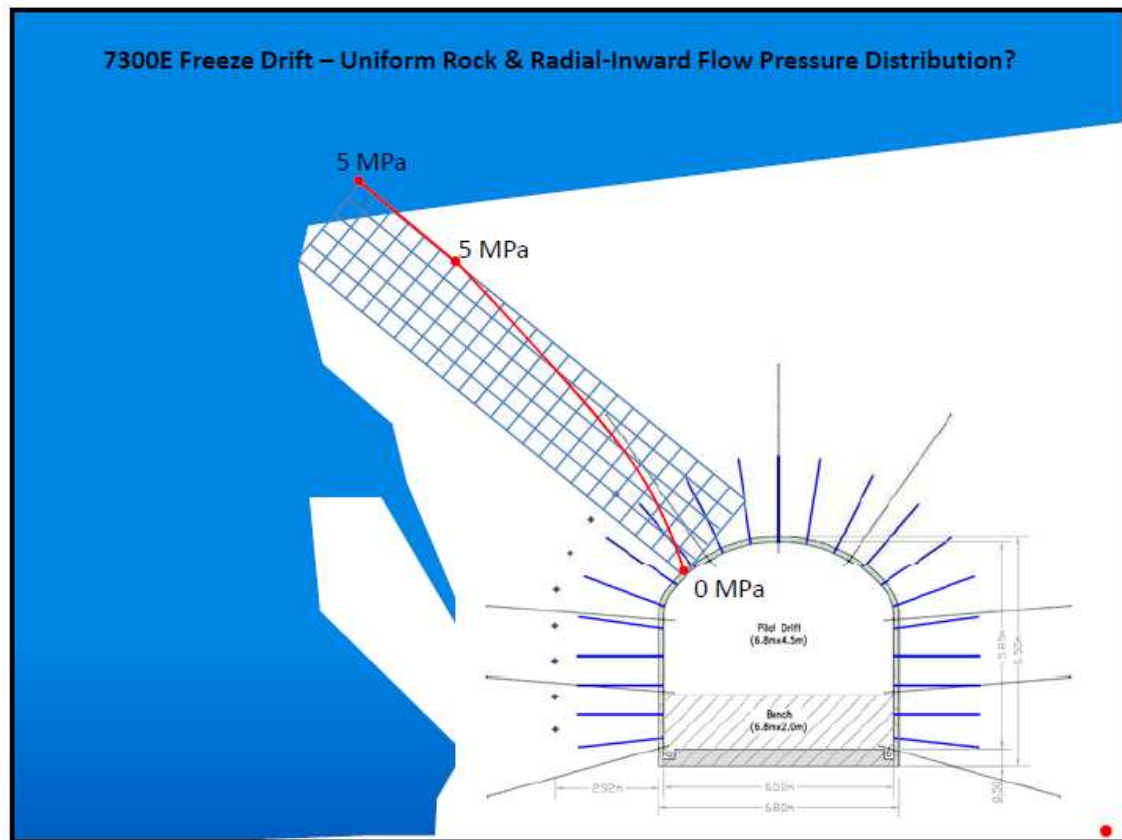


Figure 22 : diapositive donnant des pressions hydrostatiques (source : Brummer, 2007)

2.3 Études réalisées : modèles

Dans certaines des études mentionnées ci-dessus, les auteurs proposent un modèle permettant d'interpréter les mesures et de réaliser des prédictions lors des développements futurs des deux mines considérées. Nous allons donc décrire ces modèles, leurs hypothèses et leurs résultats, afin de comprendre les enjeux et les difficultés du développement d'un modèle propre à cette étude. On peut distinguer deux types d'approche différents : celle des cabinets d'études Golder (*Beddoes, Moffitt, 2000*) et Parsons-Brinkerhoff (2007), et celle de T. Smith (2006). On examinera successivement ces deux types d'approche.

2.3.1 Approches de Golder et Parsons-Brinkerhoff

2.3.1.1 Calcul thermique

Le calcul thermique est un préalable. Parsons-Brinkerhoff (2007, mais l'étude a été réalisée en 1999) le réalise par lui-même avec le logiciel de calcul aux éléments finis FLAC 2D alors que Golder fait appel au cabinet d'études Geoslope. Le résultat est une carte des températures à un temps donné dans le massif, et l'on s'intéresse particulièrement à la position du front de gel.

On peut trouver des informations sur le calcul thermique réalisé par Geoslope dans *Newman* (Geoanalysis 2000) et *Newman* (2006). Le premier de ces documents explique que les valeurs des propriétés thermiques des roches ont été ajustées afin de calibrer le modèle. Le second détaille un peu plus un calcul par éléments finis réalisé pour la mine de Cigar Lake, en décrivant les conditions aux limites et les paramètres utilisés. Cependant on ne dispose pas d'information claire sur la manière dont la chaleur latente de solidification de l'eau a été prise en compte. Le problème est le même pour Parsons-Brinkerhoff, car Beddoes et Moffitt affirment que le logiciel FLAC est peu adapté à la prise en compte de cette chaleur latente.

2.3.1.2 Calcul mécanique : influence de la congélation

C'est dans la manière de prendre en compte la congélation que les approches de Parsons-Brinkerhoff et Golder diffèrent le plus.

Parsons-Brinkerhoff conserve le même maillage pour le calcul mécanique que pour le calcul thermique. Ce qui permet de calculer une valeur du gonflement en fonction de la température sur ce même maillage et d'avoir un calcul mécanique directement lié au calcul thermique.

Cette méthode est considérée par Golder comme trop complexe et peu efficace avec le logiciel utilisé (FLAC). Aussi Beddoes et Moffitt choisissent-ils de séparer calcul thermique et calcul mécanique. Il leur suffit de récupérer les coordonnées du front de gel auprès de Geoslope (un fax est suffisant pour cela !) Ils utilisent ensuite pour les éléments de la zone gelée un pseudo coefficient d'expansion thermique α prenant en compte l'expansion de la glace :

$$\Delta V = 3\alpha(\Delta T) = 0,09 \cdot \Phi$$

Où le facteur 0,09 correspond au gonflement de l'eau dû à la transition de phase et Φ est la porosité. Le coefficient α dépend donc de la teneur en eau de la roche considérée (supposée totalement saturée).

On obtient une carte de températures telle que celle représentée à la figure 23. La zone congelée correspond à ce qui apparaît en rose. On remarque que la frontière de la zone

congelée est en dents de scie, en particulier sur la droite du schéma. Ceci est vraisemblablement dû à un maillage peu dense, et de moins en moins dense au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi de la galerie.

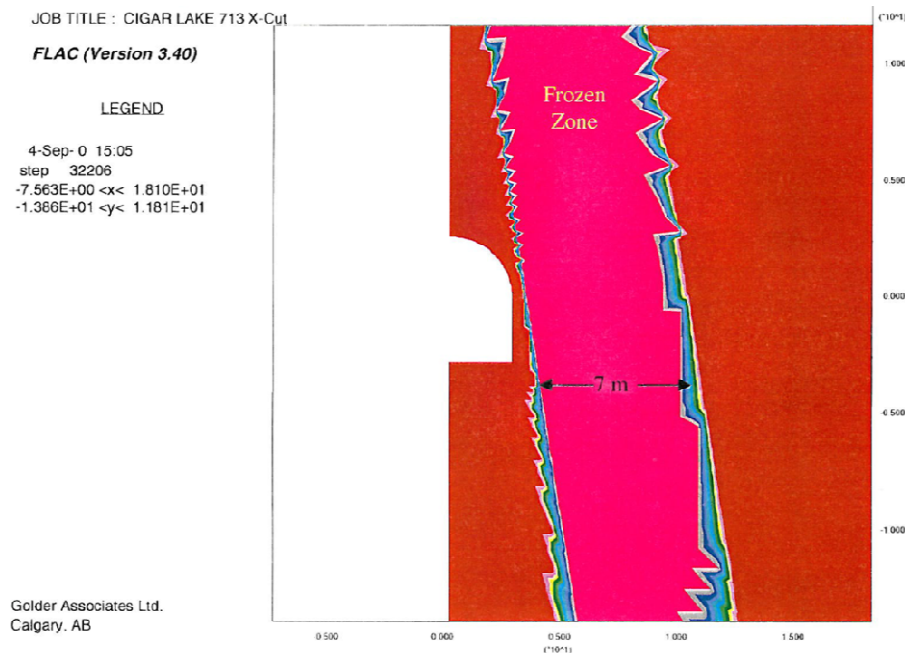


Figure 23 : carte des températures (source : Golder, 2000)

2.3.1.3 Calcul mécanique : hypothèses et résultats

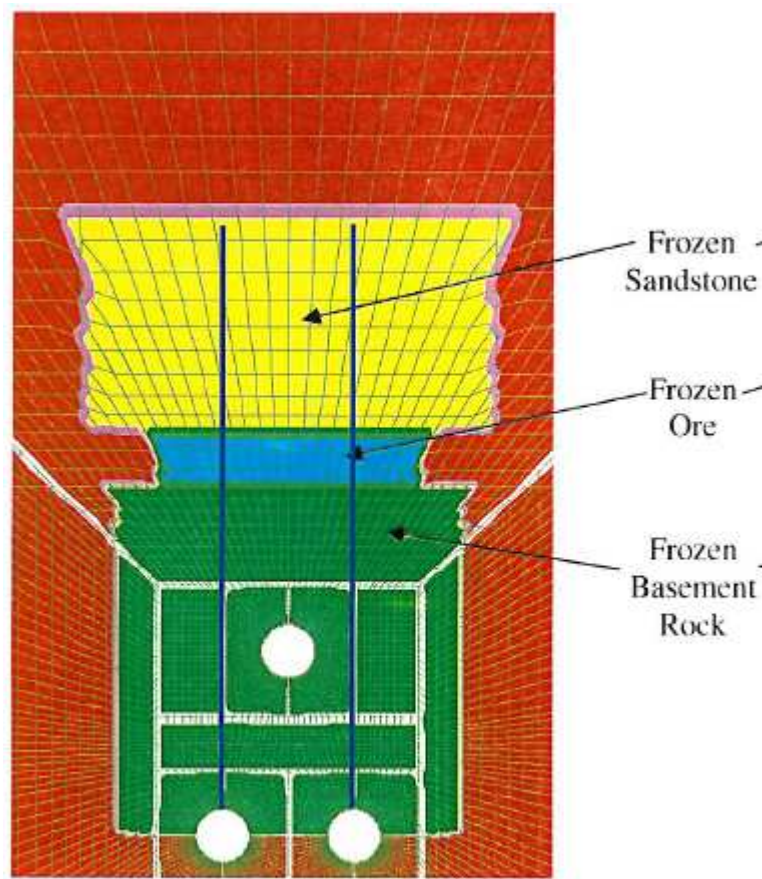
Les deux calculs sont effectués vraisemblablement en thermoélasticité, avec des géométries permettant un calcul en 2 dimensions (plan ou axisymétrique). Quant aux hypothèses portant sur la congélation, on ne prend pas en compte le phénomène de drainage, et donc de succion cryogénique. Ne pas prendre en compte le drainage est une hypothèse qui conduit à des prédictions pessimistes, contrairement à la cryosuccion. On peut néanmoins considérer qu'elle n'a pas lieu en raison des fortes contraintes géostatiques. Une autre hypothèse donnant lieu à des exagérations des contraintes et des déplacements induits par la congélation est celle de l'isotropie de l'expansion de la glace. En effet, la glace aura vraisemblablement tendance à avoir une expansion plus grande dans la direction de la plus petite contrainte principale. La conséquence de cette hypothèse est d'exagérer les variations de contrainte et les déformations dans la direction des plus grandes contraintes principales.

Golder réalise un premier calcul de calage dans le terrain non gelé. Il s'agit d'une rétro analyse sur la recoupe 749 (anneau 109) en utilisant la méthode convergence-confinement avec un modèle en déformations planes. Une étude de la recoupe 737 avec une modélisation axisymétrique permet de déterminer qu'il faut exercer une pression égale à 10% de la pression initiale pour obtenir la convergence mesurée. On applique donc ce pourcentage à la recoupe 749. On obtient des résultats plutôt pessimistes (selon les segments du soutènement) par

rapport aux mesures de contrainte radiale mais du même ordre de grandeur (environ 2 MN.m^{-1} .)

Une méthode similaire est utilisée pour effectuer une rétro analyse de la recoupe 713 au cours de la congélation. La difficulté provient du fait que l'excavation et la congélation ont eu lieu simultanément pour des raisons opérationnelles. La séparation de l'influence des deux phénomènes est donc faite par analogie avec des mesures précédentes : on considère que la convergence horizontale aurait été limitée à 80 mm si elle avait été due à la seule excavation. On utilise alors cette valeur pour évaluer la convergence due uniquement à la congélation.

On peut alors décrire un autre cas : il s'agit du creusement d'une recoupe de production dans un terrain congelé à partir de deux recoupes de congélation. On étudie donc l'influence de la congélation sur ces trois recoupes à court terme (1 an) et à plus long terme (plus de 3 ans.) La figure 24 montre la géométrie du problème. On obtient des valeurs de la contrainte radiale et du moment fléchissant dont l'amplitude semble exagérée : jusqu'à 60 MPa et 1,6 MN.m dans le soutènement des recoupes de congélation. Ces moments fléchissants imposent d'utiliser un soutènement en béton très résistant (70 MPa, voire 110 MPa) et fortement renforcé par de l'acier.



a) Cross-Section at South Side of Orebody

Figure 24 : géométrie du problème à 3 recoupes (source : Golder, 2000)

Une étude ultérieure a pris en compte d'autres données de laboratoire, l'anisotropie de l'expansion de la glace, ainsi que la compressibilité du bois séparant les segments du soutènement.

2.3.1.4 Conclusions

La mine de Cigar Lake présente un avantage majeur pour la modélisation thermique et mécanique : la géométrie des problèmes étudiés est relativement simple et se prête à un calcul plan ou axisymétrique. Les recoupes sont en effet parallèles et de grande longueur.

Cependant les modèles présentés ici présentent plusieurs inconvénients majeurs. Dans le cas de Parsons-Brinkerhoff, Golder signale que le calcul est compliqué car le logiciel utilisé n'est pas adapté. Au contraire le modèle proposé par Golder semble simpliste, tout comme le maillage.

2.3.2 Approche de T. Smith (2006)

Dans son mémoire de MSc, T. Smith propose une interprétation des mesures réalisées auparavant. Elle distingue deux cas : celui où l'expansion de la glace est prédominant, et celui où c'est la contraction thermique de la roche qui prédomine.

2.3.2.1 Expansion de la glace

Ce sont les mesures du cas n°1 qui laissent penser qu'il y a eu expansion de la glace. Là encore le drainage ne sera pas pris en compte. Le premier modèle proposé est la solution analytique correspondant à un cylindre gelé dans un massif infini, étudié en déformations planes et en thermoélasticité. Cependant ce modèle ne tient pas compte de la géométrie complexe du problème.

C'est pourquoi un calcul numérique est réalisé. On commence par déterminer la position du front de gel grâce aux mesures du thermocouple. On prend alors en compte une déformation uniquement dans la zone gelée, égale à l'expansion de la glace (9%) multipliée par la porosité. La méthode consiste ensuite à appliquer de manière itérative des conditions aux limites en tractions ou en déplacements qui vont provoquer la déformation recherchée. Ce modèle est mis en œuvre grâce à un calcul aux éléments finis en 2 dimensions, avec une géométrie axisymétrique. La géométrie retenue est présentée à la figure 25.

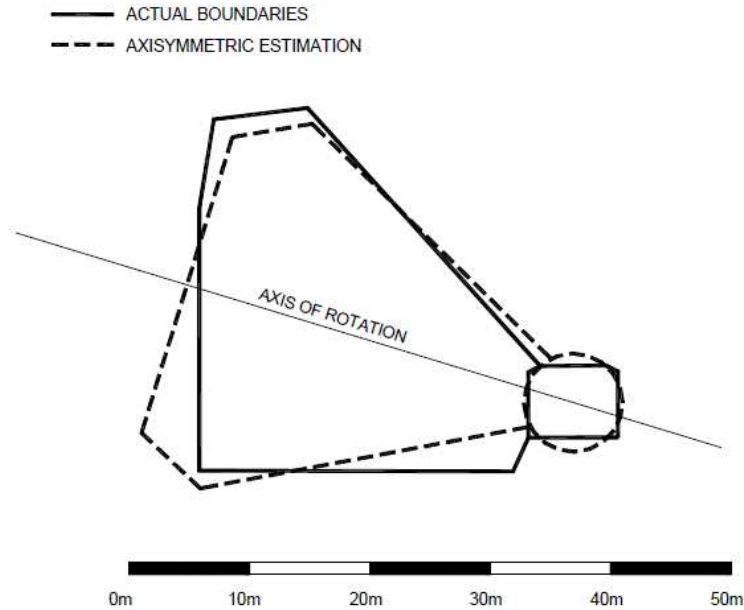


Figure 25 : géométrie utilisée pour la modélisation du cas n°2 (source : *Smith, 2006*)

Pour le cas n°1, les valeurs du déplacement obtenues par le calcul suivent la même tendance que les valeurs mesurées, mais sont d'une amplitude plus grande. Ceci peut être expliqué par une porosité plus faible. Les conditions aux limites pourraient être ajustées pour obtenir des résultats plus en conformité avec les mesures, mais T. Smith considère que les résultats qualitatifs montrent que c'est bien l'expansion de la glace qui est à l'origine des déplacements constatés.

Elle vérifie ensuite que ce ne peut pas être le cas pour le cas n°2 car en réalisant un calcul similaire on obtient des résultats aberrants.

2.3.2.2 Contraction thermique de la roche

Ce sont les mesures du cas n°2 qui évoquent la possibilité de la prédominance de la contraction thermique de la roche. Pour mettre en évidence les conséquences de ce phénomène, on adoptera à nouveau un modèle thermoélastique.

Le but n'étant pas de s'intéresser au calcul thermique, un modèle empirique de répartition des températures est proposé, valable uniquement dans le cas n°2. On utilise les valeurs de la température pour obtenir la déformation thermoélastique utilisée par le logiciel de calcul.

Les résultats obtenus ne correspondent pas précisément aux mesures, mais les ordres de grandeur sont comparables. Une explication proposée est la fracturation du massif, qui affecterait la distribution des contraintes. La présence d'excavations à proximité contribuerait également à la diminution de l'amplitude des déformations mesurées.

Ces résultats permettent à T. Smith de conclure qu'il est probable que ce soit la contraction thermique de la roche qui soit la cause des déplacements mesurés dans le cas n°2.

2.3.2.3 Conclusions

Les méthodes employées par T. Smith correspondent à des cas particuliers et ne sont pas suffisamment détaillées pour être reprises dans le cadre de ce travail.

2.3.3 Utilisation de ces résultats et méthode retenue

Pour atteindre l'objectif de ce travail, il faut mettre en place un modèle que l'on puisse vérifier grâce à des mesures in-situ. Le type de modèle qui semble le plus rigoureux est celui utilisé par Parsons-Brinkerhoff, sous réserve que l'on parviendra à bien prendre en compte la chaleur latente et l'expansion de la glace. On a vu par ailleurs que la géométrie des cas étudiés à Cigar Lake était plutôt favorable, mais que les résultats de mesures n'étaient pas fiables. Il en est de même pour le cas d'étude n°2 de T. Smith, qui correspondrait à un cas trop rare de contraction thermique prédominante. Aussi va-t-on s'intéresser au seul cas qui semble présenter des résultats de mesure fiables : le cas n°1 de l'étude de T. Smith (2006.)

3 Approche thermique et mécanique développée

3.1 Mise en place du modèle et étude d'un cas simple

Avant de nous intéresser à une étude de cas réel, il a fallu mettre au point la méthode de calcul adaptée aux logiciels CHEF et VIPLEF. Ces deux codes de calcul aux éléments finis ont été développés par M. TIJANI (ENSMP). CHEF (CHaleur par Éléments Finis) permet de réaliser les calculs thermiques, alors que VIPLEF (VIsco-PLasticité par Éléments Finis) sert aux calculs mécaniques. Ces deux codes permettent des calculs en deux dimensions. Le maillage a été réalisé grâce au logiciel DELOS, développé par O. STAB (ENSMP).

3.1.1 Définition de la géométrie

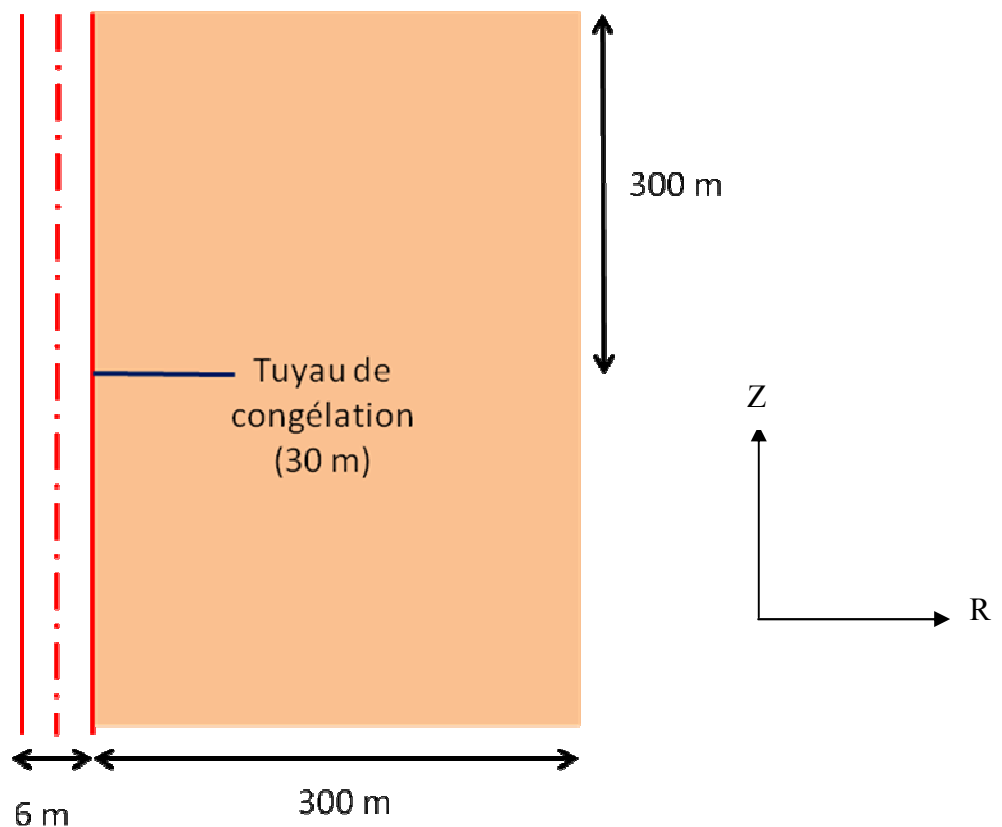


Figure 26 : géométrie

La géométrie que l'on cherche à représenter est représentée à la figure 26 : il s'agit d'une galerie de section circulaire et de rayon 3 m dans un massif infini et homogène. On choisit donc une représentation axisymétrique selon l'axe de la galerie (O, Z). On étudiera

donc un unique plan (R, Z) et grâce à la symétrie du problème on peut n'étudier qu'un demi-plan.

On place ensuite, dans un plan orthogonal à l'axe de la galerie une « collerette » de tuyaux de congélation, de rayon 30 m, qui n'apparaît dans le demi-plan (R, Z) que sous la forme d'un segment.

Étant données les dimensions de la galerie et la longueur des « tuyaux de congélation » les limites du domaine étudié ont été fixées à 300 m. On a ainsi $R_{max} = 303$ m et $Z_{max} = 300$ m. Il conviendra de vérifier que cette distance est une bonne représentation de l'infini, aussi bien pour le calcul thermique que pour le calcul mécanique.

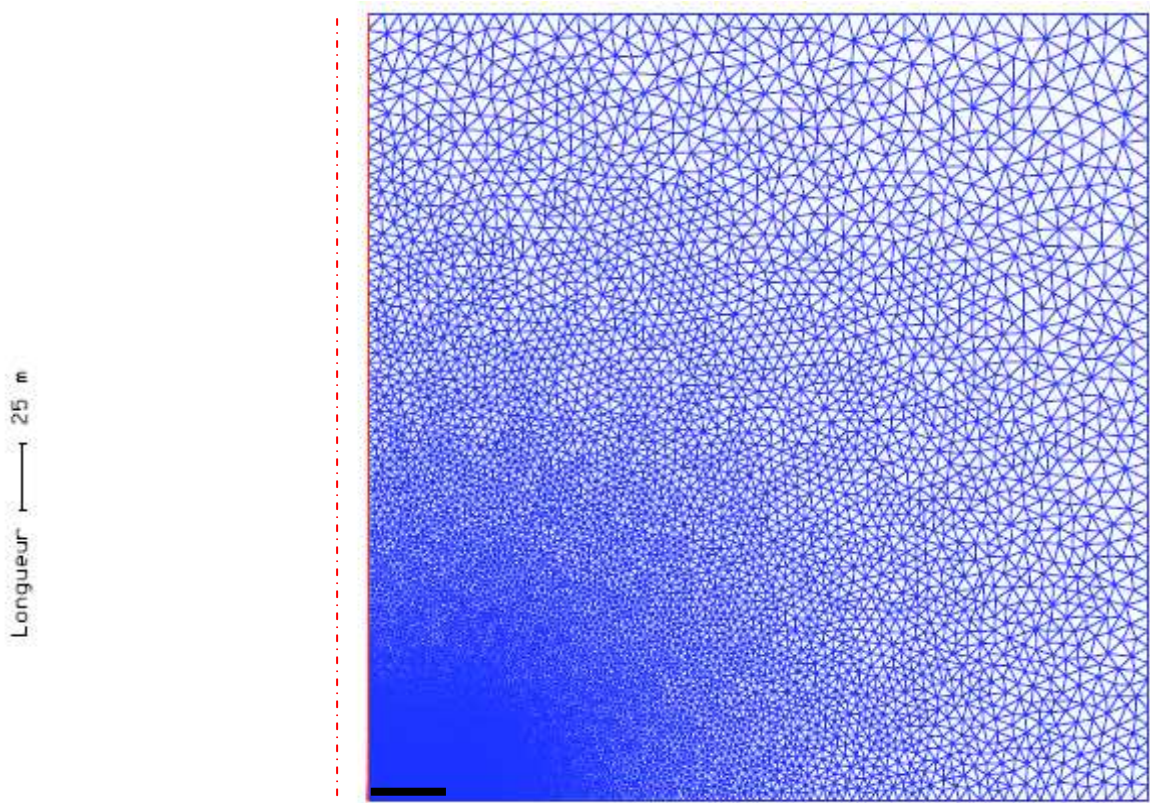


Figure 27 : Maillage, cas d'une galerie et d'un forage

Après un premier essai, il est apparu que les mailles situées à proximité du tuyau de congélation devaient avoir pour dimension maximale 0,5 m, afin que l'avancée du front de congélation soit réaliste (des gradients de température trop élevés provoquent des irrégularités dans l'avancée du front). Ceci correspond à l'ordre de grandeur de la distance caractéristique l , obtenue en considérant la diffusivité thermique D et la durée d'un pas de temps τ .

$$l = \sqrt{D * \tau}$$

On réalise donc un maillage resserré autour du tuyau de congélation, tel qu'il apparaît sur la figure 27. On a surligné en noir le tuyau de congélation, en rouge la paroi de la galerie, et représenté (sans respecter l'échelle) l'axe de symétrie du problème avec un trait rouge discontinu.

3.1.2 Calcul thermique

Une fois le maillage réalisé, on utilise le logiciel *Unitov2* pour convertir le fichier qui contient la géométrie en un fichier lisible par CHEF. On complète alors ce fichier de données pour y poser le problème considéré.

3.1.2.1 Fichier de données

Des parties de ce fichier de données sont placées en annexe 1.

3.1.2.1.1 Bloc coordonnées des nœuds.

Celles des nœuds situés dans la roche ont été générées automatiquement par *Unitov2* mais il faut rajouter manuellement celles des nœuds correspondant à l'air. On ajoute ainsi des nœuds ayant les mêmes coordonnées que ceux de la paroi de la galerie, afin de permettre la mise en place d'un échange thermique surfacique entre ces deux surfaces identiques.

3.1.2.1.2 Bloc caractéristiques des matériaux.

Les matériaux en présence sont la roche (identique dans tout le massif) et l'air de la galerie. Les caractéristiques thermiques de la roche seront détaillées plus loin, dans une modification du programme CHEFCAL. Comme il s'agit d'un matériau conducteur on se contente d'indiquer une conductivité thermique isotrope et une capacité thermique volumique unitaires. Quand à l'air de la galerie, on le modélise par un échangeur surfacique. Le flux thermique surfacique vérifie :

$$\Phi = k(T_s - T_e)$$

Où : k est le coefficient d'échange dont on fournit la valeur.

T_s est la température de la surface du matériau en contact avec l'échangeur (la roche).

T_e est la température de l'échangeur.

On adopte la valeur $k = 12,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ qui est celle d'un sol abrité du vent (Thiers et Peuportier, 2007). On convertit cette valeur pour adopter le jour comme unité de temps. On obtient : $k = 1088640 \text{ J.j}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

3.1.2.1.3 Bloc emplacement des matériaux.

Les éléments situés dans le massif rocheux ont été générés automatiquement par le logiciel Unitov2 mais il a fallu rajouter manuellement les éléments en 2 dimensions et de degré 2 correspondant à l'air. C'est dans ce bloc que l'on déclare qu'il s'agit d'éléments d'échange surfacique.

3.1.2.1.4 Bloc liaisons.

On déclare dans ce bloc les nœuds auxquels on impose une température. On impose ainsi :

TIMP sur les nœuds correspondant au tuyau de congélation.

TMAX aux limites du massif correspondant à l'infini, c'est-à-dire $R = 303 \text{ m}$ et $Z = 300 \text{ m}$.

La valeur de ces chargements sera indiquée au bloc suivant.

Pour modéliser fidèlement le problème concret d'un tuyau de congélation dans un massif rocheux, il n'est pas évident qu'il faille imposer une température et non un flux thermique. Cependant Newman (2006) confirme qu'après 1 à 2 mois le flux thermique est contrôlé par la roche plus que par le tuyau de congélation.

3.1.2.1.5 Bloc chargements.

On déclare deux chargements distincts TIMP et TMAX. À chacun de ces chargements on associe une valeur C, et un facteur de chargement P qui décrit son évolution dans le temps. On a ainsi pour un chargement i : $T_i(t) = C_i \cdot P_i(t)$.

Dans ce bloc on fournit uniquement la valeur C. Ici on a :

TIMP : chargement 1. $C_1 = 1$

TMAX : chargement 2. $C_2 = 15$

Les facteurs de chargement P_i seront fournis dans un fichier décrivant l'historique des chargements. P_2 sera toujours égal à 1 car la température de l'air et la température à l'infini seront toujours de 15°C . On y introduira en revanche la valeur réelle de P_1 pour obtenir une variation de la température du tuyau de congélation avec le temps.

3.1.2.1.6 Bloc températures initiales.

On impose une température égale à 15°C à tous les nœuds au temps $T_0 = 0$

On indique aussi la valeur initiale des facteurs de chargement : $P_1(0) = 15$ et $P_2(0) = 1$

3.1.2.2 Historique, calcul et édition des résultats.

Dans un fichier fourni à CHEF on indique à la fois l'historique du chargement, les conditions de calcul et d'édition des résultats. Ce fichier est placé en annexe 2.

Le temps final est pris égal à 730 j , soit deux ans. Tout au long de cette durée, la température TMAX reste à 15°C et le facteur de chargement correspondant est $P_2(t) = 1$. Quant à la température imposée sur le tuyau de congélation on la fait d'abord décroître exponentiellement pendant 8 jours suivant la fonction $P_1(t) = 45 \cdot e^{-\frac{t}{8}} - 30$

Ensuite on la fait décroître linéairement pendant 2 jours, avant de se stabiliser à -30°C pour tout le reste du calcul.

Durant les 10 premiers jours on prend un pas de temps égal à $0,2\text{ j}$. À chaque pas de temps, on indique la valeur du facteur de chargement correspondant à la fonction ci-dessus. Le pas de modification des caractéristiques thermiques ainsi que le pas d'édition des résultats sont égaux au pas de temps. Pour toute la suite du calcul, ces pas seront de $0,5\text{ j}$.

On s'intéresse aux mesures de température à différentes distances du tuyau de congélation, et à proximité de la galerie. On relève donc les numéros de 12 nœuds situés à environ 1 m, 5 m, 10 m, 20 m et 30 m du tuyau, et à 2,5 m de la galerie ou sur sa paroi. On indique ces numéros de nœuds dans le fichier afin d'obtenir une mesure de la température en chacun de ces nœuds et à chaque pas d'édition.

3.1.2.3 Caractéristiques thermiques de la roche

Nous avons indiqué précédemment que la roche était un matériau conducteur ayant une conductivité isotrope. Mais il reste à indiquer sa valeur ainsi que celle de sa capacité thermique volumique. C'est dans le programme CHEFCAL, composante de CHEF, qu'on indique ces caractéristiques en fonction de la température. On utilise pour cela des boucles conditionnelles du langage de programmation FORTRAN modifiant les sous-programmes CONDUC et CAPACI de CHEFCAL. Les lignes de code correspondantes ont été placées en annexe 3.

3.1.2.3.1 Conductivité thermique.

Pour la conductivité thermique se présente deux cas, selon que l'eau contenue par la roche est congelée ou non. On a donné des valeurs différentes pour les températures positives et négatives. *Newman* (Geoslope, 2006) donne les valeurs suivantes, respectivement pour la roche non-congelée et pour la roche congelée :

$$\lambda_{nc} = 3 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} = 2,6.10^5 \text{ J.j}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$\lambda_c = 4 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} = 3,5.10^5 \text{ J.j}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

3.1.2.3.2 Capacité thermique volumique

Le même rapport indique les valeurs suivantes pour la roche non congelée et congelée:

$$c_{nc} = 2,5.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_c = 2,0.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$$

Cependant la situation est rendue plus complexe par la chaleur latente de solidification de l'eau lors de sa congélation. Le programme CHEF permet d'introduire des sources de chaleur, mais on ne peut imposer que leur puissance et pas l'énergie totale fournie. Or la chaleur latente est une énergie par unité de volume congelé, et il est impossible de connaître par avance le temps que prendra la congélation d'un élément donné. Il semble donc impossible d'utiliser des termes sources pour la résolution de ce problème.

La chaleur latente de solidification est l'énergie qu'il faut apporter à un volume d'eau pour le congeler à une température fixée. Si on considère de manière formelle que la congélation a en fait lieu sur une plage de température de 1°C, alors la chaleur latente devient l'équivalent d'une capacité thermique : c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une unité de volume pour la faire passer de T_c à $T_c - 1^\circ\text{C}$.

On introduit donc dans ce modèle une capacité thermique équivalente entre 1°C et 0°C, égale à la capacité thermique de la roche non congelée à laquelle on ajoute la chaleur latente du volume d'eau contenue dans un volume unitaire (égal à la porosité multipliée par ce volume en faisant l'hypothèse que la roche est saturée en eau). On a les données suivantes :

Chaleur latente de solidification : $L_{eau} = 330 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (Côté, 2003)

Porosité de la roche : $\Phi = 15 \%$ (T. Smith, 2005)

Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Donc $L = \Phi \cdot \rho_{eau} \cdot L_{eau} = 49,5 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}$

Et en définissant c' comme la capacité thermique équivalente entre 0 °C et 1 °C :

$$c' = c_{nc} + L = 52,0 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

On indique donc au programme CHEFCAL les valeurs suivantes de la capacité thermique selon la température T :

$$\begin{array}{ll} T > 1^\circ\text{C} : & c_{nc} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ 1^\circ\text{C} > T > 0^\circ\text{C} & c' = 52,0 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \\ 0^\circ\text{C} > T & c_c = 2,0 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \end{array}$$

3.1.2.4 Exécution de CHEFCAL

3.1.2.4.1 Carte de la température

Le programme CHEFCAL peut alors être exécuté. On obtient un fichier binaire donnant la température en chaque nœud à la date finale. On obtient également une carte de la température au temps final. La figure 28 montre celle-ci dans une zone proche du tuyau de congélation. On constate que le front de congélation, c'est-à-dire l'isotherme 0 °C, est situé à environ 8 m du tuyau. En outre, les isothermes semblent perpendiculaires à la paroi de la galerie au voisinage de celle-ci, ce qui montre que l'influence de l'échangeur air-roche est négligeable par rapport à celle du tuyau de congélation. On vérifie enfin que les limites du domaine étudié sont suffisamment lointaines du front de gel pour que l'on considère qu'il s'agit de l'infini.

Geometrie : galerie et forage, axisymetrie
 Temperatures a proximite du tuyau de congelation

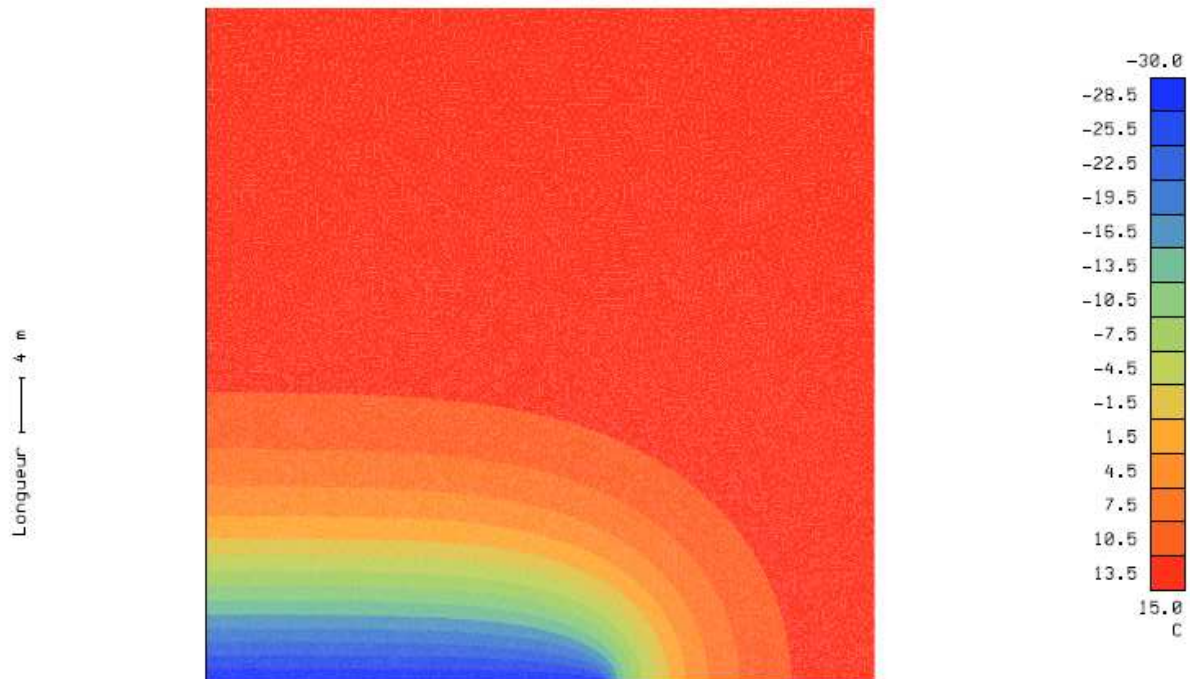


Figure 28 : carte des températures

3.1.2.4.2 Flux thermiques

Il reste à vérifier que les flux thermiques mis en jeu ne sont pas aberrants. On édite pour cela le flux thermique surfacique au cours du temps au nœud 39791, situé à 2,5 m de la paroi de la galerie et à 1 m du tuyau de congélation. On s'intéresse au flux thermique dans le sens de l'avancée du front de gel, c'est-à-dire dans le sens de l'axe de symétrie. On obtient la valeur maximale au bout de 11 jours de congélation, et cette valeur vaut :

$$\Phi_z(t = 11 j) = -8.10^6 J.j^{-1}.m^{-2}$$

La surface du cylindre de rayon 1 m et ayant pour axe le tuyau de congélation et la même longueur que ce dernier est de :

$$S = \pi * 1 * 30 = 94 m^2$$

On obtient donc un ordre de grandeur du flux total autour du tuyau de congélation :

$$\Phi \approx -7,5.10^8 J.j^{-1} \approx -8,7 kW$$

Sans pour autant disposer de référence précise, cet ordre de grandeur ne semble pas démesuré pour un tuyau de congélation. Il semble donc qu'imposer une température sur le tuyau soit une démarche valable.

3.1.3 Gonflement dû à la variation de température.

3.1.3.1.1 Calcul

Lorsqu'elle subit un refroidissement, la roche se contracte. L'eau ou la glace contenue dans les pores également, mais on considère que la roche reste toujours saturée, que des écoulements compensent la contraction de l'eau dans les pores et que la contraction de la glace n'a pas d'influence sur la variation de volume d'un échantillon. Cette hypothèse sera justifiée ci-dessous. On utilise donc le coefficient de dilatation thermique α de la roche, considéré comme constant, qui donne lieu à un gonflement :

$$g_r = \alpha(T - T_{MAX})$$

Mais ce qui a la plus grande influence est le gonflement dû à la transition de phase entre l'eau et la glace. La solidification est en effet accompagnée d'une augmentation relative de volume g_s .

Cependant il faut prendre en compte la teneur volumique en eau pour obtenir le gonflement total d'un élément de volume de roche. La roche étant saturée, cette teneur volumique est égale à la porosité Φ .

On obtient donc, pour $T < 0^\circ\text{C}$, un gonflement dû à la glace :

$$g_g = \Phi \cdot g_s$$

Pour ne pas obtenir un gonflement trop brutal qui risquerait de nuire à la précision des calculs numériques, ainsi que pour mieux rendre compte de la dilatation de l'eau liquide en dessous de 4°C (Côté, 2003) on considèrera un gonflement progressif lors du refroidissement entre 1°C et 0°C . On a ainsi :

$$\begin{aligned} T > 1^\circ\text{C} : & \quad g_g = 0 \\ 1^\circ\text{C} > T > 0^\circ\text{C} & \quad g_g = \Phi \cdot g_s \cdot (1 - T) \\ 0^\circ\text{C} > T & \quad g_g = \Phi \cdot g_s \end{aligned}$$

Ce qui se résume en : $g_g = \Phi \cdot g_s \cdot \min(\text{Max}(1 - T, 0), 1)$

Le gonflement total de l'échantillon est donc décrit par $g = g_r + g_g$

Cette loi de comportement a été décrite dans un programme qui lit le fichier des températures et écrit un fichier de températures fictives, à fournir au logiciel VIPLEF, égales au gonflement correspondant à la température réelle. On fournit ainsi directement à VIPLEF la valeur du gonflement en chaque nœud, et il restera à indiquer au logiciel un coefficient de dilatation thermique égal à 1.

3.1.3.1.2 Valeurs numériques et ordres de grandeur.

$$g_c = 9 \% \text{ (Côté, 2003)}$$

$$\alpha_{eau} = 2,6.10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ (ordre de grandeur)}$$

$$\alpha_{glace} = 5.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ (Côté, 2003)}$$

Pour le gneiss rencontré à la mine de McArthur River, on a les valeurs suivantes pour le coefficient de dilatation thermique et la porosité (Smith, 2006) :

$$\alpha = 5,5.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\Phi = 15 \%$$

Il est maintenant possible de comparer les ordres de grandeur de la contraction thermique de la roche, de celle de l'eau avant le gel, de celle de la glace après le gel, et du gonflement dû à la glace.

Avant le gel : $g_{eau} = \alpha_{eau} \cdot \Delta T = 2,6.10^{-4} * (-15) = -3,9.10^{-3}$

$$g_{roche} = \alpha \cdot \Delta T = 5,5.10^{-6} * (-15) = -8,3.10^{-5}$$

Après le gel : $g_{glace} = \alpha_{glace} \cdot \Delta T = 5.10^{-5} * (-30) = -1,5.10^{-3}$

$$g_{roche} = \alpha \cdot \Delta T = 5,5.10^{-6} * (-30) = -1,7.10^{-4}$$

Pendant le gel : $g_c = 0,09$

$$g_g = g_c \cdot \Phi = 0,09 * 0,15 = 1,4.10^{-2}$$

On a donc avant le gel : $|g_{roche}| \ll |g_{eau}| \ll g_c$

Et après le gel : $|g_{roche}| \ll |g_{glace}| \ll g_c$

Ceci incite à négliger la contraction de la roche et de la glace devant le gonflement dû à l'eau. Cependant la contraction de la roche a été prise en compte dans les calculs. En effet, si cette contraction est négligeable devant le gonflement dû à la glace, c'est le seul phénomène ayant lieu avant le gel.

En outre il convient de remarquer que ces hypothèses conduisent à des prévisions pessimistes : on surestime le gonflement dû à la congélation en négligeant une contraction.

3.1.4 Calcul mécanique

On convertit le fichier contenant le maillage en un fichier de données pour VIPLEF, qu'il faut également compléter. Des extraits de ce fichier sont placés en annexe 4.

3.1.4.1 Fichier de données

3.1.4.1.1 Bloc des coordonnées des nœuds

Malgré leur absence d'influence dans le résultat, il faut ajouter les nœuds correspondant à l'air de la galerie. Cependant il ne sera pas nécessaire de leur attribuer un matériau. Aussi ne déclare-t-on qu'un seul matériau : la roche.

3.1.4.1.2 Bloc des caractéristiques mécaniques des matériaux

On précise les caractéristiques mécaniques de la roche. On fait l'hypothèse qu'il s'agit d'un matériau élastique. Dans la deuxième étude de cas de son rapport, *Smith* (2006) fournit les valeurs suivantes pour le module d'élasticité et le coefficient de Poisson :

$$E = 30.10^9 \text{ Pa}$$

$$\nu = 0,13$$

3.1.4.1.3 Bloc liaisons

Il s'agit de préciser les conditions aux limites, qui doivent respecter la symétrie du problème et empêcher tout mouvement de corps solide. On impose donc un déplacement nul en $Z = 0$, ce qui correspond à la symétrie du problème par rapport au plan ($Z = 0$). On impose également un déplacement nul à l'infini, c'est-à-dire en réalité en $Z = 300 \text{ m}$ et $R = 303 \text{ m}$.

3.1.4.1.4 Blocs contraintes initiales et chargement

Le calcul effectué est un calcul élastique, ce qui permet d'appliquer le principe de superposition. Or on ne s'intéresse qu'à l'influence de la congélation sur la déformation de la roche. On peut donc se dispenser d'appliquer un autre chargement pour obtenir un résultat réaliste. Par exemple, aucune contrainte géostatique n'est introduite.

3.1.4.1.5 Bloc dilatations thermiques

Au lieu de fournir à VIPLEF le champ de températures réel, on lui a fourni directement la valeur du gonflement. Il suffit donc ici d'indiquer une dilatation thermique isotrope et unitaire pour la roche.

3.1.4.2 *Historique, calcul et édition des résultats.*

Pour un calcul élastique il n'y a que peu d'informations à fournir. On se contente donc de fixer la date finale (730 j) et les conditions d'édition. On demande une édition des résultats chaque jour, aux mêmes nœuds que pour le calcul thermique.

On obtient la carte du déplacement radial (figure 29) et axial (figure 30). Ces cartes illustrent bien le gonflement de la zone congelée : la roche a tendance à s'écarter du tuyau de congélation. Ceci provoque une convergence des parois de la galerie. Par ailleurs on vérifie bien que les limites du domaine étudié sont suffisamment lointaines pour être considérées comme étant à l'infini car la zone d'influence apparente reste éloignée des bords.

Pour étudier ces déplacements en fonction du temps on s'intéresse au nœud 1110, situé sur la paroi de la galerie, à 5 m du tuyau de congélation. La figure 31 montre sur un même graphique l'évolution de la température, du déplacement radial U et du déplacement axial V en ce nœud. La courbe donnant U montre une légère variation avant que le front de gel n'atteigne le point étudié, puis une forte variation lorsque le front de gel franchit ce point, avant de se stabiliser progressivement ensuite. Ceci montre que le gonflement qui a lieu derrière le front de gel a une certaine influence à distance sur la convergence.

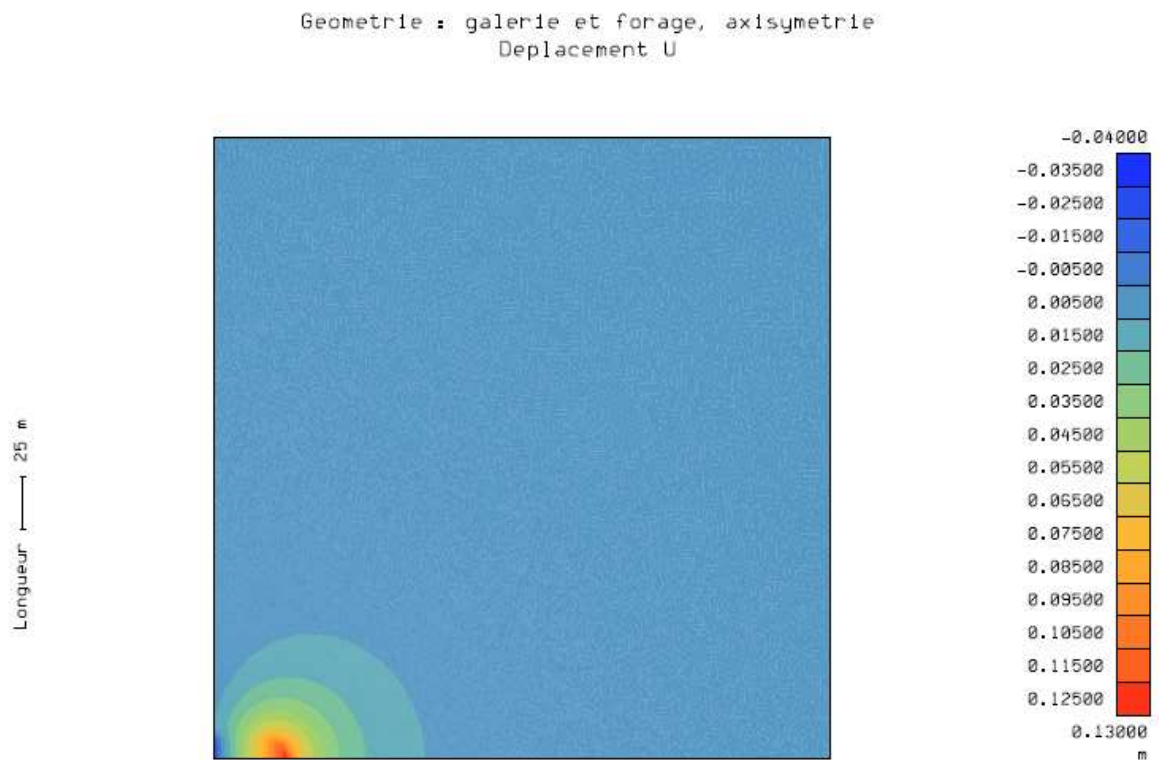


Figure 29 : déplacement radial

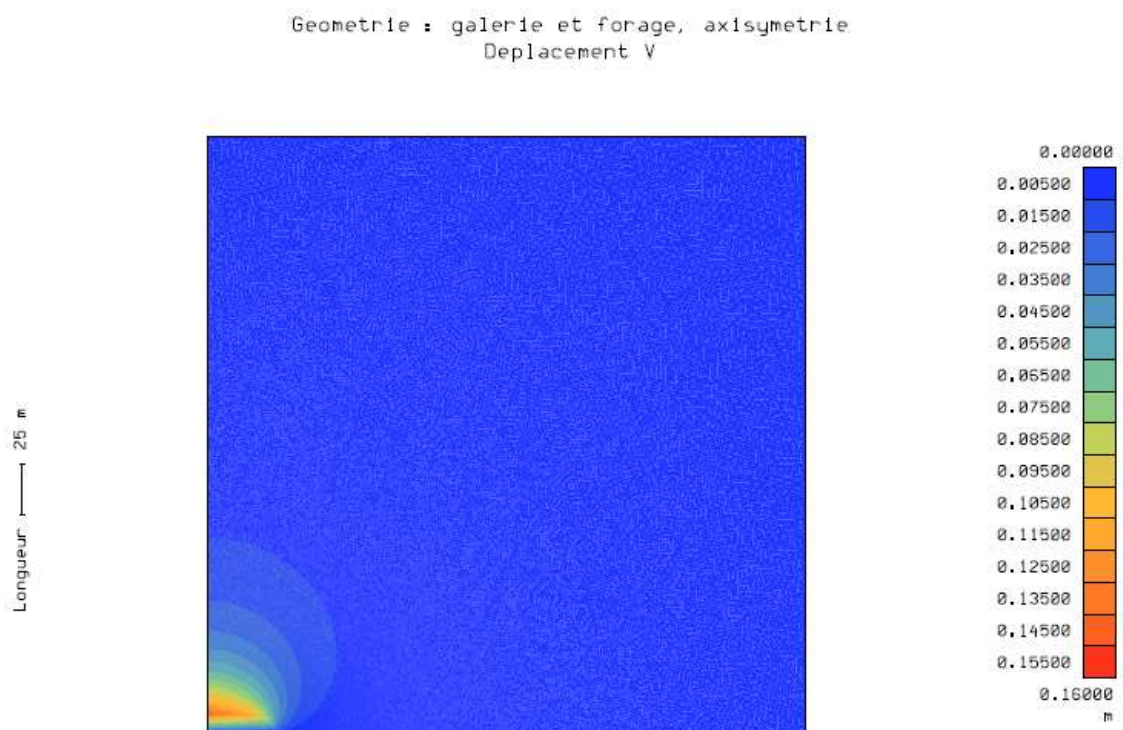


Figure 30 : déplacement axial

Quant à la courbe donnant le déplacement axial V, elle marque une augmentation progressive jusqu'au passage du front de gel puis une diminution moins rapide mais qui se poursuit bien au-delà du passage de ce front. Ceci montre que le gonflement de la glace éloigne la roche du tuyau de congélation, et qu'une fois que le front de gel est passé ce gonflement génère des contraintes de compression qui vont provoquer un déplacement de signe contraire.

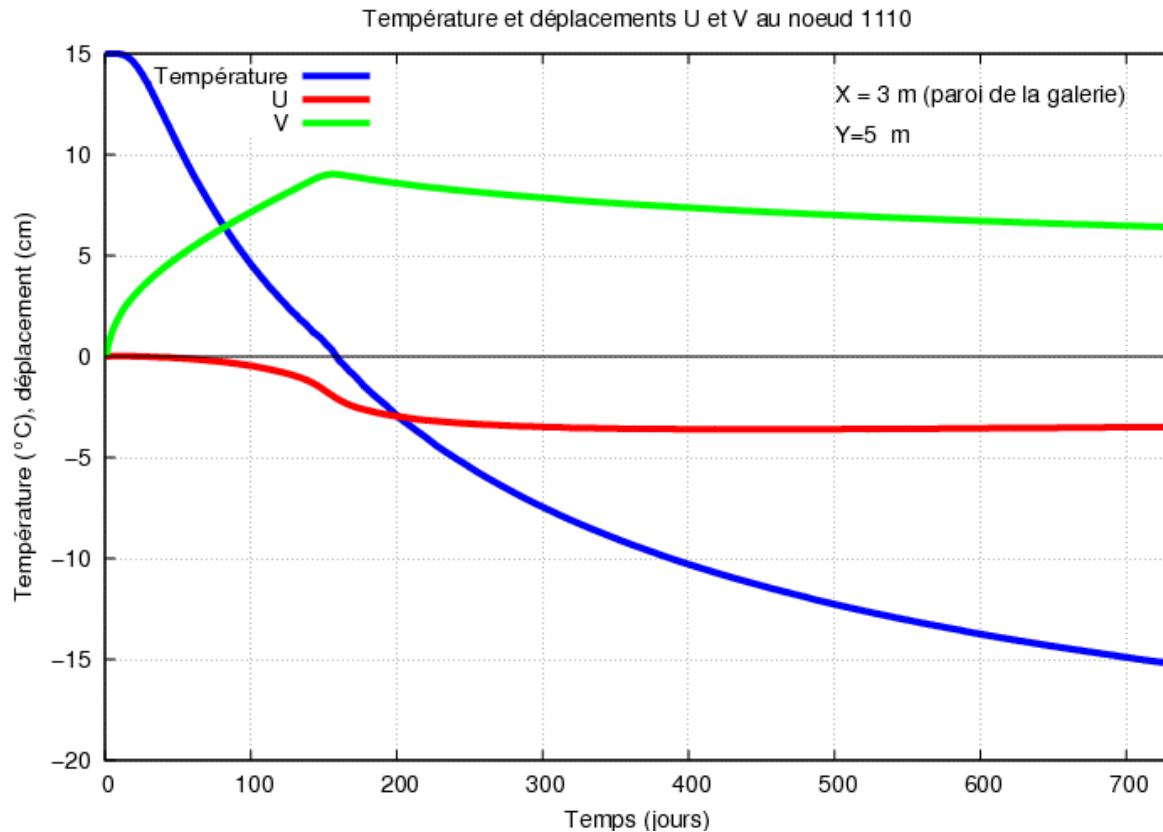


Figure 31 : température et déplacements U et V sur la paroi, à 5 m du tuyau de congélation

On peut enfin montrer la convergence de la paroi de la galerie au temps final. La figure 32 montre que dans la zone congelée on a une convergence maximale de 3,5 cm, avant de passer à une extension de la galerie, d'amplitude plus faible.

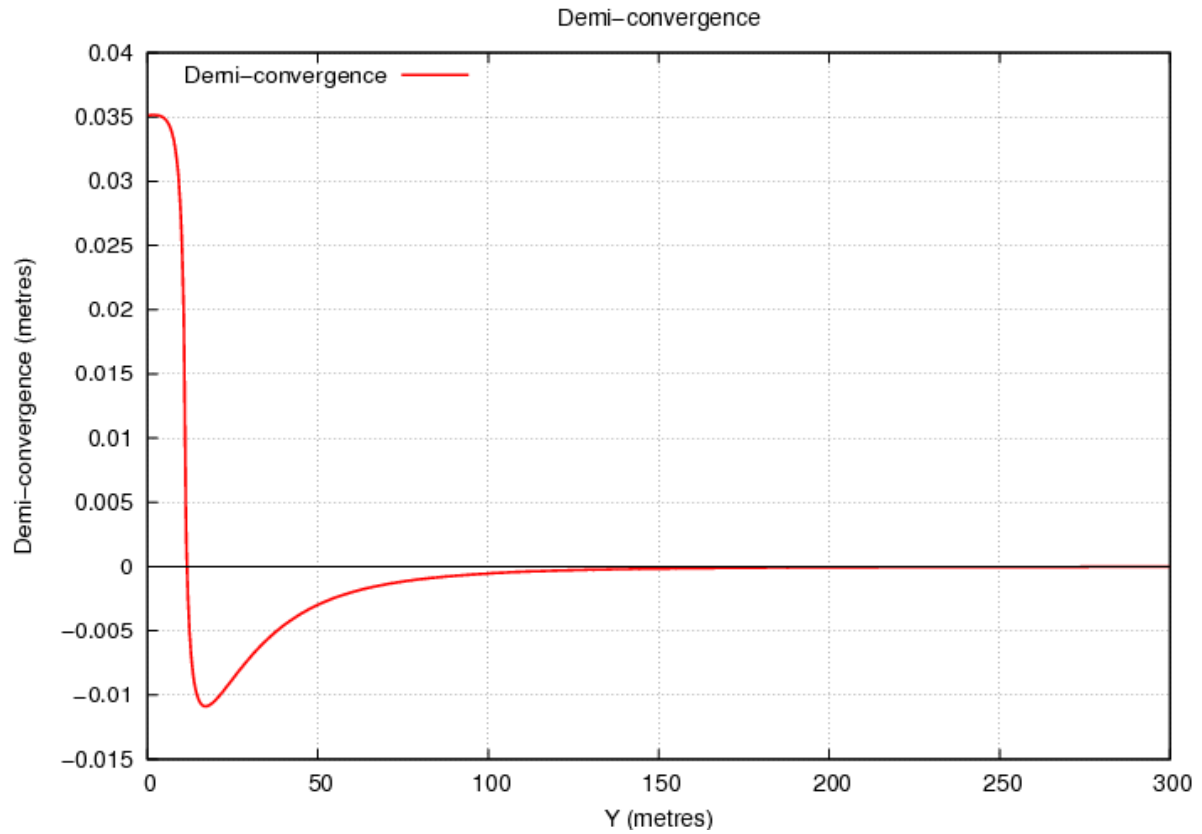


Figure 32 : demie-convergence à $t = 120$ j

3.1.5 Conclusion

Cette partie aura permis de mettre au point le modèle thermique et le modèle mécanique qui seront utilisés par la suite avec de petites modifications. On a en outre obtenu de premiers résultats sur un exemple simple, illustrant l'avancée du front de gel et son influence à distance sur les déplacements.

3.2 Étude d'un cas réel

3.2.1 Cas étudié

La partie 2.2 a montré que le seul cas réel pour lequel nous disposions de données de mesure relativement fiables était le premier cas étudié par T. Smith dans son rapport (*Smith*, 2006), c'est-à-dire la recoupe de congélation 7310E du niveau 530 de la mine de McArthur River. C'est pourquoi ce cas a été étudié par la suite. La configuration de la galerie, des tuyaux de congélation, et des instruments de mesure voisins sont rappelés à la figure 33.

Nous disposons pour cette étude de donnée sur la température grâce à la ligne de thermocouples TH-20, ainsi que de données sur les déplacements grâce aux extensomètres M903-01, M903-02, M903-04, M903-09, M903-10 et M0701-02. Il va donc s'agir de réaliser un calcul permettant d'obtenir les températures aux noeuds correspondant aux points de mesure du TH-20 et les déplacements aux points de mesure des extensomètres.

La première difficulté est de déterminer une géométrie utilisable pour les logiciels CHEF et VIPLEF. Ces logiciels ne permettent d'effectuer que des calculs en 2 dimensions. Or la géométrie réelle est complexe et ne présente aucune symétrie utilisable : la galerie n'est pas rectiligne, son environnement est compliqué par des croisements de galeries ou du remblai, et les instruments de mesure sont placés dans des plans distincts. Le choix réalisé a été de s'intéresser à la coupe BB de la figure 34. Tanya Smith, dans le calcul numérique qu'elle effectue pour l'étude de ce cas, considère un axe de symétrie et réalise un calcul axisymétrique.

Cependant un tel calcul n'est vraisemblablement pas réaliste : d'une part l'axisymétrie est ici une forte approximation de la géométrie, et d'autre part cette approximation donne des résultats qui sont certainement optimistes. La géométrie d'une cavité sphérique est en effet un cas particulièrement favorable en termes de résistance mécanique.

La géométrie retenue ici est une géométrie plane, invariante selon l'axe Nord-Sud. Ceci revient à considérer la galerie comme infinie, et on négligera par conséquent toute influence des ouvrages voisins. On ne tiendra pas non-plus compte des 3 tuyaux de congélation qui ne sont pas dans le plan de la coupe. Ces hypothèses sont évidemment très osées, mais restent les seules qui permettent d'exploiter les données retenues dans le cadre de ce travail. On aura donc un problème thermique plan et un problème mécanique en déformations planes.

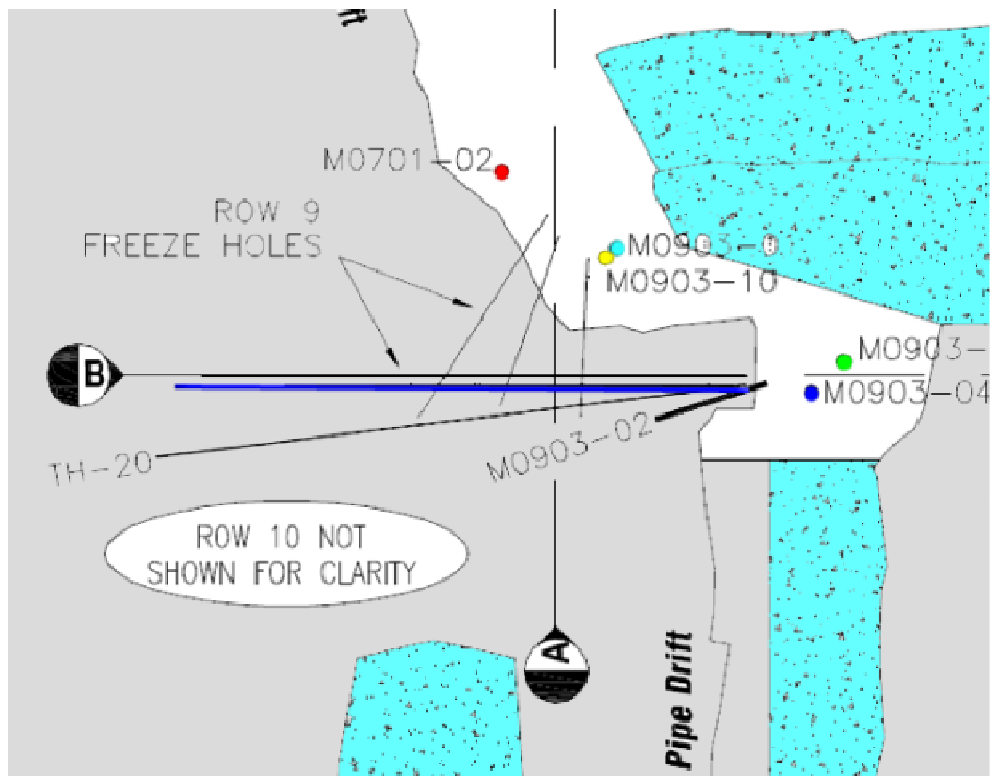


Figure 33 : configuration de l'étude (source : *Smith, 2006*)

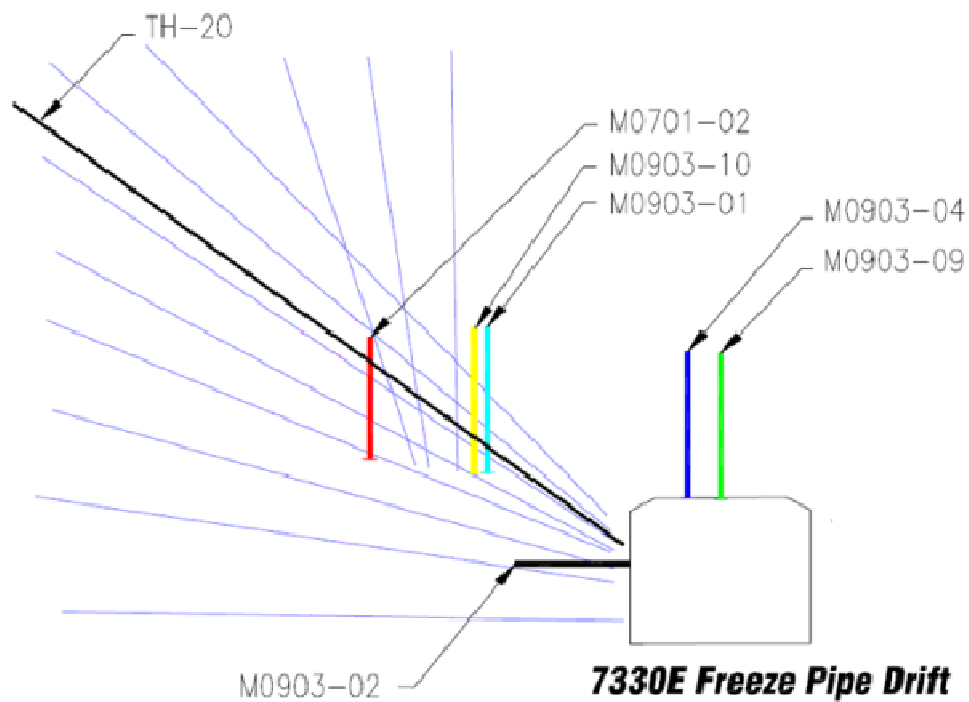


Figure 34 : coupe BB (source : *Smith, 2006*)

3.2.2 Comparaison d'un modèle axisymétrique et d'un modèle plan

3.2.2.1 Objectif

Le problème thermique étant plan, ceci implique que les tuyaux de congélation sont modélisés ici comme des nappes de tuyaux, infinies selon l'axe Nord-Sud. On s'attend donc à une congélation beaucoup plus rapide que dans la réalité. Il s'agit donc d'évaluer la différence de comportement thermique qu'induit cette différence de géométrie, dans l'espoir de pouvoir adapter le modèle plan au cas réel.

La répartition réelle des températures n'importe que très peu sur le gonflement de la roche, donc le résultat essentiel du calcul thermique est la position du front de congélation, qui correspond à l'isotherme 0°C . L'objectif est donc de déterminer s'il existe une relation entre la position du front de gel dans le cas réel d'un unique tuyau de congélation et cette position dans le cas d'une nappe. Ceci permettrait d'adapter le modèle plan pour obtenir une position du front de gel réaliste.

3.2.2.2 Description des modèles

On va s'intéresser à deux cas simples. Le premier, axisymétrique, correspond au cas d'un tuyau de congélation dans un massif considéré comme infini. L'axisymétrie est définie autour de l'axe du tuyau (figure 35). Le tuyau a un rayon r , et le domaine a comme limite extérieure R , qui représente l'infini.

La condition initiale est une température uniforme T_{∞} dans toute la roche et on impose à tout instant : $T(r) = T_r$ et $T(R) = T_{\infty}$.

Il n'existe pas de solution analytique à ce problème. Aussi utilise-t-on le logiciel POTCSF, qui réalise des calculs thermiques en 1 dimension, pour obtenir le champ de températures en un instant donné.

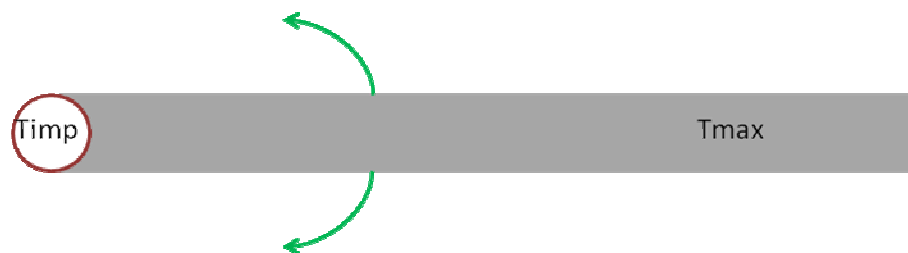


Figure 35 : schéma du cas axisymétrique

Le second cas correspond à un demi-espace infini, délimité par le plan $x = r$, où r a la même valeur numérique que ci-dessus.

On impose à tout instant : $T(x = r) = T_r$ et $T(x = \infty) = T_\infty$.

Il existe une solution analytique à ce problème plan (Carslaw and Jaeger, 1959) :

$$T(x, t) = T_r + (T_\infty - T_r) \cdot \text{erf}\left(\frac{x - r}{2\sqrt{kt}}\right)$$

Où k est la diffusivité thermique : $k = \frac{\lambda}{c}$

Les valeurs numériques adoptées pour les paramètres de ce problème sont celles retenues pour l'étude du cas réel dans le cas non congelé. On choisit donc :

$r = 4.10^{-2} \text{ m}$ Correspond au rayon d'un tuyau (Newman, 2006).

$R = 40 \text{ m}$ Donne une bonne représentation de l'infini dans le cas axisymétrique.

$\lambda = 2,6.10^5 \text{ J} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$c = 2,5.10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$

$T_r = -12^\circ\text{C}$

$T_\infty = 9^\circ\text{C}$

3.2.2.3 Résultats

On effectue un calcul pour différents temps de congélation, allant de 5 à 120 jours.

On trace alors sur un même graphique les champs de températures obtenus dans chacun des deux cas. La figure 36 montre le résultat pour une durée de 120 jours. On vérifie que pour une abscisse donnée l'influence du refroidissement est plus sensible dans le cas plan. Autrement dit la zone congelée est plus étendue dans le cas plan que dans le cas axisymétrique.

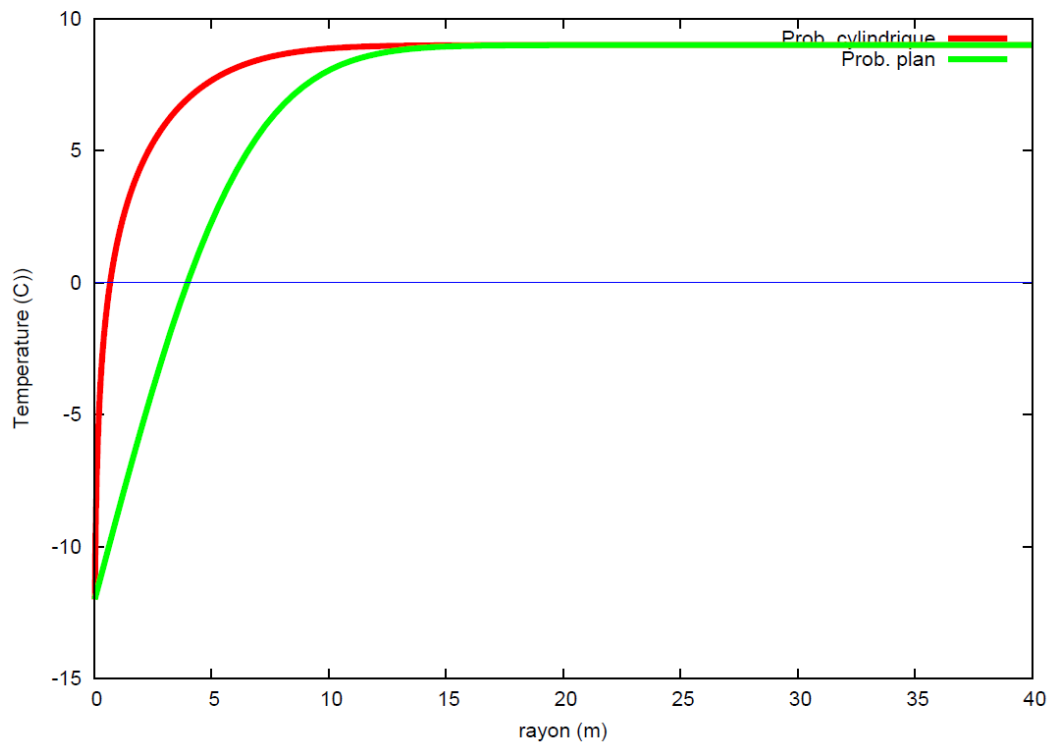


Figure 36 : température dans les cas cylindrique et plan au bout de 120 j

L'objectif est de déterminer une relation entre la taille de la zone congelée dans ces deux cas pour adapter le modèle plan. C'est pourquoi on trace ensuite sur le même graphique le champ de température obtenu précédemment dans le cas axisymétrique et celui que l'on obtient dans le cas plan avec une conductivité divisée par un coefficient α permettant d'obtenir une zone congelée de même taille.

$$\lambda_{axi} = \lambda$$

$$\lambda_{plan} = \frac{1}{\alpha} \lambda_{axi}$$

On cherche donc α tel que les courbes donnant la température dans chacun des deux cas se coupent en $T = 0^\circ\text{C}$. Ce coefficient est obtenu graphiquement en se contentant de tester les nombres entiers. On obtient donc pour différentes durées de congélation un coefficient $\alpha(t)$. La figure 37 montre l'allure des champs de température ainsi obtenus. On reporte les valeurs de $\alpha(t)$ sur la figure 38. On constate que le coefficient augmente avec t , mais de moins en moins vite. Ceci peut s'expliquer par des considérations géométriques (plus le rayon d'un cylindre augmente, plus son augmentation relative est petite) et un bilan énergétique.

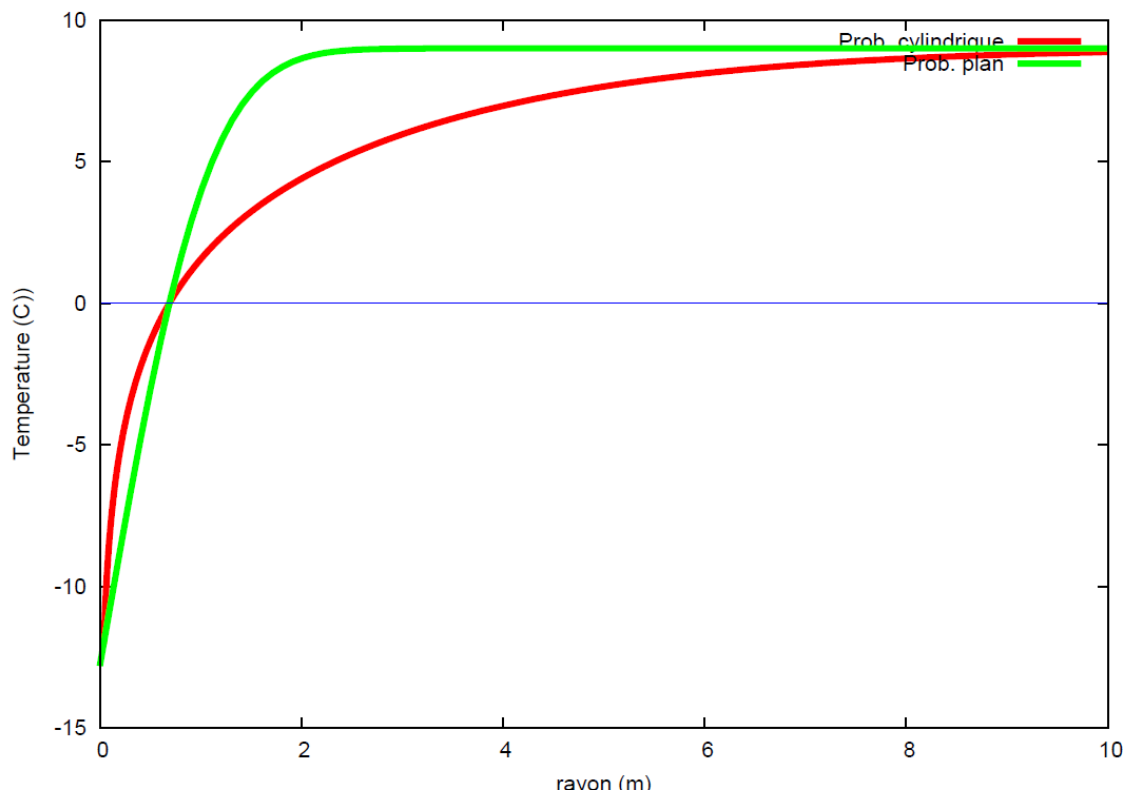


Figure 37 : températures dans les cas cylindrique et plan avec ajustement au bout de 120 j

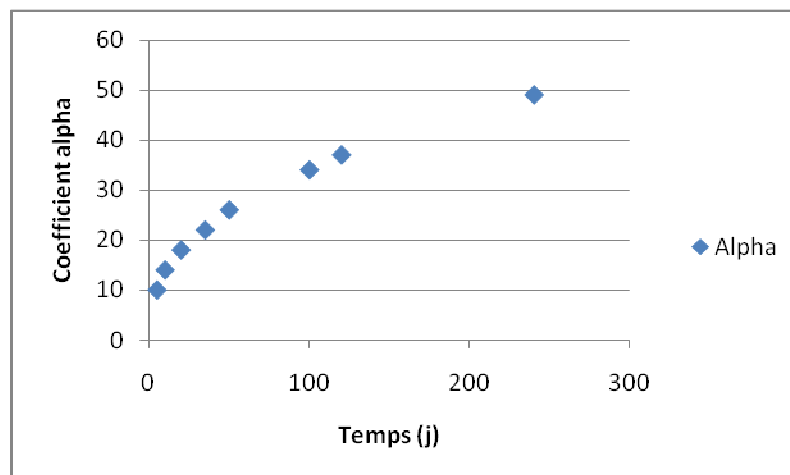


Figure 38 : coefficient d'ajustement selon la température

La difficulté qui se présente alors est de rendre compte d'une évolution de la taille de la zone congelée. En effet cette méthode nous permet au mieux d'estimer la position du front de congélation à une date fixée connaissant le coefficient α correspondant. Elle ne permet donc pas de donner une position réaliste à tout instant si l'on fixe α . Ne pouvant dans le cadre de ce travail imposer un α variable, la solution retenue a été d'effectuer plusieurs calculs avec

quelques valeurs différentes. On a retenu les valeurs suivantes : $\alpha = 1$ (pas de correction), $\alpha = 10$, $\alpha = 27$ et $\alpha = 40$.

3.2.2.4 Calage du modèle

L'introduction de ce coefficient permettra de corriger autant que possible les différences de comportement dues à l'utilisation d'un modèle plan. Il permettra en outre de caler le modèle, sa géométrie et ses paramètres. En effet, il semble nécessaire de corriger autant que possible les effets de la géométrie complexe qui environne la galerie étudiée, et de s'affranchir de l'incertitude qui pèse sur les valeurs des caractéristiques thermiques du massif rocheux.

3.2.3 Géométrie du modèle étudié

Une difficulté supplémentaire a été l'absence de données précises sur la géométrie de la galerie et sur l'emplacement des tuyaux et des instruments de mesure. Nous ne disposions que de schémas succincts tels que la figure 39 sur laquelle apparaissent certaines dimensions de la galerie, ou encore la figure 34. Les dimensions des tuyaux en particulier ont été déterminées graphiquement.

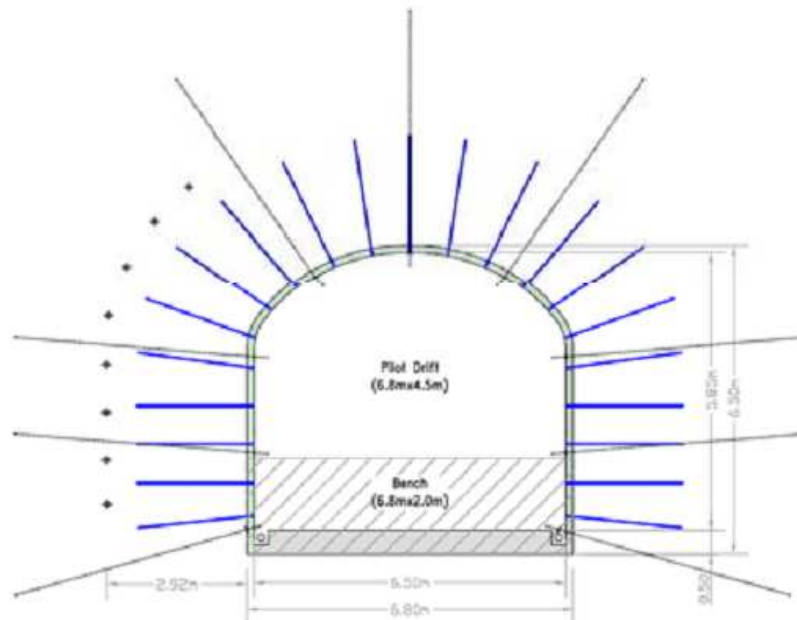


Figure 39 : section de galerie

La géométrie une fois établie, on a placé des nœuds en les espaçant de 20 cm sur les segments correspondant aux tuyaux de congélation, au thermocouple TH-20 et aux parois de la galerie. On a placé les limites du massif à environ 150 m des parois de la galerie. Les résultats de la partie 3.1 permettent de considérer une telle distance comme suffisante pour représenter l'infini.

La figure 40 montre l'ensemble du maillage et la figure 41 montre le maillage à proximité de la galerie. On distingue plusieurs segments, qui représentent les tuyaux de congélation et le thermocouple TH-20. En revanche, les extensomètres n'apparaissent pas. La densité des nœuds a été définie par concentration autour des segments, et la taille de éléments limitée afin d'obtenir un maillage le plus fin possible. Il convient de remarquer qu'avec un tel maillage le logiciel Unitov2, qui convertit le fichier contenant le maillage en un fichier de données pour CHEF et VIPLEF, est proche de sa limite sur l'ordinateur utilisé.

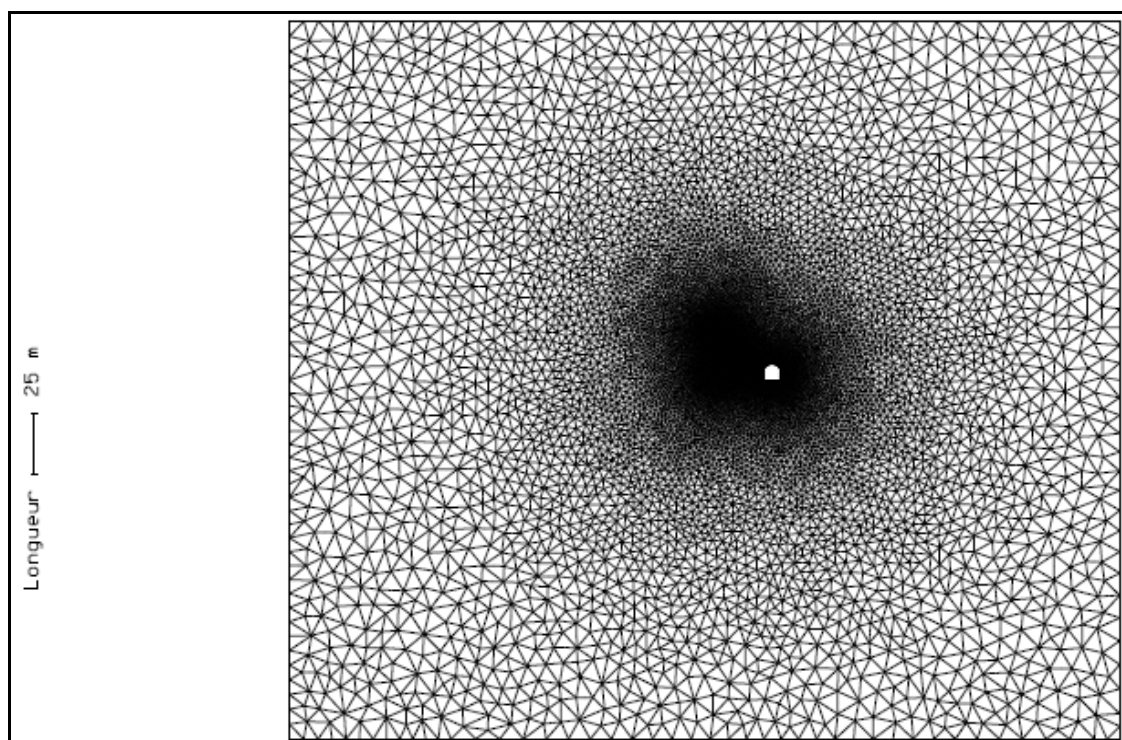


Figure 40 : ensemble du maillage

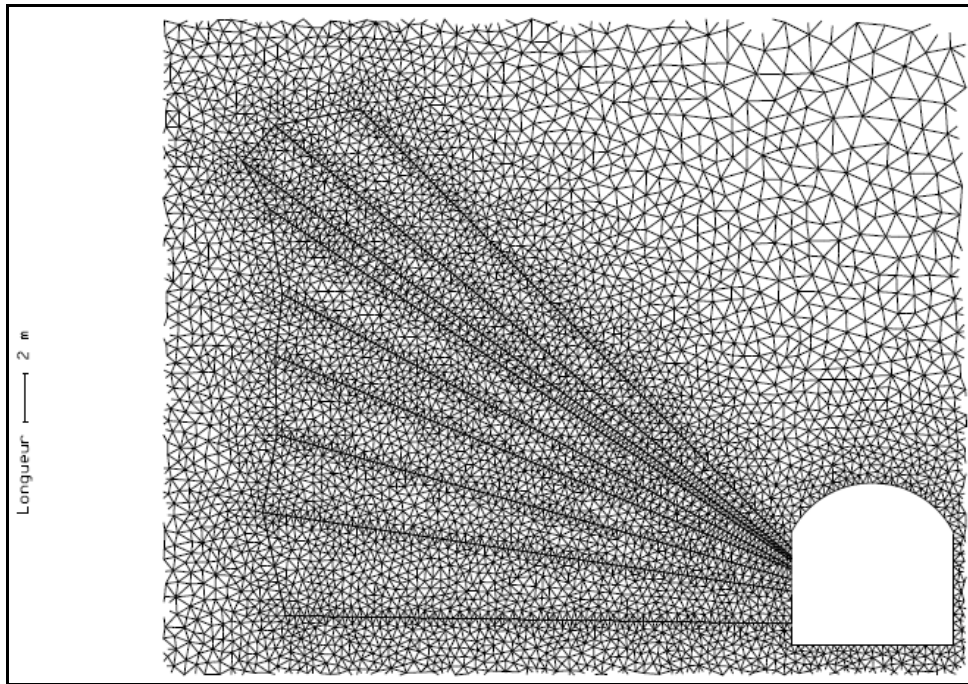


Figure 41 : détail du maillage

3.2.4 Calcul thermique

3.2.4.1 Fichier de données.

On peut remarquer sur la figure 41 que des segments rejoignent les extrémités des tuyaux de congélation et du thermocouple. Ces segments ne reflètent aucune réalité physique, mais leur introduction était nécessaire pour permettre un découpage en plusieurs régions afin de pouvoir relever le numéro des nœuds sur les segments. Le logiciel Unitov2 attribue en effet de nouveaux numéros de nœuds et l'on ne peut retrouver une séquence initiale que si elle se trouve sur une frontière entre deux régions. Ces régions étant purement formelles, on indique la continuité entre elles et on leur attribue le même matériau, nommé ROCH. Puisqu'il est apparu dans la partie 3.1 que placer un échangeur entre de l'air et la roche n'avait que très peu d'influence, on considèrera ici que la galerie est vide.

Ici encore on n'indique qu'une valeur unitaire pour la capacité thermique volumique. Cependant on divise la conductivité, isotrope, par le coefficient α décrit précédemment en 3.2.2.3. On réalise ainsi plusieurs calculs, pour différentes valeurs de α . Les caractéristiques thermiques de la roche seront détaillées en 3.2.4.3 lors de la modification de CHEFCAL.

On modifie ensuite les conditions initiales et les conditions aux limites. Pour s'approcher au mieux des mesures on impose une température initiale dans le massif de 9°C. On impose également cette température comme condition à la limite extérieure du massif. La température imposée aux nœuds correspondant aux tuyaux de congélation sera décrite dans le fichier de l'historique.

3.2.4.2 Historique, calcul et édition des résultats

Dans le fichier donnant l'historique, on décrit la température imposée aux nœuds des tuyaux de congélation. La température imposée décroît progressivement de 9°C à -12°C. On impose une décroissance exponentielle de la température imposée entre $t = 0 \text{ j}$ et $t = 8 \text{ j}$ selon l'équation $TIMP(t) = 21 \cdot e^{-\frac{t}{8}} - 12$, puis une décroissance linéaire entre $t = 8 \text{ j}$ et $t = 10 \text{ j}$ pour atteindre $TIMP = -12^\circ\text{C}$. Ensuite on impose -12°C jusqu'à la fin de l'expérience, à $t = 120 \text{ j}$.

Le pas de temps est de 0,1 j pendant les 10 premiers jours, puis de 0,5 j. On édite les résultats en chacun des nœuds de la ligne de thermocouples TH-20 afin de pouvoir tracer la température en fonction du temps en ces nœuds.

3.2.4.3 Caractéristiques thermiques de la roche

La capacité thermique et la conductivité du terrain, congelé ou non, sont celles utilisées dans la partie 3.1 et sont rappelées ci-dessous :

$$\lambda_{nc} = 3 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} = 2,6 \cdot 10^5 \text{ J.j}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$\lambda_c = 4 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ J.j}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_{nc} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_c = 2,0 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$$

Quelques essais ont été réalisés en utilisant le même modèle qu'à la partie 3.1. Ils ont abouti à une divergence des températures. Il est apparu que les variations en créneau de la conductivité et de la capacité thermique étaient vraisemblablement la cause de ces divergences. Aussi a-t-il fallu élaborer un modèle plus favorable au calcul numérique, en évitant toute variation en créneau. On remplace tout d'abord la variation brutale de la conductivité par une transition linéaire s'effectuant entre 0°C et 1°C.

Quant à la capacité thermique, on remplace également le créneau par une fonction continue représentée sur la figure 42 : une variation linéaire de c_c à c^f entre 0°C et 1°C, puis une valeur constante entre 1°C et 2°C, et enfin une variation linéaire de c^f à c_{nc} entre 2°C et 3°C. La capacité fictive c^f est calculée de telle sorte que l'énergie nécessaire pour refroidir un élément de volume de 3°C à 0°C prenne en compte la chaleur latente de solidification de l'eau. On calcule la valeur suivante :

$$c^f = 24,6 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$$

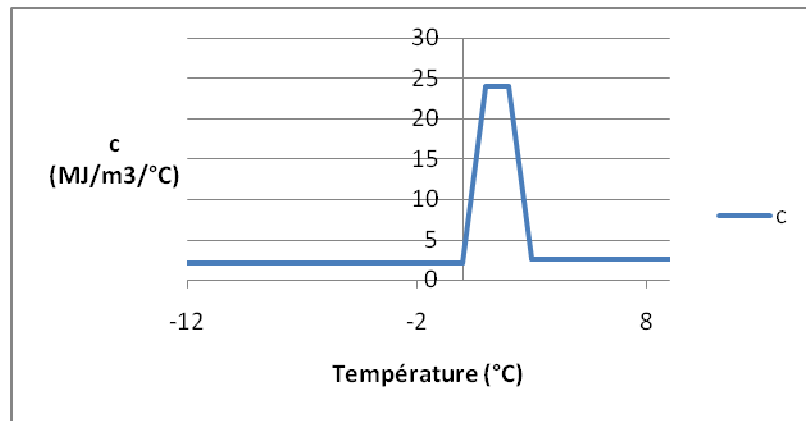
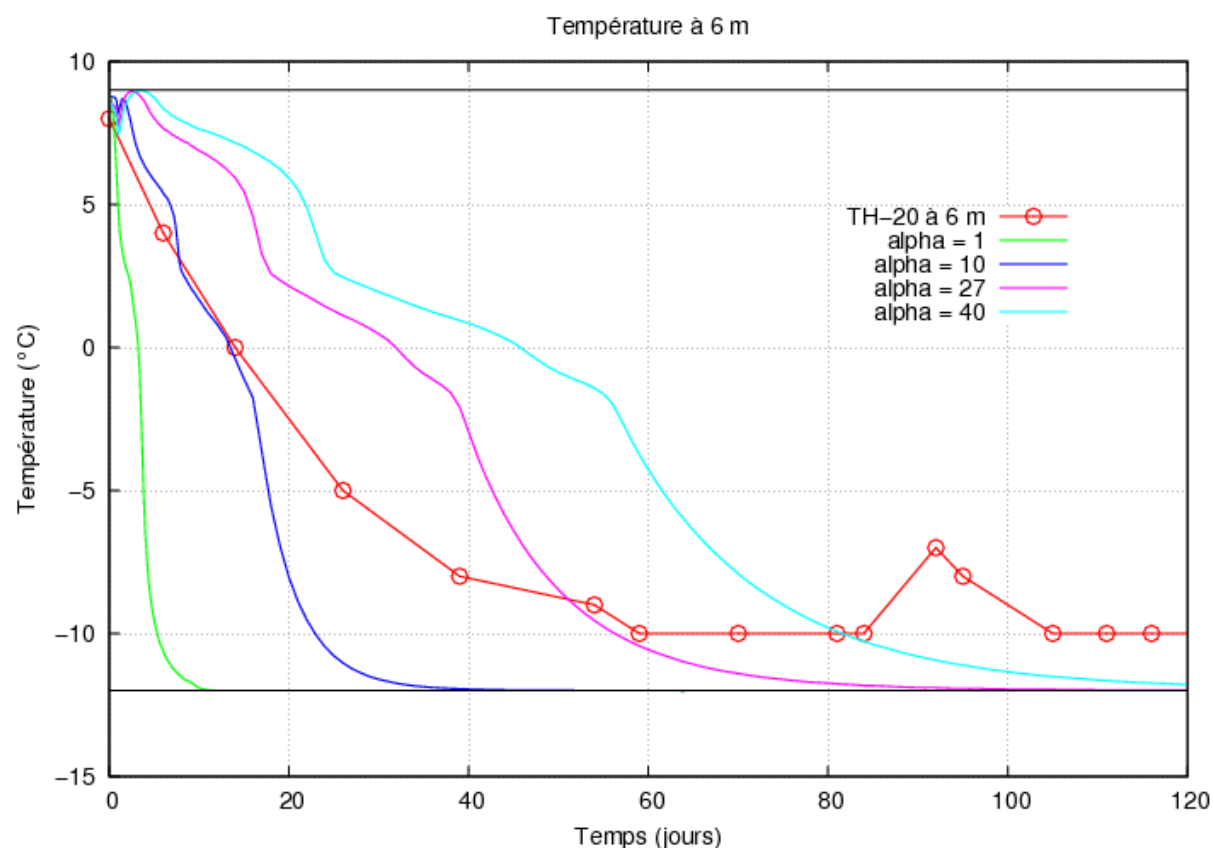
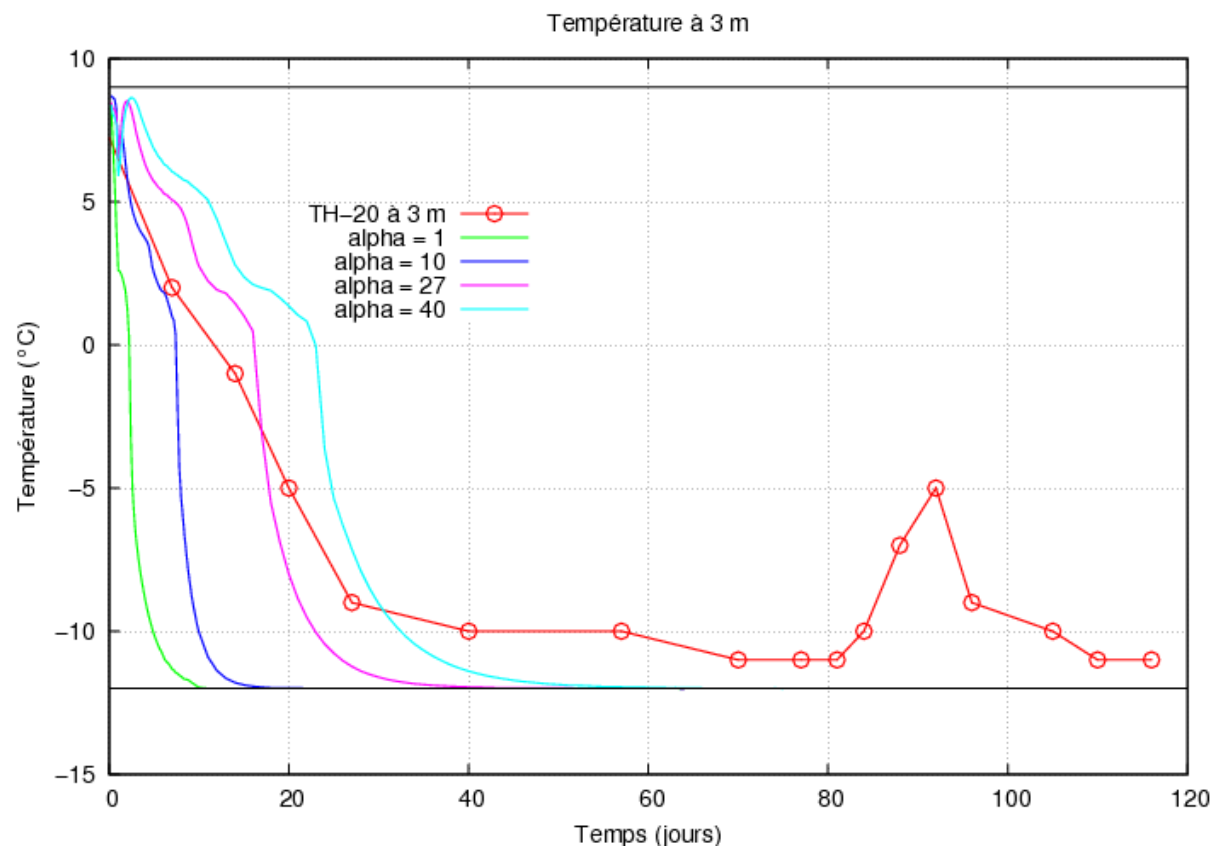


Figure 42 : capacité thermique de la roche selon la température

3.2.4.4 Résultats et analyse

On effectue un calcul avec chacune des valeurs du coefficient d'ajustement α défini en 3.2.2.3 pour compenser la différence de géométrie : $\alpha = 1$ (pas de correction), $\alpha = 10$, $\alpha = 27$ et $\alpha = 40$. On édite les résultats pour les nœuds correspondant aux mesures (Smith, 2006). Il s'agit ensuite de comparer ces résultats avec ces mesures : en chaque point on trace la température en fonction du temps mesurée et calculée (figure 43).



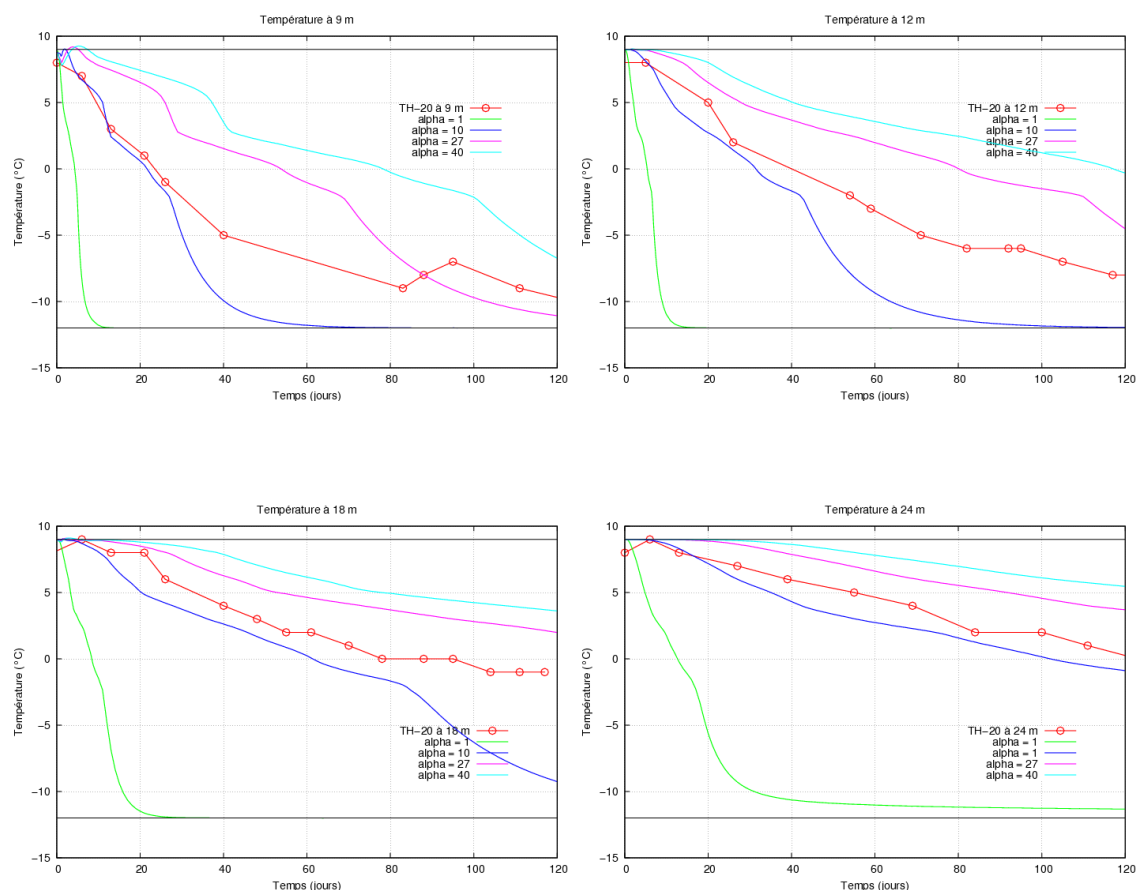


Figure 43 : température en fonction du temps aux points de mesure du thermocouple (1 m, 6 m, 9 m, 12 m, 18 m et 24 m) selon α

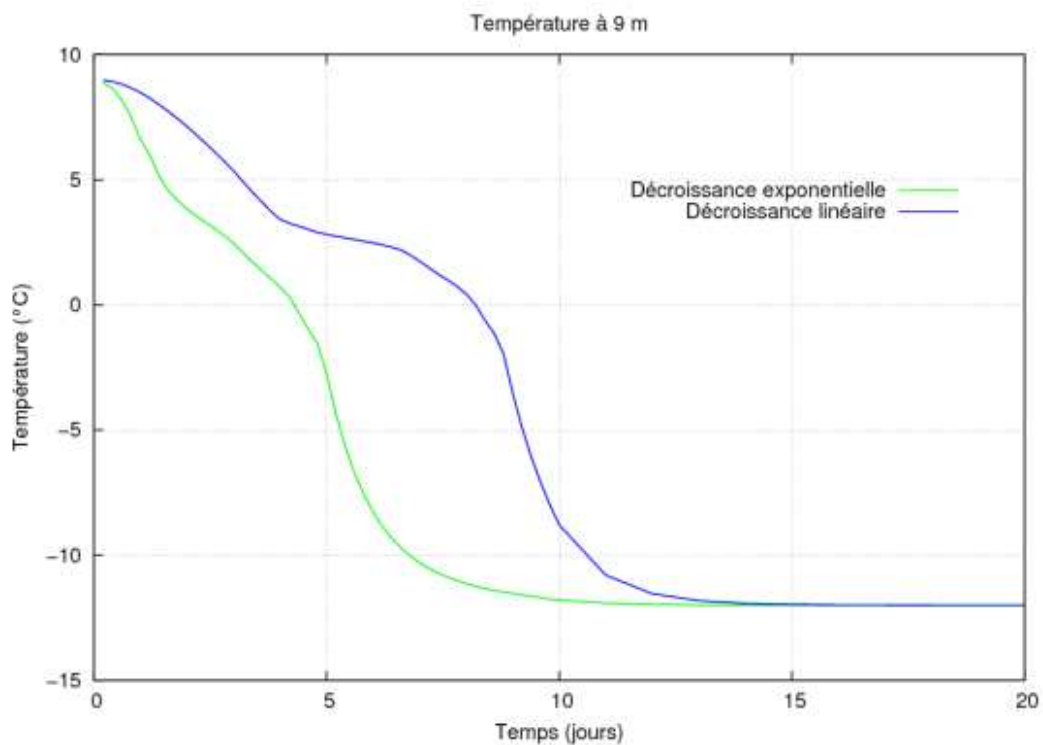
La durée de chaque calcul étant très longue (de l'ordre du jour) nous n'avons pas pu trouver par encadrements successifs la valeur de α qui serait la plus adaptée. On dispose néanmoins d'un encadrement : les courbes correspondant à $\alpha = 10$ et $\alpha = 27$ encadrent raisonnablement les points expérimentaux. Par la suite on a retenu la valeur $\alpha = 27$ pour le calcul mécanique. Avec une telle valeur l'allure de la courbe de température correspond aux données expérimentales.

La figure 43 appelle en outre à quelques commentaires. On remarque tout d'abord que le résultat du calcul numérique pour les points les plus proches de la galerie (distance inférieure à 9 m) semble présenter un artefact au cours des premiers jours de congélation : la température commence à décroître, puis augmente avant de décroître à nouveau. L'impossibilité physique d'un tel comportement est confirmée par le graphique correspondant au point situé à 9 m de la paroi, où la température dépasse temporairement la température maximale du système ($T_{MAX} = 9^\circ\text{C}$).

Ceci montre que le calcul numérique n'est pas des plus fiables dans ces conditions. Il faut garder en mémoire qu'avant une légère adaptation de la modélisation thermique du matériau, le calcul divergeait rapidement. Ces difficultés sont vraisemblablement dues à

l'apparition d'un fort gradient de température à proximité des tuyaux de congélation au cours des premiers jours. En effet, la température imposée sur les tuyaux décroît rapidement alors que la conductivité thermique réduite ne permet pas de dissiper rapidement ce gradient. Un examen des cartes de température effectué en cours de calcul permet aussi de penser que cet artefact est dû à la complexité du maillage. On voit en effet apparaître spontanément une légère augmentation de température en certains nœuds à proximité des tuyaux de congélation.

Malgré cet artefact il semble possible de distinguer sur ces mêmes courbes l'effet de la décroissance de TIMP pendant les 10 premiers jours. Pour mieux distinguer cette influence on a réalisé un calcul avec une décroissance linéaire de TIMP pendant 10 jours avec $\alpha = 1$. Les résultats sont comparés avec ceux du cas précédent sur la figure 44. On constate que les conditions de descente en température ont une influence légère après les 10 jours correspondant à ce refroidissement. À proximité de la paroi, puisque la congélation se fait en dix jours environ, la manière dont se fait la décroissance de TIMP a une influence notable. En revanche celle-ci ne fait que décaler légèrement la courbe de la température en fonction du temps dans le cas de points rejoints plus tardivement par le front de gel. Dans le cas retenu, la conductivité thermique est plus faible du fait de l'introduction de $\alpha = 27$, donc les temps de congélation sont suffisants pour que les conditions de descente en température ne soient pas déterminantes pour l'allure des résultats.



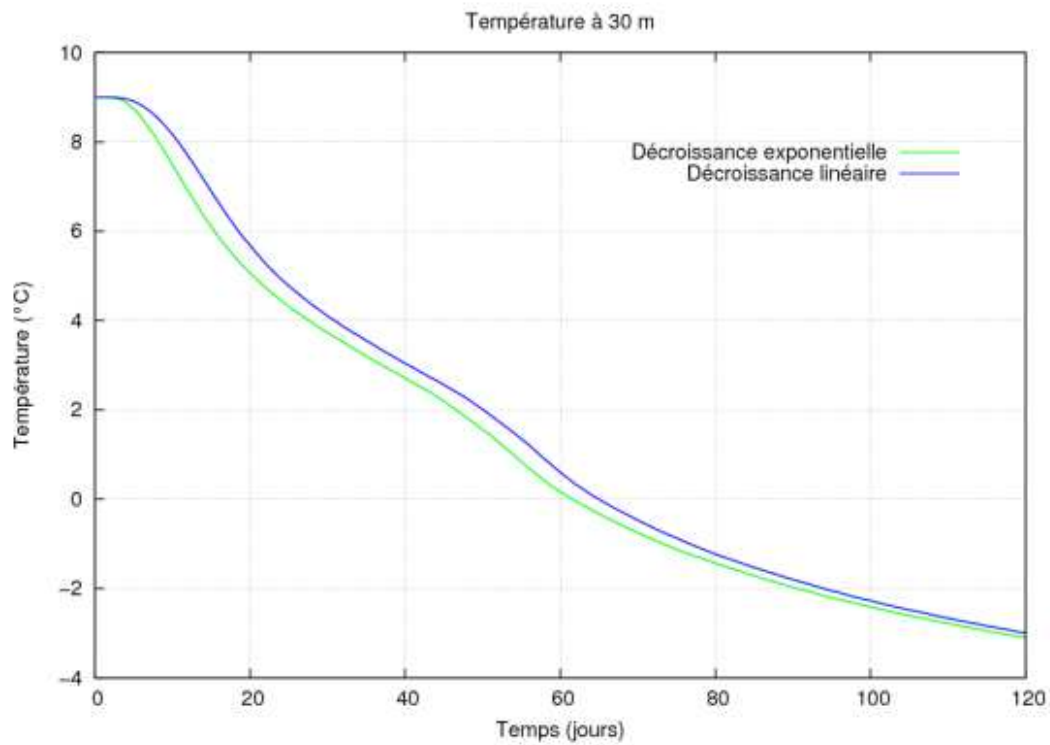


Figure 44 : influence de l'allure de la décroissance de TIMP

3.2.4.5 Carte des températures

On obtient la carte des températures au bout de 120 jours de congélation (figure 45). On peut remarquer qu'avec le paramètre α retenu le mur de congélation n'est pas encore constitué.

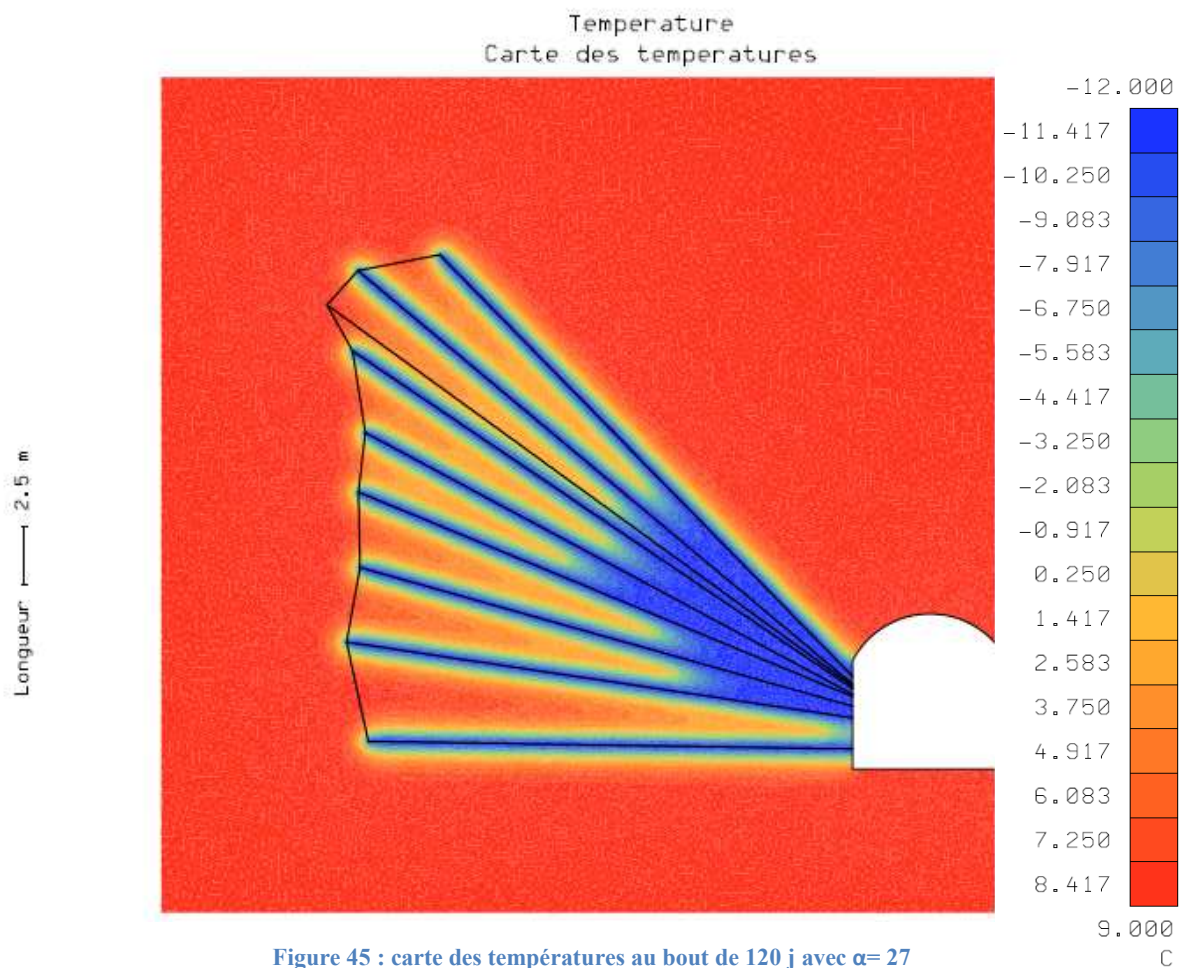


Figure 45 : carte des températures au bout de 120 j avec $\alpha=27$

3.2.4.6 Conclusion

Moyennant un calage réalisé sur la conductivité thermique, le calcul thermique réalisé permet d'obtenir une évolution de la température aux thermocouples en accord avec les mesures réalisées. Par ailleurs, on s'est affranchi des conditions exactes de descente en température en montrant que son influence n'était pas déterminante au-delà de la durée de cette descente.

3.2.5 Calcul mécanique

De même que dans la partie 3.1, on obtient le gonflement à partir du champ de températures, et on l'utilise comme donnée pour VIPLEF. On conserve également les mêmes paramètres pour la roche. On effectue ici un calcul pour une durée de 120 j, et on édite avec un pas de temps de 1 j les valeurs des déplacements aux nœuds correspondant aux ancres des extensomètres M903-02, M903-04 et M903-09. On obtient également, au temps final, des cartes de déplacements et de contraintes.

3.2.5.1 Déplacements

La figure 46 donne la carte des déplacements horizontaux. On constate bien les conséquences du gonflement, avec un changement de sens du déplacement horizontal aux alentours du front de gel. Il faut surtout noter que le déplacement maximal se situe sur la paroi de la galerie. La figure 47 donne la carte des déplacements verticaux. Là encore, on a des valeurs non-nulles sur les parois de la galerie, qui vont donner lieu à un déplacement relatif des parois. On peut visualiser ce déplacement grâce à la figure 48 qui représente la géométrie initiale de la galerie comparée à sa déformée (les déformations sont amplifiées d'un facteur 10).

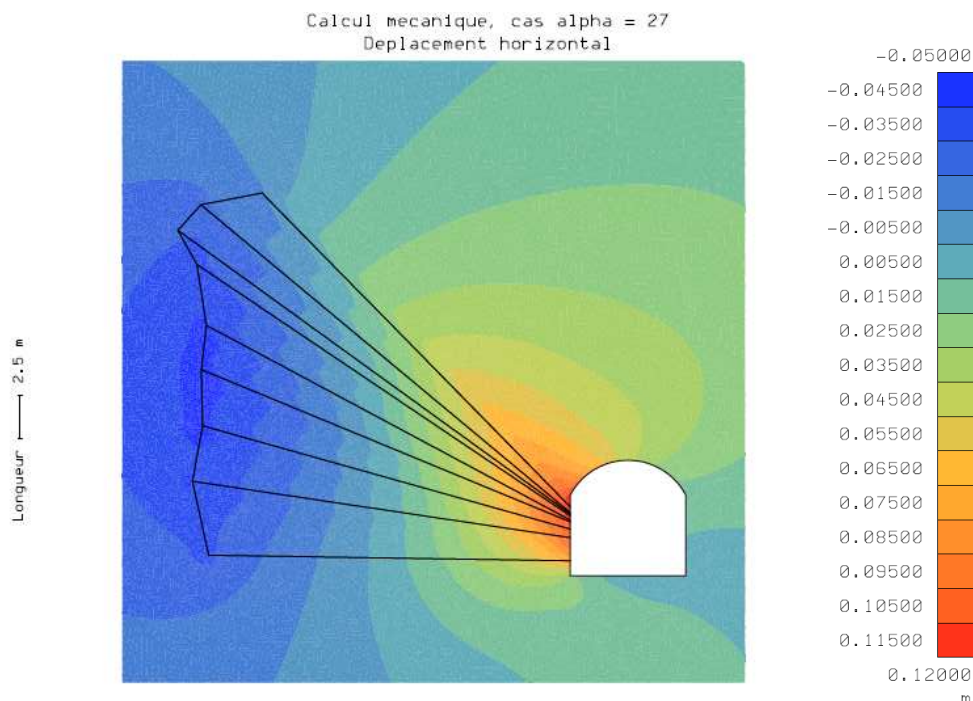


Figure 46 : déplacements horizontaux

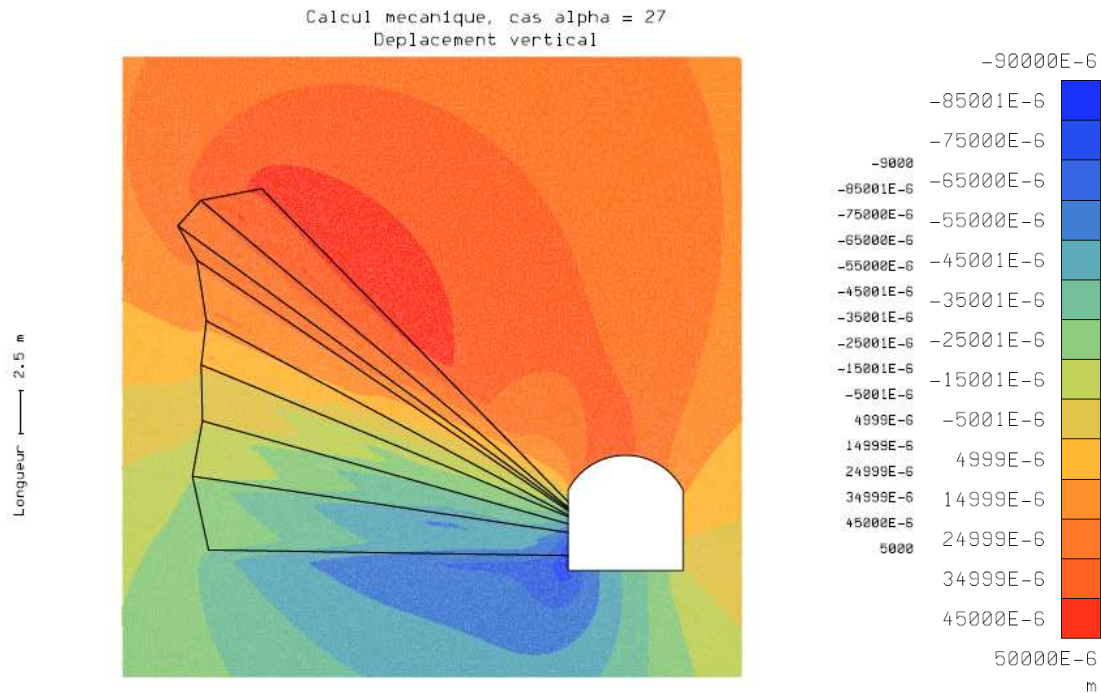


Figure 47 : déplacement verticaux

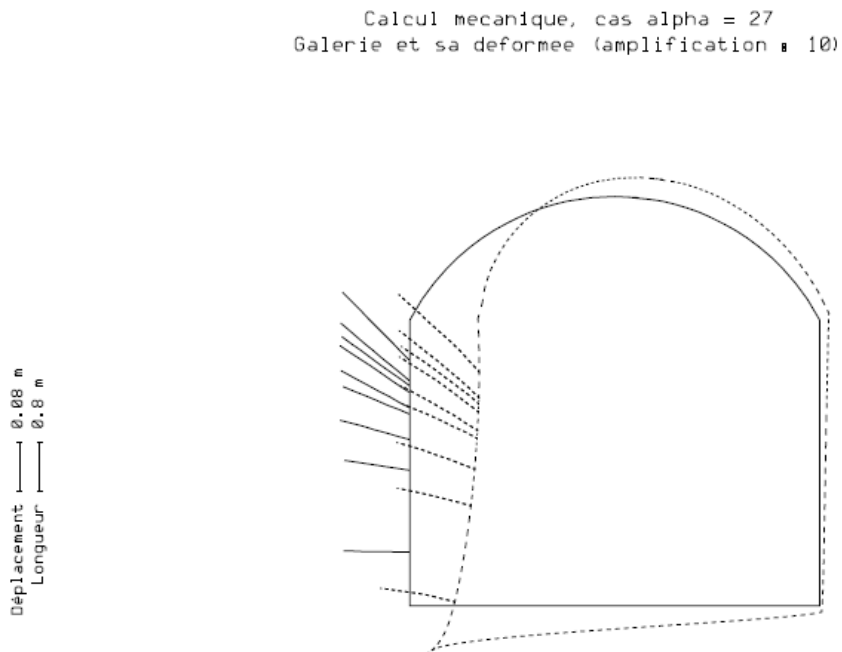


Figure 48 : galerie et sa déformée

3.2.5.1.1 Déplacements : extensomètre M0903-02

On dispose de trois courbes expérimentales, donnant le déplacement horizontal par rapport à un ancrage sur la paroi de la galerie en fonction du temps. On a donc soustrait la valeur du déplacement à la paroi à la valeur du déplacement en chaque nœud correspondant à

un point de mesure de l'extensomètre. Ceci permet de comparer les résultats du calcul aux résultats expérimentaux.

Ces résultats n'étant pas du même ordre de grandeur, on a comparé les résultats expérimentaux au dixième des valeurs calculées. L'objectif de cette division est de pouvoir comparer l'allure des courbes obtenues. Les figures 49 à 51 montrent la superposition de ces résultats aux points de mesure situés à 1 m, 2 m et 6 m de la paroi.

Sur la figure 49, correspondant aux points de mesure situés à 1 m de la paroi, on constate que non seulement les amplitudes des déplacements ne sont pas en accord, mais en outre l'allure de la courbe calculée n'a rien à voir avec les mesures. En effet les mesures restent de l'ordre du demi millimètre et montrent des variations tout au long de la mesure alors que la courbe calculée augmente rapidement jusqu'à 1,4 mm avant de se stabiliser.

Sur la figure 50, correspondant aux points de mesure situés à 2 m de la paroi, l'amplitude de la courbe calculée s'approche de 10 fois celle de la courbe expérimentale. L'allure de ces deux courbes semble similaire, avec une augmentation pendant 20 j puis une stabilisation jusqu'à la fin des mesures.

Sur la figure 51, on a tracé les résultats des mesures au point situé à 6 m de la paroi. À cause d'une erreur dans la réalisation du maillage le point où est édité le résultat du calcul est en réalité situé à 5 m de la paroi. Cette erreur vient s'ajouter aux incertitudes dues à l'imprécision de la définition de la géométrie inhérentes au modèle plan (en réalité l'extensomètre n'est pas orthogonal à la paroi de la galerie). En ce point de mesure les résultats du calcul montrent à nouveau une augmentation rapide du déplacement suivie d'une stabilisation. Les résultats des mesures n'ont pas exactement la même allure : l'augmentation relative est plus lente au départ, et plus rapide à la fin des 120 j. Afin de mieux évaluer l'écart d'amplitude entre les résultats expérimentaux et calculés, on a tracé une courbe donnant le dixième des résultats des calculs, et une autre le cinquième. On constate ainsi que les résultats du calcul prévoient un déplacement 5 fois plus grand que les mesures au bout de 120 jours.

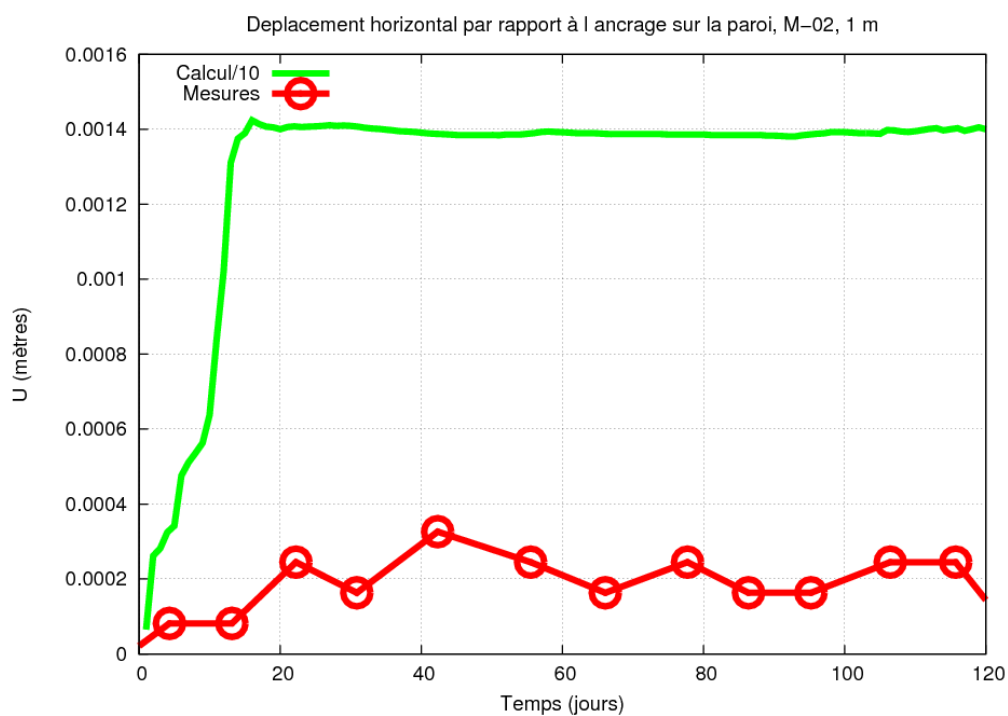


Figure 49 : déplacements horizontaux mesuré et calculé à 1 m de la paroi

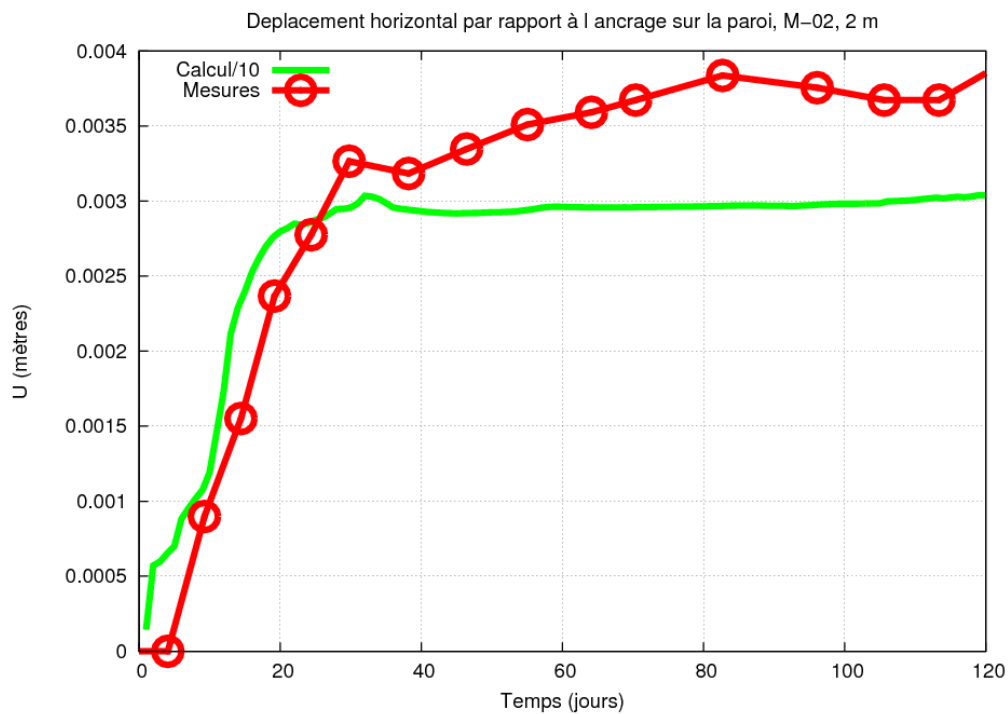


Figure 50 : déplacements horizontaux mesuré et calculé à 3 m de la paroi

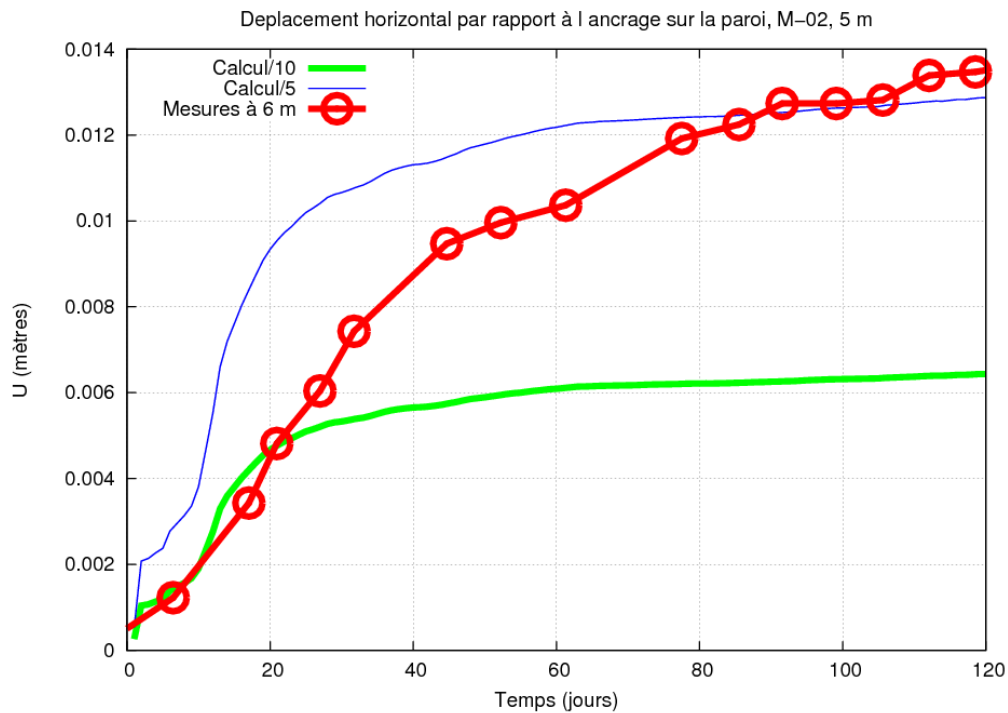


Figure 51 : déplacements horizontaux mesuré et calculé à 5 m ou 6 m de la paroi

3.2.5.1.2 Déplacements : extensomètres M0903-04 et M0903-09.

Ces extensomètres permettent d'obtenir le déplacement vertical par rapport à l'ancrage situé sur la paroi de la galerie. On dispose de mesures expérimentales ne donnant aucun résultat interprétable, avec en chaque point de mesure des déplacements de l'ordre du millimètre. La figure 52 montre ces déplacements pour l'extensomètre M0903-04, les résultats étant comparables pour M0903-09.

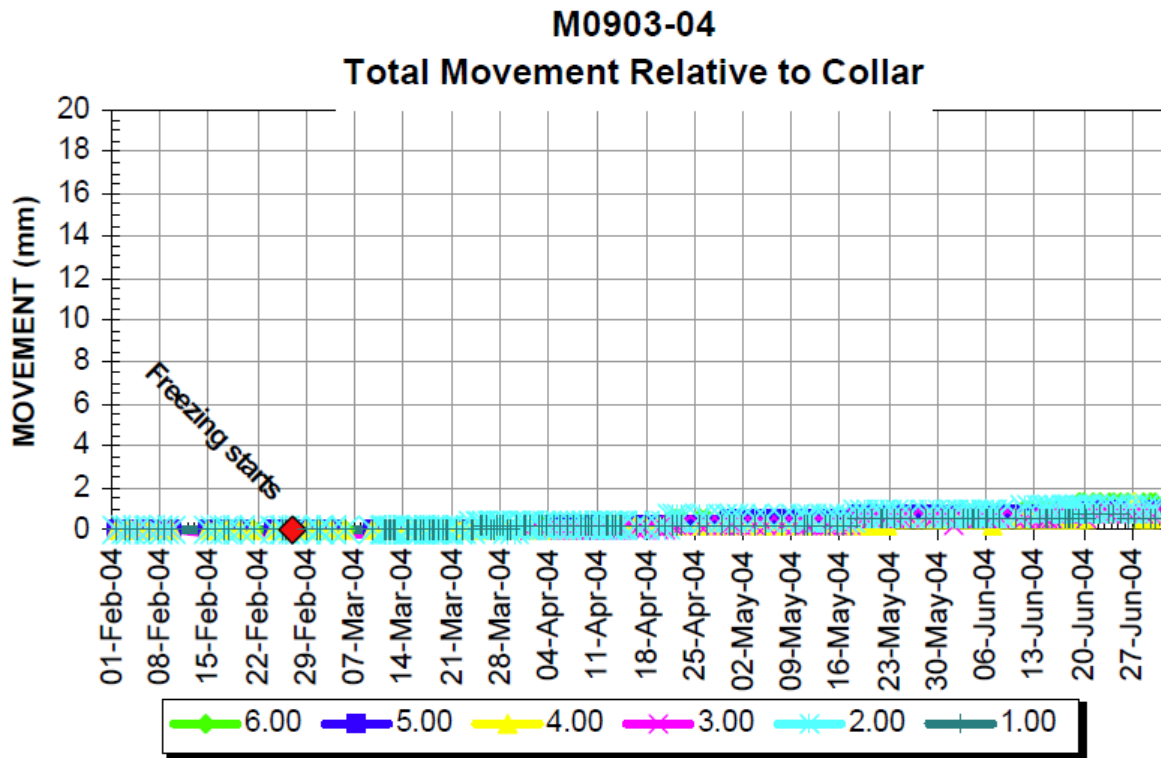


Figure 52 : mesures pour M0903-04 (source : T. Smith, 2006)

Pour présenter les résultats du calcul, on superpose sur le même graphique les déplacements obtenus pour chaque ancrage. La figure 53 montre les résultats du calcul pour l'extensomètre M0903-04. On remarque un déplacement de valeur négative dont la valeur absolue augmente avec la distance au toit de la galerie jusqu'à atteindre 3,5 mm. On a donc une compression au dessus du toit. La figure 54 montre quant à elle les résultats du calcul pour l'extensomètre M0903-09. A part pour l'ancrage situé à 1 m du toit, les déplacements ont une valeur négative, et l'on observe une évolution similaire lorsque l'on s'éloigne du toit. Là encore a lieu une compression. L'amplitude maximale des déplacements par rapport à la paroi est ici de 2 mm.

Sur l'ensemble de ces courbes on remarque une augmentation rapide de la déformation au cours des 20 premiers jours, avant une stabilisation, voire une diminution du déplacement. Celui-ci est moindre sur M0903-09, situé plus loin de la zone congelée. En revanche le temps qui s'écoule avant la stabilisation du déplacement semble être le même aux deux points de mesure.

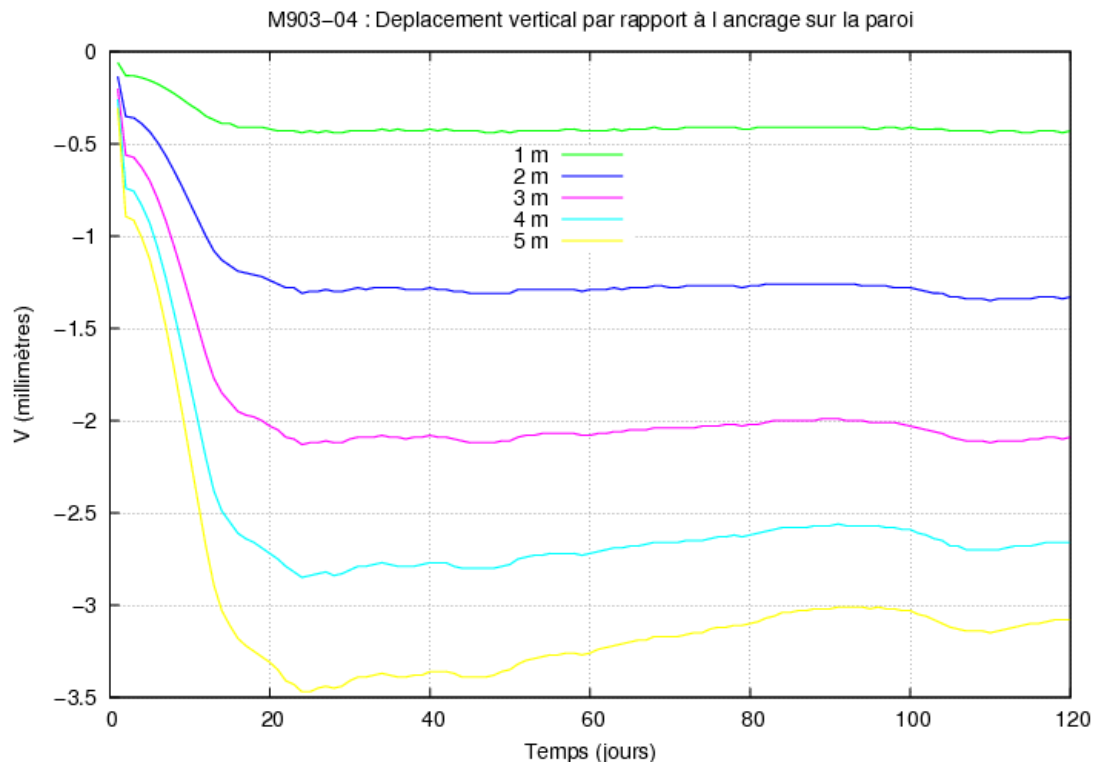


Figure 53 : calculs pour M0903-04

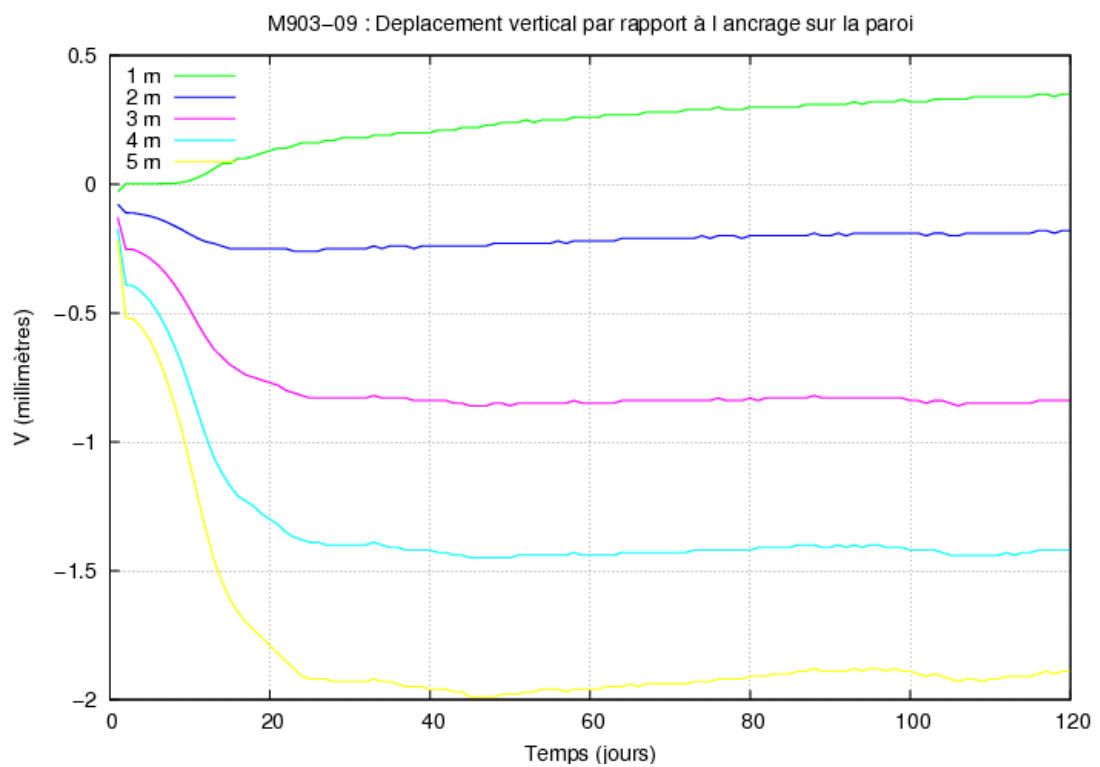


Figure 54 : calculs pour M0903-09

3.2.6 Conclusion du calcul mécanique

Le calcul mécanique donne des résultats mitigés. La comparaison des déplacements calculés avec les mesures montre que si l'allure des courbes obtenues est comparable, l'amplitude calculée est bien plus grande que celle donnée par les mesures. Ces amplitudes sont d'autant moins en accord que l'on s'approche de la paroi de la galerie. On prévoit en particulier des déplacements sensibles au dessus du toit de la galerie, ce qui n'est pas mesuré.

Afin d'améliorer ces résultats, il conviendrait d'une part de prendre en compte la variation des caractéristiques mécaniques avec la température, d'autre part d'introduire un soutènement dans le modèle.

Conclusion

Ce travail aura permis de présenter une analyse critique des méthodes utilisées pour rendre compte des effets de la congélation. Des données de site et de laboratoire ont été analysées dans le but de déterminer leur fiabilité. Il ressort de ces données que peu d'entre elles sont fiables et qu'il existe un manque certain de données expérimentales pour mener à bien un travail complet.

Un modèle thermique et mécanique a ensuite été développé, et ses résultats ont été confrontés à des résultats expérimentaux. Le calcul thermique est validé, mais le calcul mécanique doit être amélioré : les allures des courbes de déplacement semblent correctes, mais les amplitudes ne sont pas cohérentes avec les mesures.

Ce travail ouvre donc plusieurs perspectives. Il est tout d'abord nécessaire de travailler avec des données de site de meilleure qualité. Il faudrait pour cela disposer de résultats obtenus avec une instrumentation fiable sur une géométrie susceptible de faire l'objet d'une modélisation en 2 dimensions. Les mesures doivent permettre de corrélérer efficacement la température et le déplacement, l'idéal serait donc d'obtenir simultanément ces deux grandeurs en un maximum de points. Il paraît également nécessaire de développer le modèle mécanique en prenant en compte le soutènement des galeries étudiées. Enfin, en dernier recours, des modifications de fond de ce modèle peuvent être apportées. Une première amélioration, facile à réaliser, serait de prendre en compte des caractéristiques mécaniques de la roche variables avec la température. On peut ensuite prendre en compte l'anisotropie du gonflement de la glace selon la répartition des contraintes. On pourra enfin modifier le modèle rhéologique employé s'il apparaît que le modèle élastique n'est certainement pas suffisant.

Bibliographie

Agence Internationale de l'Énergie, 2008, *Key world energy statistics*

R. Beddoes, K. Moffitt, septembre 2000, *Numerical analyses to estimate stresses in crosscut linings at Cigar Lake*. Rapport

P. Berest, Ph. Weber (coordinateurs), 1988, *La thermomécanique des roches*, BRGM. École d'été de thermomécanique des roches

R. Brummer, mai 2007, *CAMECO McArthur River Operations geomechanics review visit (app. H)*. Présentation

Cameco Corporation, 2004 *geotechnical drilling*. Présentation

Carslaw, Jaeger, 1959, *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press

H. Côté, 2003, *Comportement thermo-hydro-mécanique des géomatériaux poreux: approches expérimentales et numériques*. Thèse de l'Université catholique de Louvain.

J. Hatley, T. Smith, 20 février 2007, *Effect of ground freezing on ground support and rock mass at McArthur River mine, Technical tour of McArthur River mine*. Présentation

G. Newman (Geoanalysis2000), *Artificial ground freezing of the McArthur River uranium ore deposit*. Article

G. Newman (Geoslope), 20 novembre 2006, *Ground freezing modeling for Cigar Lake mine 465 m EL remediation*. Rapport

Parsons-Brinckerhoff, 2007, *Evaluation of effects of freezing on the ground fall*

D. Sheng, S. Knutsson, 1993, *Sensitivity analysis of frost heave – A theoretical study*, in **A. Phukan** (editor), 1993, *Frost in geotechnical engineering*

T. Smith, juillet 2006, *Influence of artificial ground freezing on the deformation of a deep excavation in hard rock*. Mémoire de MSc de l'université du Saskatchewan

S. Thiers, B. Peuportier, avril 2007, *Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiments*. Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d'été

Sites internet

Areva Resources Canada : <http://www.arevaresources.ca/>

Ressources naturelles du Canada : <http://www.nrcan-rncan.gc.ca>

Annexes

Annexe 1 : extraits du fichier de données du calcul thermique

```
*  DONNEES POUR CHEF(CHEFLEC) VERSION 090101.
*****
*  ==== BLOC COORDONNEES
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD ---NZ---NP-FORM-----A1.-----A2.----GAMMA.-----TETA.-----T1.-
-----T2.
*  62458 noeuds au total.
*  ??? AXI ou DPL ou ...
AXI  62803
*****
*  ==== BLOC CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*MAT      -----R1.-----R2.-----R3.-----R4.-----R5.-----R6.-
-----R7.
ROCH      1.          0          1.          1.
AIR      1088640.
*Chefcalcl donne la valeur de lambda et c pour le matériau 1, et lit la
valeur pour le matériau 2
*Air : échangeur surfacique avec un coefficient de 12.6J/m²/K soit
1088640 J/jour/m²/°C
FIN
*
*  ==== BLOC EMPLACEMENT DES MATERIAUX
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*MAT ---IC---IR---IP---JR---JP---I1---I2---I3---I4---I5---I6---I7---I8-
--I9--I10
*  30941 elements normaux.
ROCH      3      1      1      1      1 1151 1152 1153 1154 1155 1156      1
...
...
...
ROCH      3      1      1      1      12578725786 4237449164491562458      1
AIR      -3  172      2      1      1624596246062461      1
*On forme (345 noeuds -1)/2 = 172 éléments de degré 2, en commençant
par l'élément 62459-62460-62461
FIN
*
*  ==== BLOC LIAISONS
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD ---I1---I2---I3---I4 REFE
CIMP      1  301      1      TIMP
CIMP      633  174      1      TMAX
CIMP 62459  345      1      TMAX
*L'air est à la température TMAX (la même qu'à l'infini dans la roche)
FIN
```

```

*
* ===== BLOC CHARGEMENT (Flux ...)
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
* x=espace ou 2 selon ID
*CODx---I1---I2---I3-----R1.-----R2.-----R3.-----R4.-----R5.-
-----R6.
TIMP                                     1.
*La valeur de TIMP varie avec le temps et est donnée par le facteur de
chargement 1 dans le fichier c22.his
BIS
TMAX                                     15.
*Le "BIS" signifie qu'on a un 2e chargement --> facteur de chargement
2, qui sera toujours égal à 1.
FIN
*
* ===== BLOC TEMPERATURES INITIALES
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD ---I1---I2---I3-----R1.-----R2.-----R3.-----R4.-----R5.-
-----R6.
          162803      1          15.          0.          0.
FIN              0.          15.          1.
*Les trois réels signifient : T0=0 ; P1(T0)=15 ; P2(T0)=1.

```

Annexe 2 : fichier d'historique du calcul thermique

```

*Cf. J05
*23456789 123456789 123456789 123456789 123456789 123456789 123456789
TESTTEST    0.2      0.2      10.7      1.
      0.2      0.2
      123979139791      15978659786      13933539335      13436534365
15875358753      1
      1427814278      1 1011 1011      1 1040 1040      1 1059 1059      1 1081
1081      1
      1110 1110      1 1141 1141      1
*On a défini 12 noeuds où l'on veut éditer les résultats
*On ne change ni les conditions de calcul ni les conditions d'édition
jusqu'à T=10
      0.200      0.400      6.84      1.00
      0.200      0.600      3.34      1.00
      0.200      0.800      0.164      1.00
      0.200      1.00      -2.71      1.00
      0.200      1.20      -5.30      1.00
      0.200      1.40      -7.65      1.00
      0.200      1.60      -9.78      1.00
      0.200      1.80      -11.7      1.00
      0.200      2.00      -13.4      1.00
      0.200      2.20      -15.0      1.00
      0.200      2.40      -16.4      1.00
      0.200      2.60      -17.7      1.00
      0.200      2.80      -18.9      1.00
      0.200      3.00      -20.0      1.00
      0.200      3.20      -20.9      1.00
      0.200      3.40      -21.8      1.00
      0.200      3.60      -22.6      1.00
      0.200      3.80      -23.3      1.00

```

0.200	4.00	-23.9	1.00
0.200	4.20	-24.5	1.00
0.200	4.40	-25.0	1.00
0.200	4.60	-25.5	1.00
0.200	4.80	-25.9	1.00
0.200	5.00	-26.3	1.00
0.200	5.20	-26.7	1.00
0.200	5.40	-27.0	1.00
0.200	5.60	-27.3	1.00
0.200	5.80	-27.5	1.00
0.200	6.00	-27.8	1.00
0.200	6.20	-28.0	1.00
0.200	6.40	-28.2	1.00
0.200	6.60	-28.3	1.00
0.200	6.80	-28.5	1.00
0.200	7.00	-28.6	1.00
0.200	7.20	-28.8	1.00
0.200	7.40	-28.9	1.00
0.200	7.60	-29.0	1.00
0.200	7.80	-29.1	1.00
0.200	8.00	-29.2	1.00

*Ici la variation (lente) est remplacée par une variation linéaire pour éviter un saut

0.2	10.	-30.	1.
-----	-----	------	----

*A partir d'ici TIMP = constante. On change les pas D, DTI et DTMOD.

TEST	1.	730.	-30.	1.
0.5	0.5			

STOP

Annexe 3 : sous-programmes CONDUC et CAPACI de CHEFCAL

```

SUBROUTINE CONDUC(N,M,A,X,Y,T,H)
C      H(1),H(2),H(3) : CONDUCTIVITES FONCTIONS DE (X,Y,T).
C      A(1),A(2),A(3) : VALEURS FOURNIES A CHEFLEC.
C      N : NUMERO DU NOEUD, M : NUMERO DU MATERIAU.
C      (X,Y) : COORDONNEES, T : TEMPERATURE.
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION A(3),H(3)
      lambdac=345600.
C      lambda du terrain non congelé, en J/jour/m/°C
      lambdanc=259200.
      IF (T .LT. 0) THEN
        H(1)=A(1)*lambdac
        H(2)=A(2)*lambdac
        H(3)=A(3)*lambdac
      ELSE
        H(1)=A(1)*lambdanc
        H(2)=A(2)*lambdanc
        H(3)=A(3)*lambdanc
      ENDIF
      RETURN
      END
      FUNCTION CAPACI(N,M,C,X,Y,T)
C      CAPACI = CHALEUR VOLUMIQUE FONCTION DE (X,Y,T).
C      C : VALEUR FOURNIE A CHEFLEC.

```

```

C      N : NUMERO DU NOEUD, M : NUMERO DU MATERIAU.
C      (X,Y) : COORDONNEES, T : TEMPERATURE.
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      Cnc=2.5E6
C      Capacité du terrain non congelé, en J/m³
      Cc=2.0E6
      Cgel=52.0E6
C      Capacité équivalente simulant la chaleur latente entre 0°C et 1°C
pour une porosité de 15%
      IF (T .LT. 0) THEN
        CAPACI=Cc*C
      ELSEIF (T .LT. 1) THEN
        CAPACI=Cgel*C
      ELSE
        CAPACI=Cnc*C
      ENDIF
C      ELSE
C      CAPACI=C
C      ENDIF
      RETURN
      END

```

Annexe 4 : extraits du fichier de données du calcul mécanique

```

*   DONNEES POUR VIPLEF(LECVF) VERSION 090101.
*****
**
*   ==== BLOC COORDONNEES
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD ---NZ---NP-FORM-----A1.-----A2.----GAMMA.-----TETA.-----T1.-
-----T2.
*   62458 noeuds au total.
*   ??? AXI ou DPL ou ...
AXI  62803
*
*****
**
*   ==== BLOC CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*MATnr--A.-----E1.-----NU1.-----E2.-----NU2.-----MU.-----C.-
PHI.-TET.
ROCH      30.0E9      0.13
*Valeurs indiquées par T. Smith pour l'étude de cas 2
FIN
*
*   ==== BLOC EMPLACEMENT DES MATERIAUX
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*MAT ---IC---IR---IP---JR---JP---I1---I2---I3---I4---I5---I6---I7---I8-
--I9--I10
*   30941 elements normaux.
ROCH      3      1      1      1      1 1151 1152 1153 1154 1155 1156      1

```

```

...
...
...
ROCH      3      1      1      1      12578725786 4237449164491562458      1
*Ici on n'attribue pas de matériau aux noeuds "de l'air" : l'air n'a
pas d'influence sur la mécanique !
FIN
*
* ===== BLOC LIAISONS
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD ---I1---I2---I3---I4      -----R1. REFE
SYMH                      300.
SYMV                      303.
SYMH                      0.
*On bloque le déplacement en "l'infini" (X=303 et Y=300) et en Y=0
(symétrie)
FIN
*
* ===== BLOC CONTRAINTES INITIALES
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*COD      --R1.--R2.-----R3.-----R4.-----R5.-----R6.-----R7.-
-----R8.
*On ne met pas de contraintes initiales dans le cas élastique car on
étudie l'influence de congélation seule
FIN
*
* ===== BLOC CHARGEMENT (Pressions ...)
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
* x=espace ou 2 selon ID
*CODx---I1---I2---I3-----R1.-----R2.-----R3.-----R4.-----R5.-
-----R6.
FIN
*
* ===== BLOC DILATATIONS THERMIQUES
*23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789 *23456789
*23456789
*MAT      ---A11---.---A22---.---A12---.---A33---.
ROCH      1.      1.      1.
*On met un facteur multiplicatif de 1 car les vraies valeurs du
gonflement sont indiquées dans Nc22.tpr
FIN

```

Table des matières

<u>RÉSUMÉ</u>	2
<u>REMERCIEMENTS</u>	3
<u>Introduction</u>	4
<u>1 Présentation du problème</u>	5
<u>1.1 L'uranium</u>	5
<u>1.2 Les mines de McArthur River et de Cigar Lake</u>	5
<u>1.2.1 Contexte géologique</u>	5
<u>1.2.2 La mine de McArthur River</u>	7
<u>1.2.3 La mine de Cigar Lake</u>	8
<u>1.3 La technique de congélation</u>	10
<u>1.3.1 Mise en œuvre : principe</u>	11
<u>1.3.2 Mise en œuvre à McArthur River</u>	11
<u>1.3.3 Mise en œuvre à Cigar Lake</u>	133
<u>1.3.4 Problématique</u>	133
<u>2 Synthèse des travaux antérieurs</u>	144
<u>2.1 Phénomènes physiques liés à la congélation</u>	14
<u>2.1.1 La solidification de l'eau</u>	14
<u>2.1.2 Les modifications des propriétés thermiques et mécaniques</u>	15
<u>2.1.3 Les mouvements d'eau</u>	16
<u>2.2 Études réalisées : mesures</u>	17
<u>2.2.1 Cigar Lake : Parsons-Brinkerhoff (2007)</u>	18
<u>2.2.2 Cigar Lake : Golder (2000)</u>	18
<u>2.2.3 Cigar Lake : Hatley (2007)</u>	21
<u>2.2.4 McArthur River : Smith (2006)</u>	22
<u>2.2.5 McArthur River : Hatley, Smith (2007)</u>	27
<u>2.2.6 McArthur River : Brummer (2007)</u>	27
<u>2.3 Études réalisées : modèles</u>	28
<u>2.3.1 Approches de Golder et Parsons-Brinkerhoff</u>	29

2.3.2	Approche de T. Smith (2006)	32
2.3.3	Utilisation de ces résultats et méthode retenue	34
3	Approche thermique et mécanique développée	35
3.1	Mise en place du modèle et étude d'un cas simple	35
3.1.1	Définition de la géométrie	35
3.1.2	Calcul thermique	37
3.1.3	Gonflement dû à la variation de température	43
3.1.4	Calcul mécanique	45
3.1.5	Conclusion	49
3.2	Étude d'un cas réel	50
3.2.1	Cas étudié	50
3.2.2	Comparaison d'un modèle axisymétrique et d'un modèle plan	52
3.2.3	Géométrie du modèle étudié	56
3.2.4	Calcul thermique	58
3.2.5	Calcul mécanique	66
3.2.6	Conclusion du calcul mécanique	73
	Conclusion	74
	BIBLIOGRAPHIE	75
	ANNEXES	76