

ANNEXE IV

RAPPORT HYDROGÉO-SOL INC.

Roland Thibault inc.

Caractérisation géologique et hydrogéologique
du substratum rocheux au L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton

Projet: HS 9217-01

Experts-Conseils Hydrogéolo-Sol Inc.

Juillet 1992





Chicoutimi, le 22 juillet 1992

Roland Thibault inc.
702, Route 137
Ste-Cécile-de-Milton (Québec)
J0E 2C0

À l'attention de M. Daniel Thibault

Projet: Caractérisation géologique et hydrogéologique du
substratum rocheux au L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton

Objet: Rapport technique

N/D: HS 9217-01

Monsieur Thibault,

Nous vous transmettons notre rapport technique concernant la réalisation d'une étude de caractérisation géologique et hydrogéologique du substratum rocheux au lieu d'enfouissement sanitaire de Ste-Cécile-de-Milton.

Si vous désirez obtenir des renseignements supplémentaires sur les sujets traités dans ce rapport, il nous fera plaisir de vous les faire parvenir dans les plus brefs délais.

Espérant le tout à votre entière satisfaction, veuillez agréer, Monsieur Thibault, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc.

Christian Denis, ing. M.Sc.A.
Président

p.j. Rapport

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 Mandat	1
1.2 Calendrier des travaux.....	1
2.0 CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX.....	3
2.1 Géologie régionale.....	3
2.2 Géologie locale.....	6
2.3 Description du roc échantillonné	6
2.4 Qualité du roc et description des discontinuités dans les forages.....	9
3.0 CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX.....	11
3.1 Essais d'injection à charge constante	11
3.2 Paramètres et propriétés hydrauliques du substratum rocheux	15
3.2.1 Conductivité hydraulique (K).....	15
3.2.2 Ouverture ($2b_{fu}$) d'une fracture unique équivalente	16
3.2.3 Porosité de fractures (n_f)	20
3.2.4 Gradients hydrauliques verticaux (i_v).....	22
4.0 CONCLUSION ET COMMENTAIRES	24
4.1 Généralités.....	24
4.2 Conditions géologiques	24
4.3 Conditions hydrogéologiques	27
5.0 RÉFÉRENCES	30

ANNEXES

- I Documents photographiques
- II Description de forage en rocher
- III Rapport pétrographique
- IV Profils des gradients hydrauliques verticaux au droit des forages
- V Relation entre la conductivité hydraulique (K) et la densité de fractures ouvertes
- VI Plan de localisation des forages

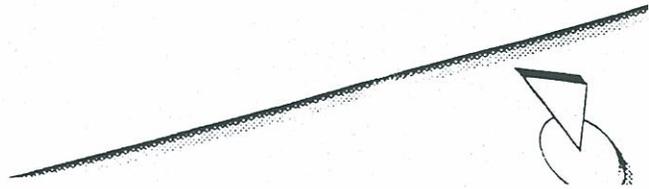


TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

TABLEAUX

Tableau 1. Nombre et espacement moyen des discontinuités naturelles	10
Tableau 2. Résultats des essais d'injection à charge constante.....	19
Tableau 3. Porosité de fractures (n_f)	21
Tableau 4. Valeurs et sens des gradients hydrauliques verticaux (i_v)	23

FIGURES

Figure 1. Localisation du site investigué.....	2
Figure 2. Géologie régionale simplifiée dans les environs du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton (adaptée de Clark, 1977).....	4
Figure 3. Données structurales relevées sur des affleurements rocheux avoisinants le L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton.....	7
Figure 4. Schéma d'installation des essais d'injection à charge constante dans un milieu rocheux fracturé.....	12
Figure 5. Évolution de la pression hydraulique lors d'un essai d'injection à charge constante.....	14
Figure 6. Schéma du modèle de la fracture unique équivalente (adaptée de Raven, 1986).....	17

Roland Thibault inc.

1.0 INTRODUCTION

1.1 Mandat

L'entreprise, Roland Thibault inc., a mandaté notre firme, *Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc.*, afin de réaliser une étude de caractérisation géologique et hydrogéologique du substratum rocheux au lieu d'enfouissement sanitaire (L.E.S.) de Ste-Cécile-de-Milton (figure 1: planche 1, annexe I).

Notre mandat consistait principalement à décrire le roc échantillonné et à effectuer des essais d'injection à charge constante dans le but de déterminer les conditions géologiques et hydrogéologiques du substratum rocheux au droit de chaque forage.

Les points suivants sont traités à l'intérieur de notre rapport:

- la description de la géologie régionale;
- la description de la géologie locale;
- la description du roc échantillonné;
- la qualité du roc et la description des discontinuités dans les forages;
- les essais d'injection à charge constante;
- les paramètres hydrauliques du substratum rocheux;
- les conclusions et commentaires.

1.2 Calendrier des travaux

L'ensemble des travaux suivants a été effectué dans le cadre de ce mandat:

01/06 au 06/06/92	Réalisation des essais d'injection à charge constante à l'aide du laboratoire mobile d'injection.
04/06 au 06/06/92	Description des échantillons de roc et des affleurements rocheux.
09/06/92	Description de lames minces en laboratoire.

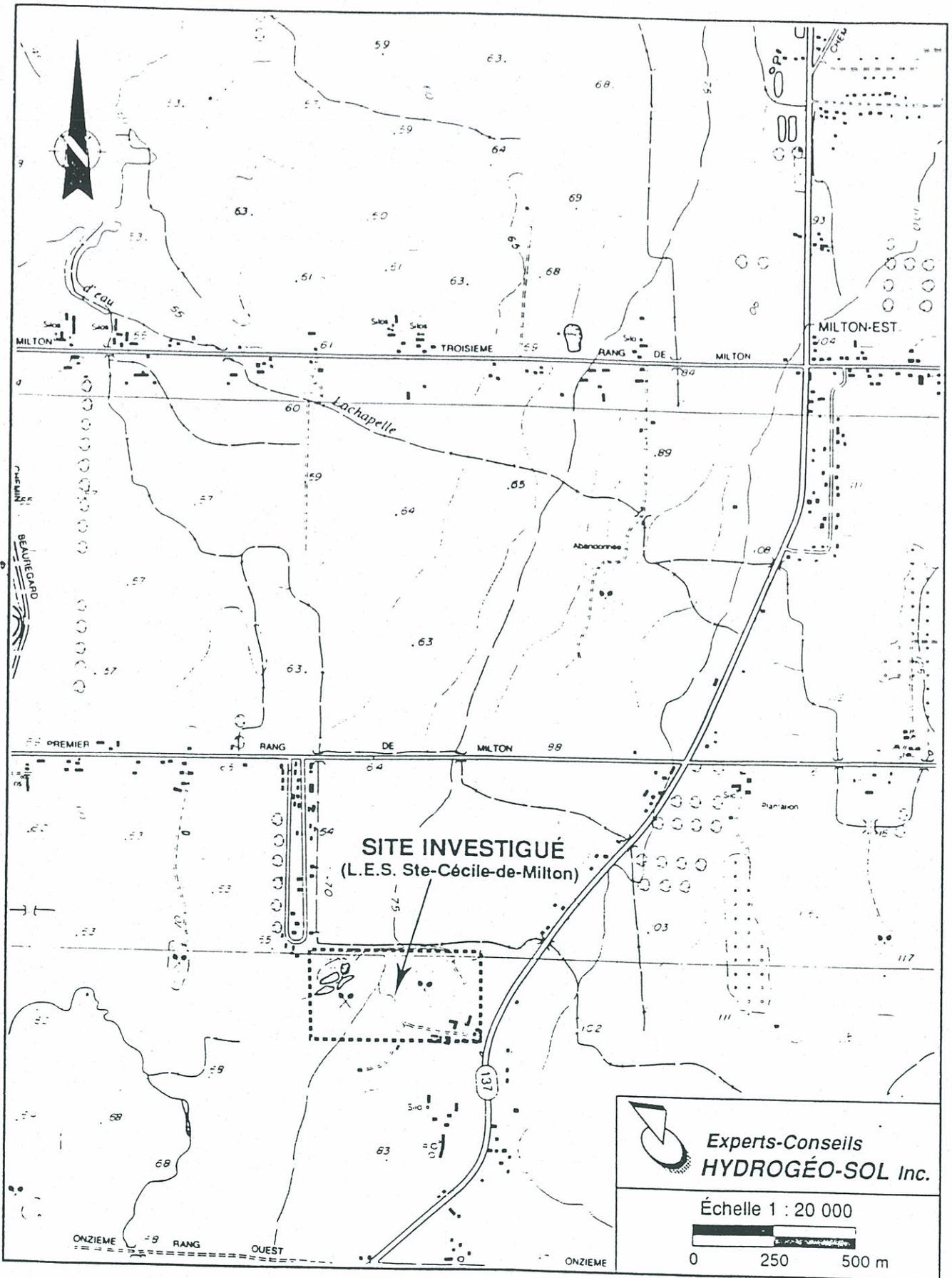


Figure 1. Localisation du site investigué

2.0 CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX

2.1 Géologie régionale

Les plus récents travaux de cartographie géologique du socle rocheux de cette région ont été effectués par le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, entre 1976 et 1977 (figure 2). Les dépôts meubles reposent sur des roches sédimentaires du Groupe de Shefford de la province géologique des Appalaches et du Complexe de St-Germain de la province géologique des Basses-Terres du St-Laurent (Clark, 1977).

Le Groupe de Shefford d'âge cambrien se divise en deux (2) formations. À la base, la Formation de Granby est formée d'une interstratification de grès et d'argilites schisteuses rouges, grises et vertes. Les roches de cette formation affleurent au nord et à l'ouest du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton. La Formation de Mawcook qui est sus-jacente, est la plus répandue dans la région étudiée. Elle est composée principalement d'argilites schisteuses rouges, grises et vertes. La couleur de l'argilite est fonction des conditions de déposition primaire ou d'altération secondaire causée par des phénomènes structuraux (Clark, 1977). Le L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton se situe à l'intérieur de cette formation rocheuse (figure 2).

Le Complexe de St-Germain d'âge ordovicien est constitué de shales calcaireux, d'argilites grises, de calcaires argileux, de conglomérats et de roches non différenciées (roches broyées et mélangées). Ce complexe de roches est localisé à l'ouest du site investigué.

Des roches ignées recoupent les roches sédimentaires précédemment décrites. Le mont Yamaska, qui se situe à environ cinq (5) km à l'ouest du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton, fait partie des collines Montérégiennes d'âge crétacé que l'on observe sur le territoire. Le pluton intrusif du mont Yamaska, qui est principalement composé de roches gabbroïques, forme un cercle irrégulier et occupe approximativement une superficie de huit (8) km². Le pluton est entouré par une auréole de cornéennes qui à l'origine, étaient composées de roches sédimentaires qui se sont fortement métamorphosées au contact de la roche intrusive.

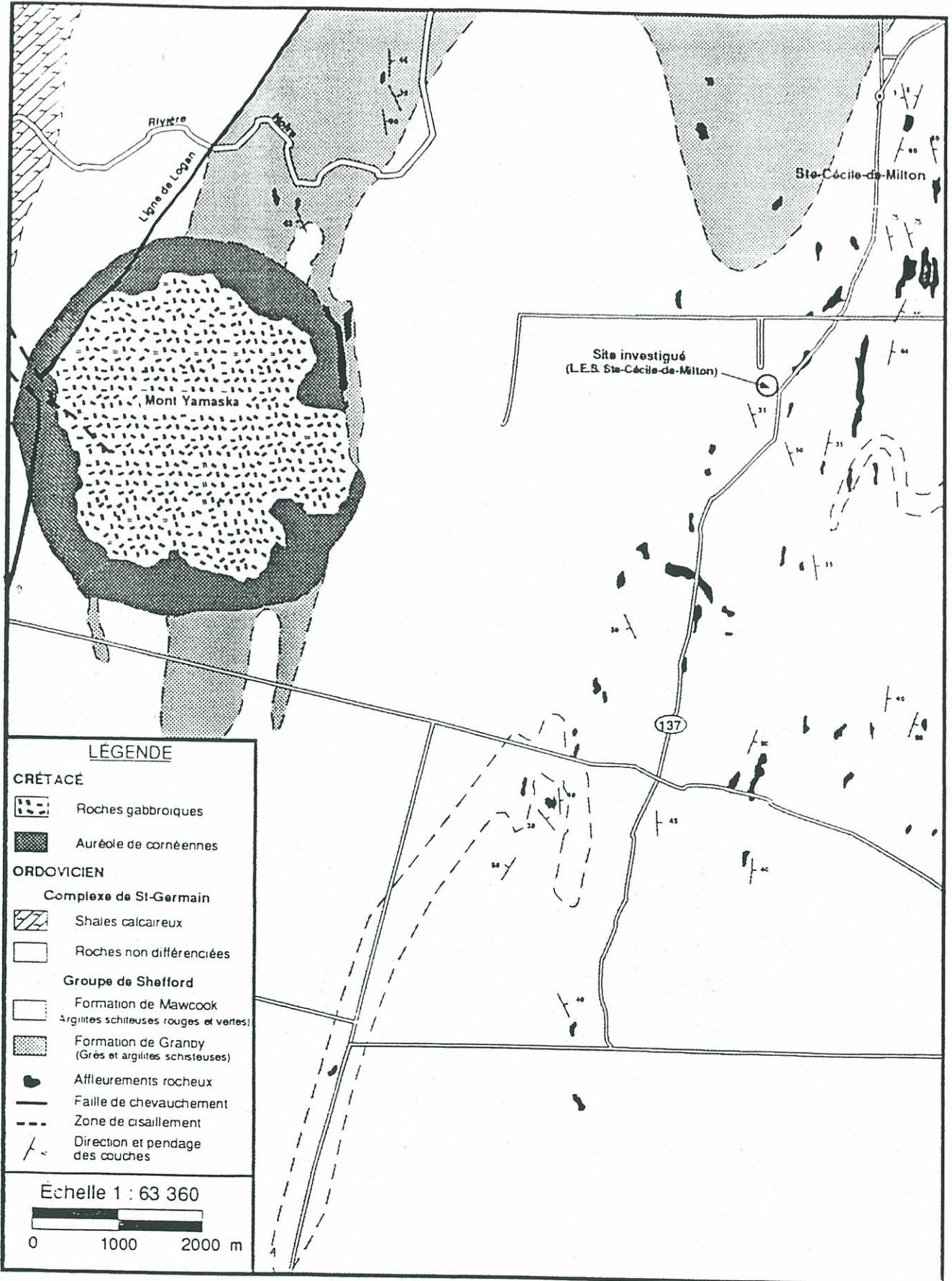


Figure 2. Géologie régionale simplifiée dans les environs du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton (adaptée de Clark, 1977)

Des intrusions de dykes de composition très variée (felsique à mafique) sont présents à l'intérieur et à l'extérieur du pluton intrusif. Ces dykes, qui sont associés au grand complexe intrusif des Montérégiennes, recoupent à plusieurs endroits les roches sédimentaires cambro-ordoviciennes.

Les roches sédimentaires de la région sont déformées par des plis dont les axes suivent sensiblement l'attitude des structures appalachiennes régionales, soit une direction de N010° et un pendage de 20° E (Clark, 1977). La plupart des axes de plis ont une faible amplitude et une courte longueur d'onde. La direction des couches lithologiques varie de N340° à N020° avec un pendage variant de 30° à 75° vers l'est. Une schistosité pénétrative (clivage ardoisier) est très bien développée dans presque toutes les roches de la région, et plus particulièrement dans les argilites. La direction des plans de clivage varie de N000° à N045° avec un pendage variant de 20° à 80° vers l'est.

Malgré la grande superficie d'affleurements, il y a très peu de failles qui sont visibles en surface. Clark (1977) les a décrites comme étant des failles normales ou des failles de chevauchement. Une faille majeure de chevauchement, représentée par la ligne de Logan, passe à environ sept (7) km à l'ouest du site investigué. La ligne de Logan met en contact les roches de la province géologique des Basses-Terres du St-Laurent avec celles de la province géologique des Appalaches. À l'ouest de cette faille, les roches sont broyées, les pendages plus prononcés et on y observe une multitude de brèches. Des zones de cisaillement sont également associées à la ligne de Logan (figure 2).

Clark (1977) a identifié deux (2) familles de fractures superficielles non pénétratives qui appartiennent à un système régional de fracturation. La première famille a une direction qui varie de N080° à N110° avec un pendage prononcé vers le nord ou le sud. La deuxième famille correspond à des fractures de tension qui se présentent parallèlement aux axes des plis régionaux, soit dans une direction de N010°. Les fractures de la deuxième famille sont généralement remplies de quartz.



2.2 Géologie locale

Quelques affleurements rocheux avoisinants le site investigué ont été décrits par un géologue de la firme: *Experts-Conseils Hydrogéo-Sol Inc.*. Des relevés structuraux ont permis de définir la lithologie et de mesurer la schistosité ainsi que les plans de fractures visibles en surface (figure 3).

Le site investigué se situe à l'intérieur de la formation de Mawcook qui se compose d'argilites schisteuses rouges à la hauteur du lieu d'enfouissement sanitaire de Ste-Cécile-de-Milton. Localement, le roc est recouvert par un dépôt de till d'origine glaciaire qui possède une épaisseur qui varie de un (1) à quatre (4) m. Une schistosité pénétrative (clivage ardoisier) est très bien développée dans l'argilite schisteuse. La direction moyenne des plans de clivage qui ont été mesurés est de N045° avec un pendage de 55° vers le sud-est. Une seule famille de fractures superficielles non pénétratives a été observée à la surface des affleurements rocheux. Les fractures ont une direction qui varie de N140° à N180° avec un pendage variant de 23° à 55° vers le sud-ouest. La direction moyenne de cette famille de fractures est de N160° avec un pendage moyen de 55° vers le sud-ouest (figure 3). À noter que l'espacement moyen des fractures superficielles n'a pu être déterminé en raison du nombre limité de fractures visibles.

Selon la carte géologique de Clark (1977), les couches lithologiques ont une direction moyenne de N350° et un pendage de 35° vers le nord-est dans le secteur du site investigué (figure 3). À noter qu'aucun relevé de direction/pendage des couches lithologiques n'a été effectué, en raison de l'absence de contact net sur les affleurements rocheux qui ont été décrits près du lieu d'enfouissement sanitaire de Ste-Cécile-de-Milton.

2.3 Description du roc échantillonné

Selon des informations obtenues auprès d'un représentant de la compagnie de forage: S.L. (1983) inc., et selon nos propres observations, sept (7) forages verticaux (TF-1 à TF-7) ont été exécutés dans les limites du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton (annexe VI). Des échantillons de roc ont été récupérés au moyen d'un carottier diamanté de calibre "NQ-3" (75.7 mm de diamètre extérieur) à triple paroi ayant une longueur de 1.52 m. Le roc a été carotté en continu sur une longueur variant de 9.56 à 10.26 m selon le forage (planches 2 à 8, annexe I; annexe II)



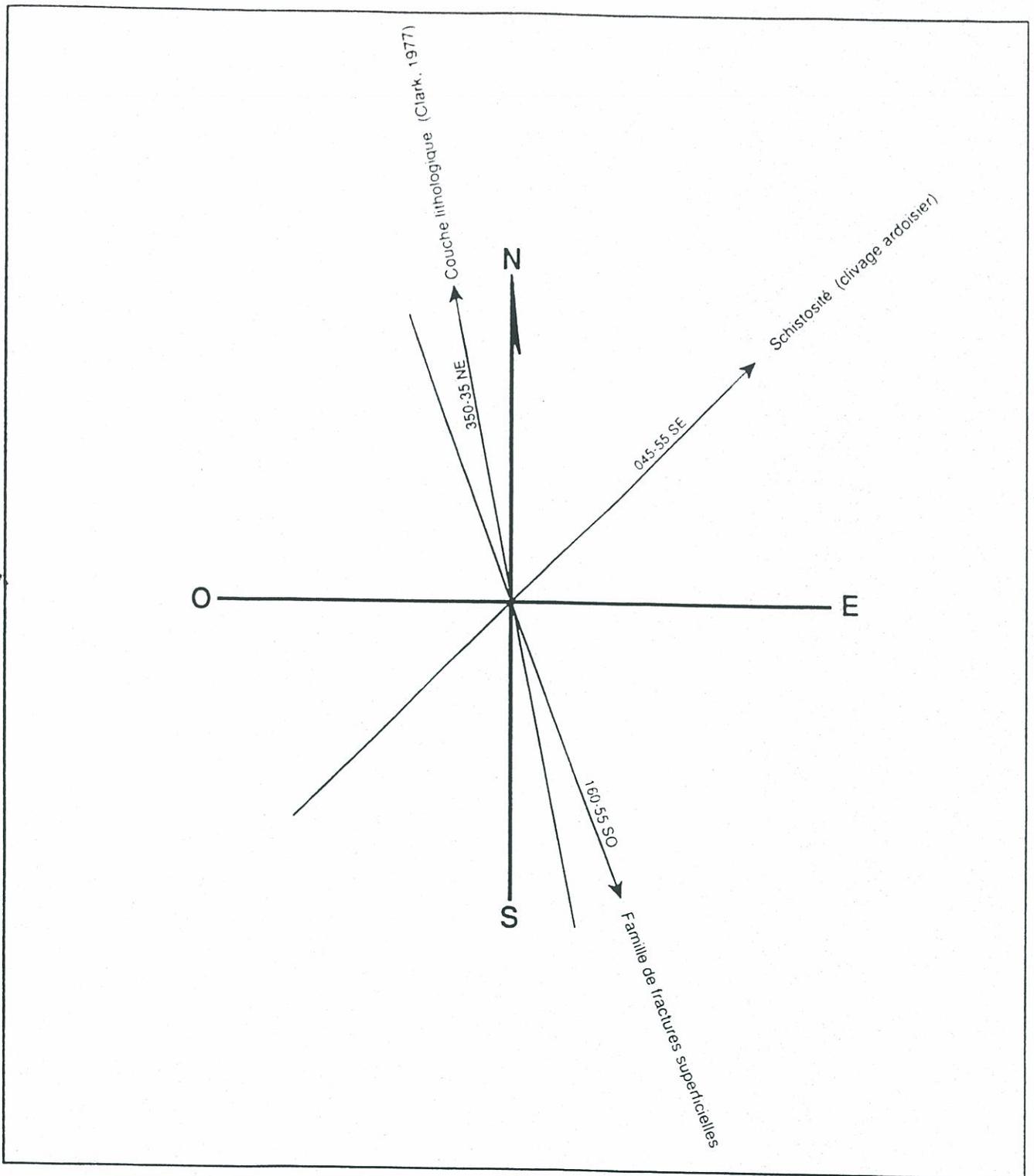


Figure 3. Données structurales relevées sur des affleurements rocheux avoisinants le L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton

À noter que des échantillons de roc représentatifs de différentes lithologies rencontrées dans les forages ont été prélevés afin de réaliser une étude pétrographique sur des lames minces en laboratoire (planches 9 à 11, annexe I).

Le roc échantillonné sur la longueur des sept (7) forages est sensiblement de même nature et relativement homogène. Un examen visuel des carottes montre que la roche échantillonnée au toit du massif rocheux est principalement composée d'argilite schisteuse rouge de la Formation de Mawcook. Des passages d'argilite schisteuse de couleur verdâtre sont observés à l'intérieur de tous les forages. La schistosité (clivage ardoisier) est bien développée et se présente à 55° en moyenne par rapport à l'axe du forage. Des veines et des veinules de quartz et/ou de calcite recoupent sporadiquement le roc par endroit. Elles se présentent avec ou sans orientation préférentielle. Des minéraux d'altération (chlorite, séricite) et de la pyrite sont souvent associés aux veines et veinules. À l'intérieur du forage TF-5, une multitude de veines de quartz et de carbonates sans orientation préférentielle recoupent l'argilite schisteuse, donnant à la roche un aspect bréchique (planche 6, annexe I; annexe III). Des intrusions de dykes de composition felsique et syénitique sont observées respectivement dans les forages TF-3 et TF-4 (planches 4 et 5, annexe I).

L'examen mégascopique d'échantillons représentatifs de l'argilite schisteuse rouge (TF-2) et verte (TF-6) montre que cette roche est constituée de grains aphanitiques (non visibles) de même nature (planches 3 et 7, annexe I; annexe III). La roche réagit faiblement sous l'effet de l'acide chlorhydrique (10%). L'examen microscopique sur des lames minces révèle que l'argilite schisteuse est composée de 70% de grains cryptocristallins (diamètre < 0.01 mm) qui forment la matrice argileuse et de 30% de grains de quartz (planches 9 et 10, annexe I). Les grains de quartz sont arrondis, de forme elliptique et ont un diamètre moyen de 0.03 mm. Les particules de quartz sont orientées de manière à définir la schistosité. Des carbonates, des oxydes de fer, des micas et de la chlorite sont présents en traces occasionnelles dans les échantillons décrits. L'étude pétrographique en lame mince montre que cette roche est métamorphisée au faciès schiste vert et se définit comme une argilite schisteuse selon la classification de Folk (1974) (annexe III).



L'examen mégascopique du dyke felsique montre que cette roche intrusive de couleur rose-blanchâtre est principalement composée de grain fin de quartz, de feldspaths plagioclases, de micas, de carbonates, de chlorite et de minéraux opaques. Des traces d'altération de couleur rouille sont présentes en surface de la roche. Ce dyke a été intercepté dans le forage TF-3 à une profondeur de 3.45 m. Il recoupe l'argilite schisteuse sur 1.07 m de longueur et selon un angle de 47° par rapport à l'axe du forage (planche 4, annexe I; annexes II et III).

Un dyke de composition syénitique gris-verdâtre à grain fin a été rencontré dans le forage TF-4 à une profondeur de 10.90 m. Il recoupe l'argilite schisteuse sur une longueur de 0.73 m et selon un angle de 68° par rapport à l'axe du forage (planche 5, annexe I; annexe II). L'examen mégascopique du dyke montre que cette roche intrusive est holocristalline (complètement cristallisée) et de composition minéralogique homogène. Cette roche possède également une faible propriété magnétique. L'examen microscopique sur une lame mince révèle que ce dyke est constitué de 62% de feldspaths plagioclases (andésine), de 15% de biotite, de 7% de chlorite, de 6% d'augite, de 5% de minéraux opaques, de 4% de carbonate, de 1% de sphène et de traces de pyrite (planche 11, annexe I). Les grains sont distribués uniformément de manière à former une texture intergranulaire. L'étude pétrographique en lame mince montre que cette roche intrusive se définit comme une syénite selon la classification de Streickeissen (1976) (annexe III).

2.4 Qualité du roc et description des discontinuités dans les forages

Le pourcentage de récupération des carottes de roc varie de 25 à 100%, bien qu'il soit pratiquement de 100% pour l'ensemble des forages. Les valeurs du "RQD" (Rock quality designation) varient entre 2 et 95% selon le forage, pour une valeur moyenne qui oscille autour de 82%. Cette valeur moyenne correspond à une bonne qualité de roc (annexe II). À noter qu'un grand nombre de fractures ont été induites par les opérations de forage et qu'elles n'ont pas été considérées dans le calcul du "RQD".

Une attention particulière a été portée sur les discontinuités naturelles lors de la description des carottes de roc. La grande majorité des fractures sont remplies par de la calcite et/ou du quartz qui se présentent en veines et en veinules de quelques millimètres d'épaisseur.



3.0 CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE DU SUBSTRATUM ROCHEUX

3.1 Essais d'injection à charge constante

Des essais d'injection à charge constante ont été réalisés par une équipe de la firme: *Experts-Conseils Hydrogéolo-Sol Inc.*, entre le 1^{er} et le 6 juin 1992. Les essais ont été effectués à l'intérieur des forages TF-1, TF-4, TF-5, TF-6 et TF-7; les forages TF-2 et TF-3 étant obstrués à différentes profondeurs.

L'équipement qui a été utilisé est une unité mobile composée d'un système d'acquisition de données, de quatre (4) réservoirs d'injection gradués, d'une bonbonne d'azote comprimé, d'un panneau de contrôle pour l'injection et de deux obturateurs pneumatiques séparés par un tuyau métallique perforé (planche 12, annexe I; figure 4). Les obturateurs en caoutchouc, qui ont une longueur de 1.00 m, isolent un intervalle de roc de 1.50 m de longueur lorsqu'ils sont gonflés. Un capteur de pression, situé au-dessus de l'obturateur supérieur, accède par une tubulure à l'intervalle isolé par les obturateurs pour y mesurer la pression hydraulique. L'ensemble est relié à la surface par un câble d'acier auquel est rattaché une série de câbles isolés et des tubulures en polyéthylène (planche 13, annexe I).

Au début d'un essai, une fois que les obturateurs sont à l'élévation voulue, le niveau statique de l'eau est mesuré avant que les obturateurs ne soient gonflés (figure 5). L'intervalle de roc testé, d'une longueur de 1.50 m, est isolé lorsque les obturateurs pneumatiques sont gonflés avec de l'azote à une pression maintenue constante. Le gonflement des obturateurs crée une surpression dans l'intervalle, laquelle se dissipe plus ou moins lentement selon la perméabilité du roc. Après un temps d'attente, la pression hydraulique naturelle (H_0) est atteinte et mesurée puis les essais d'injection débutent.

À l'équilibre, lorsque la stabilisation est atteinte, le débit (Q_i) est mesuré pour une pression d'injection imposée (P_i), laquelle est exprimée en terme de charge hydraulique (H_i). Pour chaque essai, la pression d'injection de l'eau est suivie et enregistrée en continu à l'aide du capteur de pression. Cette pression d'injection est maintenue constante grâce à l'azote pressurisé qui est injecté dans la partie supérieure d'un réservoir d'eau. Les réservoirs

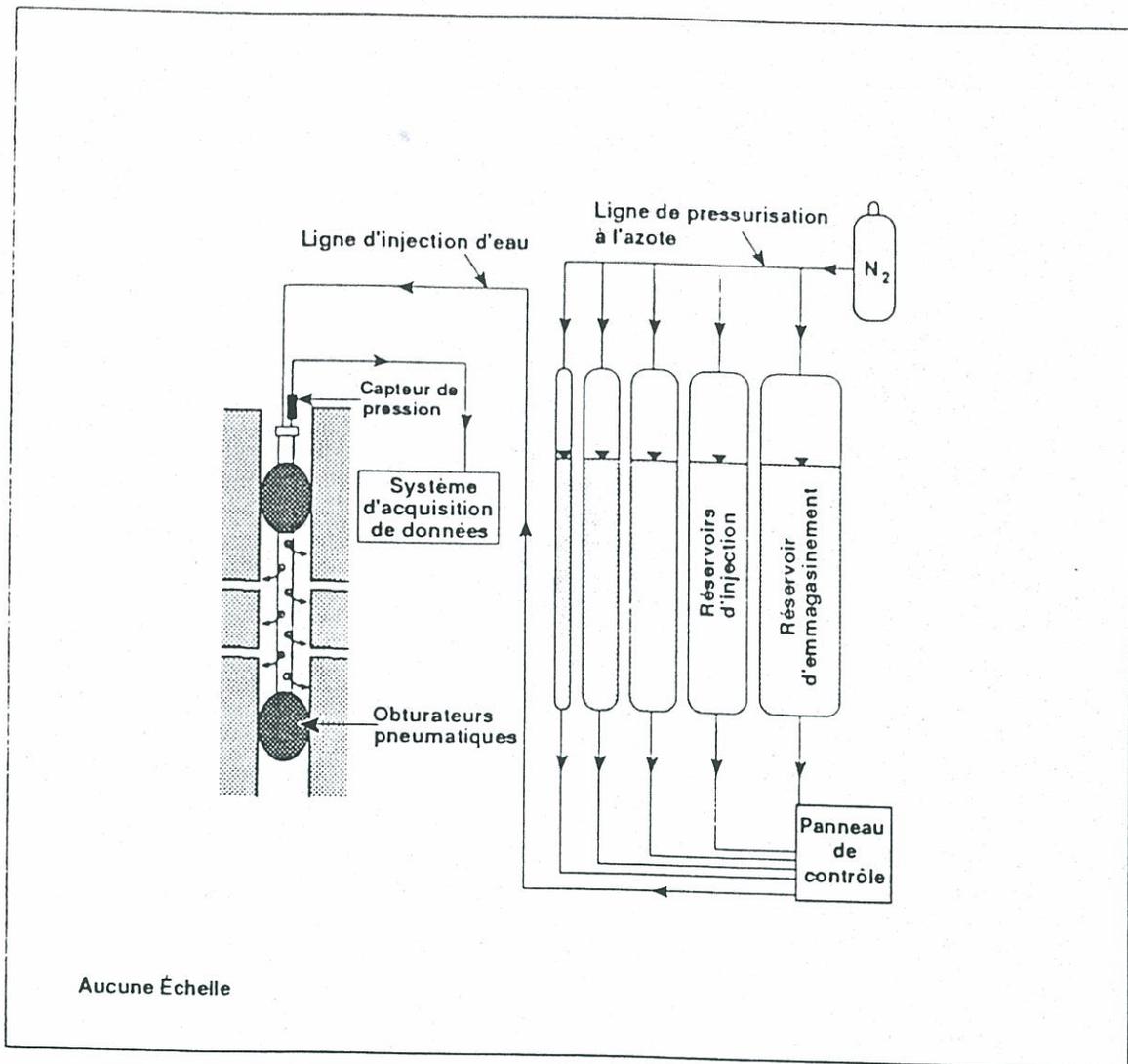


Figure 4. Schéma d'installation des essais d'injection à charge constante dans un milieu rocheux fracturé

cylindriques ont des diamètres différents et le choix du réservoir est fonction de la perméabilité du roc dans l'intervalle d'essai. C'est à partir d'un tube d'observation gradué en millimètre fixé sur chaque réservoir que le taux de changement du niveau d'eau est mesuré en cm/s. La valeur obtenue est multipliée par une constante propre à chaque réservoir, qui s'exprime en m^3/cm , pour obtenir finalement un débit (Q_i) en m^3/sec . Le rapport du débit (Q_i) sur la surcharge d'injection (ΔH) reflète la conductivité hydraulique (K) de l'intervalle d'essai.

Ce système d'injection donne des résultats significatifs pour une plage de conductivité hydraulique qui varie de $< 10^{-10}$ à 10^{-3} m/s environ. La limite inférieure est déterminée par des effets d'expansion et de compressibilité thermiques du fluide d'injection ainsi que de l'équipement. La limite supérieure est contrôlée par les pertes de charge par friction dans les tubes d'injection et de l'exigence minimale d'une charge d'injection à l'intérieur de l'intervalle.

Dans le cadre de ce mandat, six (6) essais ont été réalisés à l'intérieur de chaque forage pour un total de trente (30) essais. Chaque trou de forage a été testé systématiquement du bas vers le haut par intervalle de 1.50 m de longueur. Durant chaque essai, les mesures du débit (Q_i) et de la charge d'injection (H_i) ont été enregistrées sous forme numérique et graphique. À noter que le roc n'a pu être testé dans le premier et le dernier mètre de chaque forage en raison de la configuration des obturateurs employés.

Les données des essais d'injection à charge constante sont interprétées selon deux modèles d'écoulement: le modèle du milieu poreux équivalent, sans fracture; et le modèle de la fracture unique équivalente. Il s'agit de deux modèles extrêmes pour représenter une formation rocheuse poreuse et fracturée.



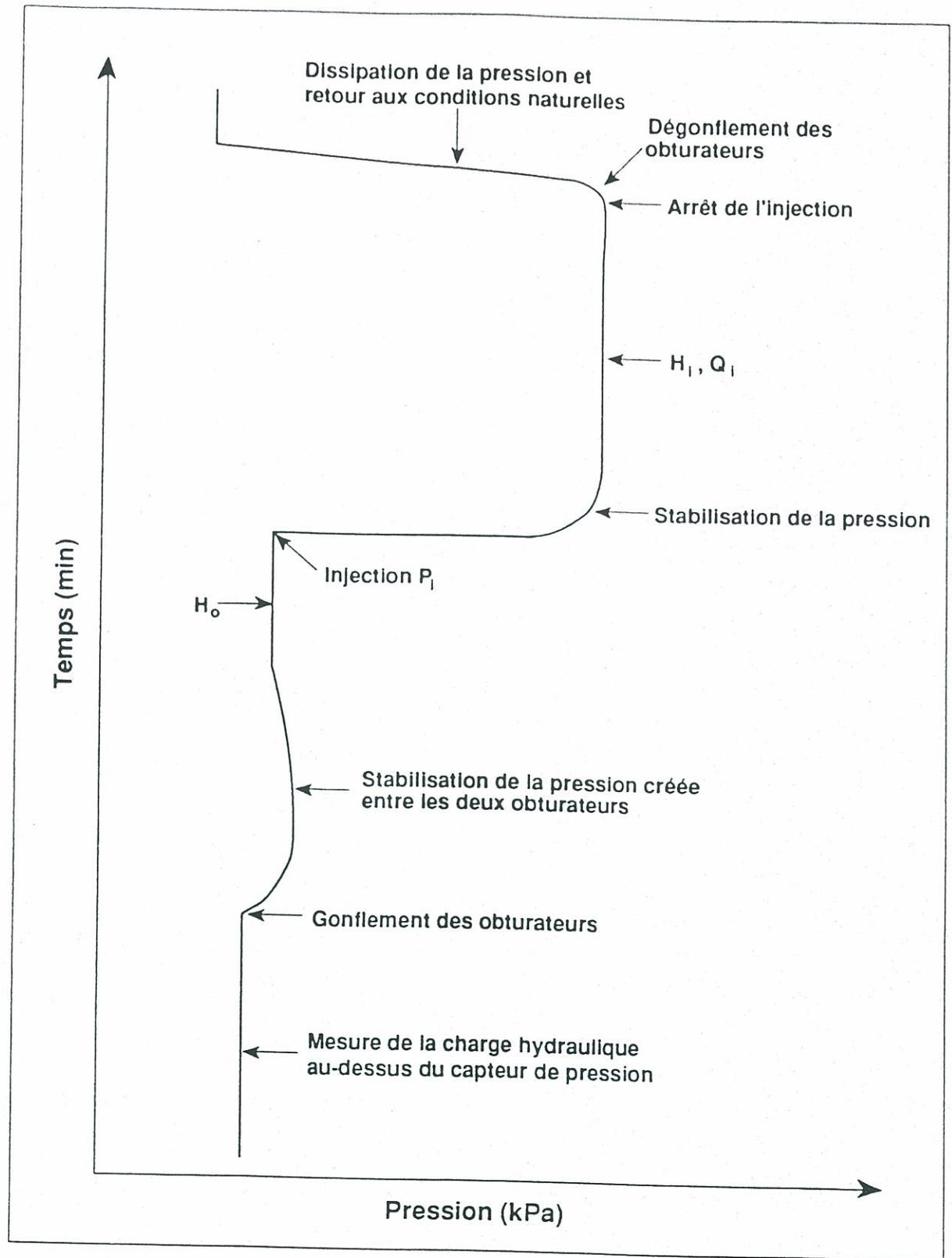


Figure 5. Évolution de la pression hydraulique lors d'un essai d'injection à charge constante

3.2 Paramètres et propriétés hydrauliques du substratum rocheux

3.2.1 Conductivité hydraulique (K)

La conductivité hydraulique (K) est estimée à partir du modèle du milieu poreux équivalent. Ce modèle suppose que l'écoulement est distribué également à travers un milieu poreux équivalent à l'intervalle de roc fracturé et que:

- 1) le milieu est homogène et isotrope;
- 2) l'écoulement est laminaire dans des conditions de régime permanent;
- 3) la loi de Darcy est valide;
- 4) l'essai d'injection est réalisé dans un forage vertical;
- 5) l'écoulement est radial et symétrique autour du puits d'essai;
- 6) il n'y a pas de pertes de charge particulières à la paroi du forage;
- 7) l'eau et le milieu sont incompressibles.

En supposant que les hypothèses de base énumérées ci-haut sont satisfaites, Hvorslev (1951) a proposé d'utiliser l'équation modifiée de Thiem (1906) pour un régime d'écoulement permanent, afin d'estimer la conductivité hydraulique (K) d'un milieu poreux équivalent à l'intervalle de roc testé, en appliquant la relation suivante:

$$K = \frac{Q}{\Delta H} \frac{\ln(r_e/r_w)}{2 \pi L} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

où Q: débit en régime d'écoulement permanent (m³/s);

ΔH : différence de charge en régime d'écoulement permanent ou la surcharge d'injection (m);

L: longueur de l'intervalle d'essai (1.50 m);

r_e : rayon d'influence (10 m);

r_w : rayon du forage dans le roc (0.03785 m);

et la transmissivité (T) par:

$$T = K L \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2)$$



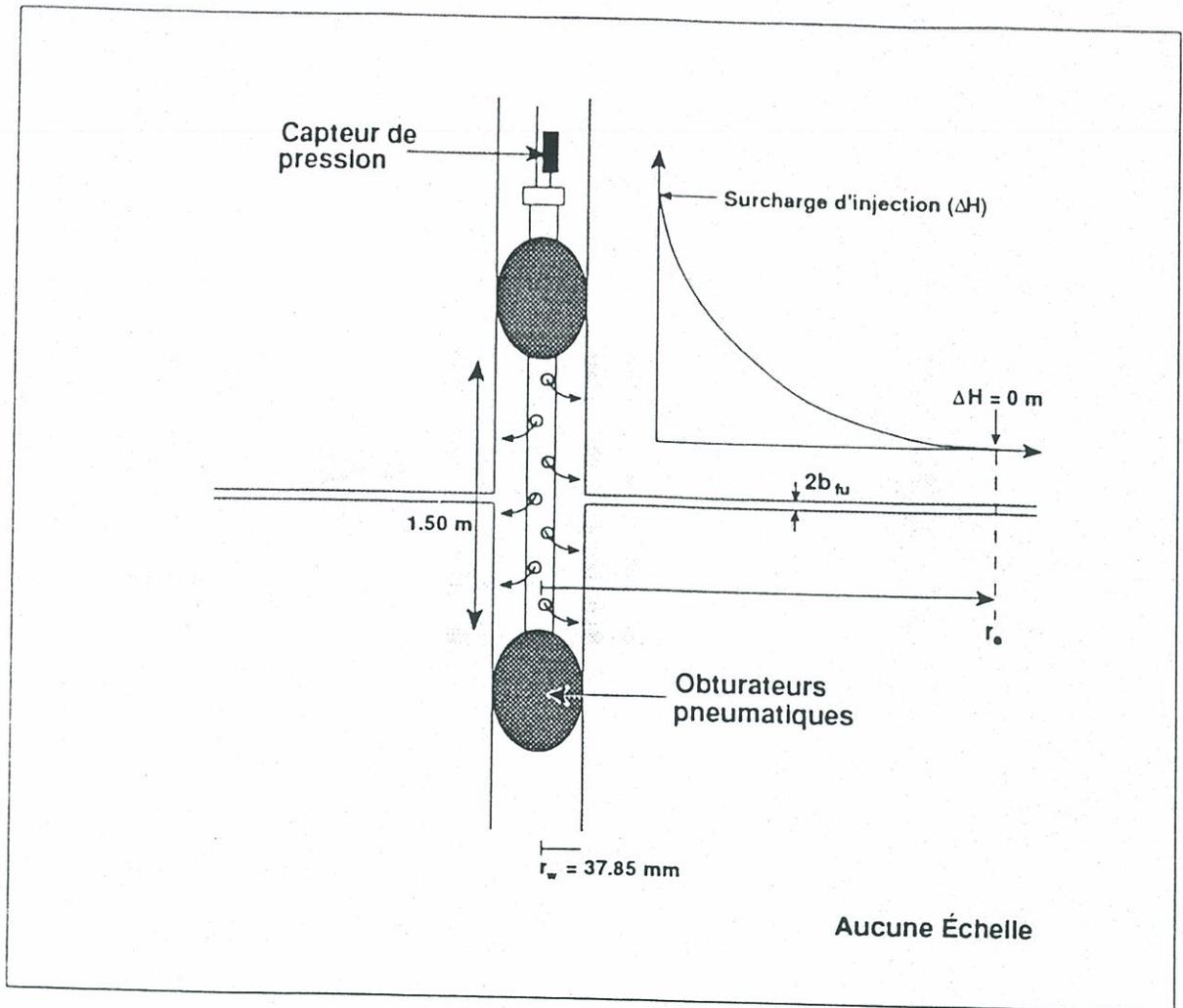


Figure 6. Schéma du modèle de la fracture unique équivalente
(adapté de Raven, 1986)

Les valeurs de la conductivité hydraulique (K) d'un milieu poreux équivalent varient entre 1.8×10^{-4} à 7.8×10^{-10} m/s, associées à des ouvertures ($2b_{fu}$) d'une fracture unique équivalente qui varient de 726 à 12 μm pour l'ensemble des essais. Les valeurs de la transmissivité (T) de la formation rocheuse varient entre 2.7×10^{-4} à 1.2×10^{-9} m²/s (tableau 2; annexe II).

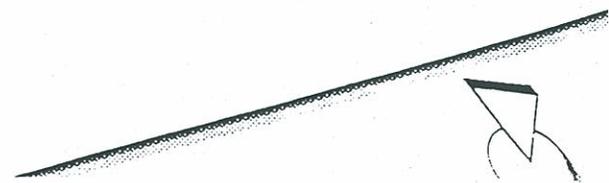


Tableau 2. Résultats des essais d'injection à charge constante

Essai	Intervalle Élév. (m)	H ₀ (m)	H _i (m)	ΔH (m)	Q _i (m ³ /s)	Q _i /ΔH (m ² /s)	T (m ² /s)	K (m/s)	2b _{fu} (μm)
TF-1/1	70.89-72.39	7.8	23.5	15.7	8.2x10 ⁻⁶	8.2x10 ⁻⁶	4.6x10 ⁻⁷	3.1x10 ⁻⁷	86
/2	72.39-73.89	6.4	21.0	14.6	8.5x10 ⁻⁶	5.8x10 ⁻⁷	3.4x10 ⁻⁷	3.1x10 ⁻⁷	89
/3	73.89-75.39	4.6	8.5	23.6	5.4x10 ⁻⁶	2.3x10 ⁻⁷	2.0x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁷	65
/4	75.39-76.89	3.6	17.8	14.2	8.5x10 ⁻⁶	6.0x10 ⁻⁷	5.3x10 ⁻⁷	3.5x10 ⁻⁷	90
/5	76.89-78.39	1.8	12.1	10.3	1.0x10 ⁻⁵	9.8x10 ⁻⁷	8.7x10 ⁻⁷	5.8x10 ⁻⁷	106
/6	77.14-78.64	1.4	11.4	10.0	1.0x10 ⁻⁵	1.0x10 ⁻⁶	9.1x10 ⁻⁷	6.0x10 ⁻⁷	108
TF-4/1	71.53-73.03	8.5	14.9	6.4	1.1x10 ⁻⁵	1.7x10 ⁻⁶	1.5x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁶	128
/2	73.03-74.53	7.1	17.1	10.0	9.9x10 ⁻⁶	9.9x10 ⁻⁷	8.8x10 ⁻⁷	5.8x10 ⁻⁷	107
/3	74.53-76.03	8.5	39.1	30.6	4.0x10 ⁻⁸	1.3x10 ⁻⁹	1.2x10 ⁻⁹	7.8x10 ⁻¹⁰	12
/4	76.03-77.53	5.0	27.0	22.0	4.6x10 ⁻⁶	2.1x10 ⁻⁷	1.9x10 ⁻⁷	1.2x10 ⁻⁷	64
/5	77.53-79.03	2.5	5.0	2.5	1.2x10 ⁻⁵	4.6x10 ⁻⁶	4.1x10 ⁻⁶	2.7x10 ⁻⁶	178
/6	77.83-79.33	2.1	3.9	1.8	1.2x10 ⁻⁵	6.7x10 ⁻⁶	5.9x10 ⁻⁶	4.0x10 ⁻⁶	202
TF-5/1	75.03-76.53	7.1	34.2	27.1	4.6x10 ⁻⁶	1.7x10 ⁻⁷	1.5x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻⁷	59
/2	76.53-78.03	6.4	38.1	31.7	2.8x10 ⁻⁶	8.8x10 ⁻⁸	7.8x10 ⁻⁸	5.2x10 ⁻⁸	48
/3	78.03-79.53	6.4	40.2	33.8	4.1x10 ⁻⁷	1.2x10 ⁻⁸	1.1x10 ⁻⁸	7.1x10 ⁻⁹	24
/4	79.53-81.03	3.91	3.95	0.04	1.2x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻⁴	2.7x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻⁴	723
/5	81.03-82.53	2.1	19.2	17.1	8.5x10 ⁻⁶	5.0x10 ⁻⁷	4.4x10 ⁻⁷	2.9x10 ⁻⁷	85
/6	81.78-83.28	1.1	3.9	2.8	1.2x10 ⁻⁵	4.4x10 ⁻⁶	3.8x10 ⁻⁶	2.6x10 ⁻⁶	175
TF-6/1	80.06-81.56	11.7	43.8	32.1	2.6x10 ⁻⁶	8.2x10 ⁻⁸	7.3x10 ⁻⁸	4.8x10 ⁻⁸	46
/2	81.56-83.06	12.1	34.9	22.8	4.5x10 ⁻⁶	2.0x10 ⁻⁷	1.7x10 ⁻⁸	1.2x10 ⁻⁷	62
/3	83.06-84.56	7.8	31.3	23.5	5.4x10 ⁻⁶	2.3x10 ⁻⁷	2.0x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁷	66
/4	84.56-86.06	6.8	28.8	22.0	5.4x10 ⁻⁶	2.5x10 ⁻⁷	2.2x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁷	67
/5	86.06-87.56	6.8	36.6	29.8	2.9x10 ⁻⁶	9.9x10 ⁻⁷	8.8x10 ⁻⁸	5.8x10 ⁻⁸	49
/6	86.56-88.06	3.6	7.2	3.6	1.2x10 ⁻⁵	3.2x10 ⁻⁶	2.8x10 ⁻⁶	1.9x10 ⁻⁶	158
TF-7/1	89.07-90.57	6.4	35.9	29.5	3.1x10 ⁻⁶	1.0x10 ⁻⁷	9.3x10 ⁻⁸	6.2x10 ⁻⁸	50
/2	90.57-92.07	5.0	25.6	20.6	7.1x10 ⁻⁶	3.4x10 ⁻⁷	3.1x10 ⁻⁷	2.0x10 ⁻⁷	75
/3	92.07-93.57	4.3	36.6	32.3	3.7x10 ⁻⁶	1.1x10 ⁻⁷	1.0x10 ⁻⁷	6.8x10 ⁻⁸	52
/4	93.57-95.07	2.13	2.17	0.04	1.2x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻⁴	2.8x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻⁴	726
/5	95.07-96.57	0.71	0.75	0.04	1.2x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻⁴	2.8x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻⁴	726
/6	95.32-96.82	0.35	0.39	0.04	1.2x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻⁴	2.7x10 ⁻⁴	1.8x10 ⁻⁴	723

3.2.3 Porosité de fractures (n_f)

Connaissant la densité de fractures ouvertes pour chaque intervalle d'essai et l'ouverture réelle de chacune des fractures ouvertes qui traversent le substratum rocheux, il est possible d'évaluer la vraie porosité de fractures (n_f) de l'ensemble du massif rocheux. Toutefois, ne connaissant pas l'ouverture réelle de chaque fracture, on suppose alors que le débit d'injection se distribue uniformément à l'intérieur des fractures qui sont caractérisées par une même ouverture. L'ouverture ($2b_f$) de chacune des fractures qui traversent l'intervalle d'essai peut se calculer suivant la relation suivante:

$$2b_f = \left[\frac{Q}{\Delta H} \frac{12\mu}{2\pi\rho g n} \ln(r_e / r_w) \right]^{1/3} \quad (\mu\text{m}) \quad (4)$$

où n : nombre de fractures ouvertes qui traversent l'intervalle d'essai

et la porosité de fractures (n_f) est estimée selon cette relation pour une dimension (Snow, 1968):

$$n_f = N (2b_f) \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

où N : densité de fractures ouvertes pour chaque intervalle d'essai
(nombre de fractures/1.50 m);

$2b_f$: ouverture des fractures qui traversent l'intervalle d'essai (m).

La porosité de fractures (n_f) varie de 0.002 à 0.08% sur l'ensemble du substratum rocheux. Le tableau 3 montre les résultats obtenus au droit de chaque forage.

Tableau 3. Porosité de fractures (n_f)

Essai	Intervalle Élev. (m)	Nombre de fractures ouvertes (n)	Densité de fractures (N)	$2b_f$ (μm)	Porosité de fractures (n_f) (%)
TF-1/1	70.89 - 72.39	0	----	----	----
/2	72.39 - 73.89	1	0.67	89	0.006
/3	73.89 - 75.39	0	----	----	----
/4	75.39 - 76.89	0	----	----	----
/5	76.89 - 78.39	2	1.33	84	0.01
/6	77.14 - 78.64	2	1.33	86	0.01
TF-4/1	71.53 - 73.03	1	0.67	128	0.008
/2	73.03 - 74.53	1	0.67	107	0.007
/3	74.53 - 76.03	0	----	----	----
/4	76.03 - 77.53	0	----	----	----
/5	77.53 - 79.03	1	0.67	178	0.01
/6	77.83 - 79.33	1	0.67	202	0.01
TF-5/1	75.03 - 76.53	0	----	----	----
/2	76.53 - 78.03	1	0.67	48	0.003
/3	78.03 - 79.53	1	0.67	24	0.002
/4	79.53 - 81.03	1	0.67	723	0.05
/5	81.03 - 82.53	0	----	----	----
/6	81.78 - 83.28	1	0.67	175	0.01
TF-6/1	80.06 - 81.56	0	----	----	----
/2	81.56 - 83.06	2	1.33	23	0.003
/3	83.06 - 84.56	1	0.67	66	0.004
/4	84.56 - 86.06	1	0.67	67	0.004
/5	86.06 - 87.56	0	----	----	----
/6	86.56 - 88.06	1	0.67	158	0.01
TF-7/1	89.07 - 90.57	0	----	----	----
/2	90.57 - 92.07	0	----	----	----
/3	92.07 - 93.57	0	----	----	----
/4	93.57 - 95.07	1	0.67	726	0.05
/5	95.07 - 96.57	1	0.67	726	0.05
/6	95.32 - 96.82	2	1.33	571	0.08

3.2.4 Gradients hydrauliques verticaux (i_v)

Les mesures de la charge hydraulique naturelle (H_0) à l'intérieur de chacun des intervalles d'essai ont permis d'évaluer la valeur et le sens des gradients hydrauliques verticaux (i_v) au droit des forages TF-1, TF-4, TF-5, TF-6 et TF-7. Les gradients hydrauliques verticaux (i_v) sont calculés à partir de la relation suivante:

$$i_v = \frac{\Delta H_0}{\Delta l} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

où ΔH_0 : variation de la charge hydraulique naturelle entre deux intervalles d'essai (m);
 Δl : distance verticale entre deux points de mesure (correspond à la distance centre à centre entre deux intervalles d'essai en m).

Des gradients hydrauliques verticaux (i_v) (ascendants et descendants) sont observés à l'intérieur du substratum rocheux (annexe IV). La valeur des gradients hydrauliques verticaux (i_v) descendants varie de 5.3 à 193.3%; tandis que celle des gradients hydrauliques verticaux (i_v) ascendants varie entre 20.0 et 540.0%. Le tableau 4 montre l'ensemble des résultats obtenus au droit de chaque forage.

Tableau 4. Valeurs et sens des gradients hydrauliques verticaux (i_v)

Forage no.	Essais no.	Intervalles d'essai Élévation (m)	Gradients hydrauliques verticaux (i_v)			
			ΔH_o (m)	Δl (m)	i_v (%)	Sens
TF-1	1 - 2	70.89/72.39 - 72.39/73.89	0.10	1.50	6.7	Descendant
	2 - 3	72.39/73.89 - 73.89/75.39	0.30	1.50	20.0	Ascendant
	3 - 4	73.89/75.39 - 75.39/76.89	0.50	1.50	33.3	Descendant
	4 - 5	75.39/76.89 - 76.89/78.39	0.30	1.50	20.0	Ascendant
	5 - 6	76.89/78.39 - 77.14/78.64	0.15	0.25	60.0	Ascendant
TF-4	1 - 2	71.53/73.03 - 73.03/74.53	0.10	1.50	6.7	Descendant
	2 - 3	73.03/74.53 - 74.53/76.03	2.90	1.50	193.3	Descendant
	3 - 4	74.53/76.03 - 76.03/77.53	2.00	1.50	133.3	Ascendant
	4 - 5	76.03/77.53 - 77.53/79.03	1.00	1.50	66.7	Ascendant
	5 - 6	77.53/79.03 - 77.83/79.33	0.10	0.30	33.3	Ascendant
TF-5	1 - 2	75.03/76.53 - 76.53/78.03	0.80	1.50	53.3	Descendant
	2 - 3	76.53/78.03 - 78.03/79.53	1.50	1.50	100.0	Descendant
	3 - 4	78.03/79.53 - 79.53/81.03	0.99	1.50	66.0	Ascendant
	4 - 5	79.53/81.03 - 81.03/82.53	0.30	1.50	20.7	Ascendant
	5 - 6	81.03/82.53 - 81.78/83.28	0.25	0.75	33.3	Ascendant
TF-6	1 - 2	80.06/81.56 - 81.56/83.06	1.90	1.50	126.7	Descendant
	2 - 3	81.56/83.06 - 83.06/84.56	2.80	1.50	186.7	Ascendant
	3 - 4	83.06/84.56 - 84.56/86.06	0.50	1.50	33.3	Descendant
	4 - 5	84.56/86.06 - 86.06/87.56	1.50	1.50	100.0	Descendant
	5 - 6	86.06/87.56 - 86.56/88.06	3.00	1.50	540.0	Ascendant
TF-7	1 - 2	89.07/90.57 - 90.57/92.07	0.10	1.50	6.7	Descendant
	2 - 3	90.57/92.07 - 92.07/93.57	0.80	1.50	53.3	Descendant
	3 - 4	92.07/93.57 - 93.57/95.07	0.67	1.50	44.7	Ascendant
	4 - 5	93.57/95.07 - 95.07/96.57	0.08	1.50	5.3	Descendant
	5 - 6	95.07/96.57 - 95.32/96.82	0.11	0.25	44.0	Ascendant

4.0 CONCLUSION ET COMMENTAIRES

4.1 Généralités

L'écoulement de fluides dans un milieu rocheux est généralement contrôlé par le système de fractures qui découpent le massif rocheux. Il est donc important de définir les caractéristiques géométriques des familles de fractures de même que leurs propriétés hydrauliques. La géométrie du système de fractures est déterminée par l'orientation, l'espacement et l'ouverture des fractures qui est décrite sur la base des travaux de cartographie géologique et la description des carottes provenant des sept (7) forages verticaux. Les caractéristiques hydrauliques sont définies à partir des essais hydrauliques réalisés à l'aide du laboratoire mobile d'injection.

4.2 Conditions géologiques

Selon la carte géologique de Clark (1977), le L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton se situe à l'intérieur de la formation rocheuse de Mawcook du Groupe de Shefford de la province géologique des Appalaches. Cette formation géologique est formée de roches d'origine sédimentaire composées d'argilites schisteuses rouges, grises et vertes. Des roches ignées d'âge crétacé de composition très variée, associées au grand complexe intrusif des collines Montérégiennes, recourent les roches sédimentaires qui sont généralement métamorphisées au faciès du schiste vert.

Régionalement, les roches sédimentaires sont déformées par des plis dont les axes suivent sensiblement l'attitude des structures appalachiennes régionales, soit une direction de N010° et un pendage de 20° E. Les plis ont généralement une faible amplitude et une courte longueur d'onde. La direction des couches lithologiques varie de N340° à N020° avec un pendage variant de 30° à 75° vers l'est. Une schistosité pénétrative (clivage ardoisier) est très bien développée dans les roches sédimentaires. La direction des plans de clivage varie de N000° à N045° avec un pendage variant de 20° à 80° vers l'est.



Mise à part la ligne de Logan qui passe à approximativement à sept (7) km à l'ouest du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton et quelques zones de cisaillement associées, aucune faille ou discontinuité majeure recoupe les roches de la région. Clark (1977) a identifié deux (2) principales familles de fractures superficielles non pénétratives qui appartiennent à un système régional de fracturation. La première famille a une direction qui varie de N080° à N110° avec un pendage prononcé vers le nord ou le sud. La deuxième famille correspond à des fractures de tension qui se présentent parallèlement aux axes des plis régionaux, soit dans une direction de N110°. Les fractures de la deuxième famille sont généralement remplies de quartz.

Localement, la description géologique de quelques affleurements rocheux avoisinants le L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton ont permis de définir la lithologie et de mesurer la schistosité ainsi que les plans de fractures visibles en surface. Un mince dépôt de till d'origine glaciaire recouvre le socle rocheux qui se définit comme une argilite schisteuse rouge de la formation de Mawcook. Une schistosité pénétrative (clivage ardoisier) est très bien développée dans cette roche. La direction moyenne des plans de clivage est de N045° avec un pendage de 55° vers le sud-est. Une seule famille de fractures superficielles non pénétratives est observée à la surface des affleurements rocheux. La direction moyenne de cette famille de fractures est de N160° avec un pendage moyen de 55° vers le sud-ouest. Selon la carte géologique de Clark (1977), les couches lithologiques ont une direction moyenne de N350° et un pendage de 35° vers le nord-est. À noter que l'attitude des affleurements rocheux biaise les données structurales, en ce sens que les fractures sub-verticales sont favorisées aux dépens des fractures sub-horizontales.

Sept (7) forages verticaux exécutés dans les limites du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton ont permis de définir la lithologie ainsi que le degré de fracturation du roc sur les dix (10) premiers mètres du toit du massif rocheux. Le roc échantillonné est sensiblement de même nature et relativement homogène. Un examen visuel des carottes montre que la roche est principalement composée d'argilite schisteuse rouge de la Formation de Mawcook. Des passages d'argilite schisteuse de couleur verdâtre sont observés à l'intérieur de tous les forages. La schistosité (clivage ardoisier) est très bien développée et se présente à 55° en moyenne par rapport à l'axe des forages. Des veines et des veinules de quartz et/ou de calcite recoupent sporadiquement le roc par endroit. Elles se présentent avec ou sans orientation préférentielle. Des minéraux d'altération (chlorite, séricite) et de la pyrite sont souvent associés aux veines et veinules. À l'intérieur du forage TF-5, une multitude de veines de quartz et de carbonates sans

orientation préférentielle recoupe l'argilite schisteuse, donnant à la roche un aspect bréchique. Des intrusions de dykes de composition felsique et syénitique sont observées respectivement dans les forages TF-3 et TF-4.

L'examen mégascopique d'échantillons représentatifs de l'argilite schisteuse rouge et verte montre que cette roche est constituée de grains aphanitiques de même nature. La roche réagit faiblement sous l'effet de l'acide chlorhydrique. L'examen microscopique sur des lames minces révèle que l'argilite schisteuse est composée de 70% de grains cryptocristallins qui forment la matrice argileuse et de 30% de grains de quartz. Les grains de quartz sont arrondis, de forme elliptique et ont un diamètre moyen de 0.03 mm. Les particules de quartz sont orientées de manière à définir la schistosité. Des carbonates, des oxydes de fer, des micas et de la chlorite sont présents en traces occasionnelles dans les échantillons décrits. L'étude pétrographique en lame mince montre que cette roche est métamorphisée au faciès schiste vert.

Le pourcentage de récupération des carottes de roc varie de 25 à 100%, bien qu'il soit pratiquement de 100% pour l'ensemble des forages. Les valeurs du "RQD" (Rock quality designation) varient entre 2 et 95% selon le forage, pour une valeur moyenne qui oscille autour de 82%. Cette valeur moyenne correspond à une bonne qualité de roc. Les fractures induites dans la roche saine par les opérations de forage ne sont pas considérées dans le calcul du "RQD".

La grande majorité des fractures naturelles sont remplies par de la calcite et/ou du quartz qui se présentent en veines et en veinules de quelques millimètres d'épaisseur. Des minéraux d'altération (chlorite, séricite), de la pyrite, de la galène sont à l'occasion associés aux veines. Quelques fractures remplies de boue d'origine inconnue sont observées dans les forages TF-1, TF-4 et TF-6. L'espacement moyen des discontinuités remplies varie de 0.73 à 5.11 m selon le forage.

Les discontinuités naturelles qui sont ouvertes (fractures et zones fracturées) sont généralement moins nombreuses et leur espacement moyen varie entre 2.01 et 5.13 m dépendamment du forage. Des plaques de quartz et/ou des minéraux d'altération (chlorite, séricite) tapissent parfois la surface des fractures ouvertes. Des traces d'oxydation brun-rouille sont également présentes sur la surface de quelques fractures, indiquant une certaine circulation d'eau. À noter que les fractures sub-horizontales, ou qui se présentent avec un angle aigu par

rapport à l'axe du forage, sont nettement favorisées dans cet échantillonnage au détriment des fractures sub-verticales, en raison de la verticalité des forages. À partir des informations disponibles, il n'est pas possible de déterminer l'extension et l'orientation des fractures ouvertes à l'intérieur du substratum rocheux.

4.3 Conditions hydrogéologiques

Des essais d'injection à charge constante, réalisés à l'aide du laboratoire mobile d'injection, ont permis de définir différents paramètres et propriétés hydrauliques du substratum rocheux. Les données des essais d'injection à charge constante ont été interprétées selon deux modèles d'écoulement: le modèle du milieu poreux équivalent, qui fait totalement abstraction des conduits préférentiels que constituent les fractures; et le modèle de la fracture unique équivalente, qui ne considère pas la géométrie des vides dans les fractures individuelles ni de la géométrie du système de fractures. Il s'agit de deux modèles extrêmes pour représenter une formation rocheuse poreuse et fracturée.

À partir des résultats obtenus, le massif rocheux au site du L.E.S. de Ste-Cécile-de-Milton a une conductivité hydraulique (K) qui varie de 10^{-4} à 10^{-10} m/s, pour une valeur moyenne de 10^{-7} m/s; une transmissivité (T) qui varie de 10^{-4} à 10^{-9} m²/s, pour une valeur moyenne de 10^{-7} m²/s; et des ouvertures ($2b_{fu}$) d'une fracture unique équivalente qui varient de 726 à 12 μ m.

Les mesures de la charge hydraulique naturelle (H_o) à l'intérieur de chacun des intervalles d'essai ont permis d'évaluer la valeur et le sens des gradients hydrauliques verticaux (i_v) au droit des forages. Des gradients hydrauliques verticaux (i_v) (ascendants et descendants) sont observés à l'intérieur du substratum rocheux. La valeur des gradients hydrauliques verticaux (i_v) descendants varie de 5.3 à 193.3%; tandis que celle des gradients hydrauliques verticaux (i_v) ascendants varie entre 20.0 et 540.0%.

Le substratum rocheux est caractérisé par une porosité de fractures (n_f) qui varie de 0.002 à 0.08%. Ces valeurs sont typiques des formations rocheuses dont l'ouverture des fractures ouvertes n'est habituellement pas grande et/ou caractérisées par une faible densité de fractures ouvertes.



Dans son ensemble, le massif rocheux présente une hétérogénéité verticale. Les profils de la conductivité hydraulique (K) montrent que les valeurs peuvent varier de 10^{-4} à 10^{-9} m/s à l'intérieur d'un même forage. De plus, les profils de la conductivité hydraulique (K) sont différents d'un forage à l'autre. À une même élévation dans le roc, les profils montrent une grande variabilité des valeurs de la conductivité hydraulique (K). Le massif rocheux semble plus fracturé dans sa partie sommitale. En effet, les valeurs de la conductivité hydraulique (K) sont généralement plus élevées à l'intérieur des quatre (4) premiers mètres du substratum rocheux.

Ce sont principalement les propriétés hydrauliques des fractures ouvertes sub-horizontales ou à angle aigu qui sont déterminées lors des essais d'injection, en raison de la verticalité des forages. Les valeurs de la conductivité hydraulique (K) semblent être en relation avec le nombre de fractures. Les valeurs de la conductivité hydraulique (K) ont tendance à être plus élevées lorsque la densité de fractures ouvertes est plus grande (annexe V). L'ouverture des fractures ouvertes influence également les valeurs de la conductivité hydraulique (K). Quant à la relation entre la conductivité hydraulique (K) et l'orientation des fractures, il n'a pas été possible de la définir dans le cadre de cette étude.

L'hétérogénéité du roc et l'anisotropie des propriétés hydrauliques à l'intérieur du massif rocheux sont dues à la présence de fractures ouvertes qui ont chacune leurs propres caractéristiques hydrauliques. Habituellement à l'intérieur d'un massif rocheux fracturé, la conductivité hydraulique horizontale (K_h) est plus grande que la conductivité hydraulique verticale (K_v). Cependant, il n'a pas été possible de le vérifier dans le cadre de cette étude, puisque ce sont les propriétés hydrauliques des fractures sub-horizontales ou à angle aigu qui ont principalement fait l'objet d'une investigation hydrogéologique. Néanmoins, il faut tenir compte qu'il existe certainement des fractures sub-verticales, avec des propriétés hydrauliques différentes, qui recoupent le massif rocheux à la hauteur du site investigué. Les très fortes variations du gradient hydraulique ascendant au toit du rocher et les profils des essais d'injection à charge constante montrent bien l'hétérogénéité du roc et l'anisotropie horizontale des propriétés hydrauliques à l'intérieur d'un même forage vertical.



À l'échelle du terrain, ce sont vraisemblablement les discontinuités ouvertes qui contrôlent l'écoulement souterrain dans le massif rocheux. Les fractures ouvertes constituent des conduits préférentiels pour la circulation des fluides.

Espérant le tout à votre entière satisfaction, n'hésitez pas à communiquer avec nous pour obtenir de plus amples informations sur les sujets traités dans cette étude.

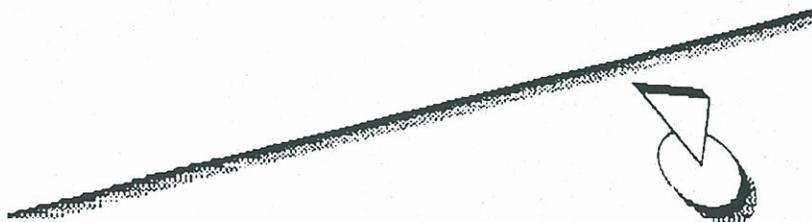
Experts-Conseils Hydrogéolo-Sol Inc.
Juillet 1992



Jean-Sébastien David, géologue jr.



Christian Denis, ing. M.Sc.A.
Hydrogéologue



5.0 RÉFÉRENCES

- 1- CLARK T.H. 1977. Région de Granby. Rapport RG-177, Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Québec, 109 p.
- 2- FOLK R.L. 1974. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Co., University of Texas, USA, 181 p.
- 3- GALE J.E. 1977. A numerical, field and laboratory study of flow in rocks with deformable fractures. Scientific Series, no. 72, National Hydrology Research Institute, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa.
- 4- HVORSLEV M.J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterways experiment station, U.S. Army Corps. Eng., 36, Vicksburg, Mississippi, USA, 84 p.
- 5- RAVEN K.G. 1986. Hydraulic characterization of a small ground-water flow system in fractured monzonitic gneiss. NHRI paper no.30, IWD Scientific Series no.149. National Hydrology Research Institute Inland Waters Directorate. 127 p.
- 6- SNOW D. T. 1965. A parallel plate model of fractured permeability media. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley. USA.
- 7- SNOW D.T. 1968. Rock fracture spacings, openings and porosities. J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 94, pp.73-91.
- 8- STREICKEISSEN A. 1976. To each plutonic rock its proper name. Earth Sci. Rev., 12, pp. 1-33.
- 9- THIEM G. 1906. Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, 56 p.
- 10- ZEIGLER T.W. 1976. Determination of rock mass permeability. Waterways experiment station. U.S. Army Corps. Eng., 36. Vicksburg, Mississippi. USA. 84 p.