

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ANNEXES	xii
1 INTRODUCTION	1
2 PROBLÉMATIQUE.....	5
2.1 Problématique à l'échelle régionale.....	5
2.2 Problématique à l'échelle locale	7
2.3 Problématique générale.....	9
3 DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SAGUENAY-LAC-SAINT-JEAN	10
3.1 Géologie du socle rocheux.....	10
3.2 Géologie des dépôts de surface.....	13
4 SITES INVESTIGUÉS.....	16
4.1 Échelle régionale – Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	17
4.2 Échelle locale – Champs captant municipaux	20
4.2.1 Champ captant municipal de Saint-Félicien	20
4.2.2 Champ captant municipal de Petit-Saguenay	24
4.3 Échelle locale – Sites doubles.....	27
4.3.1 Site double - Vauvert	28
4.3.2 Site double - Saint-Méthode	30
4.3.3 Site double - Saint-David-de-Falardeau	32

5 MÉTHODOLOGIE.....	34
5.1 Base de données du PACES-SLSJ.....	34
5.1.1 Données existantes.....	34
5.1.2 Données acquises au cours du PACES-SLSJ.....	35
5.2 Piézométrie.....	36
5.3 Essai de pompage.....	37
5.3.1 Physique de l'écoulement.....	37
5.3.2 Suivi <i>in situ</i> de paramètres physico-chimiques de l'eau.....	44
5.4 Diagraphies en forage.....	44
5.5 Simulation numérique.....	47
6 RÉSULTATS.....	48
6.1 Piézométrie.....	48
6.1.1 Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	48
6.1.2 Saint-Félicien.....	51
6.1.3 Petit-Saguenay.....	53
6.1.3 Sites doubles.....	56
6.2 Essais de pompage.....	58
6.2.1 Saint-Félicien.....	58
6.2.2 Petit-Saguenay.....	61
6.2.3 Site double – Vauvert.....	64
6.2.3.1 Paramètres physico-chimiques mesurés <i>in situ</i>	68
6.2.4 Site double – Saint-Méthode.....	70
6.2.4.1 Paramètres physico-chimiques mesurés <i>in situ</i>	74
6.2.5 Site double – Saint-David-de-Falardeau.....	76
6.2.5.1 Paramètres physico-chimiques mesurés <i>in situ</i>	79
6.3 Diagraphies.....	81
6.3.1 Vauvert.....	82
6.3.2 Saint-Méthode.....	82
6.3.3 Saint-David-de-Falardeau.....	83

6.4 Simulation numérique.....	83
6.4.1 Caractéristiques du modèle.....	84
6.4.2 Simulation de l'impact des connexions hydrauliques sur les charges hydrauliques.....	86
6.4.3 Simulation de l'impact des connexions hydrauliques sur l'hydrogéochimie ...	88
7 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	90
7.1 Piézométrie.....	90
7.2 Essais de pompage.....	91
7.2.1 Champs captant municipaux.....	91
7.2.2 Sites doubles.....	94
7.2.3 Paramètres physico-chimiques mesurés <i>in situ</i>	96
7.3 Diagraphies.....	97
7.4 Simulations numériques.....	98
7.5 Discussion.....	99
7.5.1 Quantité.....	99
7.5.2 Qualité.....	101
8 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	102
RÉFÉRENCES.....	107
ANNEXE 1.....	111
ANNEXE 2.....	112
ANNEXE 3.....	116
ANNEXE 4.....	123

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Modèle conceptuel hydrogéologique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean	6
Figure 2-2 : Modèle conceptuel de connexions hydrauliques entre aquifères à l'échelle locale sous l'influence d'un pompage	8
Figure 3-1 : Socle rocheux du Saguenay-Lac-Saint-Jean	12
Figure 3-2 : Coupe stratigraphique conceptuelle de la région.....	14
Figure 3-3 : Carte des dépôts meubles du Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	15
Figure 4-1 : Carte topographique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	17
Figure 4-2 : Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	18
Figure 4-3 : Coupe stratigraphique schématique du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	19
Figure 4-4 : Site de Saint-Félicien.....	21
Figure 4-5 : Coupe stratigraphique schématique à l'emplacement du puits P-3 à Saint-Félicien.....	22
Figure 4-6 : Coupe stratigraphique schématique à l'emplacement du puits P-4 à Saint-Félicien.....	23
Figure 4-7 : Site de Petit-Saguenay.....	25

Figure 4-8 : Coupe stratigraphique schématique à l'emplacement du puits P-3 à Petit-Saguenay.....	26
Figure 4-9 : Site double de Vauvert.....	28
Figure 4-10 : Coupe stratigraphique schématique au site de Vauvert.....	29
Figure 4-11 : Site double de Saint-Méthode.....	30
Figure 4-12 : Coupe stratigraphique schématique au site de Saint-Méthode	31
Figure 4-13 : Site double de Saint-David-de-Falardeau	32
Figure 4-14 : Coupe stratigraphique schématique au site de Saint-David-de-Falardeau...	33
Figure 5-1 : Interprétation de la géométrie de l'écoulement selon Doe (1991).....	42
Figure 5-2 : Pentas associées aux différentes dimensions d'un écoulement souterrain....	43
Figure 5-3 : Équipements pour les diagraphies en forage	45
Figure 6-1 : Piézométrie mesurée dans trois puits privés localisés à proximité des piézomètres du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	49
Figure 6-2 : Coupe schématique pour représenter la piézométrie mesurée dans les deux piézomètres du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix ainsi que celle mesurée dans le puits privé PP-1.....	50
Figure 6-3 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay enregistrée sur une période de 7 jours aux piézomètres PS-1D, PS-3R et PS-5R	54
Figure 6-4 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay enregistrée aux piézomètres PS-1D, PS-3R et PS-5R lors d'un pompage de 97 minutes.....	55
Figure 6-5 : Essai de pompage du puits P-3 de Saint-Félicien.....	59
Figure 6-6 : Essai de pompage du puits P-4 de Saint-Félicien.....	60

Figure 6-7 : Essai de pompage du puits P-3 de Petit-Saguenay.....	62
Figure 6-8 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé à Petit-Saguenay selon la dérivée logarithmique du rabattement.....	63
Figure 6-9 : Essais de pompage au site de Vauvert.....	65
Figure 6-10 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Vauvert selon la dérivée logarithmique du rabattement.....	67
Figure 6-11 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Vauvert	68
Figure 6-12 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire captif de Vauvert.....	69
Figure 6-13 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire libre de Vauvert.....	69
Figure 6-14 : Essais de pompage au site de Saint-Méthode.....	71
Figure 6-15 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Saint-Méthode selon la dérivée logarithmique rabattement.....	73
Figure 6-16 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Saint-Méthode.....	74
Figure 6-17 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire captif de Saint-Méthode.....	75
Figure 6-18 : Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire libre de Saint-Méthode.....	75
Figure 6-19 : Essais de pompage au site de Saint-David-de-Falardeau.....	77

Figure 6-20 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Saint-David-de-Falardeau selon la dérivée logarithmique du rabattement.....	78
Figure 6-21: Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Saint-David-de-Falardeau.....	80
Figure 6-22: Suivis <i>in situ</i> des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire de Saint-David-de-Falardeau.....	80
Figure 6-23 : Modèle numérique construit avec SEEP/W	85
Figure 6-24 : Résultats présentant les variations des charges hydrauliques de l'aquifère granulaire près des connexions avec les fractures de l'aquifère rocheux.....	86
Figure 6-25 : Résultats des simulations présentant la propagation des concentrations du contaminant X dans l'aquifère granulaire.....	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5-1 : Valeurs théoriques de la dimension de l'écoulement et de la pente associée à la géométrie de l'écoulement.....	43
Tableau 6-1 : Piézométrie au site de Saint-Félicien.....	51
Tableau 6-2 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay.....	53
Tableau 6-3 : Données piézométriques des ouvrages installés sur les sites doubles du PACES-SLSJ.....	56

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Légende de la carte du socle rocheux (Figure 3-1) du Saguenay-Lac-Saint-Jean

Annexe 2: Légende de la carte des dépôts meubles (Figure 3-3) du Saguenay-Lac-Saint-Jean

Annexe 3 : Aménagements piézométriques des sites doubles du PACES-SLSJ

Annexe 4 : Résultats des diagraphies en forage

1

INTRODUCTION

La compréhension des écoulements de l'eau souterraine dans les aquifères est essentielle pour bien connaître sa répartition, son comportement et pour assurer une bonne gestion de cette ressource. Ainsi, il est nécessaire de définir les liens hydrauliques pouvant permettre l'échange d'importants volumes d'eau entre des aquifères rocheux fracturés et des aquifères granulaires à l'échelle régionale. La mise en évidence des connexions hydrauliques entre ces aquifères doit être faite pour bien comprendre l'écoulement de l'eau souterraine dans les différents milieux. Qu'elle soit contenue dans les dépôts granulaires ou dans le roc fracturé, l'eau souterraine a une signature géochimique liée à son milieu aquifère, et ce dernier a des propriétés hydrauliques qui lui sont propres. Alors, puisque les connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères vont affecter l'estimation des propriétés hydrauliques des milieux aquifères et modifier les propriétés chimiques de l'eau, il devient important de caractériser ces connexions afin d'assurer la compréhension du comportement de l'eau dans ces aquifères et de la qualité chimique de l'eau souterraine.

Dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Saguenay-Lac-Saint-Jean (PACES-SLSJ), une base de données hydrogéologiques de la région a été réalisée. L'utilisation de cette base de données a permis d'observer que dans la région, il y a un grand nombre de puits installés dans les dépôts granulaires et d'autres dans le roc fracturé. On remarque également que les puits dans le roc alimentent majoritairement les particuliers (maisons, fermes, etc.), alors que les puits installés dans les dépôts alimentent surtout les municipalités en eau souterraine. De plus, en analysant cette base de données, on s'aperçoit qu'un grand nombre de puits sont installés près de l'interface entre les dépôts granulaires et le socle rocheux. Ainsi, identifier ce contexte hydrogéologique comporte d'importantes implications concernant la possibilité de pomper simultanément de l'eau dans les dépôts granulaires et dans le roc sous-jacent, donc une mise en relation de deux aquifères différents est envisageable.

Il existe deux types d'échanges hydrauliques entre les réservoirs aquifères qui vont modifier la quantité et la qualité géochimique de l'eau dans les formations hydrogéologiques ; soit les échanges entre aquifères via un aquitard (Santi et al., 2006; Eaton et al., 2007) et les échanges directs entre un aquifère granulaire et un aquifère rocheux fracturé, ces derniers étant très peu documentés dans la littérature. Dans la présente recherche, c'est ce dernier type d'échange qui est à caractériser.

Différents contextes peuvent amener l'eau d'un aquifère granulaire à être mise en relation avec l'eau du roc fracturé. Les liens hydrauliques peuvent se faire de façon naturelle, soit des connexions hydrauliques entre aquifères différents, ou de manière artificielle par un défaut de scellement du puits. Deux situations risquent de mettre en

contact les aquifères granulaire et rocheux de manière naturelle : le cas d'un roc fortement altéré à l'interface roc/granulaire et le cas de fractures subverticales du toit du socle sous un dépôt de surface. Le roc altéré assure la continuité hydraulique entre les dépôts et le socle rocheux, alors que les fractures subverticales permettent à l'eau d'un aquifère de s'infiltrer et d'alimenter un aquifère différent. En ce qui concerne les cas de connexions artificielles, on fait alors référence à des défauts de scellement de puits (Chapuis et Chenaf, 1998; Chesnaux et al., 2006, 2007; Chesnaux, 2010) lors de leur installation (tubage mal ancré dans le roc), mais également à l'accentuation des relations hydrauliques naturelles sous l'action d'un pompage. Ainsi, dans ces deux situations, l'eau pompée proviendra de deux milieux aquifères différents.

Le but de ce projet de maîtrise est de mettre en évidence l'existence de connexions hydrauliques permettant des échanges d'eau souterraine entre des aquifères rocheux et granulaire. Pour atteindre ce but, trois objectifs ont été fixés : 1) étudier le comportement hydraulique des aquifères pouvant permettre de détecter des connexions hydrauliques entre ceux-ci, 2) observer si les caractéristiques chimiques de l'eau peuvent permettre la détection de liens hydrauliques entre aquifères, et 3) détecter des défauts d'ancrage créant des connexions hydrauliques artificielles entre deux aquifères distincts.

L'approche globale de la méthodologie appliquée est d'évaluer le terrain sur les plans physique, géochimique et géophysique. Ainsi, des suivis piézométriques, des essais de pompage, des suivis *in situ* de paramètres physico-chimiques au cours de pompages et des diagraphies en forage permettront de mettre en évidence de telles connexions

hydrauliques. Enfin, des simulations numériques seront réalisées afin d'apprécier les impacts physiques et géochimiques qu'ont ces connexions sur les différents aquifères.

Ce mémoire de maîtrise est présenté en huit chapitres. La problématique spécifique, à l'échelle régionale et à l'échelle locale, est décrite au chapitre 2. Le troisième chapitre présente une description de la géologie du socle rocheux et des dépôts meubles de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Ensuite, les sites où une investigation des connexions hydrauliques entre aquifères est réalisée sont présentés au chapitre 4, alors que la méthodologie appliquée pour mettre en évidence de telles connexions est exposée au chapitre 5. Les résultats obtenus suite aux différentes méthodes d'investigation sont présentés au sixième chapitre. Enfin, au chapitre 7, les résultats sont interprétés et discutés, alors que le chapitre 8 présente les conclusions et les recommandations de cette étude.

2

PROBLÉMATIQUE

2.1 Problématique à l'échelle régionale

Les connexions hydrauliques entre des aquifères granulaire et de roc fracturé peuvent impliquer de grands volumes d'eau échangés à l'échelle régionale. Pour illustrer la problématique, le modèle conceptuel de la figure 2-1 représente un contexte hydrogéologique rencontré à plusieurs endroits dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. À la gauche du schéma, le socle rocheux est représenté par les hautes-terres régionales. Celles-ci sont caractérisées par un relief accidenté, une couverture de dépôts mince ou inexistante, et dont l'altitude est plus élevée que les basses-terres. Ces dernières sont quant à elles représentées par un relief moins accentué, elles sont recouvertes d'unités granulaires épaisses et continues. Les flèches vertes indiquent les aires de recharge des aquifères à nappe libre (de roc fracturé et de dépôt granulaire) par les précipitations. Une partie de l'eau précipitée utilise directement les fractures du roc sur les hautes-terres et la porosité des dépôts de surface sur les basses-terres pour s'infiltrer et recharger les aquifères. Les flèches bleues montrent le sens d'écoulement de l'eau souterraine suivant le gradient hydraulique régional. Enfin, les flèches en rouge

représentent différents types de connexions hydrauliques pouvant exister entre aquifères : les connexions hydrauliques peuvent se faire verticalement et horizontalement. Le cas d'une connexion à l'horizontal est possible là où la paroi du roc est subverticale et en contact avec des dépôts superficiels horizontaux. Dans le cas présent, il y a une connexion directe entre le roc des hautes-terres vers les dépôts granulaires des basses-terres adjacentes. Les connexions à la verticale se font soit entre un aquifère granulaire et un autre aquifère via une couche aquitard, mais elles peuvent aussi s'effectuer directement entre un aquifère granulaire et un aquifère de roc fracturé, avec des directions d'écoulement pouvant se faire dans les deux sens selon le sens du gradient hydraulique existant entre les deux entités en contact.

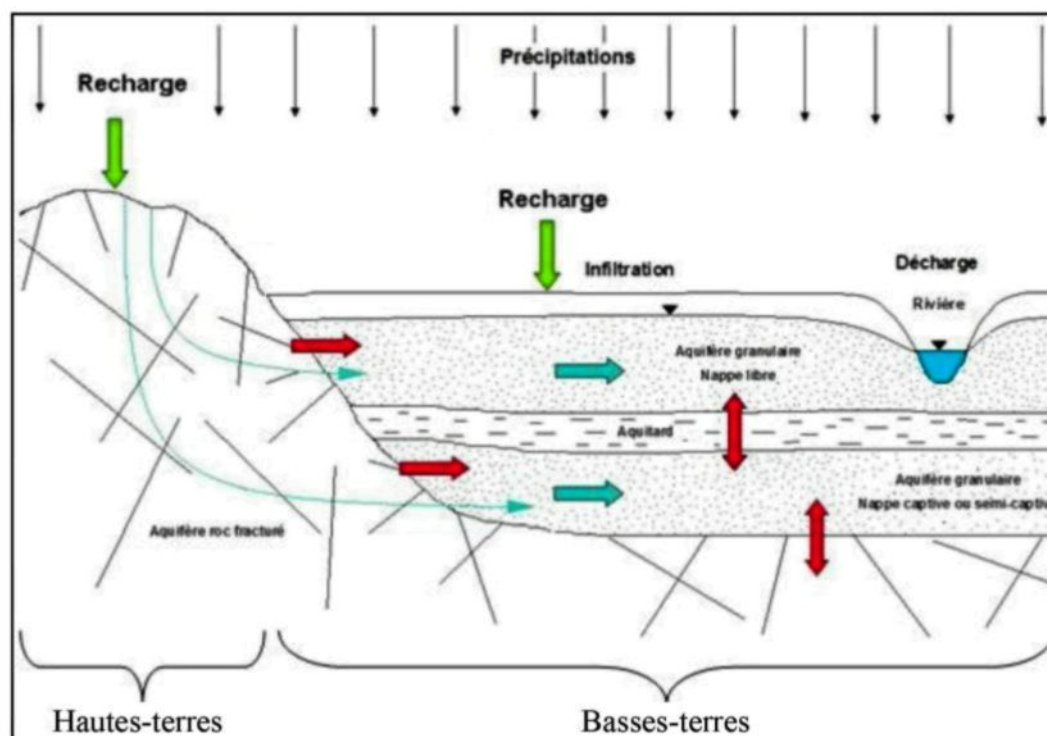


Figure 2-1: Modèle hydrogéologique conceptuel de la région du Saguenay-Lac-St-Jean. Les flèches noires représentent les précipitations, les vertes indiquent la recharge des aquifères à nappe libre, les rouges représentent des échanges possibles entre aquifères, alors que celles en bleu montrent le sens d'écoulement régional de l'eau souterraine.

Ainsi, considérer tous ces types de connexion hydraulique possibles permettra non seulement une meilleure compréhension des dynamiques d'écoulement régionales, mais aussi de mieux intégrer les échanges hydrauliques inter-aquifères dans les bilans hydriques réalisés par les hydrogéologues à l'échelle d'un aquifère. Une meilleure quantification de ces échanges sera garante d'une meilleure évaluation de la ressource et ainsi d'une meilleure gestion de celle-ci. Afin d'améliorer le calcul des bilans, il faudra ainsi intégrer des données plus précises des entrées et sorties d'eau au sein de chaque entité aquifère, ces entrées/sorties étant inter-reliées entre elles. De plus, prendre connaissance de ces connexions permettra d'en tenir compte pour la compréhension de la géochimie des aquifères d'une part et d'autre part permettra une meilleure évaluation/prédiction du transport éventuel de contaminants entre aquifères (contaminations croisées). Une telle connaissance aidera également à mieux comprendre l'origine de la chimie des aquifères et permettra d'assurer une meilleure protection de la ressource en terme de qualité.

2.2 Problématique à l'échelle locale

Sous l'influence d'un pompage, les connexions hydrauliques entre des aquifères granulaire et de roc fracturé peuvent être accentuées. À cette échelle, deux situations peuvent survenir. Tout d'abord, lors d'un pompage dans un aquifère, le cône de rabattement s'élargit autour du puits pompé. Si l'on considère l'exemple d'un pompage dans les dépôts granulaires, des fractures interceptant l'interface du roc et des dépôts peuvent être sollicitées et conduire l'eau du roc vers l'aquifère granulaire. La seconde

situation est le cas d'un pompage dans le roc fracturé près de la limite roc/granulaire. Dans ce cas, le pompage dans le socle peut amener l'eau du granulaire à emprunter les fractures du roc pour ainsi être pompée dans le puits installé dans l'aquifère rocheux fracturé. De plus, si le tubage d'acier est mal ancré dans le roc, l'eau de l'aquifère granulaire peut circuler via les ouvertures créées par le défaut d'ancrage pour être pompée dans le puits installé dans l'aquifère rocheux.

Dans les trois situations, on croit pomper dans un milieu connu, mais l'eau extraite est un mélange de deux eaux aux propriétés chimiques différentes, provenant de deux milieux hydrogéologiques distincts.

La figure 2-2 illustre un modèle conceptuel représentant les situations d'un pompage dans le dépôt (1) et d'un pompage dans le roc fracturé (2) lorsque des connexions hydrauliques existent entre les deux aquifères.

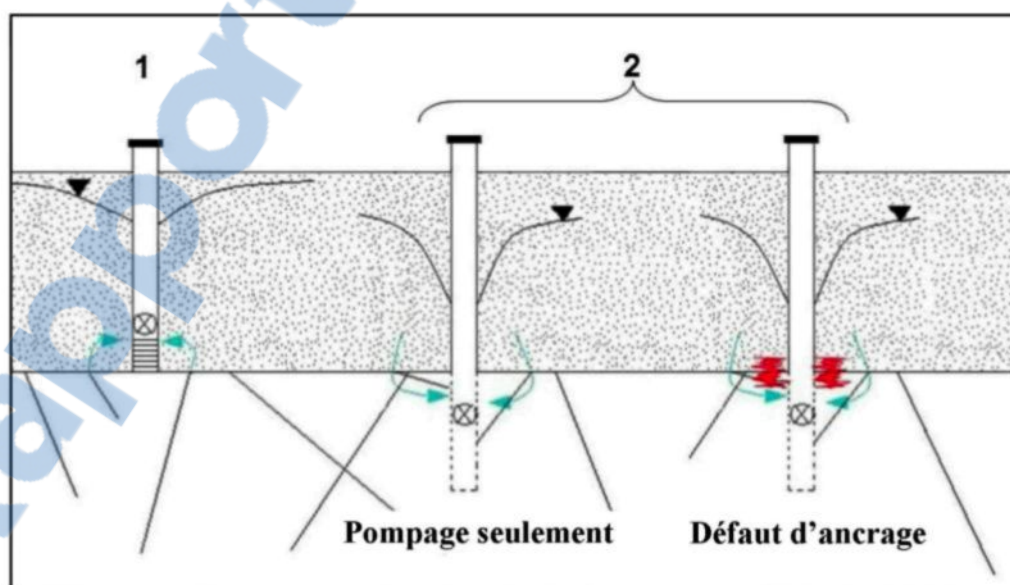


Figure 2-2: Modèle conceptuel de connexions hydrauliques entre aquifères à l'échelle locale sous l'influence d'un pompage. Les flèches bleues indiquent la relation hydraulique entre les deux aquifères suite à un pompage dans l'un ou l'autre des puits. Les zigzags rouges illustrent le défaut d'ancrage.

2.3 Problématique générale

Le territoire du Saguenay-Lac-Saint-Jean présente des contextes favorables à la mise en place de connexions hydrauliques aux échelles régionale et locale. La présente étude se basera sur des observations de terrain permettant de détecter de tels échanges sur certains secteurs de la région. De plus, les impacts physiques (quantité d'eau) et géochimiques (qualité de l'eau) que des connexions entre aquifères peuvent apporter régionalement et localement seront investigués dans cette étude. Enfin, au-delà de leurs conséquences possibles, on montrera que ces connexions doivent être prises en compte dans les études de caractérisation hydrogéologique réalisées par les firmes de consultants en hydrogéologie.

3

DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU SAGUENAY-LAC- SAINT-JEAN

3.1 Géologie du socle rocheux

La région du Saguenay-Lac-St-Jean se situe sur le Bouclier canadien et fait partie de la grande province géologique du Grenville (Rivers et al., 1989). Celle-ci est caractérisée majoritairement par un socle composé de roches ignées et de haut grade métamorphique (anorthosite, granite, complexe gneissique incluant paragneiss et orthogneiss), datant de l'ère précambrienne, soit de la période du mésoprotérozoïque (~ 1 500 à 1 000 Ma) (Hébert, 2004). On retrouve également quelques lambeaux de calcaire et de shale fossilifères du Paléozoïque inférieur (Ordovicien supérieur ~ 450 Ma) dans la région de Saint-Honoré et en bordure (nord et sud) du lac Saint-Jean (Saint-Félicien, Chambord, Saint-Méthode, etc.) (Avramtchev, 1993). Leur origine provient de la présence d'une mer tropicale peu profonde qui a recouvert une partie du Bouclier canadien de 450 à 200 Ma.

Des contraintes tectoniques associées à l'orogénie grenvillienne ont été appliquées sur la région et ont contribué à la fracturation du socle rocheux. De plus, suite à la fonte

du glacier continental de la dernière glaciation et du retrait des eaux de fonte qui ont amené la décompression du roc de la région, de nombreuses fractures subhorizontales se sont développées à la surface du roc. Ainsi, ces événements géologiques ont permis la formation d'aquifères rocheux fracturés dans les premiers mètres du socle.

Les roches sédimentaires présentent des fractures à pendage subvertical et subhorizontal principalement; alors que le pendage général des fractures dans les roches magmatiques serait plutôt subvertical, mais souvent subhorizontal dans les premiers 20 mètres près de la surface. De plus, les roches sédimentaires ont tendance à être plus perméables que les roches cristallines fracturées (Freeze et Cherry, 1979; Lemieux et al., 2009).

Dans la région, on peut observer de nombreuses zones de failles associées à des zones du socle très fracturées (Roy et Rouleau, 1999). Certaines de ces zones sont constituées par les failles bordant le graben du Saguenay, qui est un fossé d'effondrement tectonique d'orientation est-ouest. Une autre structure majeure de la région est associée au Horst de Kénogami, localisé à l'est du lac Saint-Jean et qui est composé essentiellement d'anorthosite assez fracturée.

La figure 3-1 est la carte lithologique du Ministère des Ressources Naturelles (Avramtchev, 1993), utilisée dans le cadre du projet PACES-SLSJ. La légende de cette carte se trouve en annexe 1.

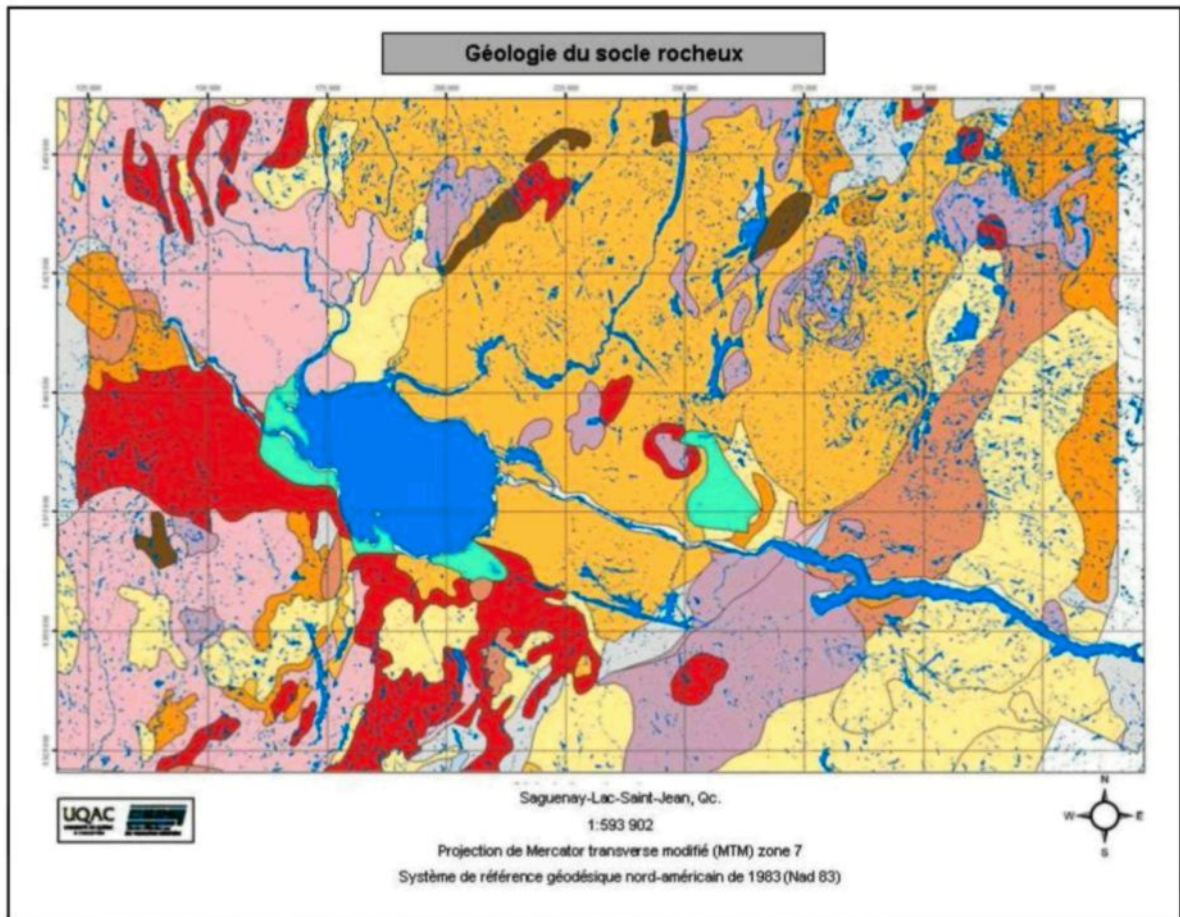


Figure 3-1 : Carte du socle rocheux du Saguenay-Lac-St-Jean (Avramtchev 1993).

3.2 Géologie des dépôts de surface

Le socle rocheux de la région est couvert de matériaux granulaires datant de la période du Quaternaire (LaSalle et Tremblay, 1978). C'est en fait lors de la dernière glaciation et déglaciation, celle du Wisconsinien, que ces dépôts ont été mis en place sur le socle régional. Tout d'abord, en période glaciaire, un till de fond est transporté par les glaciers à leur base et est déposé directement sur le socle rocheux. Lors du retrait des glaces, le matériel situé au sommet des glaciers est quant à lui déposé sur le till de fond; ce type de dépôt est un till d'ablation. Ensuite, avec la fonte de la glace, des rivières se sont formées amenant des sédiments fluvioglaciaires (sable et gravier) à se déposer. Une fois les glaciers retirés, ils ont laissé place à des lacs proglaciaires et à la mer Laflamme, qui ont permis la mise en place de sédiments glaciolacustres et glaciomarins (gravier, sable, silt et argile). Des sédiments alluviaux (sable et gravier) sont ensuite transportés par les rivières et recouvrent par endroit les dépôts glaciolacustres et glaciomarins le long des cours d'eau actuels. Enfin, aux endroits où l'action des cours d'eau ne se fait pas ressentir, on retrouve parfois sur la couche supérieure des formations quaternaires, des sédiments éoliens, de versant ainsi que des dépôts organiques qui se mettent en place encore aujourd'hui. La figure 3-2 présente de manière générale la stratigraphie des dépôts meubles de la région.

Sédiments éoliens, de versant et organiques
Sédiments alluviaux (sable et gravier)
Sédiments glaciolacustres et glaciomarins (gravier, sable, silt et argile)
Sédiments fluvioglaciaires (sable et gravier)
Tills (de fond et d'ablation)
Roc fracturé : granite, gneiss, anorthosite, calcaire et shale

Figure 3-2 : Coupe stratigraphique conceptuelle de la région

Les dépôts de surface forment en général de très bons contextes pour exploiter l'eau souterraine. Par exemple, dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, la plupart des municipalités exploitent l'eau souterraine dans des aquifères granulaires car ils sont généralement plus perméables que les aquifères de roc fracturé (Freeze et Cherry, 1979). Cependant, les unités de tills et de sédiments glaciomarins ne forment pas de réservoir d'eau souterraine exploitable. Les tills sont reconnus comme étant une couche quasi imperméable (très peu transmissive). Les argiles et le silt forment quant à eux des couches aquitards, soit des formations imperméables ou très peu perméables qui confinent les aquifères sous-jacents.

La carte de la figure 3-3 présente la géologie des dépôts quaternaires du Saguenay-Lac-Saint-Jean et celle-ci provient du Ministère des Ressources Naturelles (MRN, 2011). La légende de cette carte se trouve en annexe 2.

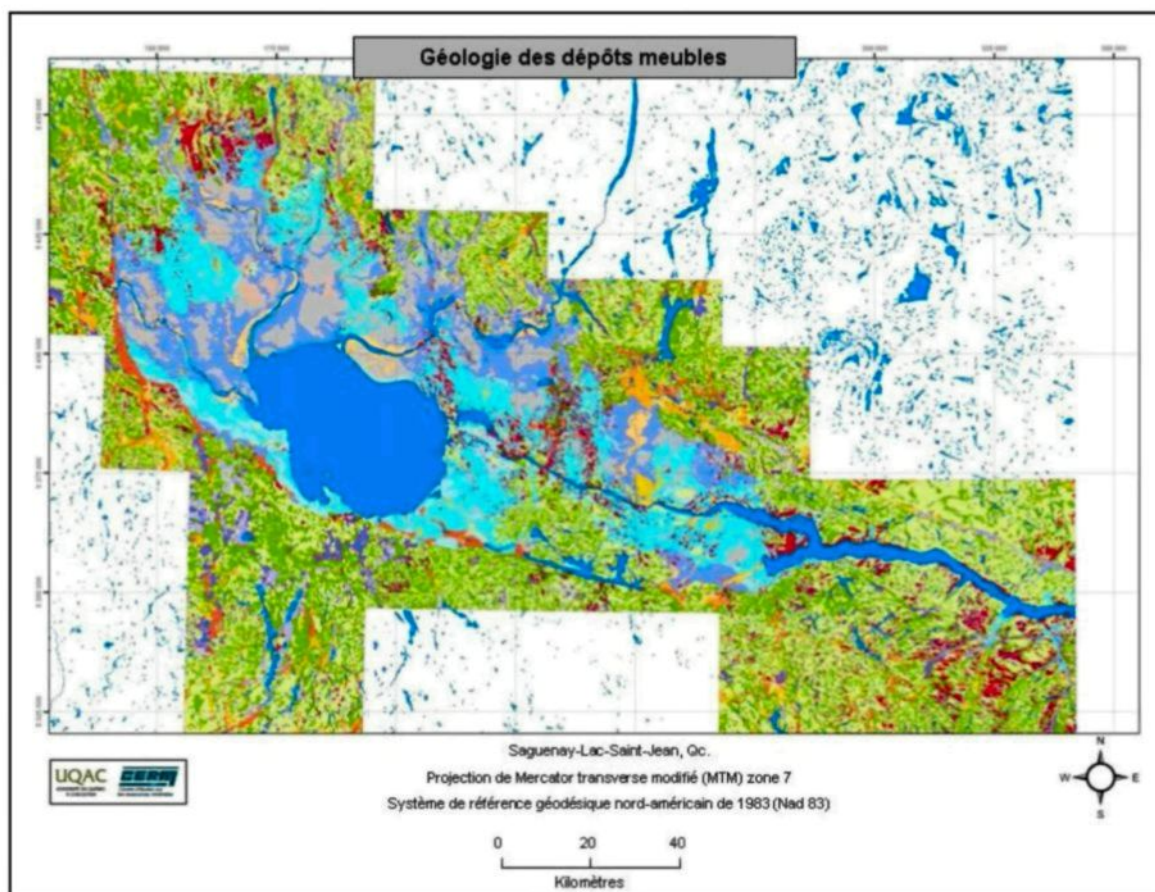


Figure 3-3 : Carte des dépôts meubles du Saguenay-Lac-Saint-Jean (MRN, 2011).

4

SITES INVESTIGUÉS

La région du Saguenay-Lac-Saint-Jean présente un contexte géologique favorable aux connexions hydrauliques directes entre un aquifère granulaire et un aquifère rocheux, puisque le roc régional est assez fracturé et est recouvert en grande partie de dépôts meubles perméables. Dans la région, six sites ont été investigués (figure 4-1) pour mettre en évidence de telles connexions aux échelles régionale et locale; soit quatre sites aménagés par l'équipe du PACES-SLSJ de l'UQAC : le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et les sites doubles (voir explications de cette terminologie ci-après) de Vauvert, de Saint-Méthode et de Saint-David-de-Falardeau, ainsi que les champs captant municipaux de Saint-Félicien et de Petit-Saguenay.

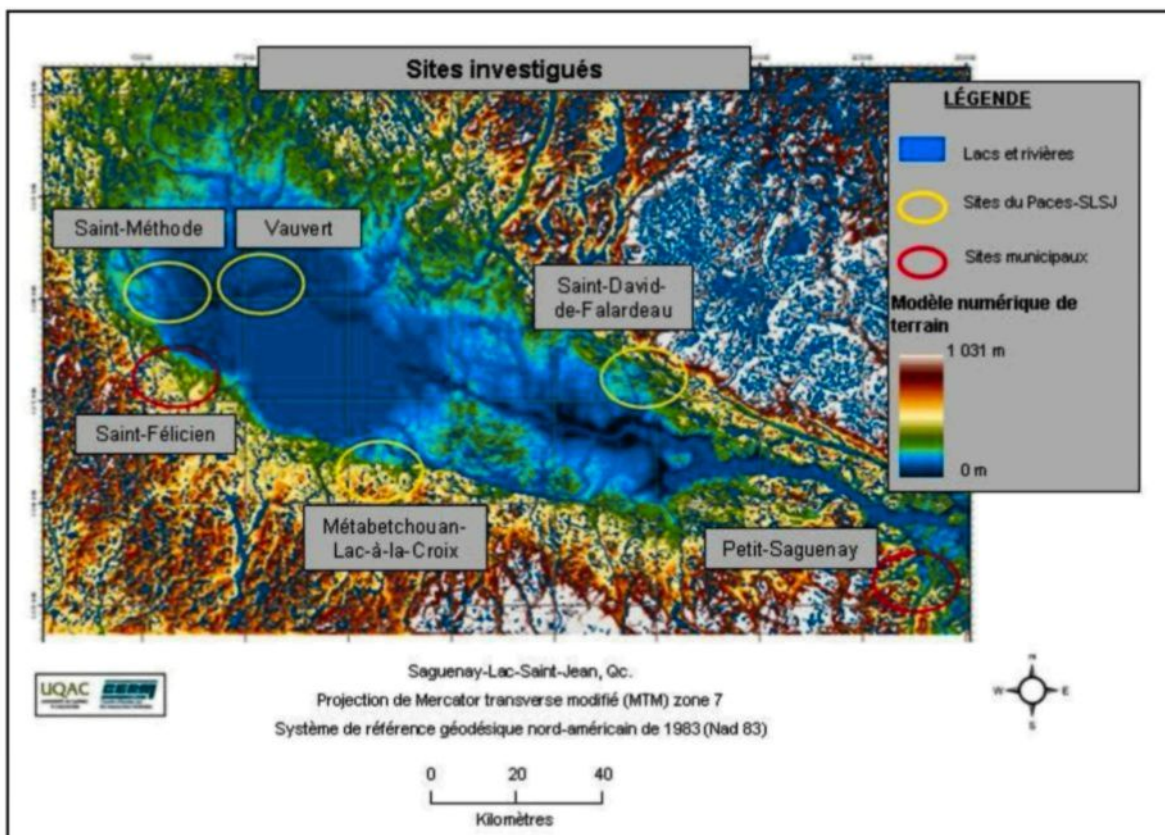


Figure 4-1 : Carte topographique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Présentation des sites investigués : les cercles jaunes présentent la localisation des sites du PACES-SLSJ, alors que ceux en rouge présentent la localisation des sites municipaux.

4.1 Échelle régionale – Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix est localisé au sud-est du lac Saint-Jean. Plus précisément, il est situé sur les basses-terres du lac, en contrefort des hautes-terres au sud (figure 4-1). Ce site (figure 4-2) est instrumenté par deux piézomètres (PZ-S6-1 et PZ-S6-2) installés dans les dépôts meubles et dont le diamètre est de 2,54 cm.

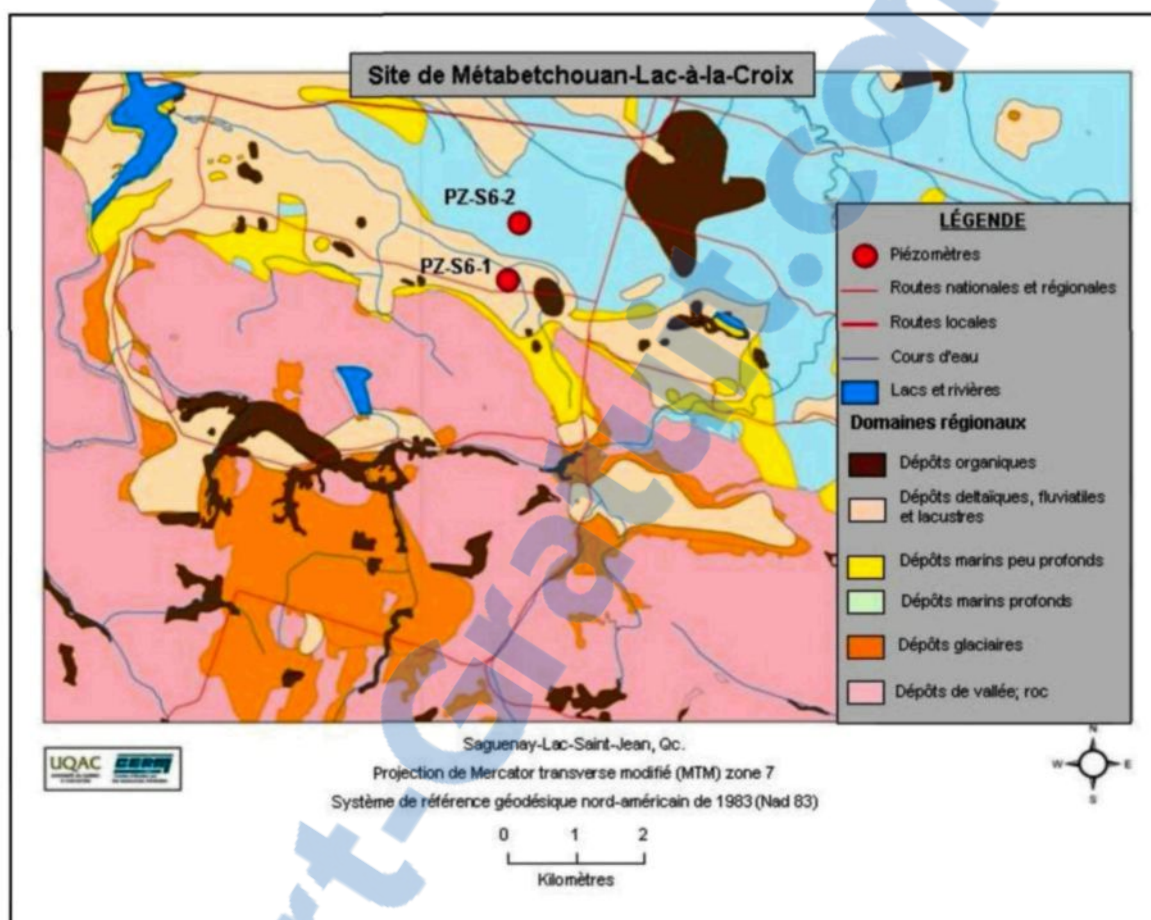


Figure 4-2 : Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix : Les cercles rouges représentent l'emplacement des piézomètres sur ce site. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

La stratigraphie générale du site (figure 4-3), selon les résultats des tests au piézocône et de la carte géologique de la région, est un socle rocheux calcaire, surmonté de dépôts granulaires composés de sable, de silt et d'argile (PACES-SLSJ, 2013).

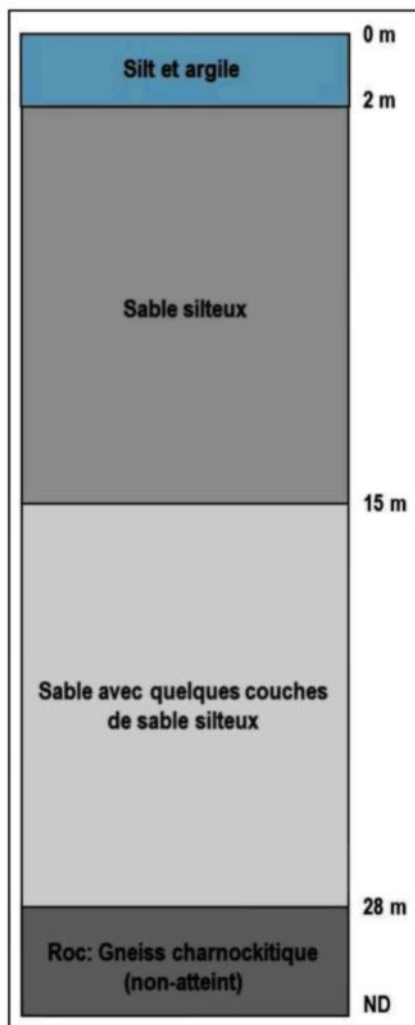


Figure 4-3 : Coupe stratigraphique schématique du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.

Pour illustrer le contexte hydrogéologique du site à l'échelle régionale, le modèle conceptuel présenté à la figure 2-1 du chapitre 2 *Problématique à l'échelle régionale* pourrait être repris puisque ce dernier est localisé sur des basses-terres recouvertes de dépôts granulaires, en contrefort avec des hautes-terres composées du socle rocheux (Avramtchev 1993; MRN, 2011).

4.2 Échelle locale – Champs captant municipaux

Dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, quarante-trois municipalités distribuent à leur population respective de l'eau souterraine alors que seulement neuf municipalités leur distribuent de l'eau de surface. La grande majorité de ces municipalités exploite des aquifères composés de matériaux granulaires (89,4%), alors que seulement quelques-unes exploitent des aquifères rocheux fracturés pour alimenter leur population en eau potable (10,6 %) (PACES-SLSJ, 2013). Parmi celles qui exploitent le roc fracturé, deux sont munies de puits d'observation aménagés à la fois dans le roc et dans les dépôts meubles, soit les municipalités de Saint-Félicien et de Petit-Saguenay. La disponibilité des données hydrogéologiques dans les différentes formations aquifères de ces champs captant rend possible une investigation à l'échelle locale des connexions hydrauliques entre celles-ci.

4.2.1 Champ captant municipal de Saint-Félicien

La ville de Saint-Félicien est située à l'ouest du lac Saint-Jean et son champ captant est localisé au sud-est de la municipalité, près de la rivière à l'Ours (figure 4-1). Ce dernier contient huit nids de piézomètres, soit des piézomètres installés dans différents milieux aquifères mais dans un même forage, deux piézomètres individuels dans le roc et deux puits de pompage (figure 4-4). Un de ces puits, le puits P-3, pompe à la fois dans les dépôts de moraine et dans le calcaire fracturé. Alors que le second puits, le puits P-4, pompe uniquement dans une formation composée de sable et gravier.

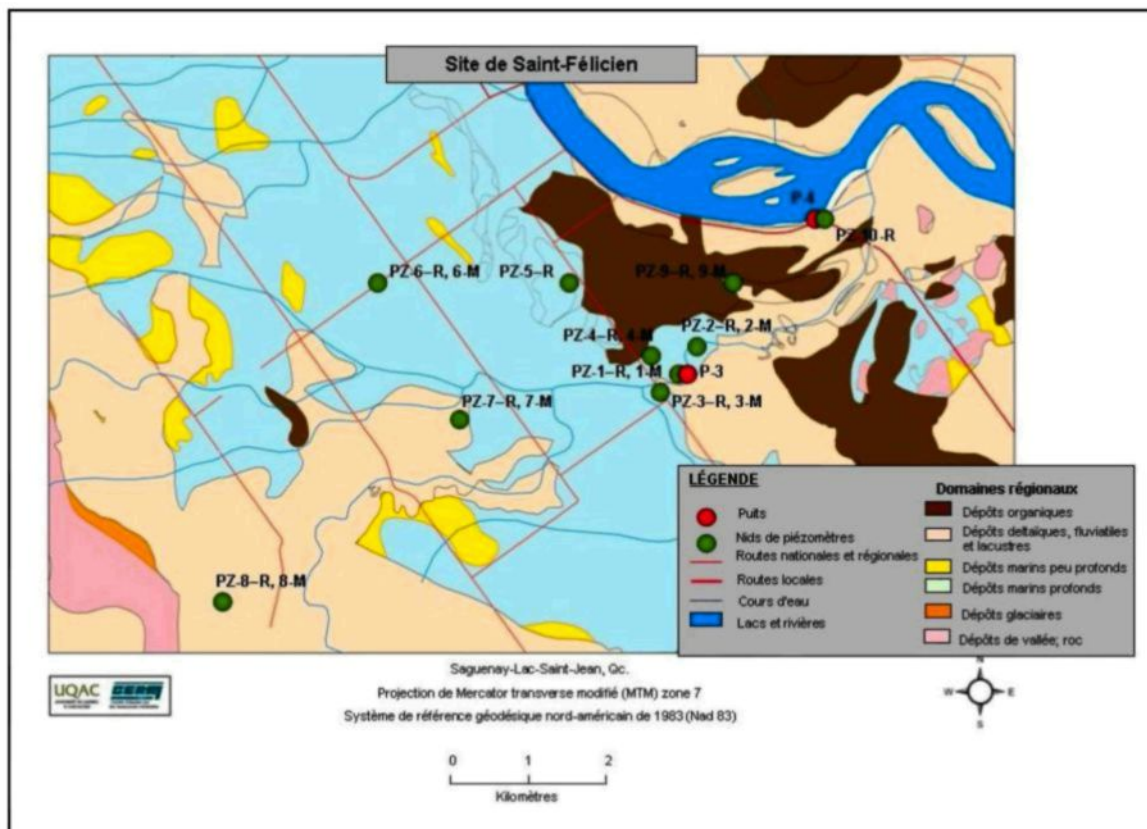


Figure 4-4 : Site de Saint-Félicien. Les nids de piézomètres sont représentés par des cercles verts alors que les puits municipaux sont représentés par des cercles rouges. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

La stratigraphie rencontrée au puits de pompage P-3 est présentée à la figure 4-5, soit une coupe stratigraphique schématique représentant les différentes formations géologiques rencontrées lors des travaux de forage.

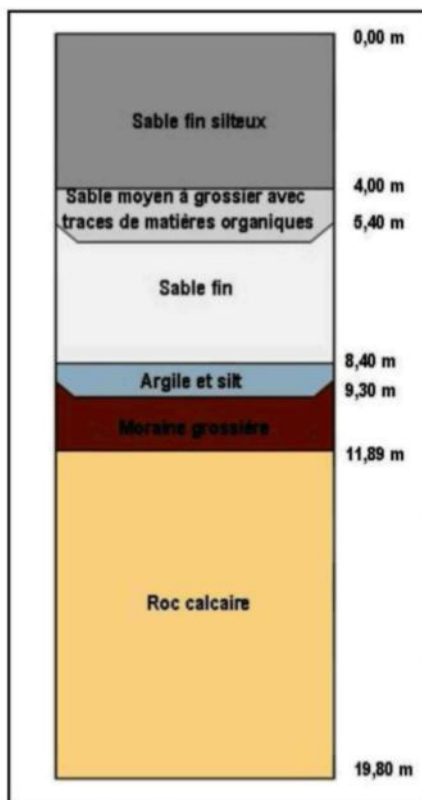


Figure 4-5 : Coupe stratigraphique schématique du puits P-3 à Saint-Félicien.

La géologie en place autour du puits P-3 est caractérisée par la présence de 11,89 mètres de dépôts meubles composés de moraine, de sable, de silt et d'argile sous lesquels 7,91 mètres de roc calcaire est traversé.

La stratigraphie rencontrée à l'endroit du puits de pompage P-4 est quant à elle présentée à la figure 4-6, soit une coupe stratigraphique schématique représentant les différentes formations géologiques rencontrées lors des travaux de forage.

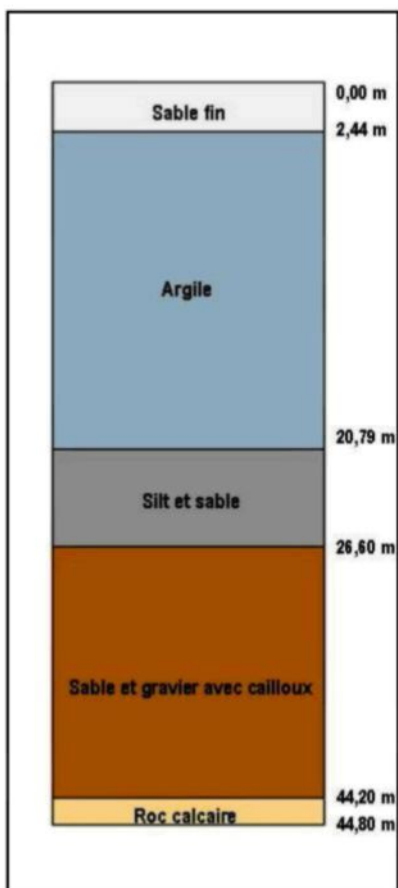


Figure 4-6 : Coupe stratigraphique schématique à l'emplacement du puits P-4 à Saint-Félicien.

La géologie en place à l'endroit du puits P-4 est caractérisée par 44,20 mètres de dépôts meubles composés de cailloux, de gravier, de sable, de silt et d'argile en place sur le roc calcaire. Le roc a été traversé sur une épaisseur de 0,60 mètre. Une crépine est installée dans le puits entre 38,20 et 44,20 mètres de profondeur. De plus, à 14,30 mètres à l'est du puits de pompage P-4, un piézomètre dans le roc est installé (PZ-10-R). La stratigraphie rencontrée lors du forage de cet ouvrage est caractérisée par 47,4 mètres de dépôts granulaires composés de blocs, de cailloux, de gravier, de sable, de silt et d'argile,

sous lesquels 7,77 mètres de roc de diverses natures sont traversés (calcaire et gneiss granitique).

Les deux puits de captage de ce champ captant puisent de l'eau souterraine à partir d'aquifères captifs. En effet, des horizons composés d'argile, de silt et de sable fin sont en place à l'endroit de ces forages et favorisent le confinement de ces aquifères.

4.2.2 Champ captant municipal de Petit-Saguenay

La municipalité de Petit-Saguenay est localisée dans la partie est de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et son champ captant est situé au sud-ouest du centre urbain (figure 4-1). Le champ captant municipal est équipé d'un puits dans le roc, le puits P-3 et de quatre piézomètres individuels (figure 4-7). La nappe d'eau contenue dans les dépôts granulaires et celle contenue dans le roc fracturé sont toutes deux munies de puits d'observation (trois dans le roc et deux dans les dépôts).

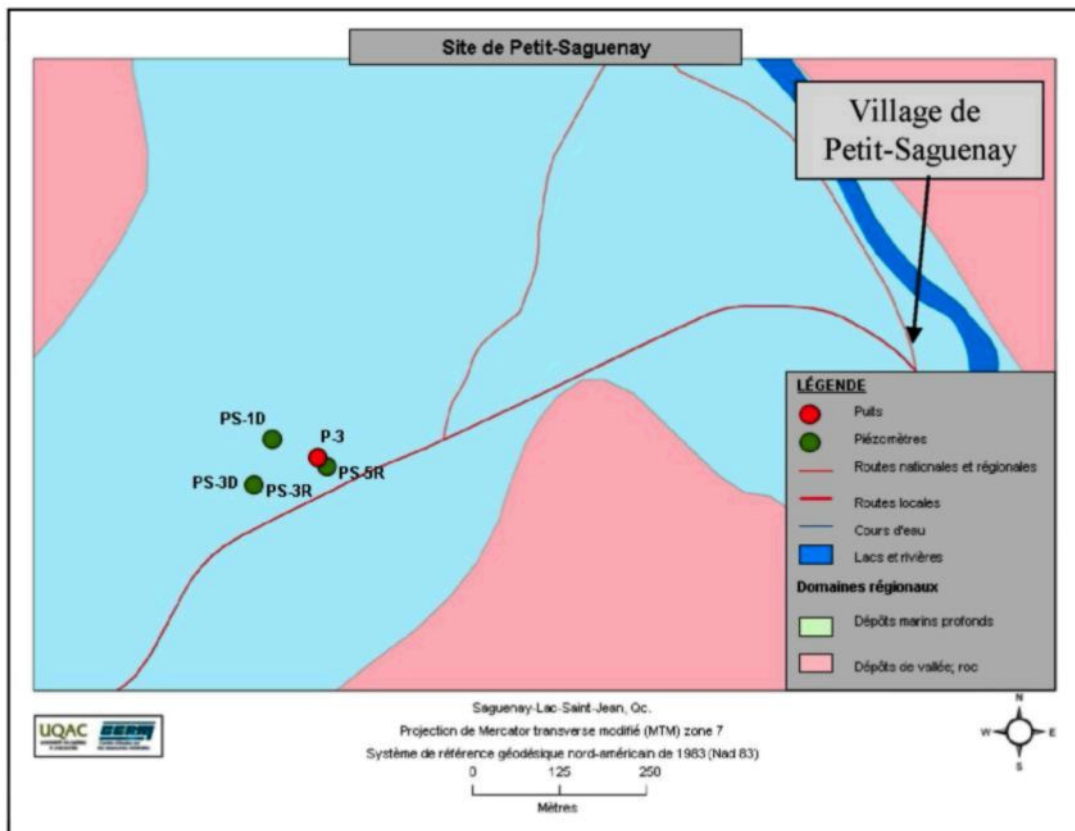


Figure 4-7 : Site de Petit-Saguenay. Les nids de piézomètres sont représentés par des cercles verts alors que les puits municipaux sont représentés par des cercles rouges. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

À l'endroit du puits de captage P-3, la stratigraphie rencontrée est décrite sur la coupe stratigraphique schématisée présentée à la figure 4-8.

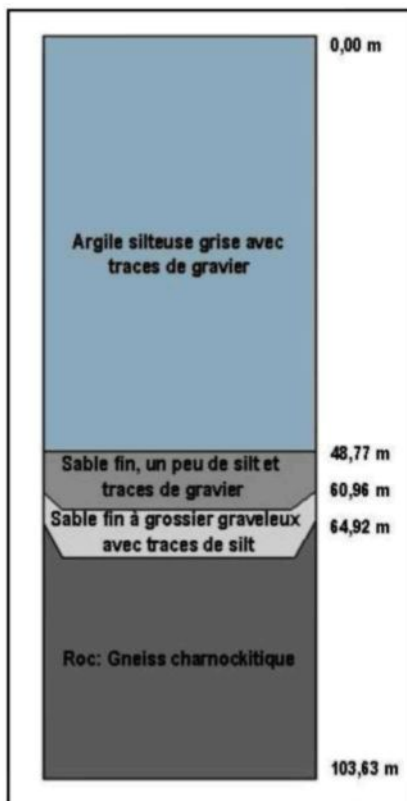


Figure 4-8 : Coupe stratigraphique schématique à l'emplacement du puits P-3 à Petit-Saguenay

En général, on retrouve en surface 64,92 mètres de dépôts granulaires composés de cailloux, de gravier, de sable, de silt et d'argile. Ces dépôts granulaires recouvrent un roc de type gneiss charnockitique qui a été pénétré jusqu'à une profondeur de 103,63 mètres à l'endroit du forage. Par la présence d'une importante couche d'argile silteuse en surface, l'aquifère rocheux fracturé exploité par la municipalité est captif.

4.3 Échelle locale – Sites doubles

Dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines au Saguenay-Lac-Saint-Jean (PACES-SLSJ), différents sites ont été investigués à des endroits où très peu d'information hydrogéologique était alors disponible. Une campagne de forages a eu lieu durant la période estivale de 2011 et trois sites ont été instrumentés de piézomètres afin d'obtenir des données hydrogéologiques à ces endroits. À chaque site, deux forages de 15,24 cm de diamètre ont été réalisés à quelques mètres de distance l'un de l'autre. Un de ces forages pénètre le roc alors que l'autre traverse seulement les dépôts granulaires. Ainsi, ces trois sites sont appelés «sites doubles» dans ce projet. Pour les forages dans le roc, un tubage d'acier est installé dans les dépôts meubles et celui-ci est ancré dans le roc sur environ un mètre de profondeur. En revanche, les forages réalisés dans les dépôts ont été convertis en piézomètres par l'insertion d'un tubage et d'une crépine de PVC de 5,08 cm de diamètre chacun. De plus, lorsqu'il y a présence de nappes libre et captive dans les dépôts, ces forages ont été transformés en nids de piézomètres par l'installation d'une crépine dans la nappe libre et d'une seconde dans la nappe captive. L'ensemble des forages possède une margelle de 0,65 à 1,04 mètre de hauteur et de 15,24 cm de diamètre.

4.3.1 Site double - Vauvert

Le site de Vauvert est localisé au nord-ouest du lac Saint-Jean, sur la pointe à l'est de la rivière Mistassini (figure 4-9). Le site est localisé sur une terre publique intramunicipale (TPI) qui est présentement utilisée pour l'exploitation de la tourbe. La géologie générale de ce site est caractérisée par la présence de 57,4 mètres de gravier, de sable, de silt et d'argile sous lesquels 82,8 mètres de roc de différentes natures ont été traversés (shale, calcaire et granite).

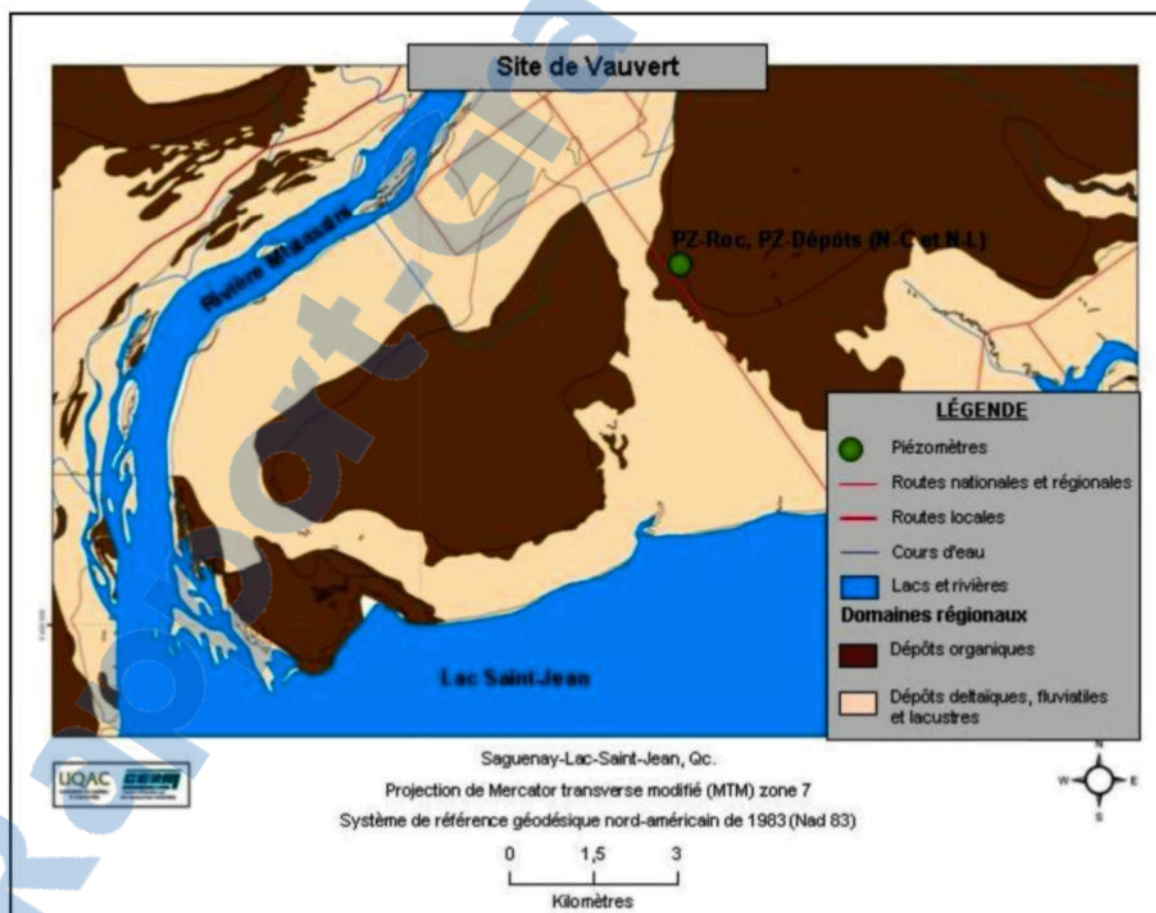


Figure 4-9 : Site double de Vauvert. L'ensemble des ouvrages est représenté par le cercle vert. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

La figure 4-10 représente une coupe schématique de la stratigraphie rencontrée lors des travaux de forage sur ce site.

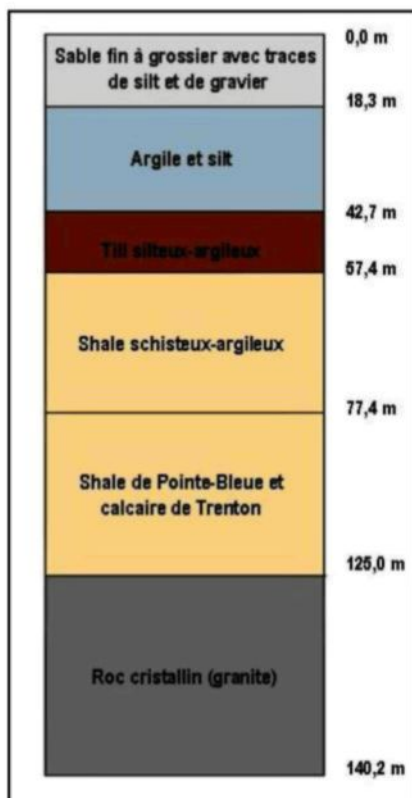


Figure 4-10 : Coupe stratigraphique schématique au site de Vauvert.

Au site de Vauvert, un piézomètre est installé dans le roc et un nid de piézomètres est aménagé dans les dépôts. Pour chacun des piézomètres en place sur le site, le schéma d'aménagement est présenté à l'annexe 1. La figure 1 de l'annexe 3 présente l'aménagement du forage dans le roc, alors que la figure 2 de cette annexe présente l'aménagement piézométrique du forage dans les dépôts.

4.3.2 Site double - Saint-Méthode

Le site de Saint-Méthode est situé au nord-ouest du lac Saint-Jean (figure 4-1). Plus précisément, il est localisé sur une TPI où une bleuetière est en exploitation à proximité de l'aéroport de Saint-Méthode (figure 4-11). En général, la géologie de ce site est caractérisée par la présence de 70 mètres de dépôts meubles composés de gravier, de sable, de silt et d'argile, sous lesquels 35,2 mètres de roc ont été traversés (granite et anorthosite).

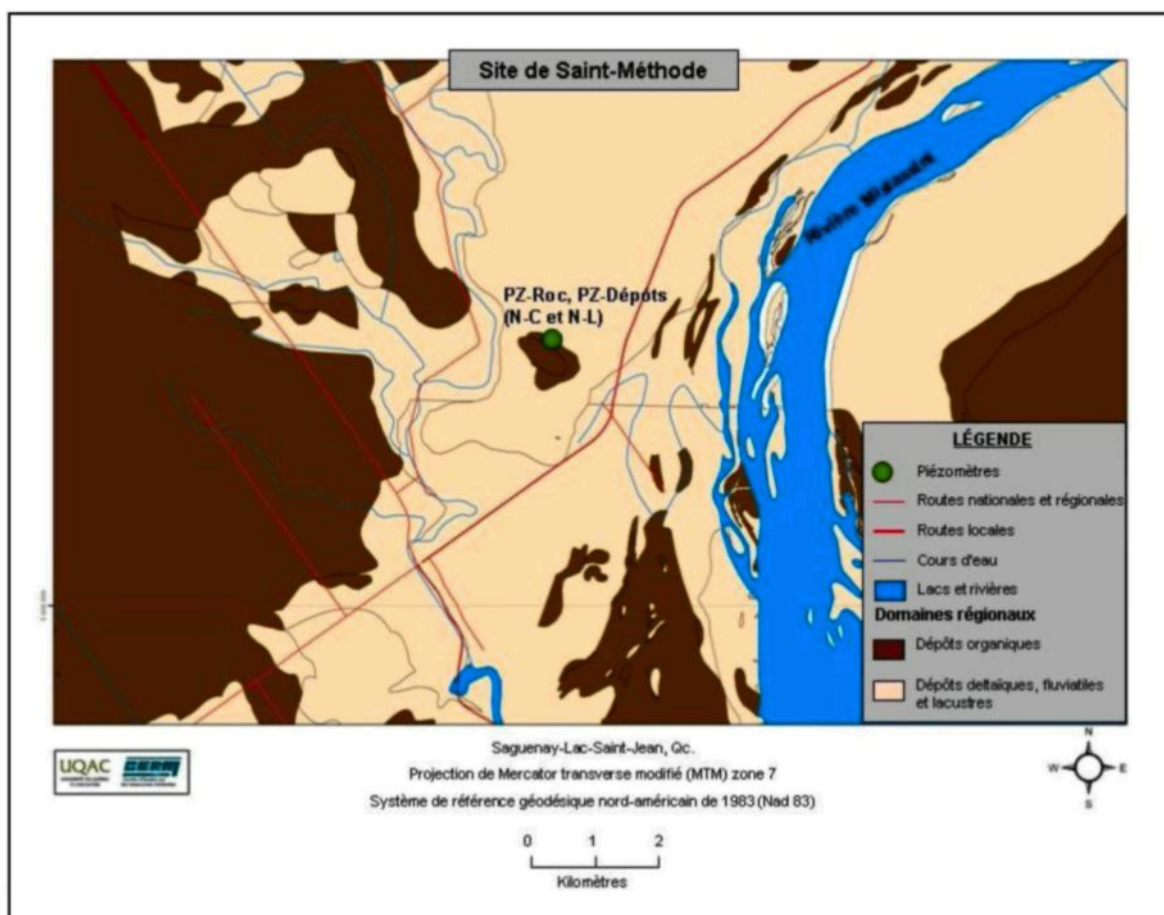


Figure 4-11 : Site double de Saint-Méthode. L'ensemble des ouvrages est représenté par le cercle vert. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

La figure 4-12 représente une coupe schématique de la stratigraphie rencontrée lors des travaux de forage sur ce site.

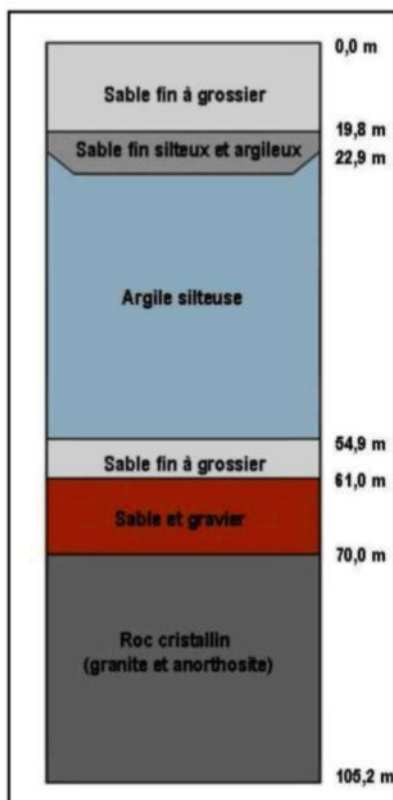


Figure 4-12 : Coupe stratigraphique schématique au site de Saint-Méthode.

Sur le site de Saint-Méthode, un piézomètre a été installé dans le roc et un nid de piézomètres a été aménagé dans les différentes formations granulaires, soit un dans la nappe libre et un dans la nappe captive. Le schéma d'aménagement de chacun des piézomètres de ce site est présenté à l'annexe 3. L'aménagement du forage dans le socle rocheux est présenté à la figure 3, alors que l'aménagement piézométrique dans les dépôts granulaires est présenté à la figure 4 de cette annexe.

4.3.3 Site double - Saint-David-de-Falardeau

Le site de Saint-David-de-Falardeau est localisé à environ 7 kilomètres au nord-ouest du village, sur un terrain privé appartenant à un résident (figure 4-13). La géologie générale de ce site est caractérisée par la présence de 24,4 mètres de gravier, de sable, de silt et d'argile sous lesquels 129,5 mètres de calcaire et d'anorthosite ont été traversés.

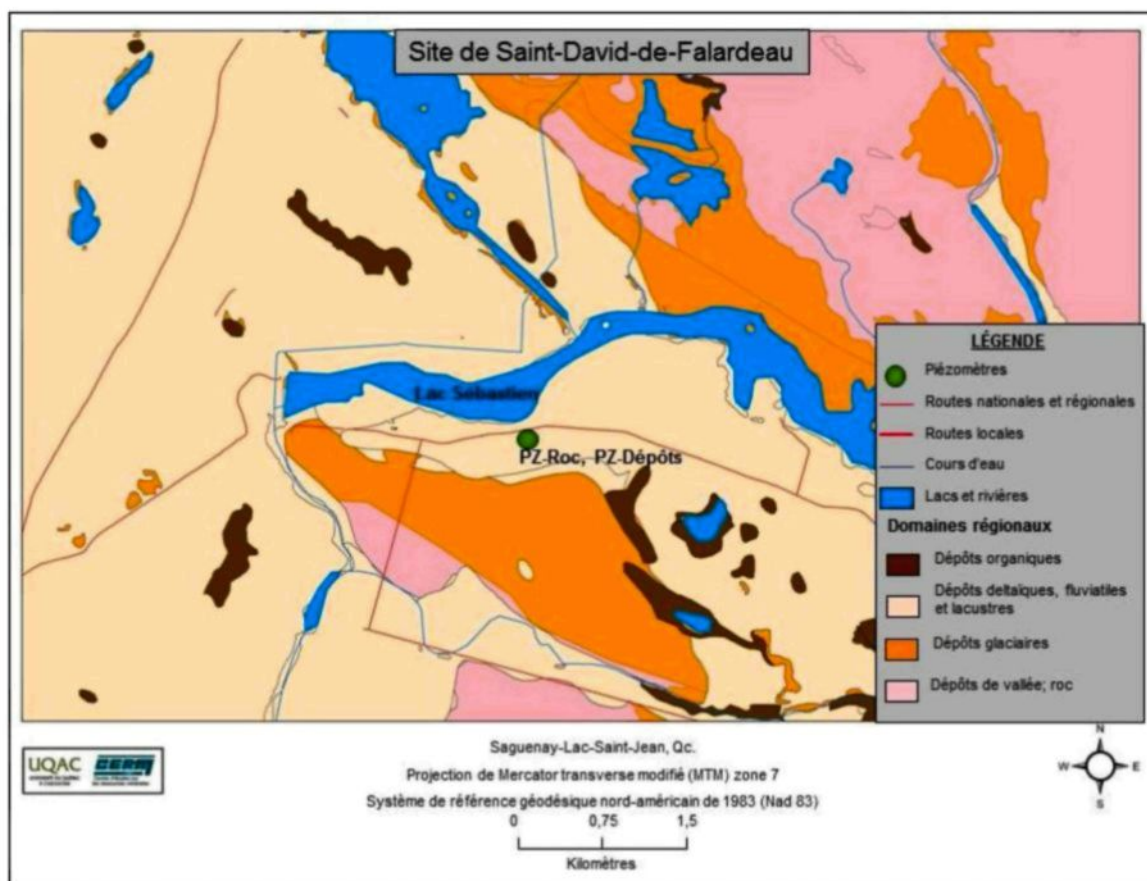


Figure 4-13 : Site double de Saint-David-de-Falardeau. L'ensemble des ouvrages est représenté par le cercle vert. Carte des dépôts de surface modifiée des cartes des dépôts quaternaires du MRN (2011).

La figure 4-14 représente une coupe schématique de la stratigraphie rencontrée lors des travaux de forage sur ce site.

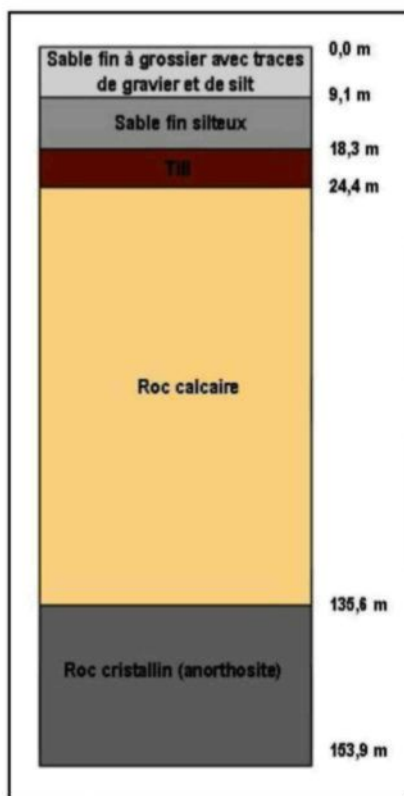


Figure 4-14 : Coupe stratigraphique schématique au site de Saint-David-de-Falardeau

Au site de Saint-David-de-Falardeau, un piézomètre est installé dans le socle rocheux et un second est aménagé dans les dépôts meubles, au niveau de la nappe libre. Aucune nappe captive n'est en place dans les dépôts granulaires. Pour chacun des piézomètres en place sur ce site, le schéma d'aménagement est présenté à l'annexe 3. La figure 5 de cette annexe présente l'aménagement du forage installé dans le roc, alors que la figure 6 de la même annexe présente l'aménagement piézométrique du forage dans les dépôts.

5

MÉTHODOLOGIE

Le chapitre suivant présente la méthodologie qui a été appliquée lors de ce projet afin de mettre en évidence l'occurrence de connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

5.1 Base de données du PACES-SLSJ

Lors du projet PACES-SLSJ, une importante base de données hydrogéologiques à références spatiales a été construite. Celle-ci constitue une compilation de données existantes, soit des données qui existaient avant le programme, et de données qui ont été acquises dans le cadre du PACES-SLSJ entre 2009 et 2012 (PACES-SLSJ, 2013).

5.1.1 Données existantes

Les informations existantes incluses dans cette base de données ont entre autre été obtenues par la collaboration des municipalités qui exploitent l'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable de leur population. Les municipalités participantes ont fourni les rapports de diverses études hydrogéologiques réalisées par différentes firmes de consultants, soit des recherches en eau, des constructions de puits de captage, des réhabilitations d'ouvrages de captage, etc. Ces rapports contiennent une grande diversité d'informations dont notamment les types d'aquifères exploités, la stratigraphie (nature et

épaisseur des dépôts) en place des différents forages, des données d'essais de pompage et de piézométrie, des schémas d'aménagement d'ouvrages de captage, etc.

Cette base de données contient également les informations présentes dans la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH). La base de données du SIH est un recueil de données réalisé à partir des rapports de forages de puits individuels et elle est publiée par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (MDDEFP) (<http://www.sih.mddep.gouv.qc.ca/index.html>). On retrouve dans cette base de données des informations concernant la stratigraphie, les niveaux piézométriques, les débits soutirés lors d'essais de pompage de courte durée et les installations des puits individuels. De plus, à partir des données contenues dans le SIH, les valeurs de transmissivité des aquifères rocheux de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont été calculées selon une méthode itérative appliquée à l'équation de Cooper-Jacob (1946) (Richard et al., 2011).

Enfin, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) a également fourni des informations sur des puits d'observation installés à des fins d'études géotechniques principalement. Les niveaux d'eau dans ces ouvrages, la stratigraphie et la qualité chimique de l'eau sont les types de données obtenues à partir des documents fournis par ce ministère.

5.1.2 Données acquises au cours du PACES-SLSJ

Les nouvelles données hydrogéologiques acquises au cours du PACES-SLSJ ont été obtenues par la réalisation de divers travaux de terrain permettant de faire la

caractérisation hydrogéologique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. En effet, différents types de levés (géophysiques, hydrogéochimiques, hydrostratigraphiques et structuraux), une campagne de forages destructifs, des sondages au piézocône, des installations piézométriques, des diagraphies en forage et des essais hydrauliques de courte durée ont été réalisés durant la période de 2010 à 2012. L'ensemble de ces données incorporées à la base de données permet de dresser un portrait global de la structure, de la qualité et de l'étendue des aquifères à l'échelle régionale (Chesnaux et al., 2011).

5.2 Piézométrie

Dans un contexte où un puits est aménagé près de l'interface entre les dépôts et le socle rocheux, et où des piézomètres installés dans les deux types de formations sont en place près du puits de pompage (figure 2-2), la lecture des niveaux piézométriques dans chacun des ouvrages peut permettre de détecter une connexion hydraulique entre les deux types d'aquifères. Par exemple, si on lit un niveau piézométrique naturel X dans le piézomètre installé dans le roc et que le niveau piézométrique naturel dans l'aquifère granulaire est également de X , ces deux aquifères ayant la même charge hydraulique pourraient être bien connectés. On peut faire de même avec les niveaux dynamiques dans chacun des aquifères; si l'on retrouve le même niveau d'eau dans les deux ouvrages durant la phase dynamique lors d'un pompage, ces deux aquifères sont considérés comme étant connectés hydrauliquement.

Pour la réalisation d'un suivi piézométrique, deux types d'instruments peuvent être utilisés: une sonde à niveau d'eau manuelle ou une sonde de pression à acquisition

automatique de données. La sonde manuelle permet de mesurer sur un ruban gradué, le niveau de l'eau à partir de la surface. Cet instrument est utile lorsque l'on veut obtenir de manière ponctuelle la profondeur du niveau de l'eau dans un ouvrage. Par contre, si l'on veut suivre la piézométrie sur une plus longue période de temps et dans plusieurs ouvrages simultanément, les sondes de pression à acquisition automatique sont avantageuses car elles enregistrent les données automatiquement selon la fréquence voulue par l'opérateur. Dans le cadre de ce projet, les deux types de sondes sont utilisés.

5.3 Essai de pompage

Par un essai de pompage, deux types de données peuvent être acquises et analysées afin de détecter une connexion hydraulique entre deux types d'aquifères; soit des données de la physique de l'écoulement et des données hydrogéochimiques.

5.3.1 Physique de l'écoulement

Dans le même contexte que celui présenté à la section 5.2 *Piézométrie*, soit un puits installé à l'interface roc/granulaire et où des piézomètres aménagés dans les deux formations géologiques sont en place près du puits, on étudie si le pompage dans le puits provoque un rabattement (réponse physique) dans les deux aquifères. Une telle réponse permet de considérer un lien hydraulique naturel ou artificiel entre ceux-ci.

Il existe plusieurs méthodes d'interprétation d'essai de pompage pour définir les propriétés hydrauliques d'un aquifère capté, notamment les méthodes classiques de Theis (1935) et de Cooper-Jacob (1946). L'interprétation d'un essai de pompage à l'aide de ces méthodes consiste à mettre en graphique les données de rabattement en fonction du temps

(Chapuis, 1999). Par exemple, si l'aquifère pompé est compris dans une formation granulaire, la courbe de rabattement peut être affectée durant cette phase s'il y a l'interaction de fractures actives hydrauliquement avec les dépôts sus-jacents. Les fractures du roc peuvent permettre un apport d'eau supplémentaire à l'aquifère pompé; le rabattement dans l'aquifère granulaire serait donc moins important que si aucune fracture n'alimentait cet aquifère. Ainsi, lors d'un essai de pompage, la connexion entre les deux aquifères cause une erreur concernant l'estimation des propriétés hydrauliques du milieu pompé.

La méthode d'interprétation d'essai de pompage de Barker (1988) permet de mieux caractériser l'écoulement dans les systèmes fracturés. Il s'agit de la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps (Barker, 1988; Rafini et Larocque, 2009; Renard et al., 2009; Straface, 2009; Chesnaux et al., 2012; Rafini et Larocque, 2012). Celle-ci a été décrite pour des aquifères rocheux faillés et discontinus. Ainsi, cette méthode d'interprétation est plus adaptée à des essais de pompage réalisés dans le roc que les autres méthodes telles que Theis (1935) ou Cooper-Jacob (1946), dont l'utilisation n'est valable que dans les cas où les conditions d'utilisation sont satisfaites (aquifère horizontal, homogène, isotrope, etc.). De plus, comme la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps est très sensible aux variations du rabattement, celle-ci permet de faire un diagnostic plus précis de la signature hydraulique des écoulements ainsi que de la géométrie structurale du roc. Cet outil permet de percevoir sur le graphique bilogarithmique les changements de pente associés à la géométrie de l'aquifère rocheux fracturé et/ou à une hétérogénéité de ce dernier. Il est

ainsi possible de diagnostiquer cette géométrie, notamment l'inclinaison des failles, de détecter des discontinuités en place et d'établir la signature hydraulique des systèmes.

Tout d'abord, le calcul de la dérivée logarithmique des rabattements se fait selon l'équation 1 :

$$ds/(d\log t) = (2,3 ds/dt) t$$

[1]

Où :

ds : dérivée du rabattement

dt : dérivée du temps

t : temps

Sur un graphique bilogarithmique, on place en abscisse le temps alors que sur l'ordonnée, ce sont les valeurs de dérivée logarithmique du rabattement qui sont représentées. Une fois le graphe réalisé, on observe que les données suivent différentes tendances au cours de l'essai. Ces tendances sont caractérisées par un alignement des points sur le graphique qu'il est possible de relier par des droites. Ces droites ont différentes pentes (p) dont la valeur est calculée selon l'équation 2.

$$p = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1} \quad [2]$$

Où :

p : valeur de la pente

x_1 : valeur de la dérivée logarithmique du rabattement au temps court (début) de la droite

x_2 : valeur de la dérivée logarithmique du rabattement au temps long (fin) de la droite

y_1 : valeur du temps au temps court (début) de la droite

y_2 : valeur du temps au temps long (fin) de la droite

On détermine la dimension de l'écoulement (n) en phase transitoire de pompage selon la valeur de la pente obtenue à l'aide de l'équation 3. Cette dimension de l'écoulement permettra de déterminer la géométrie de l'écoulement.

$$n = 2(1-p) \quad [3]$$

Où :

n = dimension de l'écoulement

p = valeur de la pente

Barker (1988) a proposé un modèle généralisé des écoulements radiaux (*Generalized Radial Flow* : GRF) incluant les modèles classiques tels que celui de Theis (1935), pour mieux reproduire les réponses obtenues lors d'essais de pompage en milieux discontinus fracturés.

Selon les modèles classiques, les rabattements se propagent suivant des surfaces équipotentielles satisfaisant $A(r) \sim r$ soit un comportement radial dont la source de l'écoulement est de forme cylindrique ($A(r) \sim 2\pi r$) (figure 5-1, B). Comparativement aux

modèles classiques, le modèle GRF de Barker décrit un continuum de géométrie d'écoulement, avec des rabattements qui ne se propagent pas nécessairement en deux dimensions lors de la phase transitoire de pompage (Rafini et Larocque, 2009). La surface des équipotentiels est déterminée selon :

$$A(r) \sim r^{n-1}$$

Où :

A : surface équipotentielle

r : la distance radiale à partir de la source

n : dimension de l'écoulement

La figure 5-1 illustre le modèle théorique de la surface équipotentielle de l'écoulement directement reliée à la géométrie du conduit hydraulique conceptuel.

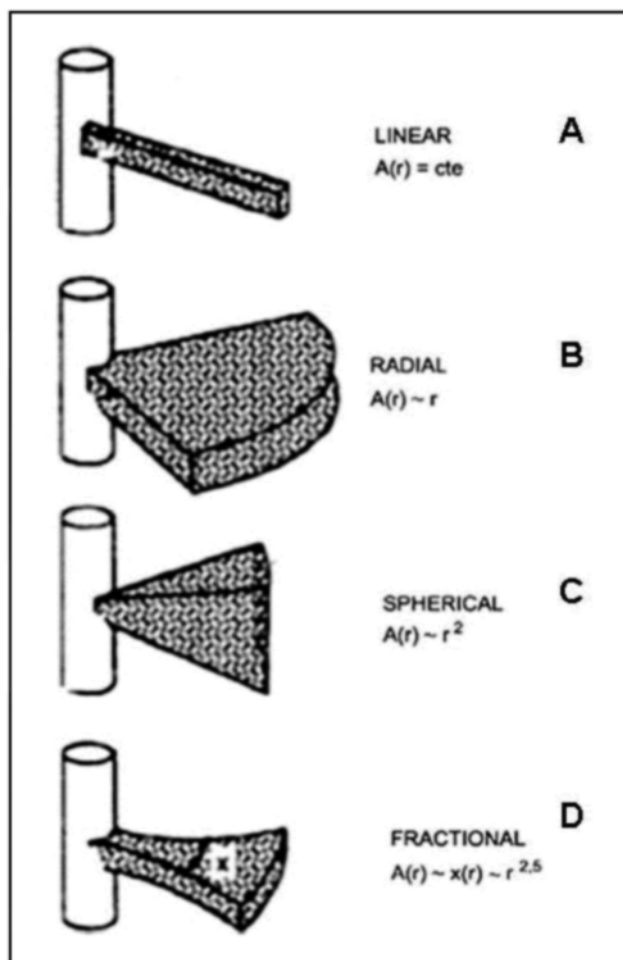


Figure 5-1: Interprétation de la géométrie de l'écoulement selon Doe (1991), tirée de Rafini et Larocque, 2009.

La figure 5-2 montre quant à elle l'aspect général des pentes associées à ces géométries sur un graphique bilogarithmique.

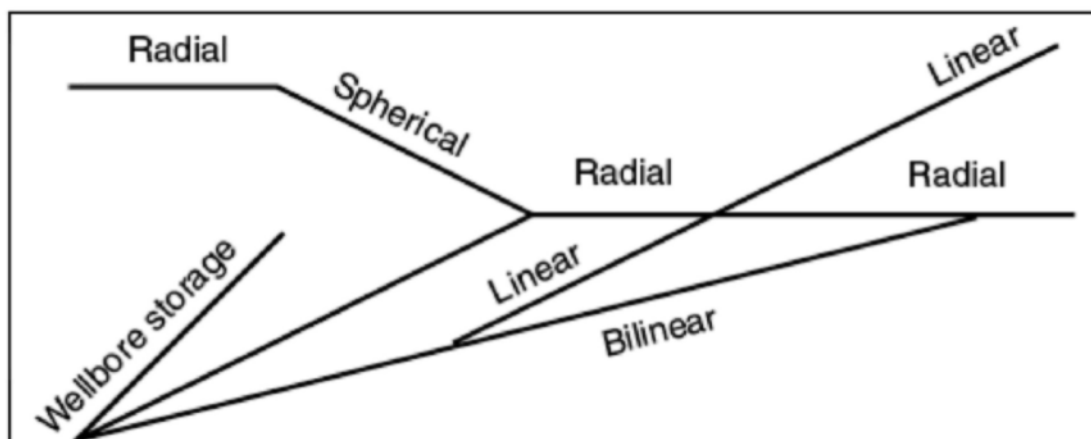


Figure 5-2 : Pentes associées aux différentes dimensions d'un écoulement souterrain, tirée de (Renard et al., 2009). Ce graphique présente le temps sur l'axe des X en fonction de la dérivée logarithmique du rabattement sur l'axe des Y.

Le tableau 5-1 présente les valeurs théoriques de dimension de l'écoulement (n) et de la pente (p) associées aux différentes géométries que peut prendre un écoulement dans un aquifère rocheux fracturé lors d'un pompage. Il est à noter que les valeurs de (n) non-entières (autres que 1,5 et 3,5) sont fréquemment observées lors de l'analyse des données; mais celles-ci ne sont pas encore bien comprises et font l'objet de recherches actuellement (Rafini et Larocque, 2012).

Tableau 5-1 : Valeurs théoriques de la dimension de l'écoulement et de la pente associée à la géométrie de l'écoulement

Géométrie de l'écoulement	Dimension de l'écoulement (n)	Valeur de la pente (p)
Linéaire	1	0,5
Bilinéaire	1,5	0,25
Radiale	2	0
Sphérique	3	-0,5
Fractionnaire	3,5	-0,75
Limite à charge constante	4	-1
Emmagasinement du puits	Autre	Pente unitaire

5.3.2 Suivi *in situ* de paramètres physico-chimiques de l'eau

Les paramètres physico-chimiques de l'eau mesurés *in situ* (pH, température et conductivité électrique) ainsi que les solides dissous totaux (SDT) déduits de la conductivité électrique peuvent également être suivis tout au long du pompage. En effet, à l'endroit où l'on mesure le débit d'eau sortant du puits, une sonde multi-paramètres peut permettre de suivre les valeurs de ces paramètres au cours de l'essai. Ainsi, après avoir pompé deux puits installés dans deux types d'aquifères et à proximité l'un de l'autre, on place les valeurs de ces paramètres sur un graphique en fonction du volume purgé. Une comparaison des paramètres physico-chimiques *in situ* peut alors permettre de reconnaître une signature chimique relativement semblable lorsque ces aquifères sont connectés entre eux.

5.4 Diagraphies en forage

La diagraphie géophysique en forage constitue un outil utilisé dans diverses sphères de la géologie, notamment pour l'exploration et la production de pétrole et de gaz naturel, l'exploration minérale et les investigations hydrogéologiques. Les diagraphies en forage permettent de déterminer plusieurs propriétés du roc dont la lithologie traversée par le forage, la porosité, la perméabilité et le degré de saturation en fluides des lithologies, la composition de ces fluides, la densité des fractures, la direction et le pendage de chacune des fractures ainsi que le débit d'eau qu'elles laissent pénétrer dans le puits (Sourisseau et al., 1998 ; Musset et Khan, 2000).

Réaliser une diagraphie en forage nécessite un équipement important, incluant un treuil et un câble d'acier (figure 5-3) permettant de descendre différentes sondes qui captent diverses informations dans le forage. De plus, ces sondes sont reliées à un poste de contrôle où les données sont acquises et enregistrées dans un ordinateur.



Figure 5-3 : Équipements pour les diagraphies en forage. Camion équipé d'un treuil et d'un câble d'acier permettant de descendre les sondes dans le forage (Photo prise le 8 septembre 2011 au site de Vauvert).

Voici une description des données que l'on peut acquérir selon le type de sonde utilisée.

- Diamètreur (*Caliper probe* en anglais): Cette sonde permet de déterminer le diamètre du puits et de localiser les fractures en place tout au long du forage. De plus, elle localise la fin du tubage d'acier dans le forage.
- Sonde multifonction : La sonde multifonction permet entre autre d'exprimer la radioactivité naturelle des formations lithologiques par les rayons gamma, la résistivité électrique de l'eau et des matériaux ainsi que la température de l'eau dans le forage.
- Sonde *Televiewer* acoustique : Cette sonde permet de localiser les fractures du roc et l'interprétation des résultats avec le logiciel WellCad permet d'obtenir le pendage et l'orientation de chaque fracture.
- Sonde sonique : Les données enregistrées par cette sonde permettent de connaître le type de roc et les propriétés mécaniques de la roche en place, dont les modules d'élasticité et de cisaillement. Comme le diamètreur, cette sonde détecte également les fractures présentes.
- Débitmètre : À l'aide du débitmètre, il est possible de mesurer le débit d'eau s'écoulant le long de l'axe du puits à plusieurs niveaux de profondeur, que le puits soit pompé ou non. On peut alors estimer la contribution des fractures les plus importantes à cet écoulement.

Pour cette étude, cet outillage a été emprunté du *United States Geological Survey* (USGS) et manipulé par une équipe de spécialistes en diagraphies, soit le Dr. Roger

MORIN et la technicienne Barbara CORNLAND du bureau du USGS de Denver au Colorado.

5.5 Simulation numérique

Dans le domaine de l'hydrogéologie, la modélisation et la simulation numérique sont des outils fort utiles pour bien comprendre la dynamique des aquifères; entre autres par la représentation et la prévision des écoulements souterrains et le transport des contaminants. En fait, ces outils numériques permettent de représenter et de visualiser le fonctionnement d'un système qu'il est impossible de voir à partir de la surface. Plusieurs logiciels (Feflow, Modflow, Geo-Slope, etc.) permettent de faire de la modélisation et simulation numérique. Dans le cadre de ce projet, le code SEEP/W (Geo-Slope International, 2002a) a été utilisé afin de simuler l'écoulement dans le modèle, alors que le code CTRAN/W (Geo-Slope International, 2002b) a été utilisé pour simuler le transport des contaminants.

Un modèle numérique a été construit afin de connaître l'impact théorique sur les charges hydrauliques et la chimie des eaux souterraines lorsqu'il y a présence de connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères pendant un essai de pompage (Chesnaux et Elliott, 2011). Ce modèle permet de simuler l'écoulement souterrain dans un aquifère granulaire lors d'un essai de pompage (cas 1) et de simuler les effets des connexions hydrauliques dans un contexte où une formation hydrogéologique granulaire est connectée avec un aquifère rocheux fracturé (cas 2).

6

RÉSULTATS

Ce sixième chapitre présente les résultats des différents levés et essais qui ont été réalisés au sein des puits et piézomètres de l'ensemble des sites investigués.

6.1 Piézométrie

6.1.1 Site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, deux piézomètres ont été mis en place à la fin de l'été 2010 dans les dépôts meubles. Le piézomètre installé le plus au sud du site (PZ-S6-1) présente des conditions artésiennes jaillissantes. En date du 20 octobre 2010, le niveau statique de cet ouvrage était de 2,32 m au-dessus du niveau du sol, soit à 140,64 m d'élévation. Ainsi, l'eau de la nappe captive présente une charge hydraulique d'un milieu plus élevé en altitude que l'aquifère en question. Le niveau statique du piézomètre PZ-S6-2 la même journée était à une profondeur de 1,22 m par rapport à la margelle, soit à 137,10 m d'élévation.

Dans le secteur des hautes-terres localisées au sud et sud-est du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, trois puits privés installés dans le roc présentent des élévations de niveau d'eau supérieures à celles des piézomètres du site (figure 6-1). En

effet, le puits privé le plus près des piézomètres (PP-1) est localisé à environ 5 km au sud, et l'élévation de l'eau dans cet ouvrage est de 253,03 m. Au sud-est des piézomètres, deux puits sont localisés à 9,5 km environ et l'élévation de leur niveau d'eau est de 257,56 (PP-2) et 237,51 m (PP-3) (figure 6-1).

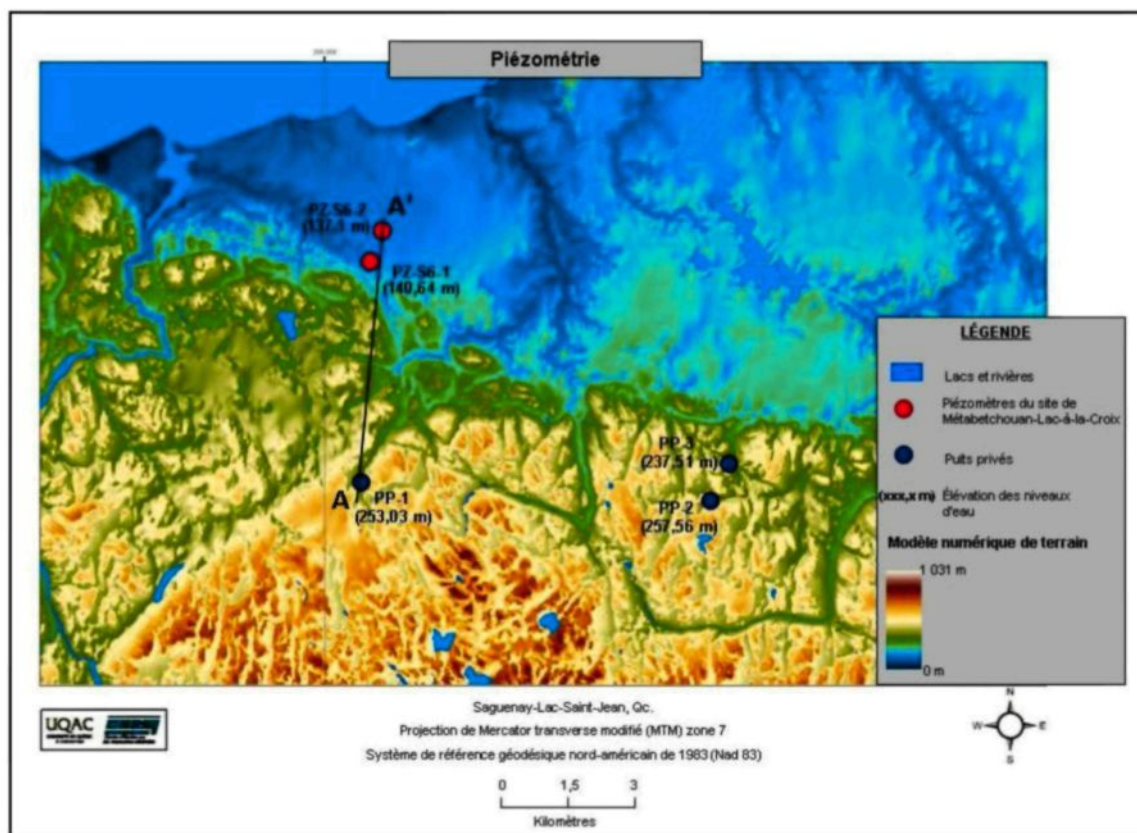


Figure 6-1 : Piézométrie mesurée dans trois puits privés localisés à proximité des piézomètres du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Les cercles rouges représentent les deux piézomètres du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, alors que les cercles bleus représentent des puits privés du secteur. La ligne noire représente l'orientation de la coupe A-A' présentée à la figure 6-2.

La figure 6-2 présente quant à elle une coupe schématique illustrant la piézométrie à l'échelle régionale au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.

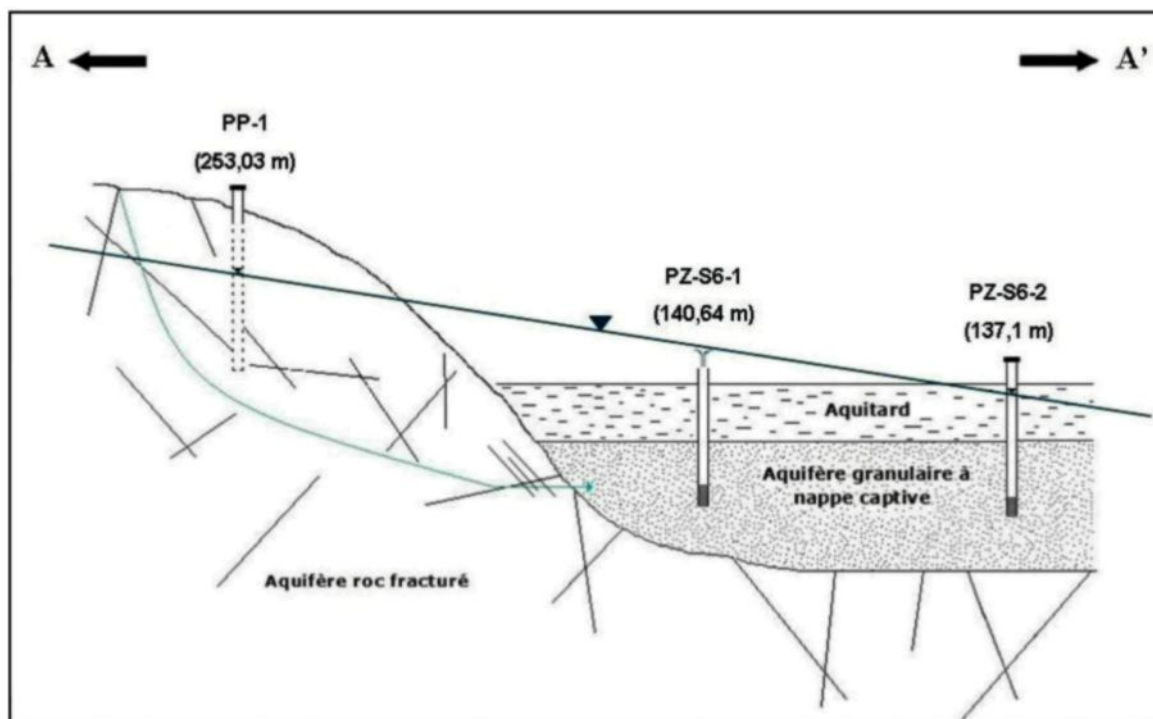


Figure 6-2 : Coupe schématique pour représenter la piézométrie mesurée dans les deux piézomètres du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix ainsi que celle mesurée dans le puits privé PP-1. La ligne bleue relie les niveaux d'eau des ouvrages, alors que la flèche bleue représente le lien hydraulique entre le roc fracturé et l'aquifère granulaire captif ainsi que le sens de l'écoulement souterrain régional. Une zone de failles observée sur diverses cartes géologiques est également représentée par les lignes parallèles au pied des hautes-terres.

6.1.2 Saint-Félicien

Les données piézométriques au sein des ouvrages en place sur le champ captant municipal de Saint-Félicien (figure 4-4) ont été extraites du rapport de consultant fourni par la ville de Saint-Félicien (Denis, 1997) et sont présentées au tableau 6-1. Ces données ont été enregistrées lors d'un essai de pompage de longue durée (72 heures) réalisé du 14 au 17 juillet 1997.

Tableau 6-1 : Piézométrie au site de Saint-Félicien. Données piézométriques (régime transitoire et permanent) des piézomètres et nids de piézomètres localisés sur le champ captant de la ville de Saint-Félicien. Les cases jaunes représentent les données piézométriques où des différences significatives d'élévation de niveaux d'eau sont mesurées.

Piézomètre	Élévation du niveau d'eau naturel (m)	Différence (m)	Élévation du niveau d'eau après 72 heures de pompage (m)	Différence (m)
PZ-1R	105,71	+/- 0,01	103,29	+/- 0,35
PZ-1M	105,70		103,64	
PZ-2R	106,69	+/- 0,44	105,48	+/- 1,01
PZ-2M	106,25		104,47	
PZ-3R	106,43	0	104,91	0
PZ-3M	106,43		104,91	
PZ-4R	106,46	-	105,17	-
PZ-5R	111,88	-	111,77	-
PZ-6R	119,03	+/- 0,72	119,01	+/- 0,74
PZ-6M	119,75		119,75	
PZ-7R	114,69	0	114,67	0
PZ-7M	114,69		114,67	
PZ-8R	169,65	0	169,35	+/- 0,04
PZ-8M	169,65		169,39	
PZ-9R	104,89	+/- 0,02	104,81	+/- 0,05
PZ-9M	104,87		104,86	
PZ-10R	98,92	-	96,17	-

On remarque dans le tableau 6-1 que l'élévation des niveaux d'eau naturels et dynamiques dans les nids de piézomètres PZ-3 et PZ-7 (roc et dépôts) est identique. Les nids PZ-8 et PZ-9 présentent une très faible différence entre l'élévation de leurs niveaux

d'eau naturel et dynamique au sein des dépôts et du roc en place. En effet, pour le nid PZ-8, l'élévation du niveau d'eau naturel des aquifères granulaire et rocheux est le même, et seulement 0,04 m distinguent l'élévation du niveau d'eau dans les deux formations en régime permanent. Au sein du nid PZ-9, de très légères différences d'élévation des niveaux d'eau naturels et dynamiques sont observées : 0,02 m à l'état naturel des nappes et 0,05 m après 72 heures de pompage.

Au nid de piézomètres PZ-1, on observe une infime différence d'élévation des niveaux d'eau naturels entre les aquifères granulaire et rocheux (0,01 m), alors que 0,35 m séparent l'élévation du niveau d'eau dans les dépôts à celui dans le roc après 72 heures de pompage.

Seulement deux nids (PZ-2 et PZ-6) présentent une distinction significative des niveaux piézométriques naturels et dynamiques entre les deux formations aquifères. En effet, au sein du nid PZ-2, on remarque une différence de 0,44 m entre l'élévation des niveaux naturels des aquifères granulaire et rocheux, alors qu'en régime permanent, on observe 1,01 m de différence d'élévation des niveaux d'eau entre les deux formations. Pour le nid de piézomètres PZ-6, il est observé 0,72 m entre l'élévation du niveau naturel des aquifères de dépôts granulaires et de roc, et 0,74 m entre l'élévation du niveau dynamique de ces formations.

6.1.3 Petit-Saguenay

Lors d'un essai de pompage de longue durée (72 heures) réalisé du 4 au 7 février 2003, les élévations du niveau d'eau dans le puits de captage P-3 et dans quatre piézomètres (figure 4-7) ont été enregistrées. Les données piézométriques présentées dans le tableau 6-2 ont été extraites du rapport de consultant fourni par la municipalité de Petit-Saguenay (Denis, 2003).

Tableau 6-2 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay. Données piézométriques (régime transitoire et permanent) des piézomètres et du puits de captage localisés sur le champ captant de la municipalité de Petit-Saguenay.

Piézomètre	Élévation du niveau d'eau naturel (m)	Différence (m)	Élévation du niveau d'eau après 72 heures de pompage (m)	Différence (m)
PS-1D	67,129	-	56,184	-
PS-3D	67,500	+/- 0,010	60,010	+/- 0,050
PS-3R	67,490		60,005	
PS-5R	66,875	+/- 0,018	48,600	+/- 0,033
P-3	66,857		48,567	

Selon les données présentées au tableau 6-2, on remarque que les ouvrages localisés à proximité l'un de l'autre présentent des élévations de niveaux d'eau très similaires. En effet, les piézomètres PS-3D (dépôts) et PS-3R (roc) sont situés à 1,8 m de distance et leurs niveaux naturel et dynamique sont très semblables. Une différence de seulement 0,01 m entre l'élévation des niveaux d'eau naturels dans le roc et dans les dépôts granulaires est observée et de 0,05 m après 72 heures de pompage.

La piézométrie a également été suivie à l'aide de sondes de pression à acquisition automatique de données installées par une équipe du PACES-SLSJ dans trois piézomètres (PS-1D, PS-3R et PS-5R) du champ captant municipal entre le 14 et le 21 octobre 2011. Le piézomètre PS-3D a également fait l'objet de ce suivi, mais la sonde a mal fonctionné

et les résultats n'étaient pas représentatifs de la piézométrie réelle mesurée. Il est à noter que la pompe du puits municipal fonctionnait par intermittence lors de ce suivi. Le graphique de la figure 6-3 présente les résultats du suivi sur une semaine.

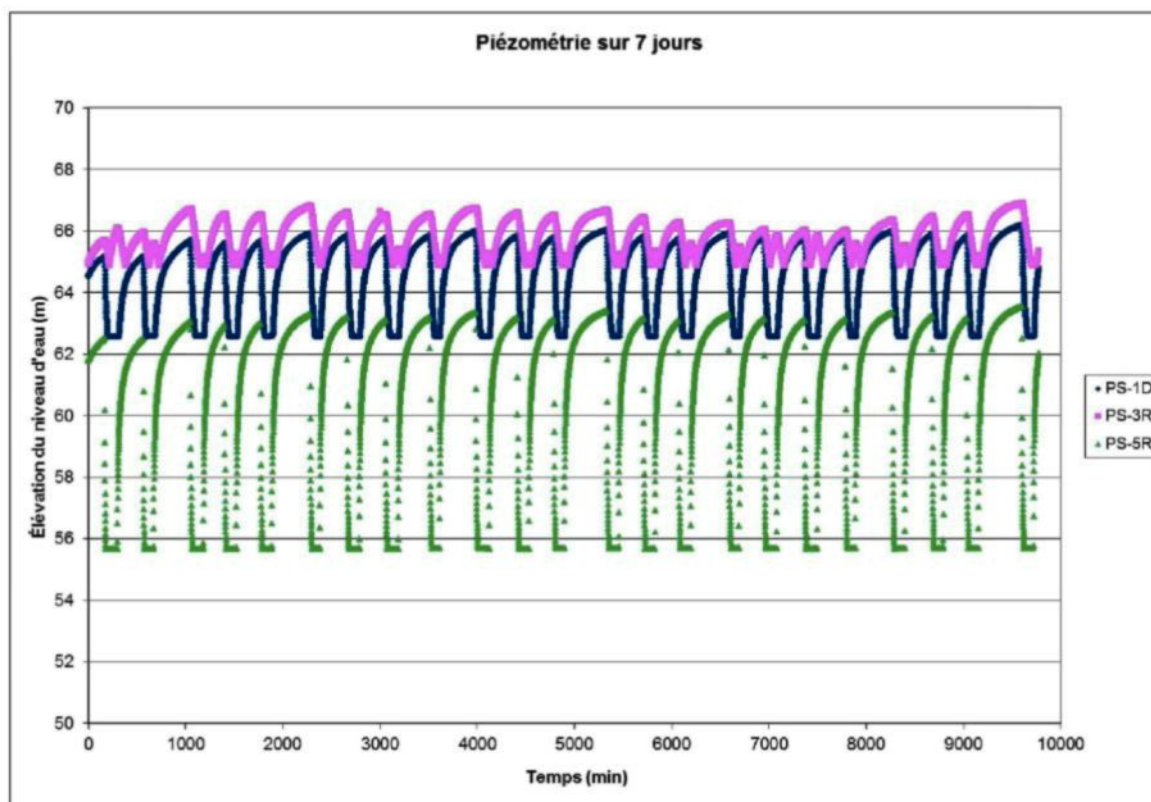


Figure 6-3 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay enregistrée sur une période de sept jours aux piézomètres PS-1D, PS-3R et PS-5R.

On remarque sur la figure 6-3 que les piézomètres les plus près du puits de captage P-3 ont tendance à réagir davantage aux départs et arrêts de la pompe du puits. En effet, le piézomètre PS-5R est localisé à 3,1 m du puits P-3 et son niveau d'eau fluctue davantage comparativement aux autres ouvrages plus distants au puits de pompage. De plus, ce piézomètre est installé au sein du roc et traverse la même zone fracturée que le puits P-3, ce qui explique de telles fluctuations du niveau d'eau. Le piézomètre PS-1D est installé

dans les dépôts granulaires et est situé à 76,5 m du puits P-3. On observe sur le graphe présenté à la figure 6-3 que le niveau d'eau dans cet ouvrage réagit de façon similaire à celui du PS-5R, mais de manière moins prononcée. Le piézomètre PS-3R est installé dans le roc et est situé à 104,6 m du puits de captage municipal. Il suit la même tendance que les deux autres piézomètres, mais les variations de son niveau d'eau sont évidemment moins importantes que les ouvrages moins distants du puits. À partir des données de ce suivi, la piézométrie mesurée lors d'une période de ce pompage totalisant 97 minutes est présentée à la figure 6-4.

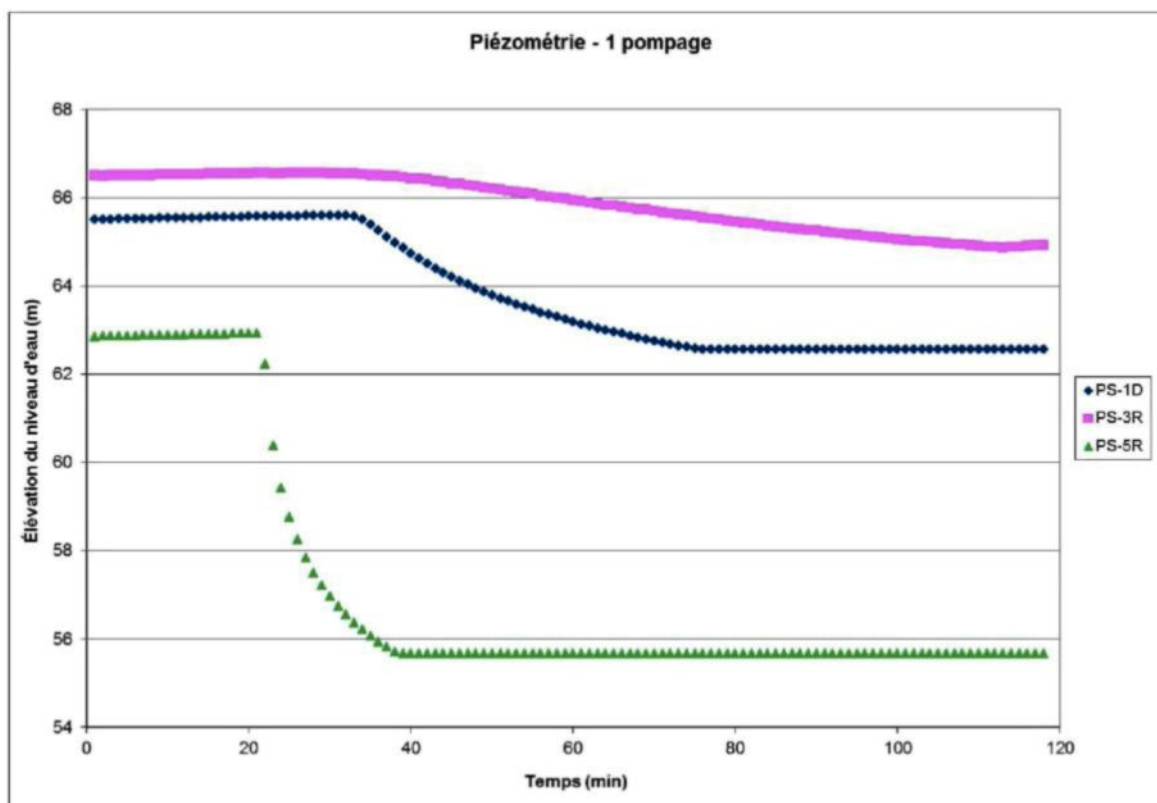


Figure 6-4 : Piézométrie au site de Petit-Saguenay enregistrée aux piézomètres PS-1D, PS-3R et PS-5R lors d'un pompage de 97 minutes.

Sur la figure 6-4, on remarque la même tendance que pour le suivi sur une semaine. Plus le piézomètre est distant du puits de captage P-3, plus il prend du temps à réagir au pompage et la baisse du niveau d'eau est moins importante.

Enfin, dans les deux cas présentés, peu importe dans quelle formation aquifère l'ouvrage est installé, on observe une réaction du niveau d'eau dans tous les ouvrages suite au pompage du puits P-3 installé dans le roc.

6.1.3 Sites doubles

Le tableau 6-3 ci-dessous présente la piézométrie mesurée au sein des piézomètres des sites doubles.

Tableau 6-3 : Données piézométriques des ouvrages installés sur les sites doubles du PACES-SLSJ. Les élévations du niveau d'eau en phase dynamique ont été mesurées suite au pompage dans les aquifères rocheux fracturés. Le pompage a été prolongé durant 520 minutes à Vauvert, 140 minutes à Saint-Méthode et 244 minutes à Saint-David-de-Falardeau. Les cases jaunes représentent les données piézométriques où des différences significatives d'élévation de niveaux d'eau sont mesurées.

Site	Ouvrage	Élévation du niveau naturel (m)	Différences (m)	Élévation du niveau d'eau après (x) minutes de pompage (m)	Différences (m)
Vauvert	Pz-Roc	119,214	+/- 0,068	110,349	+/- 3,072
	Pz-Dépôts (nappe captive)	119,146		113,421	
	Pz-Dépôts (nappe libre)	121,611	-	-	-
Saint-Méthode	Pz-Roc	104,033	+/- 0,18	100,123	+/- 3,765
	Pz-Dépôts (nappe captive)	104,213		103,888	
	Pz-Dépôts (nappe libre)	106,923	-	-	-
Saint-David-de-Falardeau	Pz-Roc	171,363	+/- 8,86	154,113	+/- 26,11
	Pz-Dépôts	180,223		180,223	

Au site de Vauvert, on observe une différence de 0,068 m entre l'élévation du niveau d'eau naturel dans le piézomètre dans le roc et dans celui installé dans les dépôts granulaires captifs. On remarque également que la nappe libre ne présente pas la même piézométrie que les nappes captives (roc et dépôts). En effet, une différence d'élévation du niveau d'eau de 2,465 m est observée entre les deux ouvrages installés dans les dépôts granulaires en place. De plus, suite au pompage de 520 minutes du piézomètre installé dans le roc, l'élévation des niveaux d'eau des aquifères captifs présente une différence de 3,072 m.

À Saint-Méthode, on constate une différence de 0,18 m entre l'élévation du niveau d'eau naturel dans le piézomètre installé dans le roc et dans celui installé dans les dépôts granulaires captifs. On constate aussi que la nappe libre ne présente pas la même piézométrie que les nappes captives (roc et dépôts). Après avoir pompé durant 140 minutes dans l'aquifère rocheux, on remarque une différence de 3,765 m entre les élévations du niveau dynamique dans le roc et dans les dépôts granulaires captifs.

Enfin, au site de Saint-David-de-Falardeau, on remarque une différence de 8,86 m entre l'élévation du niveau d'eau naturel dans l'aquifère rocheux et dans l'aquifère granulaire. De plus, tout au long du pompage dans l'aquifère rocheux, le niveau d'eau mesuré dans le piézomètre installé dans les dépôts granulaires est demeuré stable. On remarque alors une différence d'élévation de 26,11 m entre ces deux aquifères au cours du pompage de l'eau du roc fracturé.

6.2 Essais de pompage

Différents essais de pompage ont été réalisés dans le but notamment de connaître le comportement hydraulique de l'aquifère testé, de déterminer la transmissivité (T) de l'aquifère, mais également de mettre en évidence l'occurrence ou non de connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères. Les essais de pompage réalisés aux champs captant municipaux ont été menés par une firme de consultants en hydrogéologie alors que ceux faits aux sites doubles du PACES-SLSJ ont été réalisés par une équipe de l'UQAC.

6.2.1 Saint-Félicien

Deux essais de pompage de longue durée (72 heures) ont été réalisés au sein des puits municipaux P-3 et P-4 et les niveaux piézométriques ont été suivis dans les nids de piézomètres en place sur le champ captant de la Ville de Saint-Félicien tout au long des essais. Ces données sont disponibles dans le rapport technique de la Ville de Saint-Félicien (Denis, 1997).

Le graphique de la figure 6-5 présente les rabattements mesurés au cours du pompage du puits P-3 dans les nids de piézomètres avoisinant ce puits. Il est à noter que ce puits pompe à la fois dans les dépôts granulaires et dans le roc fracturé; la crépine est installée à l'interface entre les deux formations.

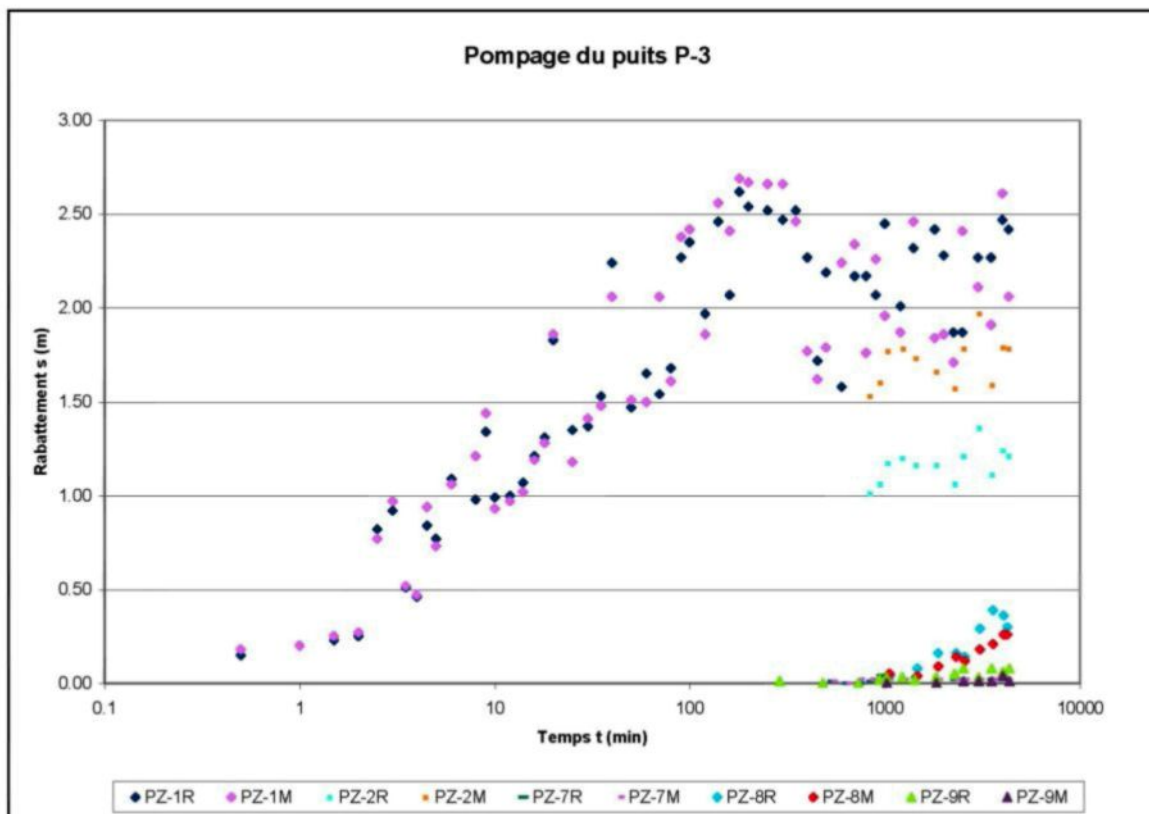


Figure 6-5 : Essai de pompage du puits P-3 de Saint-Félicien. Graphique présentant les rabattements mesurés dans les nids de piézomètres localisés près du puits de captage P-3, suite au pompage de ce dernier. Distance au puits P-3 : Nid 1 à 5,14 m; Nid 2 à 183 m; Nid 7 à 2 599 m; Nid 8 à 6 200 m et le Nid 9 à 1 550 m.

Sur le graphique présenté à la figure 6-5, on remarque que suite au pompage des deux formations hydrogéologiques, les piézomètres installés dans ces formations ont réagi au pompage du puits P-3. De plus, on observe en général de plus forts rabattements de l'eau dans les nids de piézomètres installés à proximité du puits testé que dans ceux plus distants. Le graphique de la figure 6-6 présente les rabattements mesurés dans le puits P-4 et le piézomètre PZ-10R, lors du pompage du puits de captage P-4 installé dans les dépôts granulaires.

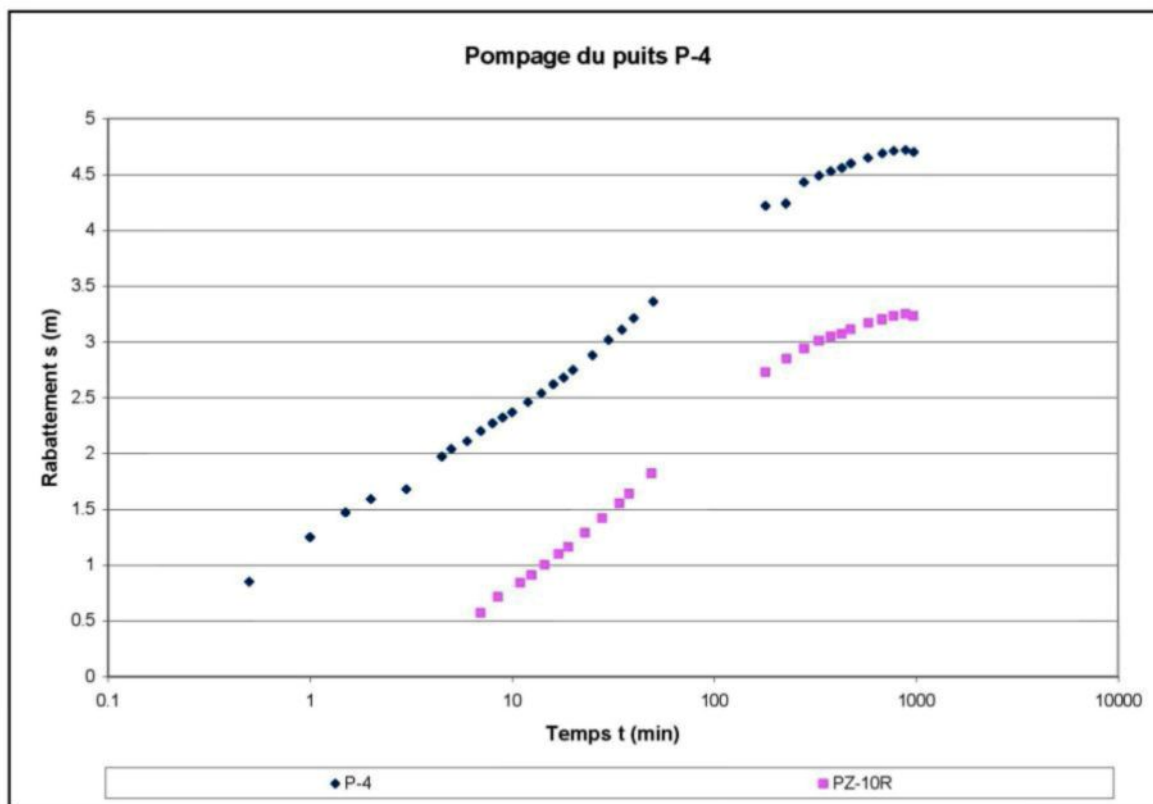


Figure 6-6 : Essai de pompage du puits P-4 à Saint-Félicien. Graphique présentant les rabattements mesurés dans le piézomètre PZ-10R localisé à 14,30 m du puits de captage P-4, suite au pompage de ce dernier.

On observe sur le graphique de la figure 6-6 que les courbes de rabattement en fonction du temps des deux ouvrages présentent quasiment les mêmes pentes. En effet, suite au pompage du puits P-4, les deux aquifères ont tendance à se comporter de la même manière. Dans le piézomètre PZ-10R, on observe toutefois des rabattements de l'eau de l'aquifère rocheux moins importants que dans le puits testé.

À partir des données de ces essais de pompage, la transmissivité des deux aquifères a été calculée par la firme de consultants à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946). Au champ captant de Saint-Félicien, l'aquifère granulaire aurait une transmissivité variant de $6,0 \times 10^{-3}$ à $7,4 \times 10^{-3}$ m²/s, alors que l'aquifère rocheux aurait une transmissivité qui varie de $4,8 \times 10^{-3}$ à $5,2 \times 10^{-3}$ m²/s (Denis, 1997).

6.2.2 Petit-Saguenay

Une firme de consultants en hydrogéologie (Denis, 2003) a réalisé en 2003 un essai de pompage de 72 heures dans le but de mieux comprendre le comportement de l'aquifère exploité par la Municipalité de Petit-Saguenay. Le niveau piézométrique a été suivi dans le puits de captage P-3 et dans les piézomètres localisés sur le champ captant municipal lors de cet essai. Le graphique de la figure 6-7 présente les rabattements dans les aquifères mesurés dans le puits et les quatre piézomètres en place lors du pompage du puits P-3.

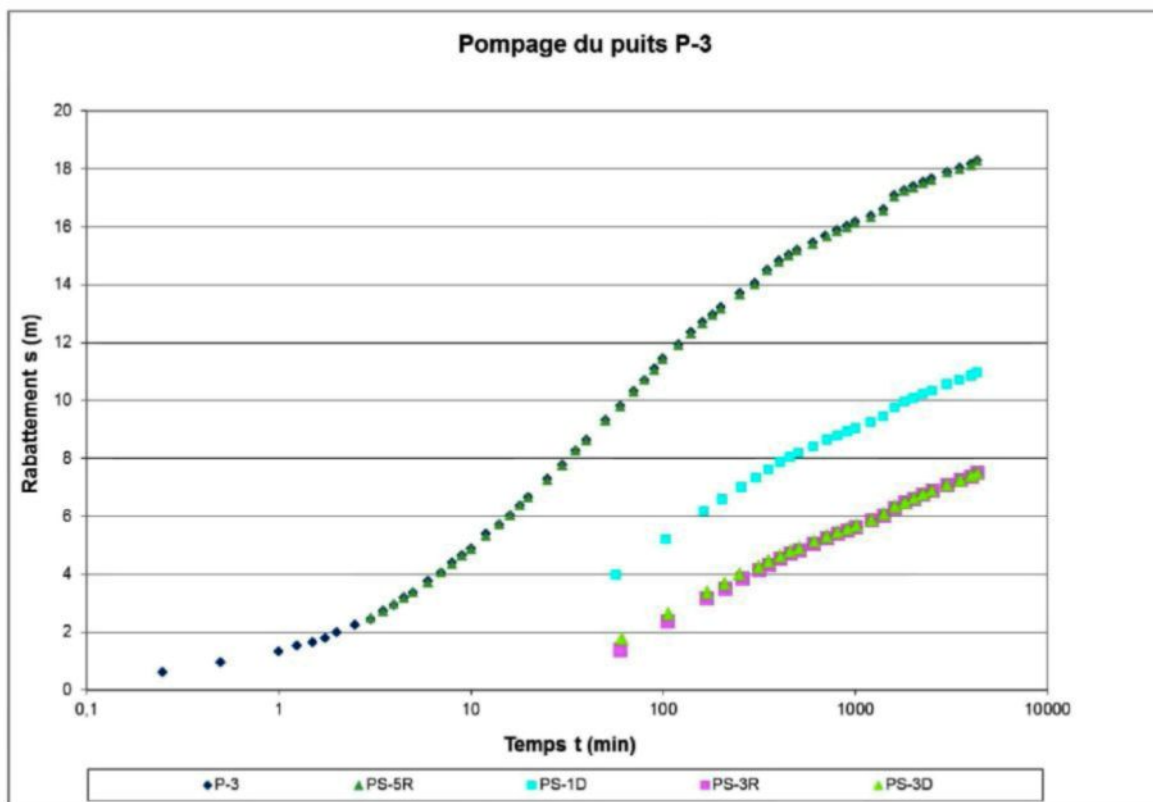


Figure 6-7 : Essai de pompage du puits P-3 de Petit-Saguenay. Graphique présentant les rabattements mesurés dans le puits de pompage P-3 et les piézomètres localisés près du puits de captage, suite au pompage de ce dernier. Distance au puits P-3 : PS-1D à 76,5 m; PS-3R à 104,6 m; PS-3D à 106,4 m; et le PS-5R à 3,1m.

On remarque sur le graphique de la figure 6-7 que lorsque l'eau de l'aquifère rocheux est pompée, des rabattements relativement importants sont observés dans l'aquifère granulaire. De plus, les ouvrages localisés plus près du puits ont tendance à réagir davantage au pompage que les piézomètres les plus distants. En effet, des rabattements plus importants dans les aquifères ont été mesurés dans les ouvrages localisés à proximité du puits P-3. On voit également que la courbe de rabattement en fonction du temps du piézomètre PS-5R chevauche exactement celle du puits. Pour les piézomètres PS-3R et PS-3D, on observe la même tendance : les deux courbes sont juxtaposées sur le graphique.

Les données de cet essai de pompage ont été interprétées par la firme de consultants selon la méthode de Cooper-Jacob (1946) afin de calculer la transmissivité de l'aquifère rocheux qui est de $7,06 \times 10^{-4}$ m²/s. Ces données ont également été interprétées avec la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement dans le but de déterminer les dimensions des écoulements en phase transitoire de pompage (figure 6-8).

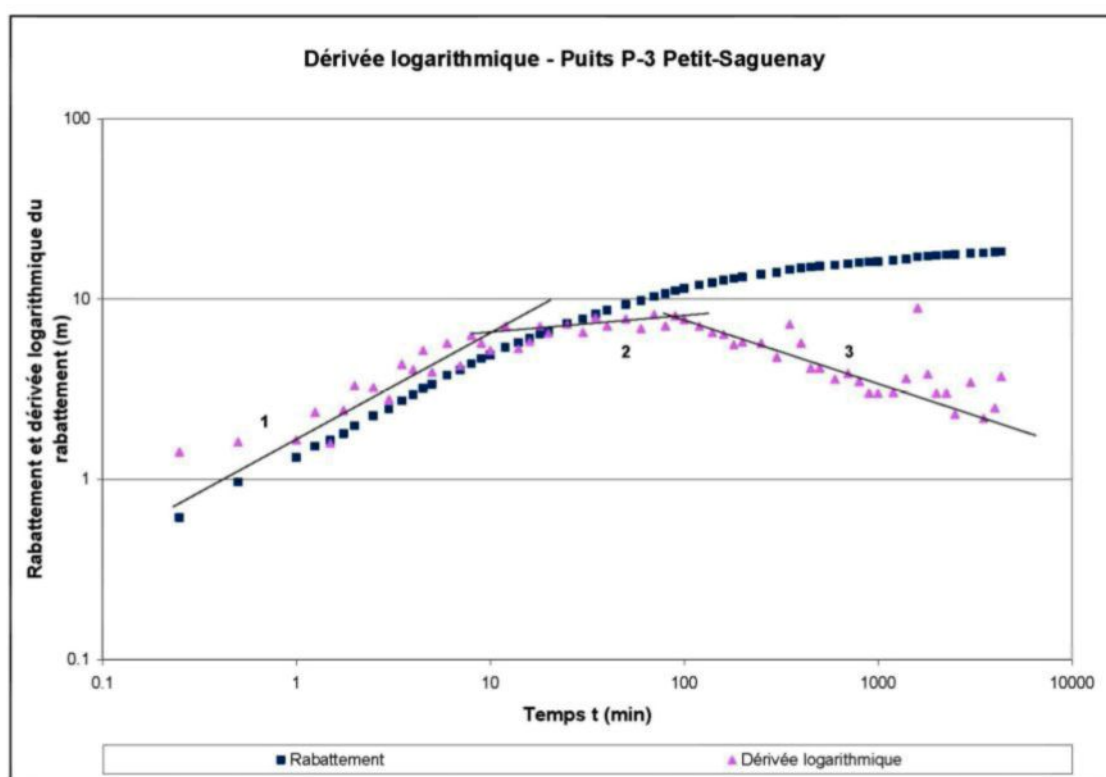


Figure 6-8 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé à Petit-Saguenay selon la dérivée logarithmique du rabattement. Graphique des données de l'essai de pompage réalisé au sein du puits de captage municipal de Petit-Saguenay. Les carrés bleus représentent le rabattement en fonction du temps alors que les triangles roses représentent la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps. Sur la courbe de la dérivée logarithmique du rabattement, chaque pente observée a été identifiée de 1 à 3.

Sur la figure 6-8, on observe trois tendances de l'alignement des données de dérivée logarithmique du rabattement. Chaque pente est associée à une dimension de l'écoulement (n) généré par le pompage. Les dimensions des écoulements (n) déterminées pour cet essai de pompage sont les suivantes :

- Pente 1 $\Rightarrow 0,59$; $n = 0,82$
- Pente 2 $\Rightarrow 0,085$; $n = 1,83$
- Pente 3 $\Rightarrow -0,36$; $n = 2,72$

- Séquence de n : $0,82 - 1,83 - 2,72$

Les valeurs de rabattement ainsi que les valeurs de la dérivée logarithmique du rabattement ont été placées sur ce graphe pour bien observer la différence du signal relatif aux deux méthodes d'analyse.

6.2.3 Site double – Vauvert

Dans le but de connaître le comportement hydraulique des aquifères en place au site de Vauvert, des essais de pompage ont été réalisés à partir du piézomètre installé dans le roc et de celui installé au sein des dépôts meubles captifs. La durée totale de l'essai réalisé dans l'aquifère rocheux est de 520 minutes et le débit pompé tout au long du test est de 15,97 L/min. Alors que la durée de l'essai de pompage réalisé dans le piézomètre installé dans les dépôts captifs est de 96 minutes et le débit pompé pendant l'essai est de 2 L/min.

Lors des essais, les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée ont été suivis et lorsque ceux-ci étaient stables, les essais ont été arrêtés. Les débits de pompage ont été choisis selon la capacité de la pompe utilisée et de l'aquifère testé. La figure 6-9 présente un graphique récapitulatif de ces essais de pompage.

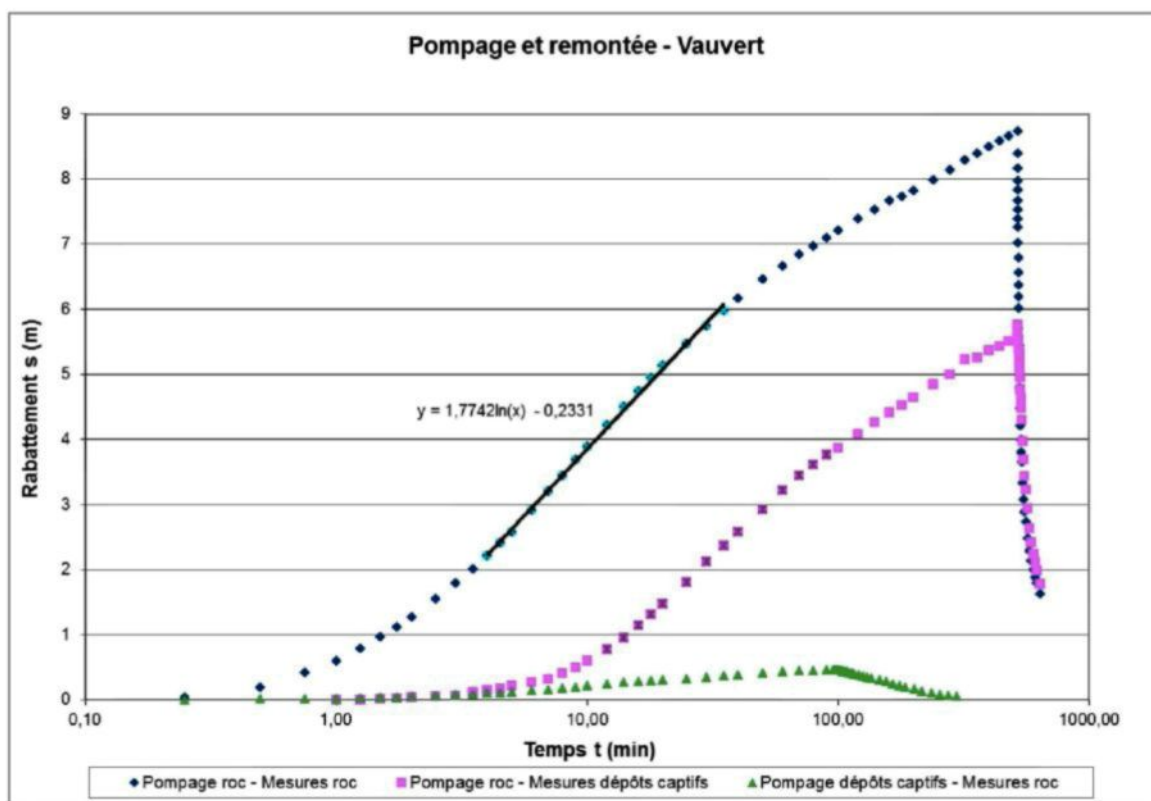


Figure 6-9 : Essais de pompage au site de Vauvert. Graphique présentant les rabattements en fonction du temps lors de deux essais de pompage réalisés les 24 et 25 août 2011. La courbe bleue représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère rocheux fracturé au cours du pompage de ce même aquifère. La courbe rose représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère granulaire captif au cours du pompage du roc. Enfin, la courbe verte montre les valeurs de rabattement dans l'aquifère rocheux fracturé lors du pompage dans l'aquifère granulaire captif.

On constate sur la graphique de la figure 6-9 que lors du pompage dans l'aquifère rocheux, l'aquifère granulaire captif réagit de la même manière que l'aquifère testé. En effet, les courbes de rabattement rose et bleue présentent pratiquement les mêmes pentes. Toutefois, les rabattements dans l'aquifère granulaire demeurent moins importants que

ceux mesurés dans l'aquifère rocheux. On remarque également que suite à l'arrêt de la pompe du piézomètre dans le roc, la remontée piézométrique dans les deux aquifères est très similaire et se fait simultanément; les deux courbes sont superposées et forment une seule pente. Il est à noter que le régime permanent n'a pas été atteint dans l'aquifère rocheux lors du pompage de ce dernier.

Lors du pompage dans l'aquifère granulaire captif, on mesure de faibles rabattements dans l'aquifère rocheux. Il est à noter que le rabattement dans l'aquifère granulaire captif n'a pas pu être mesuré lors du pompage dans cet aquifère puisque le tubage du piézomètre ne possède pas un diamètre suffisamment important pour accueillir à la fois la pompe et la sonde à niveau d'eau. On ne sait donc pas si le régime permanent a été atteint lors de ce pompage.

Les données de l'essai de pompage réalisé au sein de l'aquifère rocheux ont été interprétées selon deux méthodes : La méthode de Cooper-Jacob (1946) pour le calcul de la transmissivité et celle de la dérivée logarithmique du rabattement pour déterminer les dimensions des écoulements.

Selon l'interprétation à partir de la méthode de Cooper-Jacob (1946), la valeur de transmissivité de l'aquifère rocheux lors de la phase transitoire de pompage est de $1,19 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'interprétation de l'essai à partir des dérivées logarithmiques des rabattements a permis d'observer cinq tendances de l'alignement des données (figure 6-10). Chaque pente est associée à une dimension de l'écoulement (n) générée par le pompage.

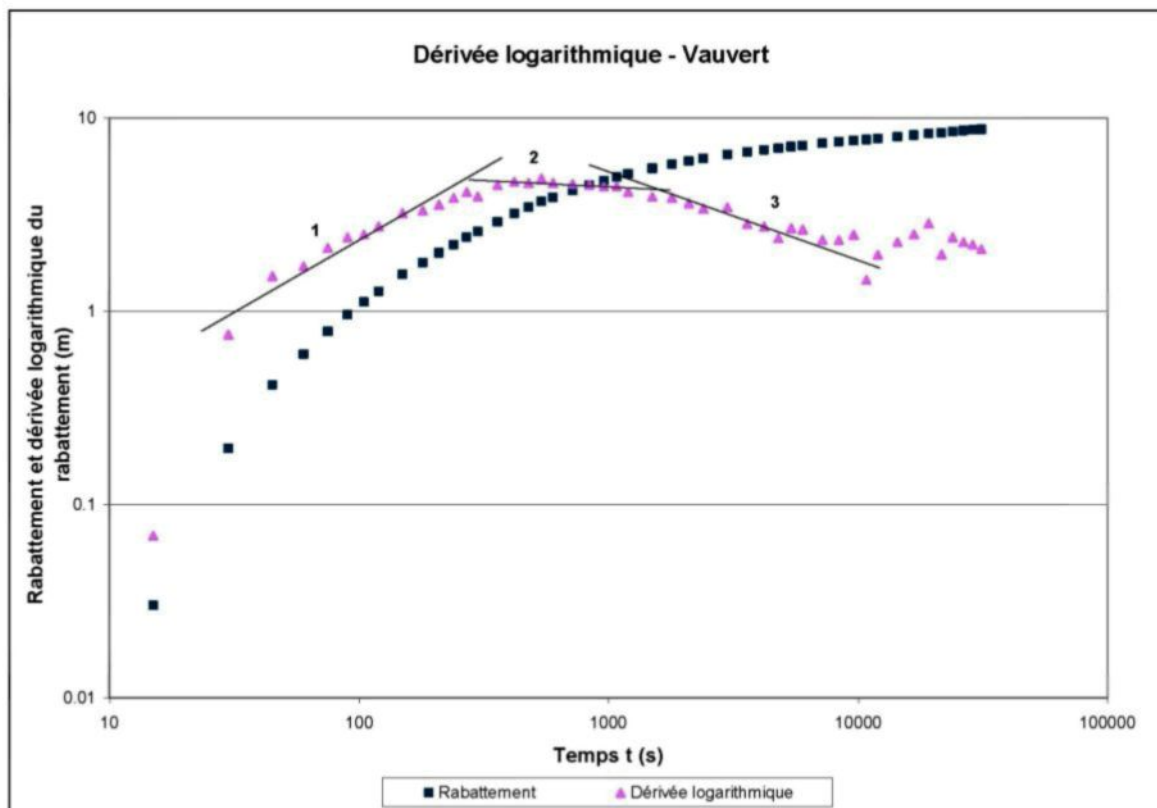


Figure 6-10 : Interprétation de l'essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Vauvert selon la dérivée logarithmique du rabattement. Les carrés bleus représentent le rabattement en fonction du temps alors que les triangles roses représentent la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps. Sur la courbe de la dérivée logarithmique du rabattement, chaque pente observée a été identifiée de 1 à 3.

Les dimensions des écoulements (n) déterminées pour cet essai de pompage sont les suivantes :

- Pente 1 \Rightarrow 0,56 ; $n = 0,88$
- Pente 2 \Rightarrow -0,05 ; $n = 1,9$
- Pente 3 \Rightarrow -0,49 ; $n = 2,98$
- Séquence de n : 0,88 – 1,9 – 2,98

Les valeurs de rabattement ainsi que les valeurs de la dérivée logarithmique du rabattement ont été placées sur ce graphe pour bien observer la différence du signal relatif aux deux méthodes d'analyses.

6.2.3.1 Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

Lors des essais de pompage réalisés au sein des aquifères rocheux et granulaire captifs, les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, SDT (sels totaux dissous), pH et température) de l'eau souterraine pompée ont été suivis en continu. De plus, pour des fins de comparaison entre les aquifères en place au site de Vauvert, l'eau de l'aquifère granulaire libre a également été pompée afin de connaître la qualité physico-chimique de cette eau. Les graphiques présentés aux figures 6-11, 6-12 et 6-13 présentent les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* de l'eau souterraine en provenance des trois aquifères au site de Vauvert.

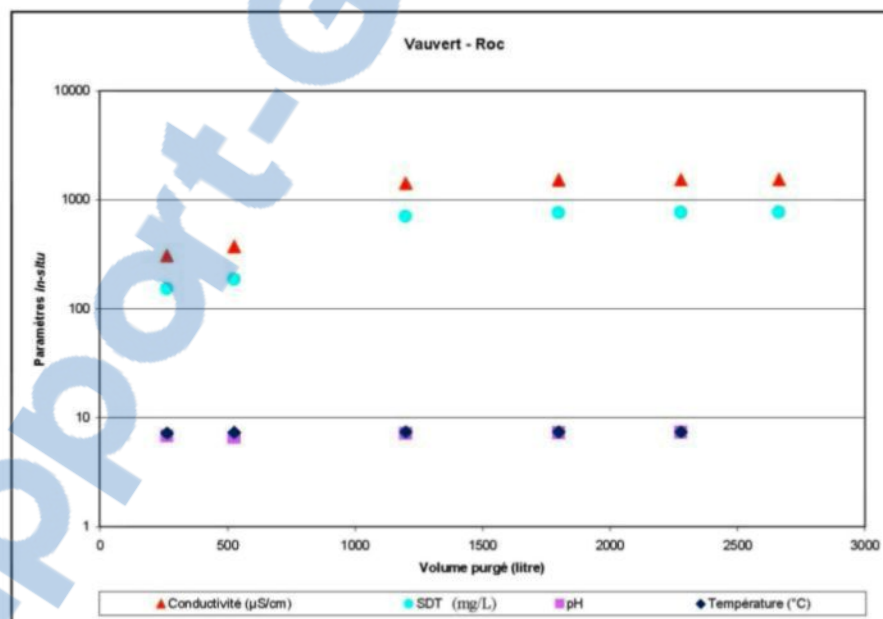


Figure 6-11: Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Vauvert. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrées lors du pompage dans l'aquifère rocheux de Vauvert en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

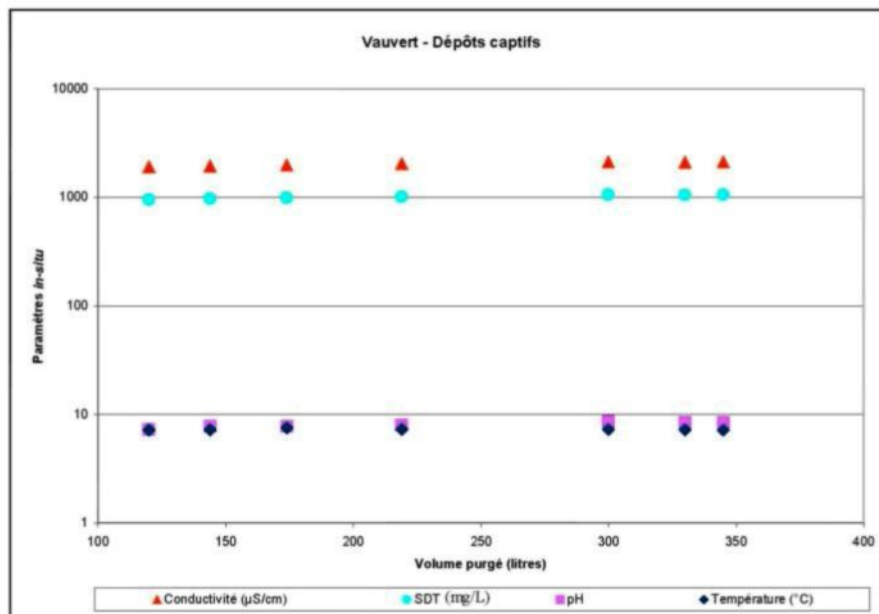


Figure 6-12 : Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire captif de Vauvert. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrées lors du pompage dans l'aquifère granulaire captif de Vauvert en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

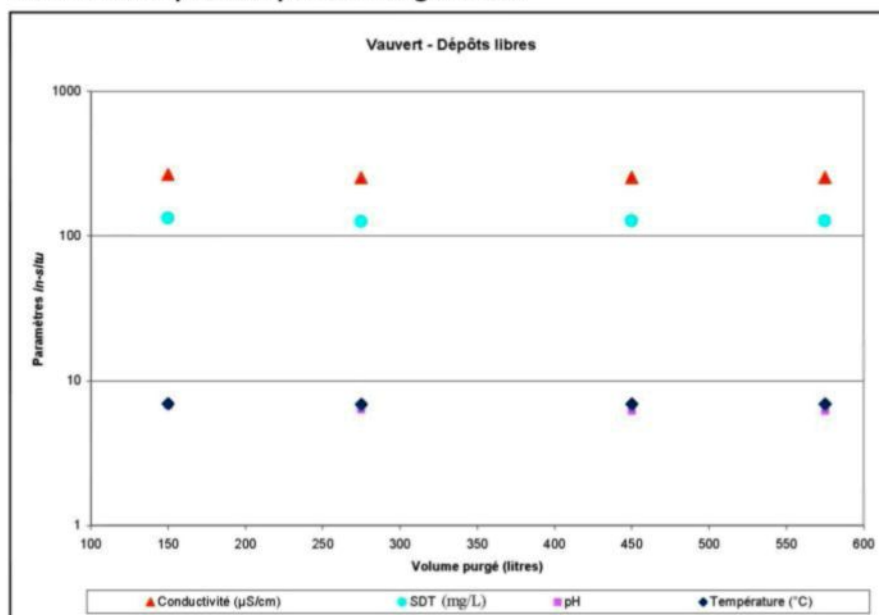


Figure 6-13 : Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire libre de Vauvert. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrées lors du pompage dans l'aquifère granulaire libre de Vauvert en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

On remarque sur les graphes présentés aux figures 6-11, 6-12 et 6-13 que les valeurs de température et de pH de l'eau sont sensiblement les mêmes pour les trois types d'aquifère. Toutefois, ces valeurs enregistrées dans l'eau de l'aquifère granulaire libre sont faiblement inférieures à celles dans les aquifères captifs. En ce qui concerne les valeurs de conductivité électrique et de SDT, les valeurs détectées dans l'eau de l'aquifère rocheux et dans celle de l'aquifère granulaire captif sont du même ordre de grandeur, alors que les valeurs de ces paramètres enregistrées dans l'eau de l'aquifère granulaire libre sont presque dix fois inférieures aux valeurs dans les aquifères captifs.

6.2.4 Site double – Saint-Méthode

Afin de comprendre le comportement de l'eau souterraine au sein des différents aquifères en place au site de Saint-Méthode, des essais de pompage ont été réalisés à partir du piézomètre installé dans le roc et dans celui installé au sein des dépôts meubles captifs le 6 juin 2012. L'essai de pompage dans le roc a été prolongé pendant une durée de 120 minutes et a été mené à un débit constant de 9,4 L/min. Alors que l'essai réalisé dans le piézomètre installé dans les dépôts captifs a duré 60 minutes et a été réalisé à un débit de 9,34 L/min. Tout comme au site de Vauvert, les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée ont été suivis tout au long des essais, et lorsque ceux-ci étaient stables, les essais de pompage ont été arrêtés. Les débits ont été choisis selon la capacité de la pompe utilisée et de l'aquifère testé. La figure 6-14 présente un graphique récapitulatif de ces essais de pompage.

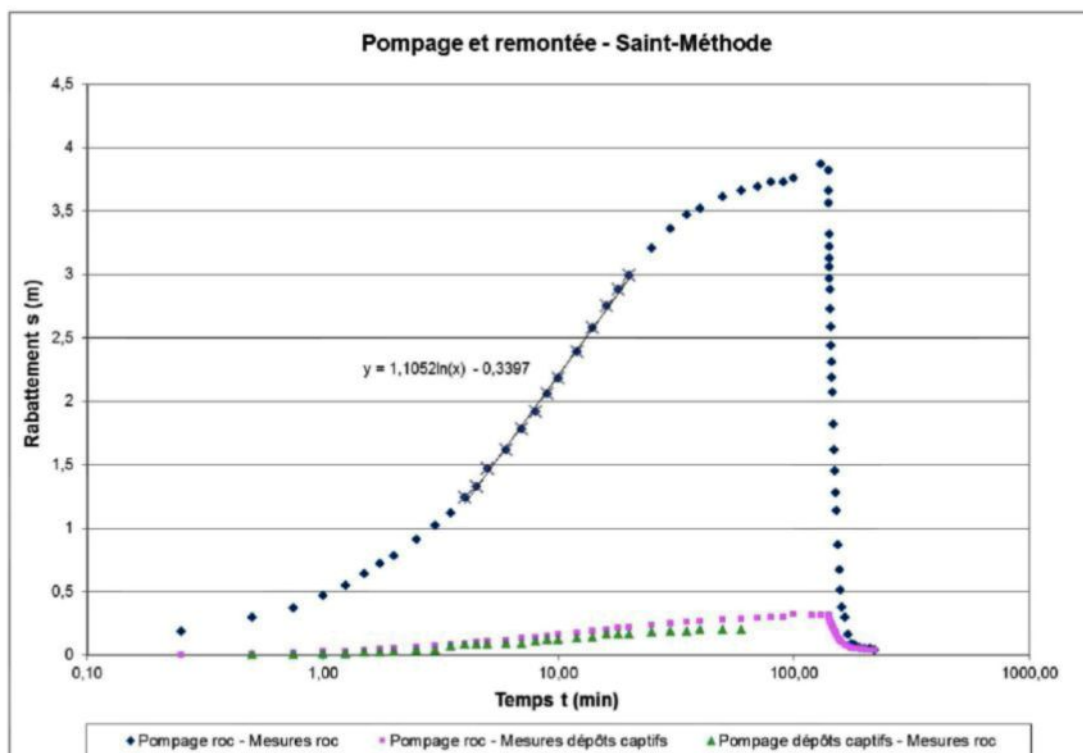


Figure 6-14: Essais de pompage au site de Saint-Méthode. Graphique présentant les rabattements en fonction du temps lors de deux essais de pompage. La courbe bleue représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère de roc fracturé au cours du pompage dans ce même aquifère. La courbe rose représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère granulaire captif au cours du pompage dans le roc. Enfin, la courbe verte montre les valeurs de rabattement dans l'aquifère rocheux au cours du pompage dans l'aquifère granulaire captif.

On remarque sur le graphique de la figure 6-14 que lors du pompage dans l'aquifère rocheux, l'aquifère granulaire captif tend à réagir après seulement quelques secondes de pompage. Cependant, les rabattements mesurés au sein de l'aquifère granulaire sont beaucoup moins importants que ceux mesurés dans l'aquifère rocheux fracturé. On remarque aussi que la remontée de l'eau dans l'aquifère granulaire captif se fait immédiatement après l'arrêt de la pompe installée dans l'aquifère de roc fracturé. Il est à noter que le régime permanent n'a pas été totalement atteint dans l'aquifère rocheux lors du pompage dans ce dernier.

Au cours du pompage dans l'aquifère granulaire captif, on mesure de faibles rabattements dans l'aquifère rocheux. Comme au site de Vauvert, les rabattements dans l'aquifère granulaire captif n'ont pas pu être mesurés lors du pompage dans cet aquifère car le diamètre du tubage du piézomètre n'est pas assez grand pour accueillir à la fois la pompe et la sonde à niveau d'eau dans l'ouvrage. Ainsi, on ne sait pas si le régime permanent a été atteint dans les dépôts lors du pompage dans cet aquifère.

Les valeurs de rabattement dans l'aquifère rocheux fracturé ont été interprétées selon la méthode de Cooper-Jacob (1946) pour calculer la transmissivité du roc. La valeur de transmissivité a été évaluée à $1,13 \times 10^{-5}$ m²/s.

Ces données ont également été interprétées à l'aide de la méthode de la dérivée logarithmique du rabattement afin de déterminer les dimensions des écoulements souterrains lors du pompage de cet aquifère. Sur un même graphique, les valeurs du rabattement et celles de la dérivée logarithmique du rabattement sont présentées conjointement pour bien comparer les signaux des deux méthodes (figure 6-15).

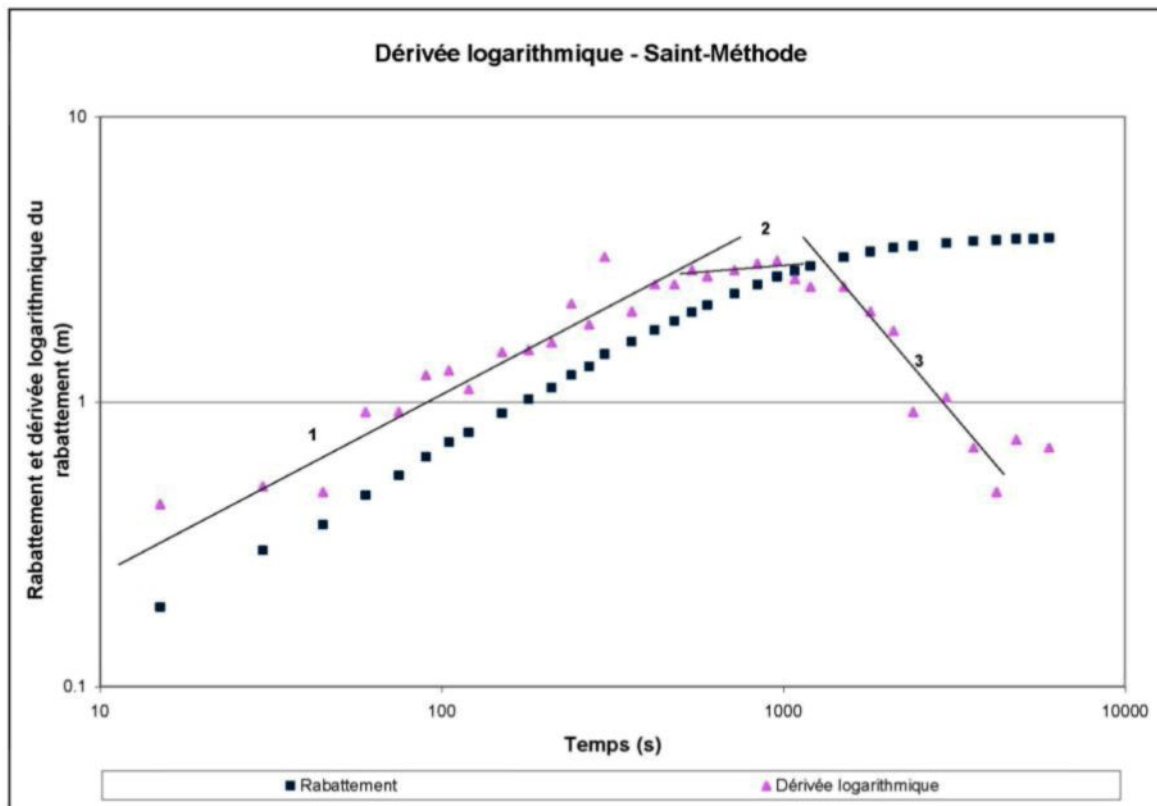


Figure 6-15 : Interprétation d'un essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Saint-Méthode selon la dérivée logarithmique du rabattement. Les carrés bleus représentent le rabattement en fonction du temps alors que les triangles roses représentent la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps. Sur la courbe de la dérivée logarithmique du rabattement, chaque pente observée a été identifiée de 1 à 3.

Les données des dérivées logarithmiques des rabattements de cet essai de pompage s'alignent de manière à former quatre pentes distinctes. Les dimensions des écoulements (n) associées à ces pentes sont :

- Pente 1 \Rightarrow 0,62 ; $n = 0,76$
- Pente 2 \Rightarrow 0,13 ; $n = 1,75$
- Pente 3 \Rightarrow -1,61 ; $n = 5,22$
- Séquence de n : 0,76 – 1,75 – 5,22

6.2.4.1 Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

Au cours des deux essais de pompage réalisés dans les aquifères rocheux et granulaire captifs, les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, SDT, pH et température) de l'eau souterraine pompée ont été suivis en continu. De plus, pour comparer les valeurs de ces paramètres entre les trois types d'aquifère en place au site de Saint-Méthode, l'eau de l'aquifère granulaire libre a également été pompée afin de connaître sa qualité physico-chimique. Les graphiques présentés aux figures 6-16, 6-17 et 6-18 présentent les valeurs des paramètres mesurés *in situ* de l'eau souterraine en provenance des trois aquifères au site de Saint-Méthode.

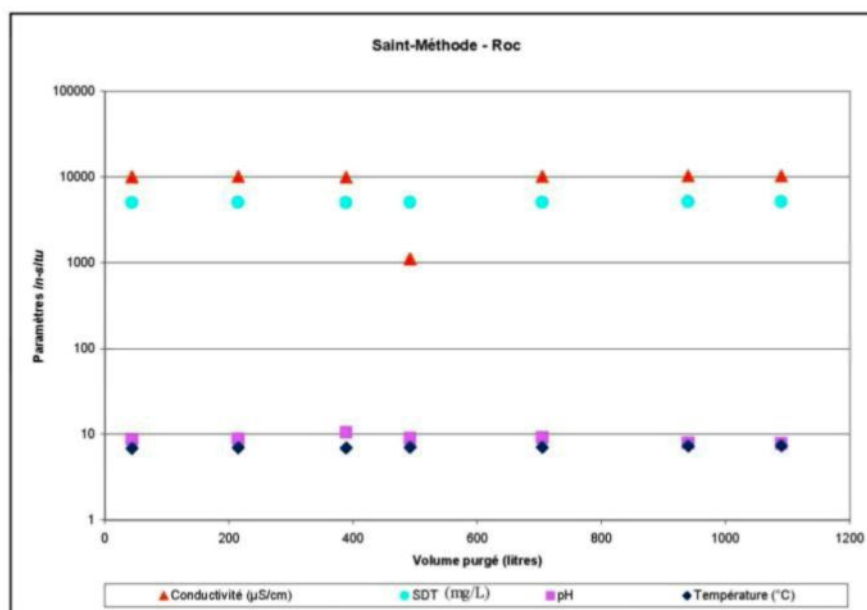


Figure 6-16 : Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Saint-Méthode. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrées lors du pompage dans l'aquifère rocheux de Saint-Méthode en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

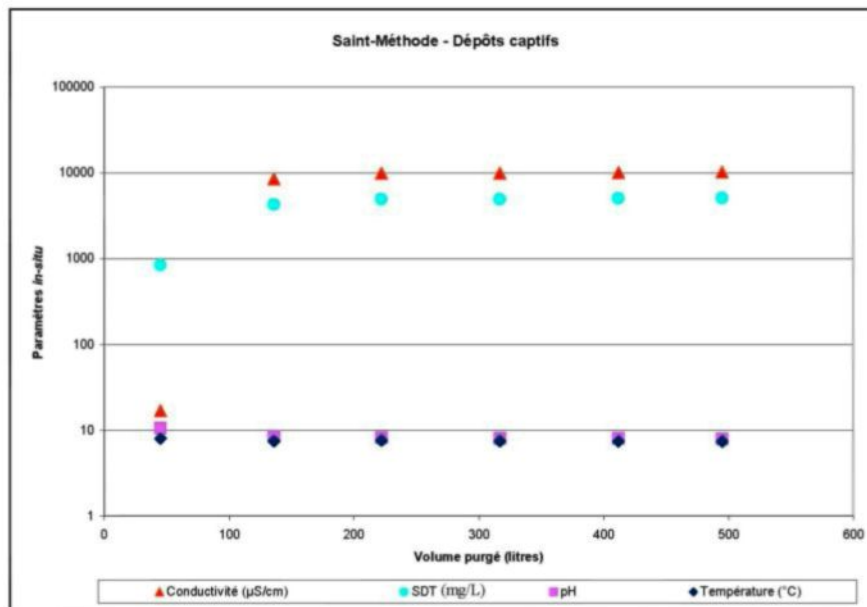


Figure 6-17 : Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire captif de Saint-Méthode. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrés lors du pompage dans l'aquifère granulaire captif de Saint-Méthode en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

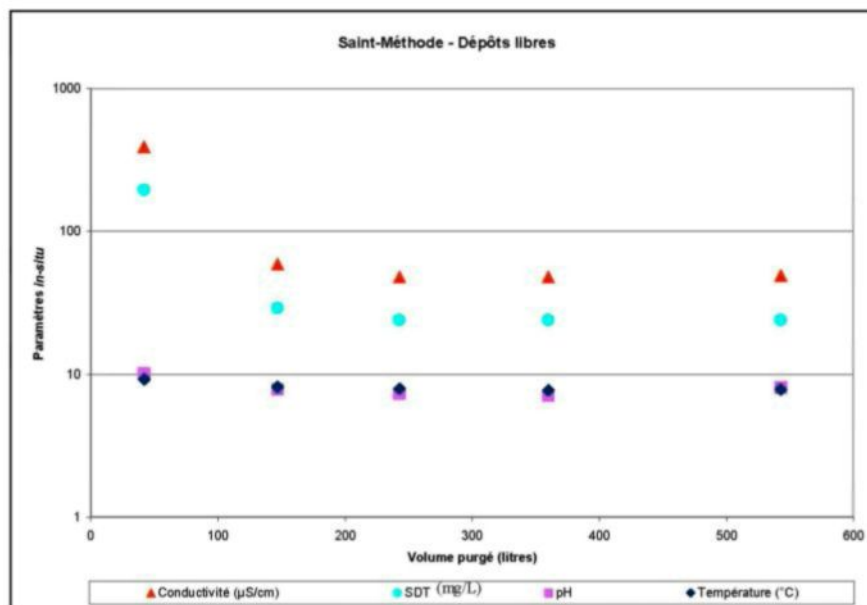


Figure 6-18 : Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire libre de Saint-Méthode. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrés lors du pompage dans l'aquifère granulaire libre de Saint-Méthode en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

Sur les graphiques présentés aux figures 6-16, 6-17 et 6-18, on constate que la température et le pH de l'eau ont sensiblement les mêmes valeurs d'un aquifère à l'autre. Cependant, ces paramètres ont des valeurs un peu moins élevées dans l'eau de l'aquifère granulaire libre que pour les deux aquifères captifs (roc et dépôts). Pour ce qui est des valeurs de conductivité électrique et de SDT, on observe les valeurs les plus élevées dans les eaux des aquifères captifs. En effet, ces paramètres ont des valeurs presque 100 fois plus élevées dans l'eau des aquifères captifs que dans l'eau de l'aquifère libre.

6.2.5 Site double – Saint-David-de-Falardeau

Pour comprendre le comportement hydraulique des aquifères existants au site de Saint-David-de-Falardeau, un essai de pompage a été réalisé à partir du piézomètre installé dans le roc. L'aquifère rocheux a été testé le 22 juillet 2011, sur une période de 244 minutes et à un débit constant de 16,82 L/min. Lors de l'essai les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée ont été suivis et lorsque ceux-ci étaient stables, l'essai a été arrêté. Le débit de pompage a été choisi selon la capacité de la pompe utilisée et de l'aquifère testé. Le graphique présenté à la figure 6-19 montre l'ensemble des données recueillies lors de cet essai de pompage.

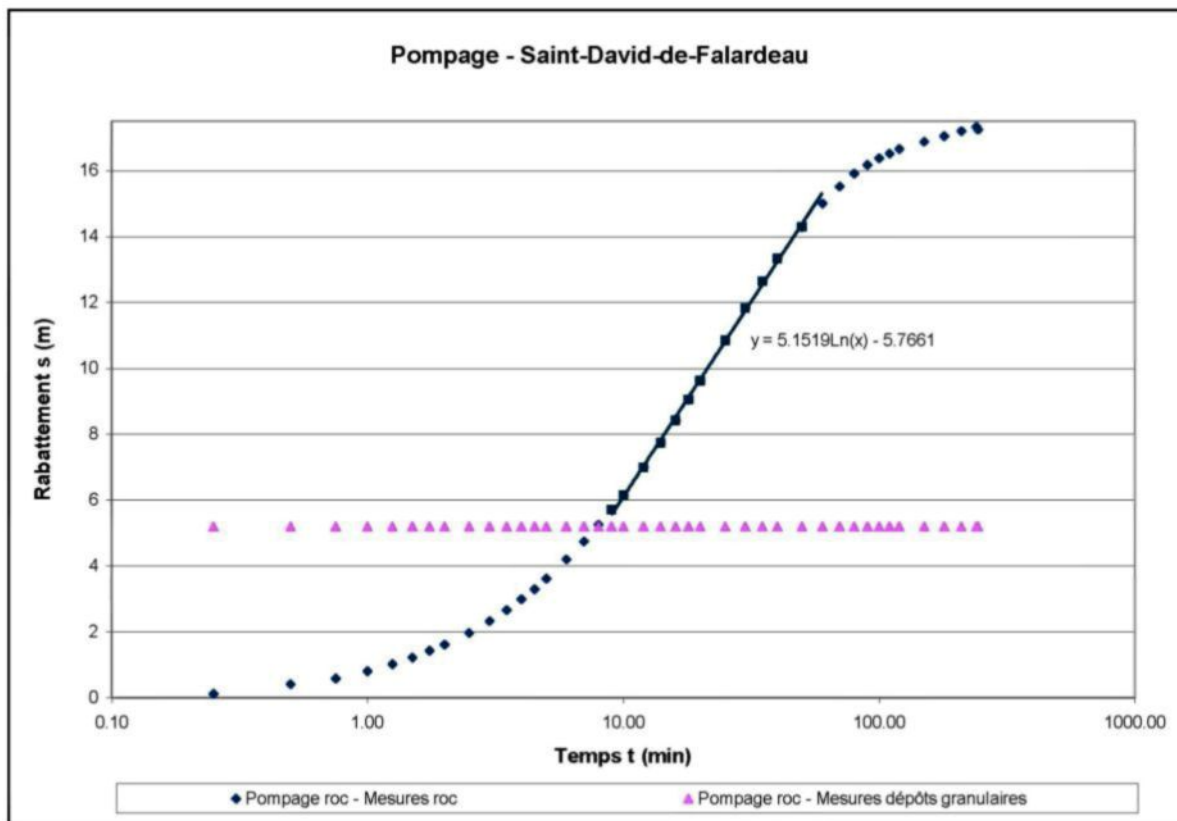


Figure 6-19: Essais de pompage dans l'aquifère rocheux au site de Saint-David-de-Falardeau. Graphique présentant les rabattements en fonction du temps lors d'un essai de pompage réalisés 22 juillet 2011. La courbe bleue représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère de roc fracturé au cours du pompage dans ce même aquifère, alors que celle en rose représente les valeurs de rabattement dans l'aquifère granulaire au cours du pompage dans le roc.

On remarque sur la figure 6-19 que lorsque l'on pompe dans l'aquifère de roc fracturé, aucun rabattement n'est produit au sein de l'aquifère granulaire. Il est à noter que le régime permanent n'a pas été atteint dans l'aquifère rocheux lors du pompage de ce dernier.

Les données de l'essai de pompage réalisé au sein de l'aquifère rocheux fracturé ont été interprétées selon deux méthodes, soit celles de Cooper-Jacob (1946) et de la dérivée logarithmique du rabattement. Selon l'interprétation réalisée à partir de la

méthode de Cooper-Jacob (1946) lors de la phase transitoire de pompage, la valeur de transmissivité de l'aquifère rocheux est de $4,33 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'interprétation de l'essai de pompage dans l'aquifère de roc selon la représentation de la dérivée logarithmique du rabattement a permis de distinguer trois pentes différentes auxquelles on associe une dimension de l'écoulement (n) provoqué par le pompage (figure 6-20).

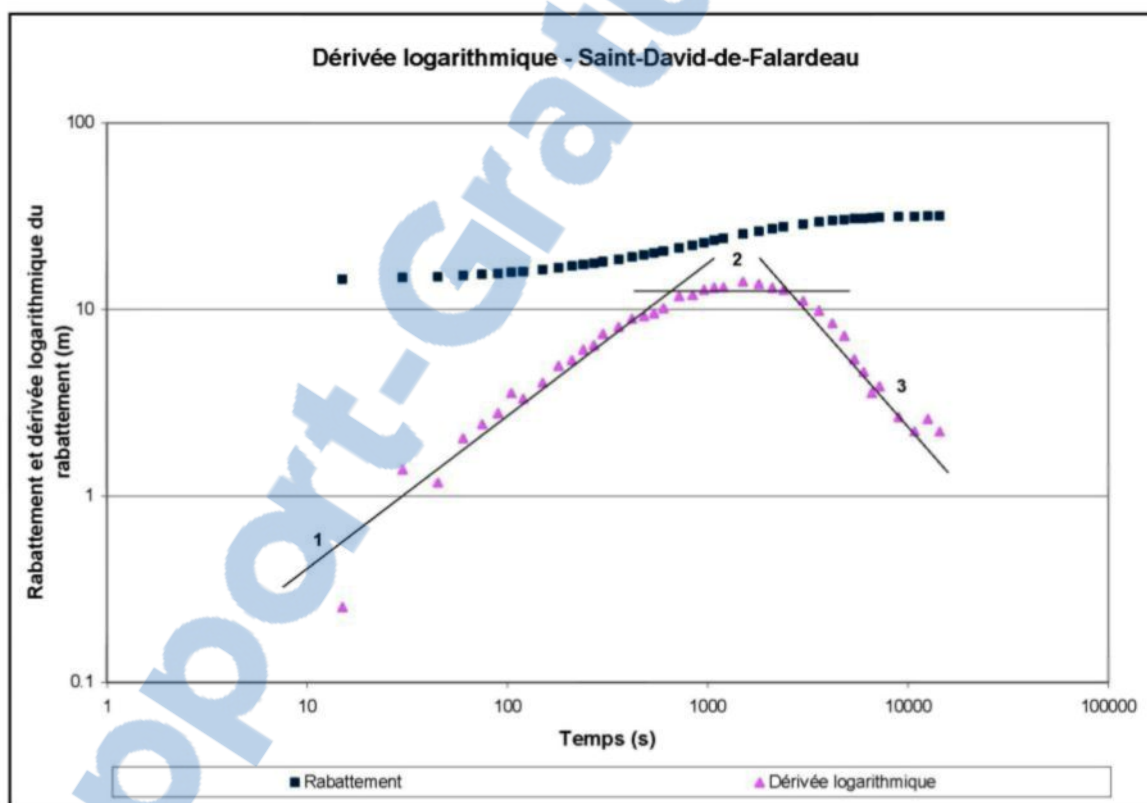


Figure 6-20: Interprétation d'un essai de pompage réalisé dans le forage dans le roc de Saint-David-de-Falardeau selon la dérivée logarithmique du rabattement. Les carrés bleus représentent le rabattement en fonction du temps alors que les triangles roses représentent la dérivée logarithmique du rabattement en fonction du temps. Sur la courbe de la dérivée logarithmique du rabattement, chaque pente observée a été identifiée de 1 à 3.

Voici les différentes dimensions (n) déterminées par les trois pentes du graphique de la figure 6-20:

- Pente 1 => 0,76 ; $n = 0,48$
- Pente 2 => 0 ; $n = 2$
- Pente 3 => -1,26 ; $n = 4,52$
- Séquence de n : 0,48 – 2 – 4,52

Les valeurs de rabattement ainsi que les valeurs de la dérivée logarithmique du rabattement ont également été mises sur le graphique pour bien observer la différence du signal relatif aux deux méthodes d'analyse.

6.2.5.1 Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

Lors de l'essai de pompage de l'aquifère rocheux fracturé, les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine (conductivité électrique, SDT, pH et température) ont été suivis. Afin de comparer la qualité chimique de l'eau de l'aquifère de roc à celle de l'aquifère granulaire, l'eau du piézomètre installé dans les dépôts a également été pompée. Les graphiques présentés aux figures 6-21 et 6-22 montrent les valeurs des paramètres mesurés *in situ* de l'eau souterraine des deux aquifères au site de Saint-David-de-Falardeau.

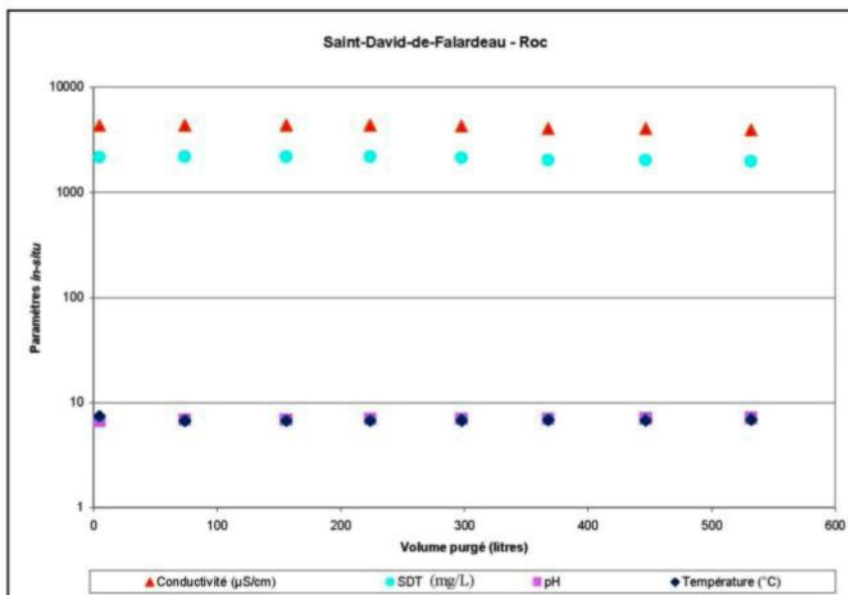


Figure 6-21: Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère rocheux de Saint-David-de-Falardeau. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrés lors du pompage dans l'aquifère rocheux fracturé de Saint-David-de-Falardeau en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

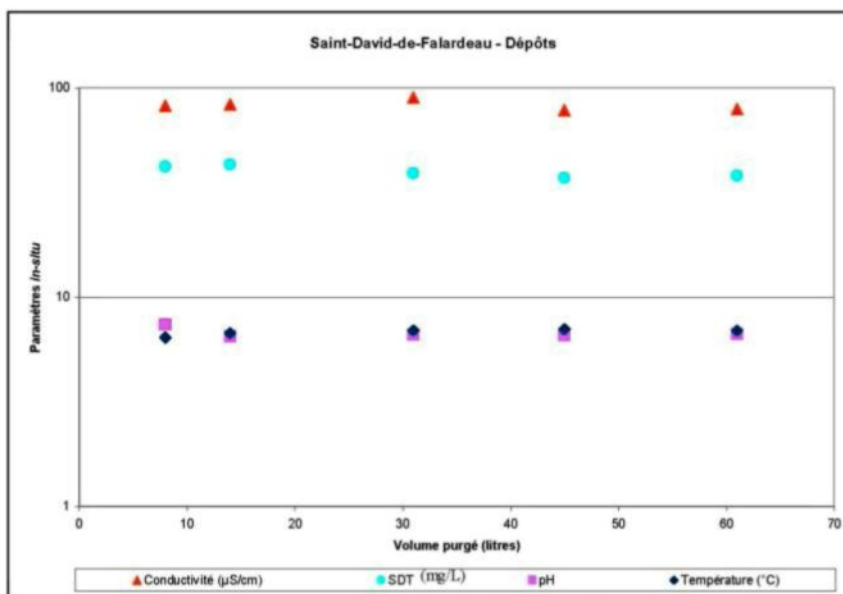


Figure 6-22: Suivi *in situ* des paramètres physico-chimiques de l'aquifère granulaire de Saint-David-de-Falardeau. Graphique présentant les valeurs des paramètres enregistrés lors du pompage dans l'aquifère granulaire libre de Saint-David-de-Falardeau en fonction du volume d'eau purgé. La conductivité électrique est représentée par les triangles oranges, les SDT par les cercles turquoise, le pH par les carrés roses et la température par les losanges bleus.

Sur les graphiques des figures 6-21 et 6-22, on remarque que les valeurs de température et de pH de l'eau sont très semblables d'un aquifère à l'autre. Ces valeurs sont toutefois quelque peu plus élevées dans l'aquifère rocheux que dans l'aquifère granulaire. En ce qui concerne les valeurs de conductivité électrique et de SDT, l'eau de l'aquifère rocheux fracturé est presque 100 fois plus élevée en ces paramètres que l'aquifère sus-jacent.

6.3 Diagraphies

Dans le cadre du projet PACES-SLSJ, une campagne de diagraphie en forage a été réalisée dans les piézomètres installés dans le roc sur les sites doubles au cours de la période du 7 au 12 septembre 2011. Pour les fins de cette étude concernant les connexions hydrauliques entre différents aquifères, ce sont les résultats des tests réalisés à l'aide du diamètreur, du *Televiewer* acoustique et du débitmètre qui sont utilisés puisqu'ils permettent de connaître, entre autres, la position des fractures en place, mais également le débit d'eau que ces fractures apportent au forage.

6.3.1 Vauvert

Selon les résultats de l'essai réalisé avec le diamètreur, plusieurs zones fracturées existeraient aux profondeurs de 58,52 m à 64,31 m, de 71,02 m à 72,85 m, de 90,83 m à 106,68 m et de 123,44 m à 125,88 m. Ces fractures sont essentiellement subhorizontales mis à part quelques fractures subverticales selon l'essai au *Televiwer* acoustique. Enfin, l'essai au débitmètre a permis de remarquer que tout le débit d'eau entrant dans le puits était observé au niveau de la base du tubage. La figure 1 de l'annexe 4 présente les résultats de cette diagraphie en forage.

6.3.2 Saint-Méthode

Selon les résultats du test réalisé avec le diamètreur, plusieurs zones fracturées existeraient aux profondeurs suivantes : 72,24 m, de 73,76 m à 74,37 m, 76,20 m, 77,72 m à 81,99 m, de 83,82 m à 84,73 m et de 87,17 m à 94,18 m. La présence de ces zones fracturées a été confirmée par le *Televiwer* acoustique. La majorité des fractures détectées présentent un fort pendage (70°) et sont orientées NNE et SE. Quelques fractures à pendage plus faible sont également en place dans le forage. On observe des fractures à 40° de pendage orientées E-O, alors que d'autres ont un pendage de 30° et sont orientées vers le sud. Enfin, de la même manière qu'au site de Vauvert, l'essai au débitmètre a permis de constater que tout le débit entrant dans le puits était observé au niveau de la base du tubage ancré dans le toit du roc. La figure 2 de l'annexe 4 présente les résultats de cette diagraphie en forage.

6.3.3 Saint-David-de-Falardeau

Selon les résultats de l'essai réalisé à l'aide du diamètreur, plusieurs fractures seraient en place à 40,84 m, à 47,24 m, à 53,34 m, à 56,39 m, à 68,88 m, entre 76,2 m et 95,1 m, à 109,12 m, à 113, 69 m et entre 135,64 m et 139,90 m. L'ensemble de ces fractures seraient subhorizontales selon l'essai au *Televiwer* acoustique. Enfin, l'essai au débitmètre a permis de connaître les profondeurs des arrivées d'eau dans le puits. La majorité du débit entrant provient de la fracture présente à 56, 39 m. Une seconde fracture apporte également de l'eau à 53,34 m de profondeur. La figure 3 de l'annexe 4 présente les résultats de cette diagraphie en forage.

6.4 Simulation numérique

Le modèle numérique construit représente un système fictif à deux aquifères ; soit un aquifère granulaire confiné de 10 mètres d'épaisseur au-dessus d'un aquifère rocheux fracturé de 2 mètres d'épaisseur. Les deux aquifères sont connectés par la présence de fractures verticales au sein de l'aquifère rocheux, lesquelles rencontrent l'aquifère granulaire sus-jacent. De plus, ces fractures verticales sont connectées entre elles par la présence d'une fracture horizontale.

6.4.1 Caractéristiques du modèle

Le modèle est représenté en deux dimensions, soit un modèle avec l'abscisse représentant la distance radiale (r) et l'ordonnée représentant l'élévation (z). En fait, ce modèle présente une symétrie radiale le long de l'axe « z » à $r=0$. Les aquifères sont représentés dans le modèle comme étant circulaires avec un rayon de 20 mètres centré à $r=0$. Quatre zones fracturées de 5 cm d'épaisseur interceptent l'aquifère granulaire à $r=2$ m, $r=5$ m, $r=10$ m et $r=18$ m. Une valeur de conductivité hydraulique (K) de $2,15 \times 10^{-5}$ m/s a été assignée à la formation granulaire et une valeur de 1 m/s aux fractures de l'aquifère rocheux. Le modèle contient 20437 nœuds et 19873 éléments. Les conditions aux frontières à la distance radiale de 20 m dans les deux formations aquifères confinés consistent en une charge hydraulique de 20 m. Les élévations de l'aquifère rocheux vont de 0 à 2 mètres alors que celles de l'aquifère granulaire vont de 2 à 10 mètres. Enfin, un puits de 30 cm de diamètre est également introduit au modèle à $r=0$ afin de simuler un essai de pompage réalisé à un débit constant de 1,885 L/s.

Il est à noter que ce modèle représente un système de fractures cylindriques, ce qui n'est pas une réalité géologique. Toutefois, ce modèle a pour objectif de réaliser des simulations permettant d'illustrer les conséquences des connexions hydrauliques entre aquifères rocheux et granulaire, indépendamment de la géométrie du réseau de fractures qui connecte ces formations.

Deux simulations numériques ont été réalisées : une pour simuler un essai de pompage de l'aquifère granulaire sans connexion hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé (cas 1) et une seconde pour simuler les effets des connexions hydrauliques de l'aquifère granulaire avec l'aquifère rocheux (cas 2) (figure 6-23).

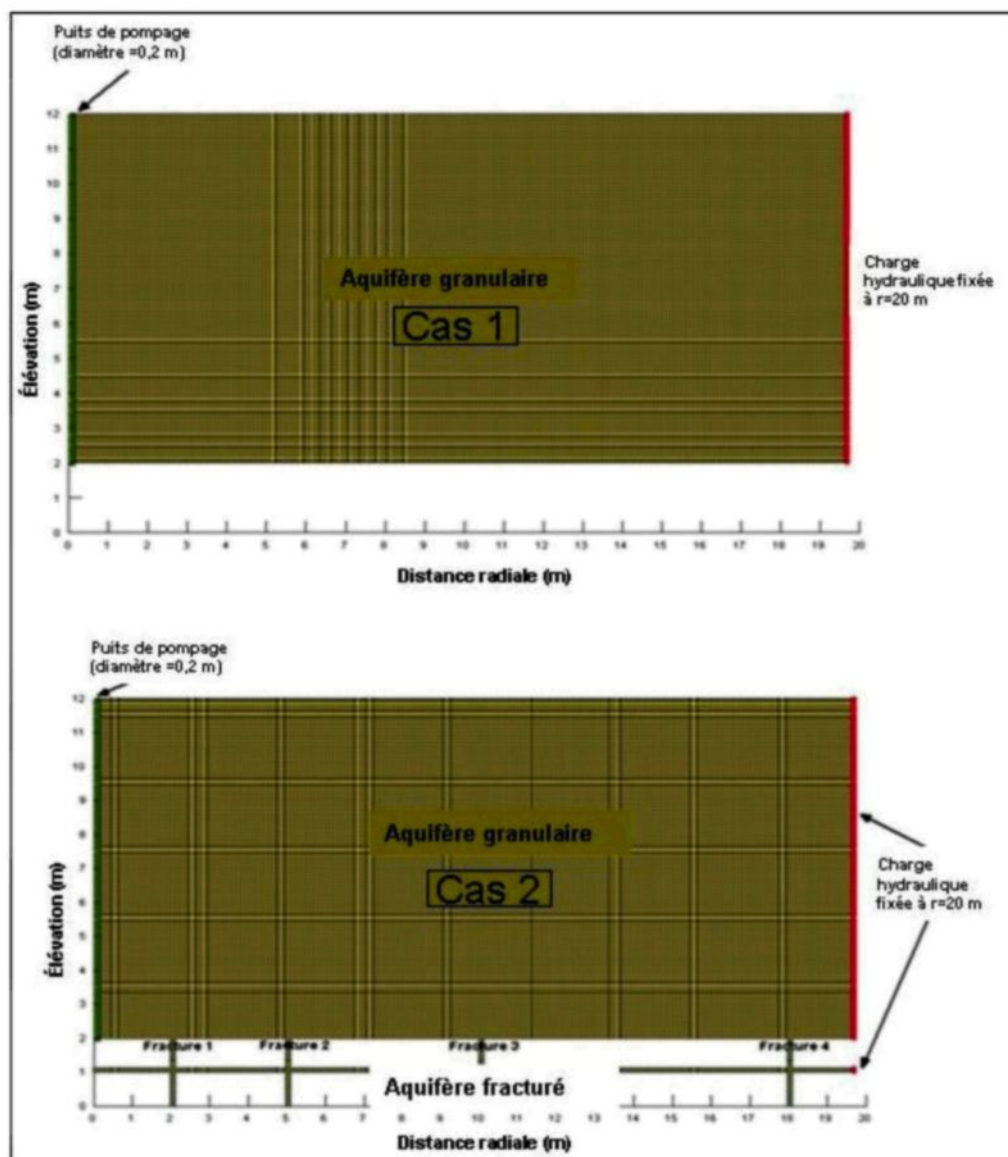


Figure 6-23 : Modèle numérique construit avec SEEP/W. Le cas 1 est construit afin de simuler un essai de pompage dans l'aquifère granulaire. Le cas 2 est construit pour simuler les effets des connexions hydrauliques entre les aquifères granulaire et rocheux. Figure tirée de Chesnaux et Elliott, 2011.

6.4.2 Simulation de l'impact des connexions hydrauliques sur les charges hydrauliques

Lorsque l'on compare le patron de la charge hydraulique entre le cas 1 et le cas 2 (figure 6-24) en régime permanent, on remarque que les valeurs de la charge ne sont pas distribuées de la même manière.

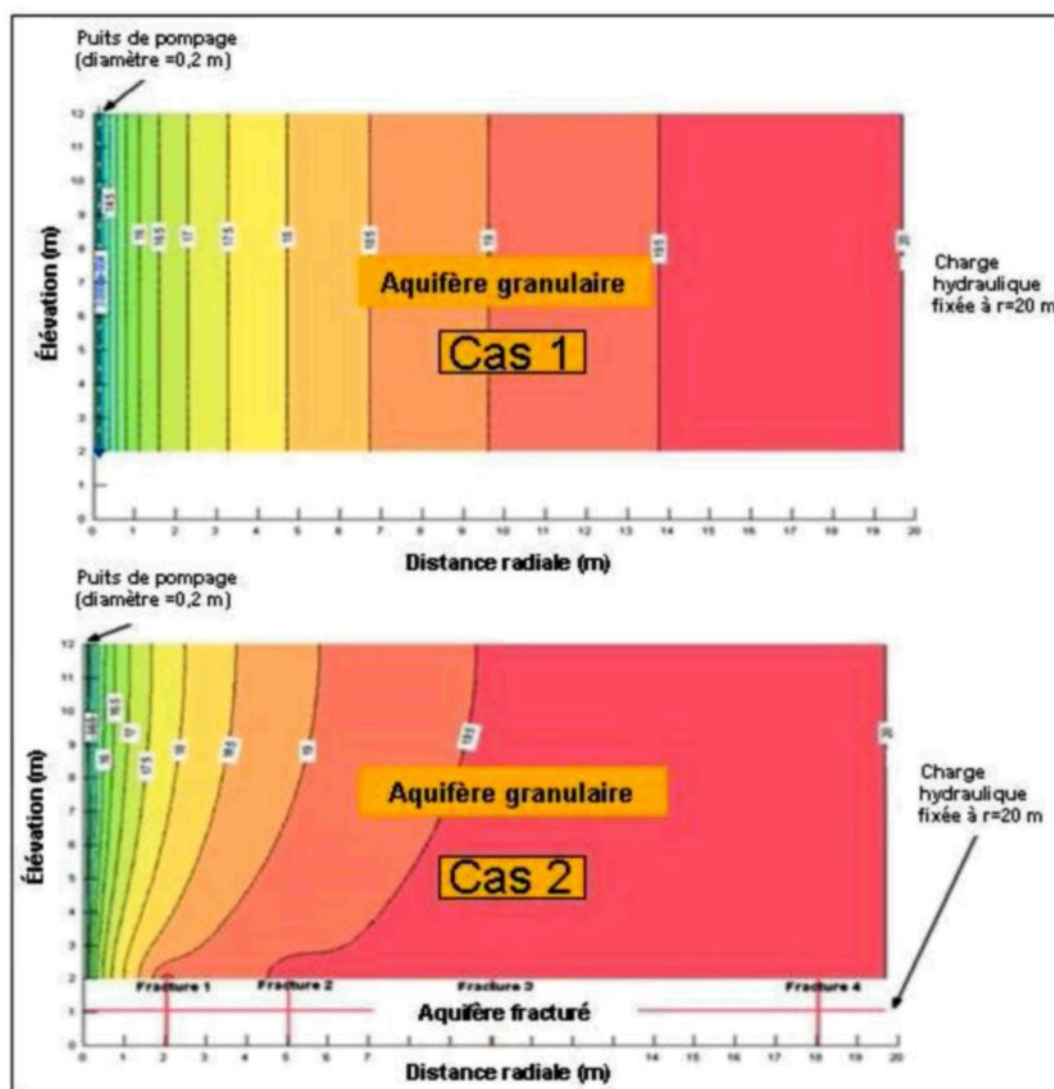


Figure 6-24 : Résultats présentant les variations de la charge hydraulique dans l'aquifère granulaire près des connexions avec les fractures de l'aquifère de roc fracturé. Comparaison des cas 1 et 2. Figure tirée de Chesnaux et Elliott, 2011.

En effet, dans le cas 1 les résultats de la simulation montrent que les lignes équipotentiels de la charge hydraulique sont verticales. Ce profil de charge représente exactement l'écoulement de type Theis (Theis, 1935) autour d'un puits de pompage et sur l'ensemble de l'aquifère confiné. Finalement, lorsque le régime permanent est atteint, le rabattement obtenu dans l'aquifère granulaire est de 7,3 m.

En ce qui concerne la simulation du second cas, on n'observe pas le même patron d'écoulement dans l'aquifère granulaire. On remarque qu'aux emplacements des fractures verticales (connexions hydrauliques), les lignes équipotentiels de la charge hydraulique ne sont pas verticales comme dans le premier cas. En effet, lorsque les fractures sont mises à contribution lors du pompage, elles amènent un volume d'eau qui modifie le rabattement de l'aquifère granulaire. Enfin, lorsque le régime permanent est atteint, le rabattement obtenu est de 5,1 m au sein de l'aquifère granulaire.

De plus, la transmissivité de l'aquifère granulaire a été calculée lors des pompages simulés aux cas 1 et 2. Lors du pompage de l'aquifère granulaire au cas 1, la transmissivité calculée est de $2,19 \times 10^{-4}$ m²/s alors que dans le deuxième cas, la valeur de transmissivité est de $2,50 \times 10^{-4}$ m²/s.

6.4.3 Simulation de l'impact des connexions hydrauliques sur l'hydrogéochimie

Afin de connaître les impacts géochimiques de la présence de connexions hydrauliques entre les deux types d'aquifères, différentes simulations ont été réalisées avec le cas 2. Il a été considéré dans ces simulations que l'aquifère rocheux fracturé est contaminé par une substance X dont la concentration est de 100 ppm, et que l'aquifère granulaire n'est pas contaminé (concentration = 0 ppm). De plus, il est considéré dans le modèle que la dispersivité longitudinale de l'aquifère granulaire est de 0,1 m, que celle du roc est de 1 m et que les valeurs de dispersivité transversale représentent un dixième de la dispersivité longitudinale pour les deux aquifères. Enfin, il est à noter que le traceur est non-réactif et que le transport est simulé selon le mode advection/dispersion uniquement.

Les résultats des simulations présentés à la figure 6-25 montrent que les fractures verticales dans le roc propagent des concentrations de la substance X dans l'aquifère granulaire non contaminé. Cette figure montre en effet les lignes d'isovaleurs de concentrations du contaminant dans l'aquifère granulaire après 1 heure, 16 heures, 2 jours et 85 jours de pompage.

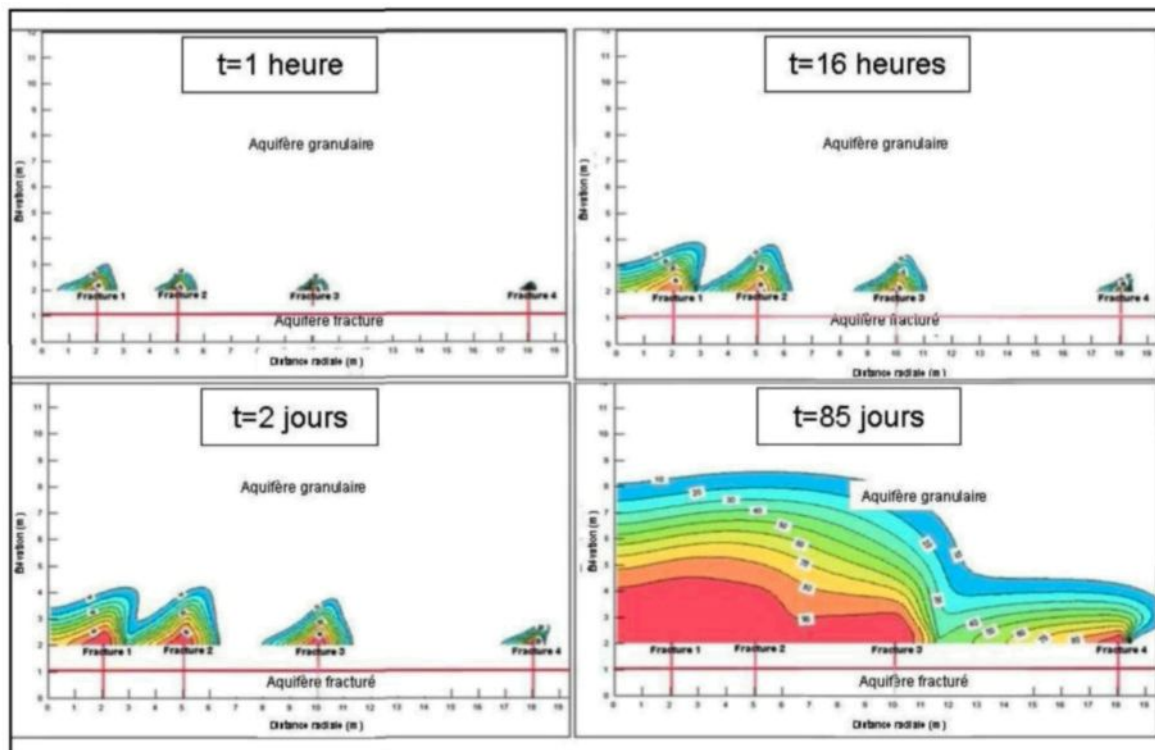


Figure 6-25 : Résultats des simulations présentant la propagation des concentrations du contaminant X dans l'aquifère granulaire après 1 heure, 16 heures, 2 jours et 85 jours de pompage. Figure tirée de Chesnaux et Elliott, 2011.

7

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus à partir des différents levés et essais réalisés aux sites investigués sont interprétés et discutés dans ce septième chapitre.

7.1 Piézométrie

Les données piézométriques mesurées dans divers ouvrages localisés sur le territoire du Saguenay-Lac-Saint-Jean permettent de soupçonner la présence de connexions hydrauliques entre aquifères à l'échelle de la région et à l'échelle locale.

En effet, au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, les conditions artésiennes jaillissantes observées dans le piézomètre aménagé dans les dépôts sont fort probablement dues à des connexions naturelles existantes entre le roc fracturé des hautes-terres et les dépôts granulaires des basses-terres. Comme l'eau de la nappe captive contient une charge hydraulique d'un milieu plus élevé en altitude, un contact hydraulique entre les deux formations à l'échelle régionale est vraisemblablement à l'origine de ce phénomène.

À l'échelle locale, on a remarqué dans la plupart des ouvrages de Saint-Félicien et de Petit-Saguenay, de faibles différences d'élévation du niveau d'eau entre les aquifères granulaire et rocheux en question, tant en conditions statique que dynamique. Aux

piézomètres des sites de Vauvert et de Saint-Méthode, on observe également de faibles différences d'élévation du niveau d'eau naturel entre les deux aquifères confinés. Par contre, sous les conditions dynamiques, les différences d'élévation du niveau d'eau sont plus importantes entre les différents aquifères. Ces données piézométriques suggèrent alors l'existence de connexions entre les ouvrages installés dans les dépôts et dans le roc fracturé sur la plupart des sites investigués. Par contre, au site de Saint-David-de-Falardeau, on a mesuré une différence marquée entre la piézométrie des dépôts granulaires et celle du roc tant en conditions statique que dynamique. Ainsi, selon ces mesures de niveau d'eau, il ne semble pas y avoir de connexion entre les deux formations aquifères sur ce site.

7.2 Essais de pompage

7.2.1 Champs captant municipaux

Lors des essais de pompage de longue durée réalisés dans les puits des champs captant municipaux, on a remarqué que lorsque l'on pompe dans un aquifère, on mesure des rabattements dans les deux formations hydrogéologiques. Au puits P-3 de Saint-Félicien, cette réponse était attendue puisque ce puits pompe simultanément l'eau des deux formations aquifères en place. Par contre, le puits P-4 pompe l'eau des dépôts alors que des rabattements sont mesurés dans le piézomètre voisin aménagé dans le roc. Le même phénomène est observé à Petit-Saguenay : le puits P-3 pompe l'eau du roc, mais l'ensemble des piézomètres aménagés dans les dépôts et dans le roc réagissent au pompage.

Suite à l'interprétation de ces essais de pompage, on a calculé des valeurs de transmissivité variant de $4,8 \times 10^{-3}$ à $5,2 \times 10^{-3}$ m²/s à Saint-Félicien et de $7,06 \times 10^{-4}$ m²/s à Petit-Saguenay. Selon les valeurs de transmissivité des aquifères rocheux de la région (Richard et al., 2011), la majorité (48%) des valeurs de transmissivité calculées dans les aquifères rocheux de la région sont de l'ordre de 1×10^{-5} m²/s. Ainsi, les valeurs de transmissivité mesurées au sein des formations rocheuses sont 10 à 100 fois plus élevées aux sites de Petit-Saguenay et de Saint-Félicien respectivement, comparativement aux valeurs moyennes régionales; ceci suggère qu'un écoulement préférentiel supplémentaire contribue à alimenter l'aquifère testé via les connexions existantes entre les deux aquifères. C'est la raison pour laquelle la transmissivité estimée de l'aquifère testé aurait une valeur plus élevée que celle à laquelle on s'attendrait. De plus, à Saint-Félicien, la valeur de transmissivité des dépôts est du même ordre de grandeur que celle du roc, ce qui appuie encore plus l'hypothèse de connexions hydrauliques entre les deux formations aquifères.

Enfin, l'interprétation de l'essai de pompage réalisé à Petit-Saguenay à l'aide de la dérivée logarithmique du rabattement ne permet pas d'observer une dimension de l'écoulement permettant de suspecter des connexions hydrauliques entre les deux aquifères. En effet, la séquence polyphasée de la dimension des écoulements (n) produits en phase transitoire est de 0,82 – 1,83 – 2,72. Ces valeurs de dimension ne correspondent pas tout à fait à ce que l'on peut observer dans la littérature, mais elles permettent tout de même de poser des hypothèses sur la géométrie des écoulements produits lors du pompage si celles-ci sont arrondies à 1 – 2 – 3. Ainsi, la séquence suggère tout d'abord

une géométrie de l'écoulement dite linéaire ($n=1$). Comme la présence de connexions hydrauliques entre le roc et les dépôts est fortement suspectée à Petit-Saguenay, cette dimension pourrait être le reflet d'un écoulement produit au niveau de la base du tubage, soit un défaut d'ancrage permettant un écoulement de l'eau de l'aquifère sus-jacent vers l'aquifère rocheux. Géométriquement, on s'imagine que la surface d'écoulement générée par un défaut d'ancrage a la forme d'un tore (forme géométrique d'un beigne) divisé en deux parties. Selon la formule permettant de calculer l'aire d'un tore, le comportement de l'écoulement se produirait selon la relation $A(r) \sim \text{constante}$, donc un écoulement à géométrie linéaire dont la dimension de l'écoulement est de 1. Par contre, la pente ressemble également à celle de l'effet d'emménagement de l'eau dans le puits (figure 5-3) et celle-ci est observée en début de pompage. Ainsi, cette dimension semble combiner une arrivée d'eau via un défaut d'ancrage du tubage dans le roc et les effets d'emménagement de l'eau dans le puits. Une simulation numérique pourrait confirmer ou infirmer cette hypothèse, mais elle n'est pas prévue dans le cadre de ce projet. Ensuite, une phase cylindrique ($n=2$) est observée entre 10 et 100 minutes de pompage, donc un écoulement dont les équipotentielles sont de forme cylindrique qui s'étendent radialement autour du puits. La fin de la séquence peut enfin être interprétée comme un front de propagation du rabattement dont la source est sphérique ($n=3$). Selon le modèle GRF de Barker, ce comportement traduirait la présence d'un substratum rocheux incliné.

7.2.2 Sites doubles

Aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode, on remarque que lorsque l'on pompe dans l'ouvrage aménagé dans le roc ou dans les dépôts captifs, on mesure un rabattement dans l'autre aquifère. Les valeurs de rabattement mesurées dans l'aquifère non testé sont toutefois moins élevées que celles dans l'aquifère testé. Alors que durant l'essai de pompage réalisé dans le piézomètre aménagé dans le roc de Saint-David-de-Falardeau, aucun rabattement de la nappe libre comprise dans les dépôts de surface n'a été observé. Ainsi, la présence de connexions hydrauliques est fortement suspectée entre le roc et les dépôts aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode, alors qu'aucun lien hydraulique ne semble exister entre les deux formations aquifères à Saint-David-de-Falardeau.

L'interprétation des données des essais de pompage par l'analyse de la dérivée logarithmique du rabattement révèle des dimensions des écoulements (n) produits en phase transitoire de pompage qui permettent de soupçonner des connexions hydrauliques entre les aquifères présents aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode.

En effet, à Vauvert, la séquence polyphasée de la dimension des écoulements produits en phase transitoire est de 0,88 – 1,9 – 2,98, soit des résultats pouvant être interprétés comme étant une séquence dont les dimensions de l'écoulement sont de 1 – 2 – 3. Tout d'abord, la valeur de 1 suggère une phase dont la géométrie de l'écoulement est linéaire et un effet d'emmagasinement de l'eau dans le puits. En effet, ceci suppose qu'une arrivée d'eau à signature linéaire par un défaut d'ancrage est combinée à l'effet d'emmagasinement. Encore une fois, une vérification par simulation numérique pourrait supporter cette hypothèse, mais celle-ci sort du cadre de cette étude. Ensuite, une phase

cylindrique ($n=2$) est observée entre 5 et 18 minutes de pompage. Celle-ci est suivie d'une phase correspondant à un front de propagation du rabattement dont la source est sphérique ($n=3$) jusqu'à 118 minutes. Enfin, dans les dernières minutes de l'essai, le signal devient considérablement bruité. Il est probable que ces variations du rabattement soient associées à des causes externes, comme par exemple, des variations de la pression atmosphérique lors de l'essai.

Au site de Saint-Méthode, la séquence de dimension des écoulements (n) est de 0,76 – 1,75 – 5,22 (dimensions de 1 – 2 – 5 lorsque les valeurs sont arrondies). Tout comme à Vauvert, les deux premières phases correspondent à un écoulement à géométrie linéaire, qui est peut-être causé par un défaut d'ancrage de la base du tubage d'acier, combiné à l'effet d'emmagasinement du puits suivi d'une phase à géométrie cylindrique. La dimension de l'écoulement équivalant à 5,22 (ou 5) est difficilement interprétable. Cette phase est suivie d'un signal bruité qui pourrait également être associé à des causes externes au pompage telles des variations de la pression atmosphérique.

Au site de Saint-David-de-Falardeau, la séquence polyphasée des dimensions des écoulements (n) générés par le pompage du roc en place est de 0,48 – 2 – 4,52 (valeurs de 0,5 – 2 – 4 si elles sont arrondies). La première pente observée sur le graphique de l'essai de pompage traduit l'effet d'emmagasinement de l'eau dans l'ouvrage car cet écoulement est observé au début du pompage et car la pente correspond à celle présentée à la figure 5-3. Ensuite, la seconde phase du signal correspond à une valeur de dimension d'écoulement égale à 2, donc une surface des équipotentielles de l'écoulement de forme cylindrique. Enfin, la dernière phase a une valeur de dimension d'écoulement de 4,52.

Comme mentionné dans le tableau 5-1, une valeur de 4 équivaut à une limite à charge constante de l'aquifère. Ainsi, cette valeur peut être interprétée comme une frontière de recharge car le régime pseudo-permanent a été atteint pendant le pompage et que le lac Sébastien est présent à une centaine de mètres de l'ouvrage testé. Encore une fois, on ne reconnaît pas de dimension des écoulements lors du pompage du roc fracturé à Saint-David-de-Falardeau permettant de soupçonner la présence de connexions hydrauliques entre les deux aquifères car aucune phase linéaire ($n=1$) n'a été observée en début de pompage.

7.2.3 Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

En ce qui concerne la qualité chimique des eaux souterraines pompées au site de Vauvert et de Saint-Méthode, on remarque que l'eau des piézomètres installés dans la nappe captive comprise dans les dépôts et le roc est chimiquement très semblable (figures 6-11, 6-12, 6-16 et 6-17). En effet, les valeurs de conductivité électrique et des sels dissous totaux (SDT) des eaux pompées dans le piézomètre aménagé dans le roc et dans celui aménagé dans les dépôts captifs sont du même ordre de grandeur : Les valeurs de conductivité électrique et de SDT sont près de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1000 mg/L pour Vauvert, et près de 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10 000 mg/L pour Saint-Méthode. Alors que les valeurs de conductivité électrique et de SDT de l'eau de l'aquifère libre de Vauvert se rapprochent plutôt de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 100 mg/L (figure 6-13) et sont plutôt près de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10 mg/L dans l'eau de l'aquifère libre de Saint-Méthode (figure 6-18). Encore une fois, à partir de ces données géochimiques, la présence de connexions hydrauliques entre les deux

aquifères en place est fortement suspectée aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode. En effet, les connexions hydrauliques entre le roc et les dépôts captifs produisent un mélange des eaux formant ainsi une qualité chimique commune à l'eau des deux aquifères captifs en place à ces deux sites.

En ce qui a trait à la qualité chimique des eaux souterraines prélevées au site de Saint-David-de-Falardeau, on remarque que les valeurs de conductivité électrique et des sels dissous totaux sont presque 1000 fois plus élevées dans l'eau de l'aquifère rocheux comparativement à l'eau de l'aquifère granulaire, alors que la température et le pH sont semblables d'un aquifère à l'autre (figures 6-21 et 6-22). Ainsi, cette signature géochimique distincte entre les deux aquifères suggère l'absence de connexion hydraulique entre eux.

7.3 Diagraphies

Les résultats des diagraphies en forage des piézomètres aménagés dans le roc de Vauvert et de Saint-Méthode suggèrent fortement un défaut d'ancrage de la base du tubage dans le socle. En effet, lors de l'essai au débitmètre, tout le débit entrant dans le piézomètre se faisait à la base du tubage d'acier, soit à 57,90 et 70,71 m de profondeur par rapport au sol (forages de Vauvert et de Saint-Méthode respectivement), et non au niveau des zones fracturées observées dans le roc (figures 1 et 2 de l'annexe 4). Ainsi, cette information permet de comprendre que les connexions hydrauliques observées à partir des différents essais sont dues à un défaut d'ancrage du tubage dans le roc plutôt qu'à une connexion hydraulique naturelle.

Au site de Saint-David-de-Falardeau, on a remarqué que la fin du tubage se trouve à une profondeur de 27,43 m par rapport au sol. Selon l'essai au débitmètre, l'eau entrant dans le puits se fait majoritairement au niveau des fractures localisées à 53,34 et 56,39 m de profondeur par rapport au sol. Ainsi, ces résultats confirment que le tubage est bien ancré dans le roc et qu'aucune connexion hydraulique n'est en place. On remarque également que la majorité des fractures ont été observées dans le calcaire ainsi qu'à la transition entre le calcaire et le socle cristallin (anorthosite). De plus, comme ces fractures sont subhorizontales et qu'elles sont comprises dans une formation sédimentaire, celles-ci semblent être le reflet de paraclases, soit des fractures suivant les plans de stratification du calcaire. De ce fait, l'anorthosite au site de Saint-David-de-Falardeau ne s'avère pas représenter une formation hydrogéologique transmissive de par ces résultats de diagraphie en forage.

7.4 Simulations numériques

Les diverses simulations numériques ont permis d'observer les conséquences des connexions hydrauliques entre deux aquifères par l'entremise de fractures verticales du toit du roc. En effet, on remarque que le rabattement obtenu à la fin du pompage de la première simulation, soit le cas 1 où aucun lien hydraulique n'existe entre les aquifères, est plus important de 2,2 m comparativement à la deuxième simulation où un apport d'eau supplémentaire est fourni à l'aquifère granulaire via les fractures du roc (cas 2). De plus, la transmissivité de l'aquifère granulaire calculée à partir de la première simulation est 1,14 fois moins élevée que celle calculée à partir de la deuxième simulation. Ainsi,

lorsque des connexions hydrauliques sont en place entre les deux aquifères, la transmissivité de l'aquifère granulaire devient surestimée par ces connexions.

Au point de vue géochimique, on remarque que la contamination présente dans l'aquifère rocheux est propagée dans l'aquifère granulaire via les fractures lorsque l'eau de ce dernier est pompée. Ce résultat montre bien que lorsque deux aquifères sont connectés et qu'un de ceux-ci est contaminé, une contamination croisée se produit. Dans ce cas-ci, l'aquifère granulaire, auparavant exempt de contamination, devient contaminé par l'eau de l'aquifère rocheux fracturé sous-jacent.

7.5 Discussion

Les connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères comportent d'importantes implications en ce qui a trait à la quantité et à la qualité de l'eau souterraine dans les aquifères.

7.5.1 Quantité

Dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, comme les hautes-terres bordent en grande partie les basses-terres régionales, il est fort probable qu'un grand nombre de connexions hydrauliques soient en place entre le roc de hautes-terres et les dépôts des basses-terres. Ainsi, à l'échelle régionale, ces connexions hydrauliques impliquent des échanges d'eau souterraine représentant d'importants volumes. Prendre en considération l'existence des connexions hydrauliques entre deux types d'aquifère permettra d'évaluer des bilans hydriques plus représentatifs de la réalité. Pour ce faire, il sera alors nécessaire de considérer tous les flux d'eau qui transitent dans le sol et le sous-sol, incluant ainsi les

échanges hydrauliques entre les aquifères. De cette manière, on assurera une meilleure gestion de l'eau souterraine car on connaîtra avec plus de précision les valeurs de recharge des aquifères, donc des réserves disponibles pour l'exploitation de la ressource.

De plus, lorsque des connexions hydrauliques entre deux aquifères sont en place, lors d'un pompage, ces dernières assurent un apport d'eau supplémentaire à la formation aquifère testé comme on l'a entre autre observé par la simulation numérique. De ce fait, les propriétés hydrauliques de l'aquifère testé estimées à partir des données de pompage seront biaisées (surestimation) par le volume d'eau additionnel apporté à l'aquifère via les liens hydrauliques existants. Ainsi, lors de la détermination des aires d'alimentation et de protection d'un nouveau puits de captage municipal par exemple, les propriétés hydrauliques surestimées vont impliquer une amplification des limites de ces périmètres. On va donc protéger les eaux souterraines de manière trop intensive et on risque d'interdire faussement certaines activités qui sont réalisées dans ces aires (activités agricoles par exemple). Ainsi, d'importants inconvénients peuvent être amenés de manière inutile aux gens concernés si l'on surestime ces aires d'alimentation et de protection.

Enfin, vérifier la présence de connexions hydrauliques entre aquifères et les prendre en compte dans les études hydrogéologiques, si elles existent, va permettre de faire de meilleures estimations des propriétés hydrauliques. Ainsi, la dynamique des écoulements sera mieux comprise ce qui permettra de mieux gérer cette ressource.

7.5.2 Qualité

Pour ce qui est de la qualité de l'eau souterraine, on a vu par la simulation numérique que les connexions hydrauliques pouvaient entraîner des contaminations croisées entre aquifères, lorsqu'il y a présence d'une substance (naturelle ou anthropique) dans l'une ou l'autre des formations hydrogéologiques et qui est absente dans l'autre. Effectivement, une bonne compréhension de la dynamique des écoulements entre les aquifères va permettre une meilleure évaluation des échanges des contaminants entre les formations hydrogéologiques. Ainsi, les risques de contamination d'un aquifère par un autre aquifère via des liens hydrauliques existant entre les deux pourront être mieux évalués, donc grandement diminués.

8

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Pour assurer une gestion adéquate de l'exploitation de l'eau souterraine, il est impératif de comprendre comment l'eau circule dans les formations aquifères. En effet, à l'échelle régionale, les connexions hydrauliques entre deux types d'aquifères peuvent générer le transit d'importants volumes d'eau d'un aquifère à l'autre. Afin de bien comprendre la dynamique des écoulements souterrains dans les différents milieux hydrogéologiques, la mise en évidence de connexions hydrauliques entre un aquifère rocheux fracturé et un aquifère granulaire doit être faite. Peu importe la formation hydrogéologique dans laquelle l'eau souterraine circule, cette dernière a une signature géochimique distincte propre à son milieu aquifère, et celui-ci présente également ses propres valeurs de propriétés hydrauliques. Or, comme ces échanges d'eau entre aquifères modifient les propriétés chimiques de l'eau et l'estimation des propriétés hydrauliques des aquifères, il est alors important de caractériser ces connexions dans les études hydrogéologiques pour assurer la compréhension de la dynamique des écoulements souterrains.

Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, six sites ont été étudiés pour mettre en évidence l'existence des connexions hydrauliques régionales et locales entre aquifères de roc fracturé et les aquifères granulaires. Cette investigation a permis de connaître par la prise

de données piézométriques, des essais de pompage, des suivis *in situ* des paramètres physico-chimiques au cours de pompages et des diagraphies en forage, les effets des connexions en ce qui a trait à la physique des écoulements et à l'hydrogéochimie. La modélisation numérique a également été mise à profit pour illustrer le phénomène des connexions hydrauliques entre aquifères et leurs impacts sur les charges hydrauliques et sur l'hydrogéochimie. Un des sites a été étudié pour mettre en évidence les échanges d'eau entre aquifères à l'échelle régionale, soit le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, alors que les sites municipaux de Saint-Félicien et de Petit-Saguenay, ainsi que les sites doubles de Vauvert, Saint-Méthode et de Saint-David-de-Falardeau ont été investigués pour montrer l'occurrence des connexions hydrauliques à l'échelle locale.

Cette étude a permis de constater que sur la majorité (83,3 %) des sites investigués dans la région, des connexions hydrauliques entre des aquifères de différents types sont en place. En effet, les résultats de cette investigation montrent que cinq sites sur six présentent des connexions entre deux types d'aquifères, soit les sites de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, de Saint-Félicien, de Petit-Saguenay, de Vauvert et de Saint-Méthode; c'est seulement au site de Saint-David-de-Falardeau que l'on n'observe pas de lien hydraulique entre les deux aquifères en place. Ces observations prouvent tout d'abord l'existence de connexions hydrauliques entre deux aquifères, mais elles démontrent également que ces connexions semblent être un phénomène très étendu dans la région.

On a remarqué l'occurrence de connexions hydrauliques régionales au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix à partir de données piézométriques. En effet, les valeurs élevées de niveau d'eau mesurées dans des piézomètres sur les basses-terres ne peuvent

que refléter la piézométrie des hautes-terres puisque des conditions artésiennes jaillissantes sont observées à basse altitude : l'eau contenue dans l'aquifère granulaire localisée sur les basses-terres contient une charge hydraulique d'un milieu plus élevé en altitude. Ainsi, les fractures du roc reliées aux dépôts meubles confinés permettent à l'eau du roc de rejoindre l'aquifère granulaire puisqu'un gradient hydraulique ascendant existe. Seulement des connexions hydrauliques régionales entre le roc des hautes-terres et les dépôts des basses-terres peuvent produire de telles conditions.

Aux sites municipaux de Saint-Félicien et de Petit-Saguenay, la dynamique des écoulements observée dans les différents ouvrages à partir de données piézométriques et d'essais de pompage a permis de mettre en évidence des connexions hydrauliques locales entre les différentes formations aquifères en place. Par contre, on ne sait pas si ces connexions ont été mises en place de manière naturelle (présence de fractures du roc connectées aux dépôts) ou si elles ont été créées lors des travaux de forages ou lors de l'aménagement de ces ouvrages (défaut d'ancrage). Pour connaître leur nature, des diagraphies en forage permettent notamment de connaître les débits d'eau fournis par les fractures le long du forage (essai au débitmètre). On est alors en mesure de voir si le tubage d'acier est bien ancré dans le roc et ainsi se questionner sur la présence d'un défaut d'ancrage permettant les échanges d'eau entre les formations.

Aux sites doubles du PACES-SLSJ, on a mis en évidence la présence de connexions hydrauliques entre aquifères aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode à partir de la piézométrie, d'essais de pompage, de suivis des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* et de diagraphies en forage. Toutefois, de par les résultats des essais au

débitmètre, on a compris que les échanges d'eau étaient principalement produits par un défaut d'ancrage du tubage d'acier au contact du socle rocheux : l'eau des dépôts granulaires emprunte les ouvertures créées par le défaut d'ancrage pour circuler vers le forage dans le roc. Ce sont en fait ces défauts qui assurent une connexion entre les formations aquifères en place. Par contre, advenant la présence de fractures à la surface du roc connectées aux dépôts sous-jacents en place, les connexions observées pourraient être à la fois associées au défaut d'ancrage et à cette fracturation du toit du roc.

À Saint-David-de-Falardeau, on a appliqué la même méthodologie qu'aux deux autres sites doubles du PACES-SLSJ et on n'a pas observé d'évidence de lien hydraulique existant entre les deux types d'aquifère en place. Lors de l'essai au débitmètre, aucune arrivée d'eau n'a été observée à la base du tubage d'acier du piézomètre aménagé dans le roc à Saint-David-de-Falardeau contrairement aux sites de Vauvert et de Saint-Méthode, ce qui suggère que le tubage est bien ancré dans le socle et que le roc n'est pas fracturé en surface.

Ces résultats d'essais au débitmètre laissent ainsi croire qu'au Saguenay-Lac-Saint-Jean, un grand nombre de puits aménagés dans le roc semblent présenter un défaut d'ancrage de leur tubage d'acier puisque lors de la campagne de diagraphies de 2011, deux puits diagraphiés sur trois ont montré cette tendance. Pour minimiser les risques d'instaurer un défaut d'ancrage et de créer des connexions hydrauliques entre des aquifères, il faudrait limiter les forages dans le roc lorsqu'il y a présence d'un aquifère granulaire assez transmissif permettant de répondre aux besoins d'alimentation en eau. De

plus, il serait bon de revoir les techniques d'ancrage pour bien étanchéifier les formations aquifères en place lorsque l'on veut capter un aquifère rocheux.

Enfin, on a vu que les connexions hydrauliques impliquent d'importants impacts sur la physique des écoulements et sur l'hydrogéochimie. Dans les futures études hydrogéologiques, il est donc nécessaire d'intégrer ces connaissances afin de bien gérer la ressource d'eau souterraine.

RÉFÉRENCES

- Avramtchev, L. 1993. Carte minérale de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, 1 carte. PRO9307
- Barker, J. A., 1988. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, v. 24, no. 10: 1796-1804.
- Chapuis, R.P. et Chenaf, D., 1998. Detecting a hydraulic short circuit along a monitoring well with the recovery curve of a pumping test in a confined aquifer: method and example. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 35, no. 5: 790-800.
- Chapuis, R.P., 1999. Guide des essais de pompage et leurs interprétations, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 156 p.
- Chesnaux, R., Chapuis, R.P. et Molson, J.W., 2006. A new method to characterize hydraulic short-circuits in defective borehole seals. *Ground Water*, v. 44, no. 5: 676-681.
- Chesnaux, R. et Chapuis, R.P., 2007. Detecting and quantifying leakage through defective borehole seals: a new methodology and laboratory verification. *Geotechnical Testing Journal*, v. 30, no. 1: 17-24.
- Chesnaux, R., 2010. Scellement des puits de pompage et protection des eaux souterraines, Éditions Universitaires Européennes, Sarrebruck, Germany, 276 p.
- Chesnaux, R. et Elliott, A-P., 2011. Demonstrating evidence of hydraulic connections between granular aquifers and fractured rock aquifers. *Proceeding of Geohydro 2011, Joint Meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists*, August 28-31, 2011, Quebec City, Canada, 8 p.
- Chesnaux, R., Lambert, M., Walter, J., Fillastre, U., Hay, M., Rouleau, A., Daigneault, R., Moisan, A. et Germaneau, D., 2011. Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay-Lac-St-Jean Region, Canada. *Computers & Geosciences*, v. 37, no. 11: 1870-1882.

- Chesnaux, R., Rafini, S. et Elliott, A-P., 2012. A numerical investigation to illustrate the consequences of hydraulic connections between granular and fractured-rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, v. 20, no. 8: 1669-1680.
- Cooper, H.H. et Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, v. 27 no. 4: 526-534.
- Denis, C., 1997. Évaluation de la vulnérabilité de la formation aquifère à la contamination et recherche en eau souterraine – Secteur nord-est du parc industriel: Experts-Conseils Hydrogéo-Sol inc., Projet HS 97264-01, 119 p.
- Denis, C., 2003. Amélioration du système d'approvisionnement d'eau potable - Recherche en eau souterraine - Phase III - Municipalité de Petit-Saguenay: Experts-Conseils Hydrogéo-Sol inc., HS 9220-01, 241 p.
- Doe, T. W., 1991. Fractional dimension analysis of constant-pressure well tests. *SPE Journal*: 461-467.
- Eaton, T.T., Anderson, M.P. et Bradbury, K.R., 2007. Fracture control of ground water flow and water chemistry in a rock aquitard. *Ground Water*, v. 45, no. 5: 601-615.
- Freeze, R.A et Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
- Geo-Slope International Ltd. 2002a. SEEP/W for Finite element seepage analysis, Version 5: User's Guide. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd. 457p.
- Geo-Slope International Ltd., 2002b. CTRAN/W for Finite element contaminant transport analysis, Version 5: User's Guide. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd. 405p.
- Hébert, C., 2004. Histoire tectomagmatique d'une partie de la région du Saguenay, Québec, avec la collaboration de Daigneault, R., Excursion des amis du Grenville, 34 p.

- LaSalle, P. et Tremblay, G., 1978. Dépôts meubles Saguenay-Lac-Saint-Jean. Rapport géologique 191, Ministère des Richesses naturelles du Québec, 61 p.
- Lemieux, J-M., Kirkwood, D. et Therrien, R., 2009. Fracture network analysis of the St-Eustache quarry, Quebec, Canada, for groundwater resources management. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 46 : 828-841.
- MRN, 2011. Cartographie des formations superficielles réalisée dans le territoire municipalisé du Saguenay – Lac-Saint-Jean (Québec) entre 2009 et 2011. Rapport final, Ministère des Ressources naturelles, GM 65970, 44 p.
- Musset, A.E. et Khan, M.A., 2000. Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics. Cambridge University Press, 470 p.
- PACES-SLSJ, 2013. Acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire municipalisé du Saguenay - Lac-Saint-Jean. Centre d'études sur les ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Rapport final, 223 p.
- Rafini, S. et Larocque, M., 2009. Insights from numerical modeling on the hydrodynamics of non-radial flow in faulted media. *Advances in Water Resources*, v. 32, no. 8: 1170-1179.
- Rafini, S. et Larocque, M., 2012. Numerical modeling of the hydraulic signatures of horizontal and inclined faults. *Hydrogeology Journal*, v. 20, no. 2: 337-350.
- Renard, P., Glenz, D. et Mejias, M., 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, v. 17, no. 3: 589-600.
- Richard, SK., Chesnaux, R., Rouleau, A., 2011. Estimating the hydraulic properties of aquifers from specific capacity data: Saguenay-Lac-Saint-Jean, Quebec. *Proceeding of GeoHydro 2011, Joint Meeting of the Canadian Quaternary Association and the Canadian Chapter of the International Association of Hydrogeologists*, August 28-31, 2011, Quebec City, Canada, 8 p.
- Rivers, T., Martignole, J., Gower, C. et Davidson, T., 1989. New tectonic divisions of the Grenville province. Southeast Canadian shield. *Tectonic*, v. 8: 63-84.

- Roy, D.W et Rouleau, A., 1999. Les eaux souterraines du Saguenay-Lac-Saint-Jean, mise en valeur et protection. Document synthèse, Conseil régional de concertation et de développement. Centre d'études sur les ressources minérales. 41 p.
- Santi, P.M., McCray, J.E. et Martens, J.L., 2006. Investigating cross-contamination of aquifers. *Hydrogeology Journal*, v. 14, no. 1-2: 51-68.
- Sourisseau, B., Daum, J-R. et Longin, G., 1998. Guide de bonne pratique et de contrôle des forages d'eau pour la protection de l'environnement. Manuels et méthodes 31: Éditions BRGM, No ISBN 2715908636, 77 p.
- Straface, S., 2009. Estimation of transmissivity and storage coefficient by means of a derivative method using the early-time drawdown. *Hydrogeology Journal*, v. 17, no. 7: 1679-1686.
- Theis, C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions American Geophysical Union*, v. 16: 519-524.

ANNEXE 1


LÉGENDE DE LA FIGURE 3-1 : GÉOLOGIE DU SOCLE

ROCHEUX

Paléozoïque

 Calcaire, shale, grès

Protérozoïque


 Granite et pegmatite


 Syénite, monzonite, granodiorite, diorite


 Granitoïde à pyroxène ou hornblende; charnockite, mangérite, jotunite


 Gabbro, pyroxénite, amphibolite, troctolite


 Anorthosite, anorthosite gabbroïque, gabbro, gabbro anorthositique


 Paragneiss mixte, paragneiss riche en hornblende, paragneiss quartzofeldspathique, amphibolite, quartzite

 Migmatite, migmatite à trame de gneiss du complexe gneissique ou de paragneiss mixte

 Gneiss charnockitique (principalement orthogneiss)

 Gneiss granodioritique, amas granitique, parfois rubané et oeilé, roche granitoïde, foliée ou migmatisée

 Complexe gneissique: gneiss gris à quartz-plagioclase-biotite et/ou hornblende, homogène ou bien rubané; gneiss associé riche en hornblende et/ou biotite; amphibolite; tonalite foliée

 Lacs et rivières

ANNEXE 2

LÉGENDE DE LA FIGURE 3-3 : GÉOLOGIE DES DÉPÔTS MEUBLES

DÉPÔTS DE VERSANT

- Cl **Grèzes litées** : cailloutis sablo-graveleux substratifiés à stratifiés, formant des cônes et des tabliers au pied d'escarpement rocheux.
- Ce **Dépôts d'éboulis** : cailloux et blocs anguleux gélifractés; formant des cônes ou des tabliers au pied d'escarpements rocheux.
- Ca **Dépôts d'avalanches** : cailloux et blocs anguleux gélifractés et déposés au droit de couloirs d'avalanches le long d'escarpements rocheux.
- Cr **Dépôts de glaciers rocheux** : cailloux et blocs anguleux à subanguleux, mis en place sur des pentes raides et se déformant plastiquement par la présence de glace interstitielle.
- Cg **Dépôts de glissement de terrain** : silts et argiles remaniés par des glissements de terrain; selon la nature du matériel recouvrant les argilo-silts marins, ces sédiments peuvent comprendre des amas de sable ou de gravier entraînés par les glissements.
- C **Dépôts de versant non différenciés**

SÉDIMENTS ORGANIQUES

- Ot **Sédiments de tourbières** : tourbe plus ou moins décomposée, déposées dans des fens ou des bogs.
- Om **Sédiments de marécages et de marais** : sédiments organiques souvent riches en particules minérales, déposés dans des milieux palustres à plan d'eau ouvert (étang).
- O **Sédiments organiques non différenciés**

DÉPÔTS ÉOLIENS

- Ed **Sédiments éoliens** : sable fin à stratifications obliques diffuses mis en place par le vent sous forme de dunes paraboliques formées à la surface des sédiments littoraux et alluviaux fraîchement exondés pouvant contenir des horizons organiques tels des paléosols.
- Ei **Loess** : silt ou silt sableux massif mis en place par le vent; généralement en placages minces.

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

- Ap **Alluvions actuelles** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant fréquemment de la matière organique.
- Ac **Cône alluvial** : galets, graviers, sables stratifiés formant des cônes plus ou moins inclinés au débouché de cours d'eau sur un terrain plus plat.
- Ae **Sédiments estuariens anciens** : silt, silt sableux, sable contenant généralement des fragments organiques; structure massive, sublaminée ou rythmique.
- At **Alluvions des terrasses fluviales** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier contenant (ou non) de la matière organique, surface généralement marquée par des levées et barres alluviales et parfois remaniée par l'action éolienne.
- Ax **Alluvions de terrasses anciennes** : sable, silt sableux et gravier contenant un peu de matières organiques, déposées dans des zones débordant des couloirs fluviaux actuels. Surface généralement marquée par des levées et barres alluviales et parfois remaniée par l'action éolienne.
- A **Alluvions non différenciées**

SÉDIMENTS LACUSTRES

- Ld **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés; mis en place à l'embouchure des cours d'eau; formant des surfaces planes généralement marquées par des chenaux abandonnés, et parfois remaniées en surface par l'action éolienne.
- Lb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; mis en place en eaux peu profondes lors de la phase plénilacustre et lors de l'exondation; surface généralement marquée par des cordons littoraux ou pré-littoraux et parfois remaniée par l'action éolienne; forment souvent une couverture mince reposant sur des sédiments d'eau profonde.
- La **Sédiments fins d'eau profonde** : silt et argile, généralement laminés, constituant parfois des rythmites.
- L **Sédiments lacustres non différenciés**

SÉDIMENTS MARINS

- Mi **Sédiments intertidaux** : silt et silt sableux, généralement massifs ou faiblement stratifiés; mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités, souvent à proximité de grands complexes deltaïques.
- Md **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés; mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans la mer; comprenant localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques.
- Mb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénimarine et lors de l'exondation; surface généralement marquée par des cordons littoraux ou *pré-littoraux et parfois remaniée par l'action éolienne; lorsqu'il s'agit de faciès d'exondation, ces sédiments forment généralement une couverture mince sur les sédiments d'eau profonde.*
- Ma **Sédiments fins d'eau profonde** : silt argileux et argile silteuse, gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites; mis en place principalement par décantation durant la phase d'inondation marine.
- M **Sédiments marins non différenciés**

SÉDIMENTS GLACIOMARINS

- MGi **Sédiments intertidaux** : silt et silt sableux, généralement massifs ou faiblement stratifiés; mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités, souvent à proximité de grands complexes deltaïques.
- MGd **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable graveleux et gravier, stratifiés et bien triés; mis en place à l'embouchure de cours d'eau se déversant dans la mer; comprenant localement des sédiments silto-sableux prodeltaïques.
- MGb **Sédiments littoraux et pré-littoraux** : sable, silt sableux, sable graveleux et gravier stratifiés et généralement bien triés; mis en place en eau peu profonde; surface généralement marquée par des cordons littoraux ou pré-littoraux et parfois remaniée par l'action éolienne.
- MGa **Sédiments fins d'eau profonde** : silt argileux et argile silteuse, gris moyen à gris foncé, massifs, laminés ou stratifiés, comprenant localement des rythmites; mis en place principalement par décantation durant la phase d'inondation glaciomarine.
- MG **Sédiments glaciomarins non différenciés**

SÉDIMENTS GLACIOLACUSTRES

- LGd **Sédiments deltaïques et prodeltaïques** : sable, sable grossier et sable graveleux; mis en place à l'embouchure des cours d'eau qui se déversaient dans le lac proglaciaire; montrant une surface plane généralement marquée par des chenaux abandonnés et parfois modifiée par l'action éolienne.
- LGb **Sédiments littoraux et pré littoraux** : sable, sable silteux, gravier sableux et blocs; sédiments remaniés le long des rives et à l'intérieur du lac glaciaire; montrant une surface parfois marquée par des cordons littoraux ou pré littoraux ou modifiée par l'action éolienne.
- LGa **Sédiments fins d'eau profonde** : silt, rythmites argilo-silteuses, varves.
- LG **Sédiments glaciolacustres non différenciés**




SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

- Go **Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien** : sable, gravier et blocs montrant une décroissance granulométrique générale vers l'aval; formant des replats et des plaines d'épandage dont la surface est souvent marquée par d'anciens chenaux sinueux et peu profonds.
- Gs **Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique** : sable et sable silteux, un peu de gravier; formant des amas mis en place en eau plus ou moins profonde au bout de tunnels sous- ou intra- glaciaires débouchant dans le lac ou la mer; parfois exposés sous les sédiments marins ou glaciolacustres dans les sablières, gravières ou coupes naturelles.
- Gx **Sédiments juxtaglaciaires** : sable et gravier, blocs, un peu de till ou de diamicton; formant des eskers, des kames, des deltas- kames et des crêtes morainiques dont la surface est généralement bosselée.
- Gxl **Sédiments juxtaglaciaires interlobaires** : gravier, sable et blocs mis en place au sein de la moraine Interlobaire.
- GxT **Sédiments de moraine frontale**: till, diamicton, blocs, sable et gravier; mis en place au front du glacier; constitués d'une ou plusieurs crêtes dont la surface est généralement bosselée et parsemée de blocs.
- G **Sédiments proglaciaires non différenciés**







SÉDIMENTS GLACIAIRES

- Tf **Till de fusion ou d'ablation** : diamicton à matrice lâche et généralement délavée et dont l'épaisseur dépasse généralement 1 m; surface généralement ponctuée de nombreux cailloux et blocs.
- Tm **Till remanié en couverture discontinue** : diamicton comprenant principalement des faciès de fond ou d'ablation remaniés par les vagues et courants sous la limite maximum de la mer ou du lac. Moins de 1 m d'épaisseur, la surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux.
- Tr **Till remanié en couverture continue** : diamicton dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et les courants sous la limite maximum de la mer ou du lac. Parfois fossilifère et comprenant des niveaux sablo-graveleux stratifiés ou substratifiés.
- Tc **Till en couverture généralement continue** : diamicton comprenant des faciès de fond et d'ablation; épaisseur supérieure à 1 m; en surface.
- Tm **Till en couverture mince et discontinue** : diamicton comprenant principalement des faciès d'ablation de moins de 1 m d'épaisseur et dont la surface est généralement ponctuée d'affleurements rocheux; la structure du roc sous-jacent. Unité présente principalement dans les régions de socle.
- T **Till non différencié**

QUATERNAIRE ANCIEN

-  Q **Formations quaternaires anciennes non-différenciées** : antérieures au Wisconsinien supérieur.
-  Qa **Formations quaternaires anciennes altérées** : formations altérées non recouvertes par les glaciers du Wisconsinien supérieur ou préservées en dépit de leur recouvrement par les glaciers wisconsinien.
-  Qf **Felsenmeer** : champs de blocs principalement géoliffractés formés sur les hauts plateaux et recouvrant une mosaïque d'affleurements rocheux et de tills oxydés; présence généralisée de cercles de pierres, d'ostioles et de sols striés; présence occasionnelle de blocs erratiques au sein de blocs d'origine locale.

SUBSTRAT ROCHEUX

-  R **Roche non différenciée**
-  Ri **Roches ignées intrusives**
-  Rs **Roches sédimentaires et/ou volcaniques, généralement subhorizontales**
-  Rd **Roches métasédimentaires et/ou métavolcaniques déformées**
-  Rm **Roches métamorphiques de haut grade**
-  Lacs et rivières

ANNEXE 3

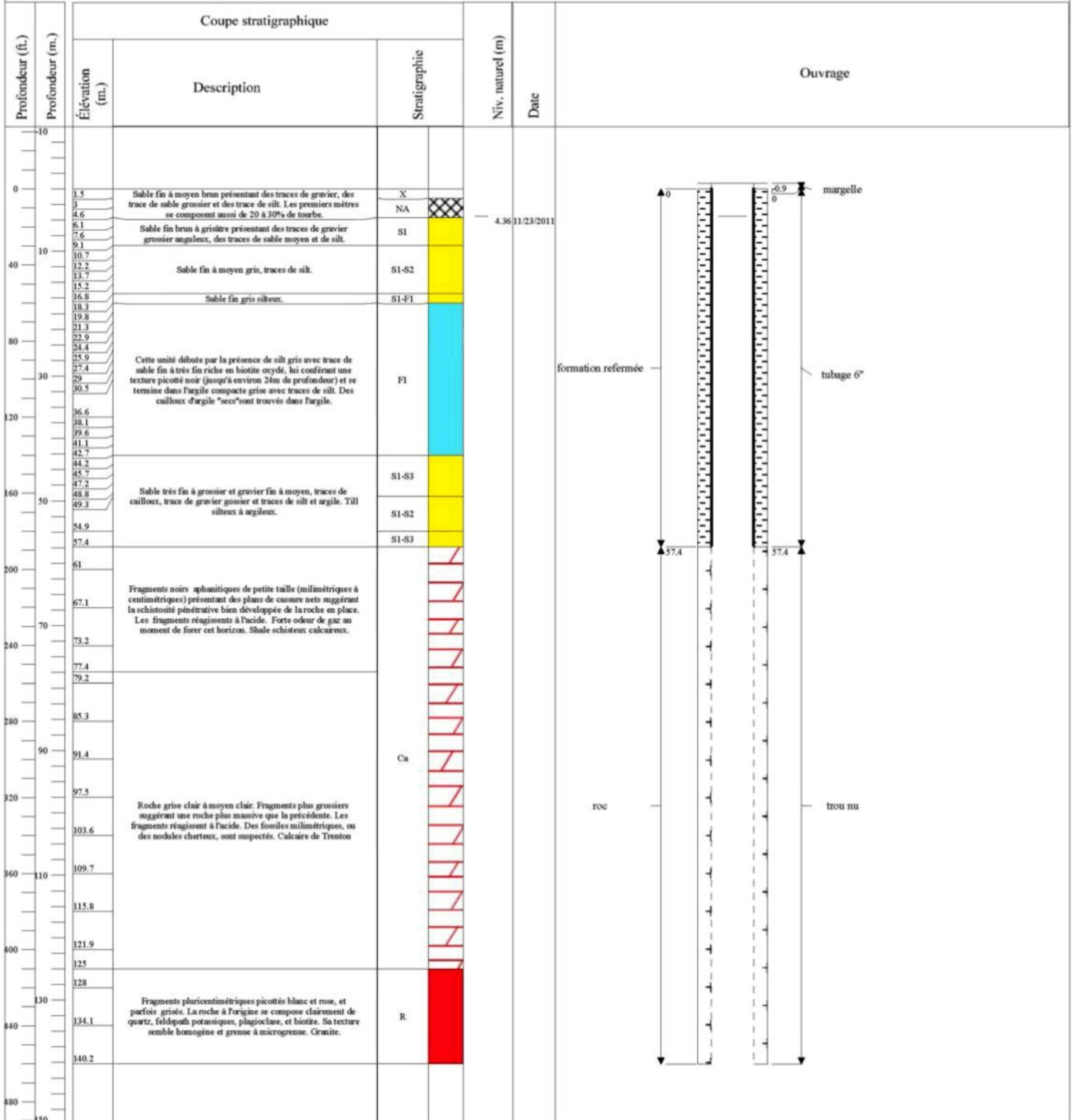
AMÉNAGEMENTS PIÉZOMÉTRIQUES DES SITES

DOUBLES DU PACES-SLSJ

Coordonnées X : 179981.47 (m)
Y : 5406834.83 (m)
Système: MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

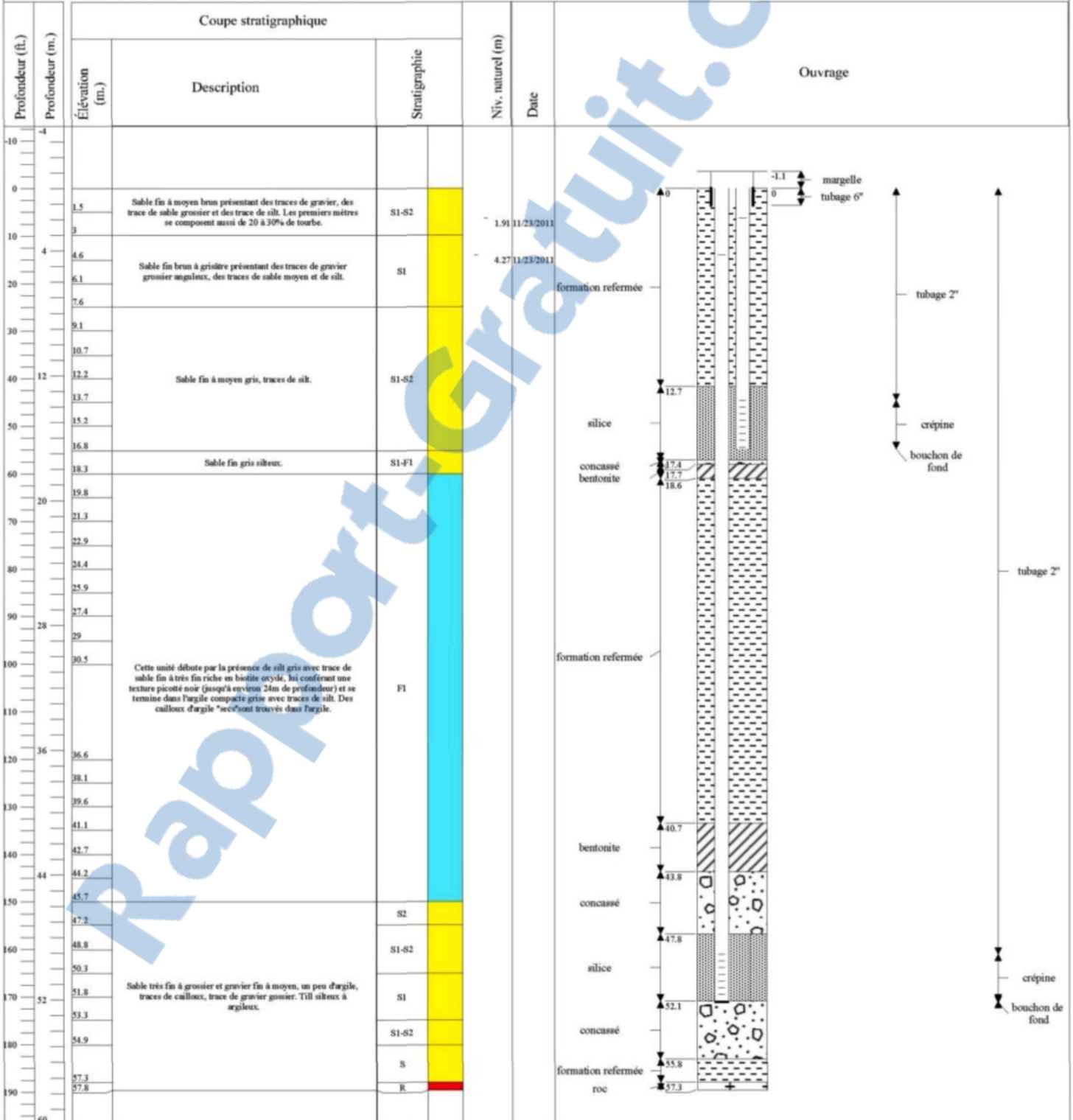
Altitude au sommet du tubage: 124.394 (m)



Coordonnées X : 179977.76 (m)
Y : 5406833.2 (m)
Système: MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

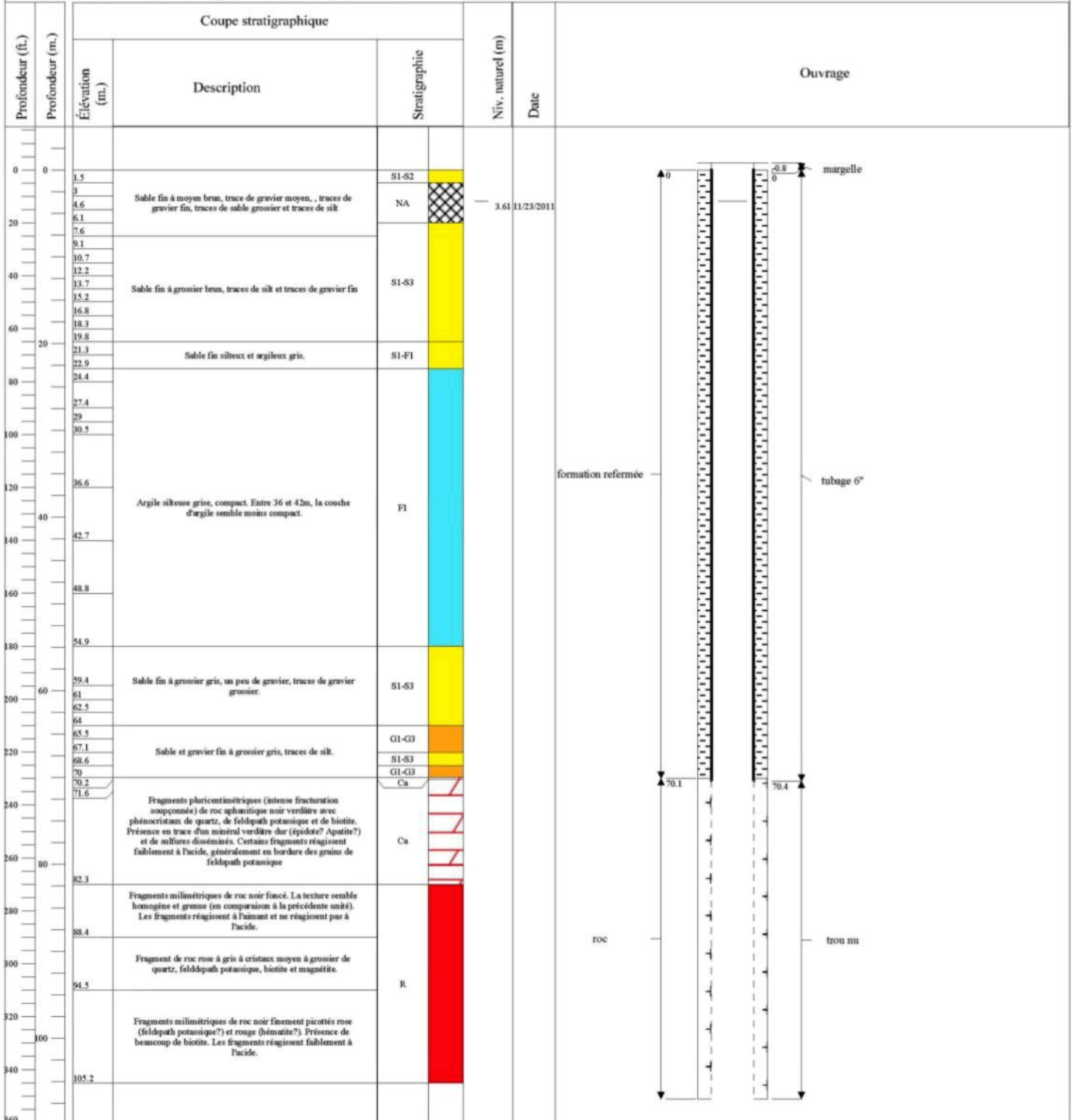
Altitude au sommet du tubage: 124.441 (m)



Coordonnées X : 166207.77 (m)
Y : 5403920.25 (m)
Système:MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

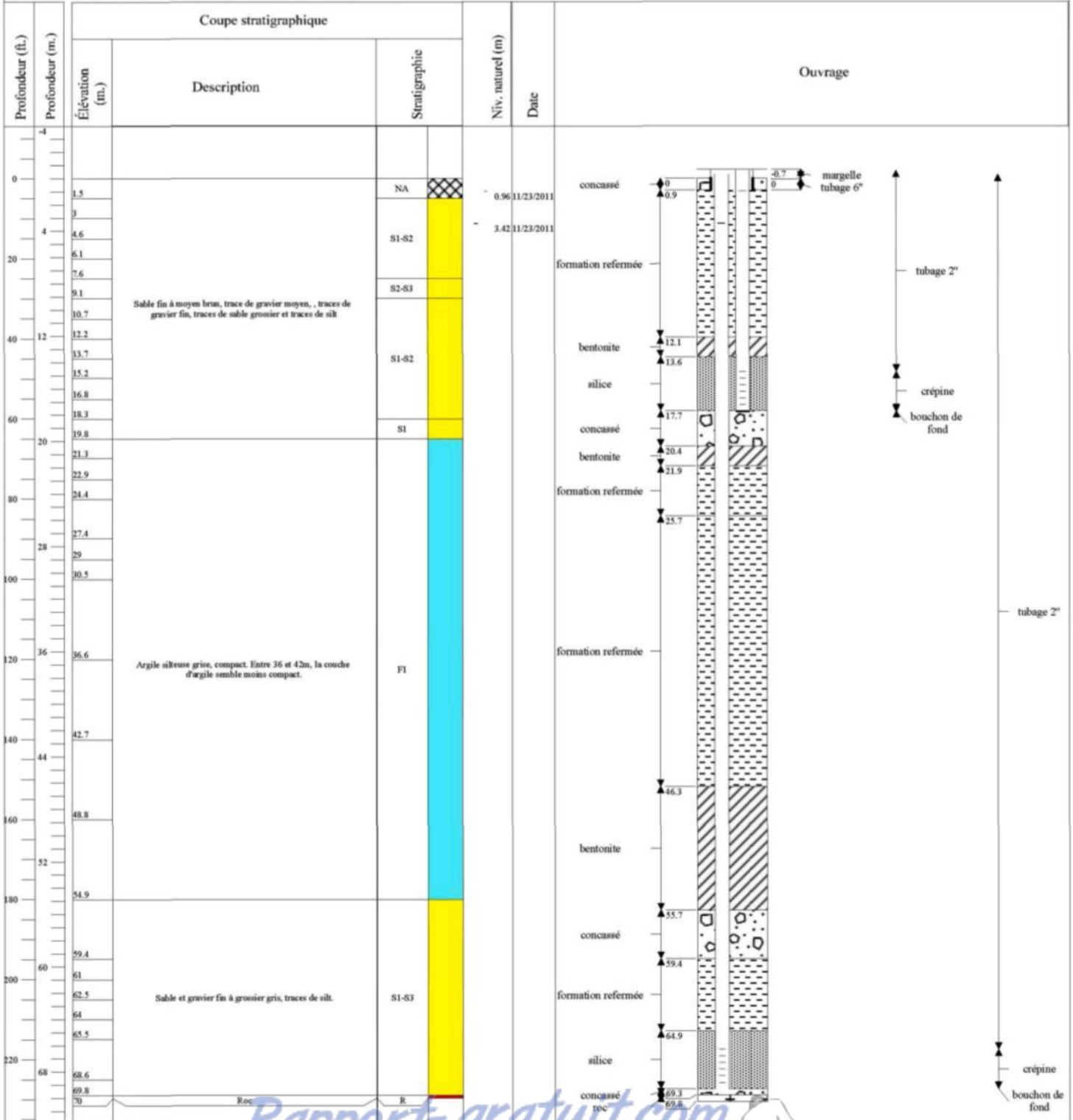
Altitude au sommet du tubage: 108.493 (m)



Coordonnées X : 166210.18 (m)
Y : 5403924.74 (m)
Système: MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

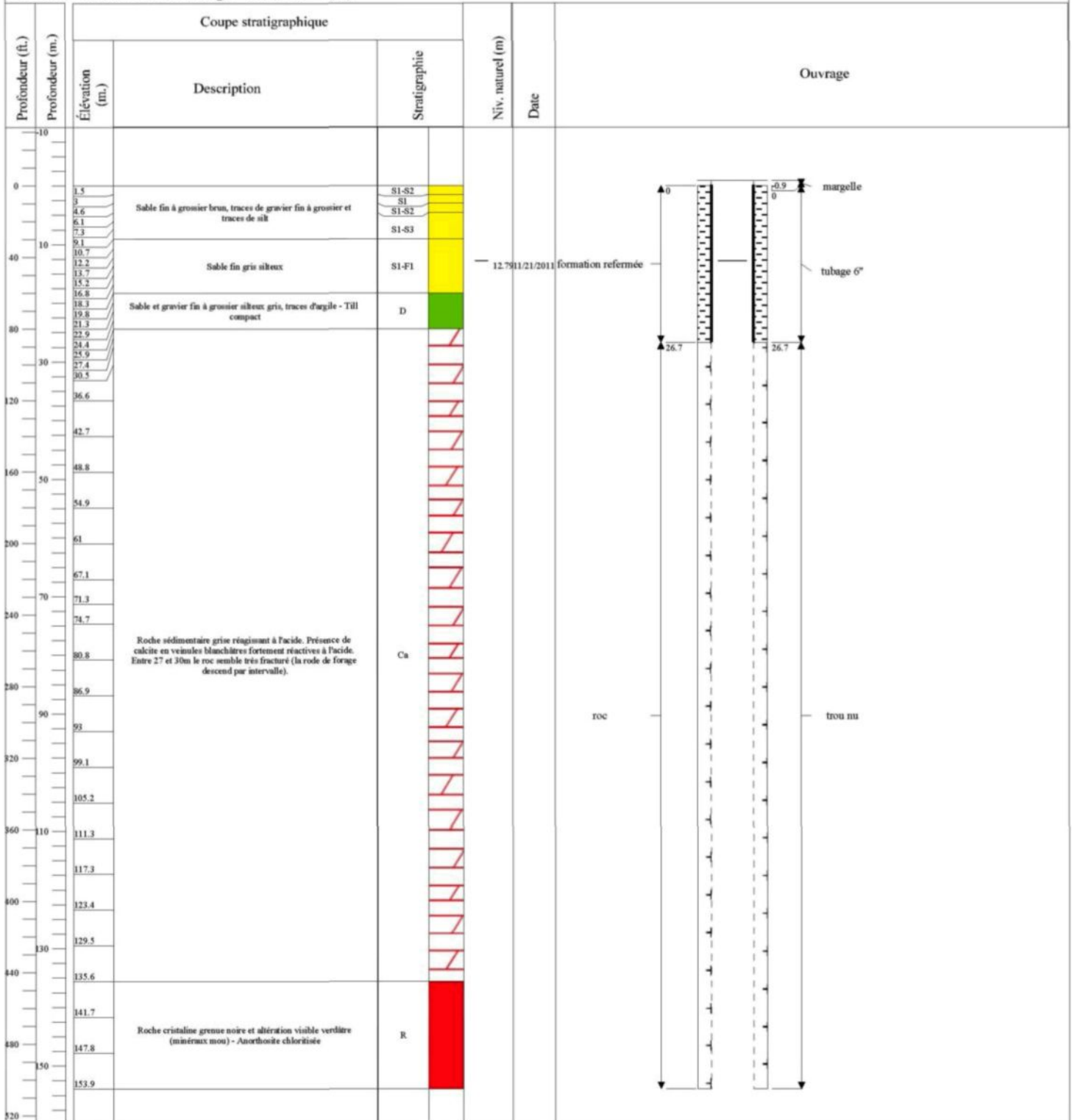
Altitude au sommet du tubage: 108.453 (m)



Coordonnées X : 255033.85 (m)
Y : 5390451.94 (m)
Système:MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

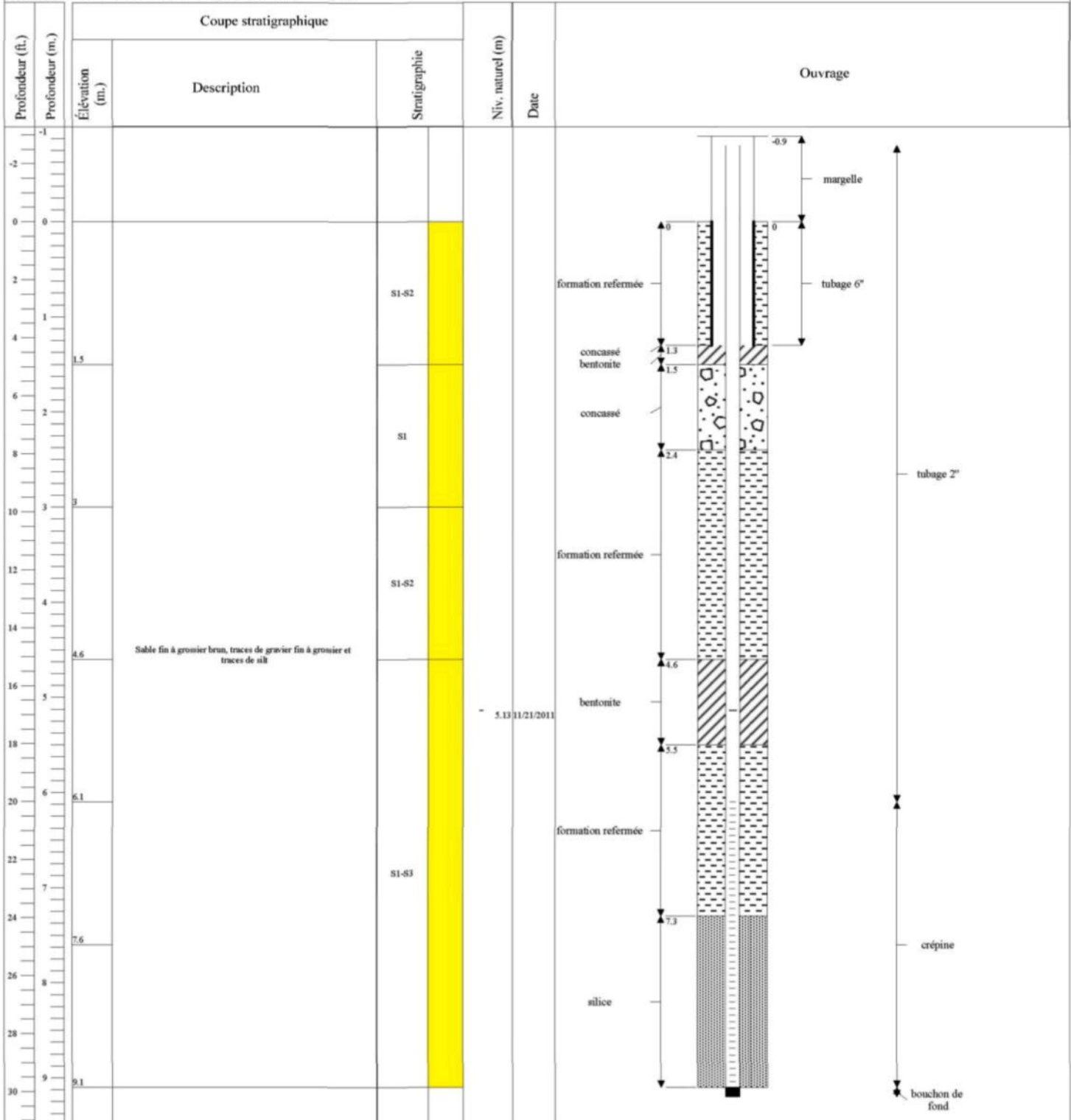
Altitude au sommet du tubage: 185.713 (m)



Coordonnées X : 255031.65 (m)
Y : 5390453.26 (m)
Système:MTM
Zone: 7

Rapport de Forage

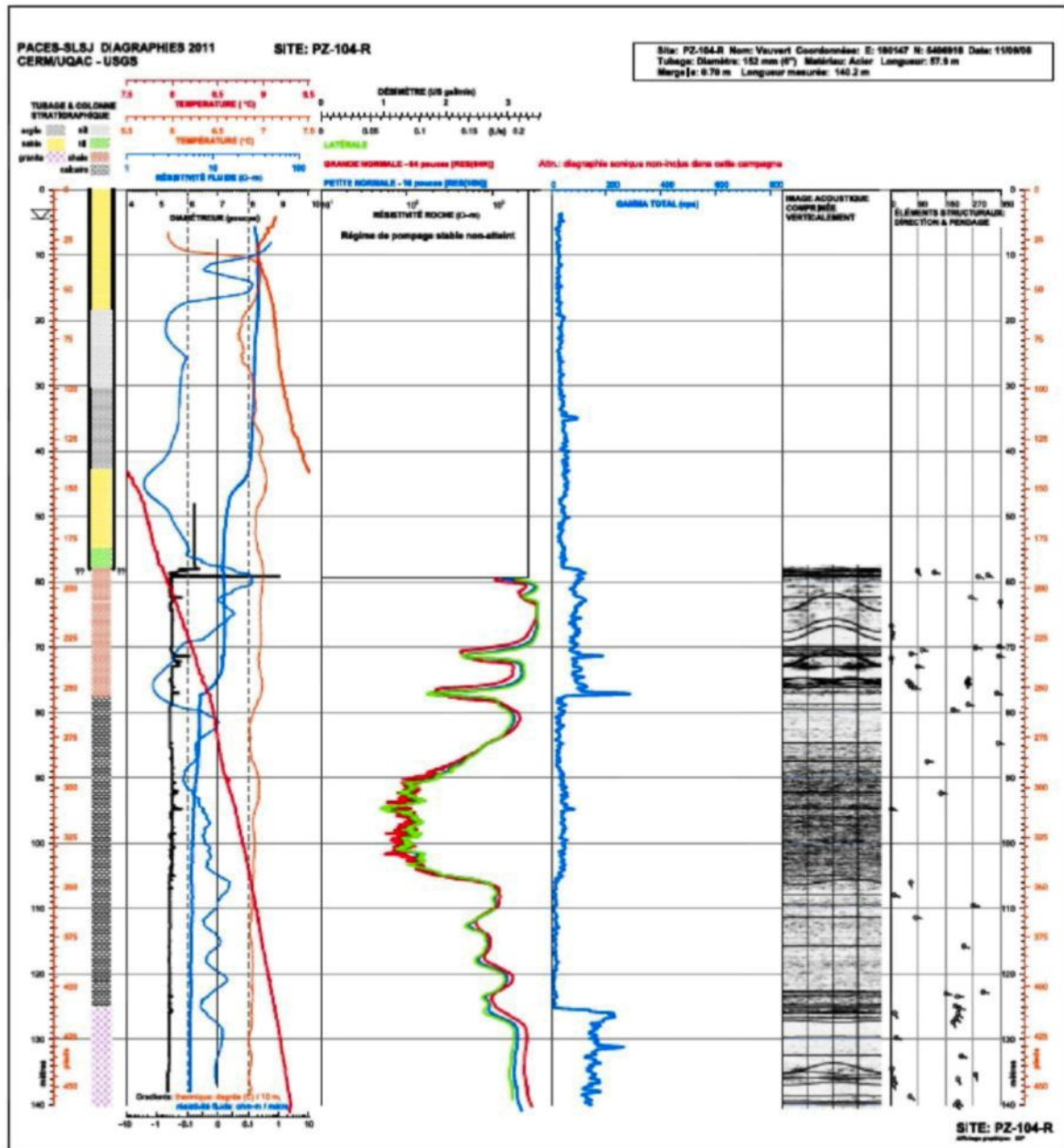
Altitude au sommet du tubage: 185.413 (m)



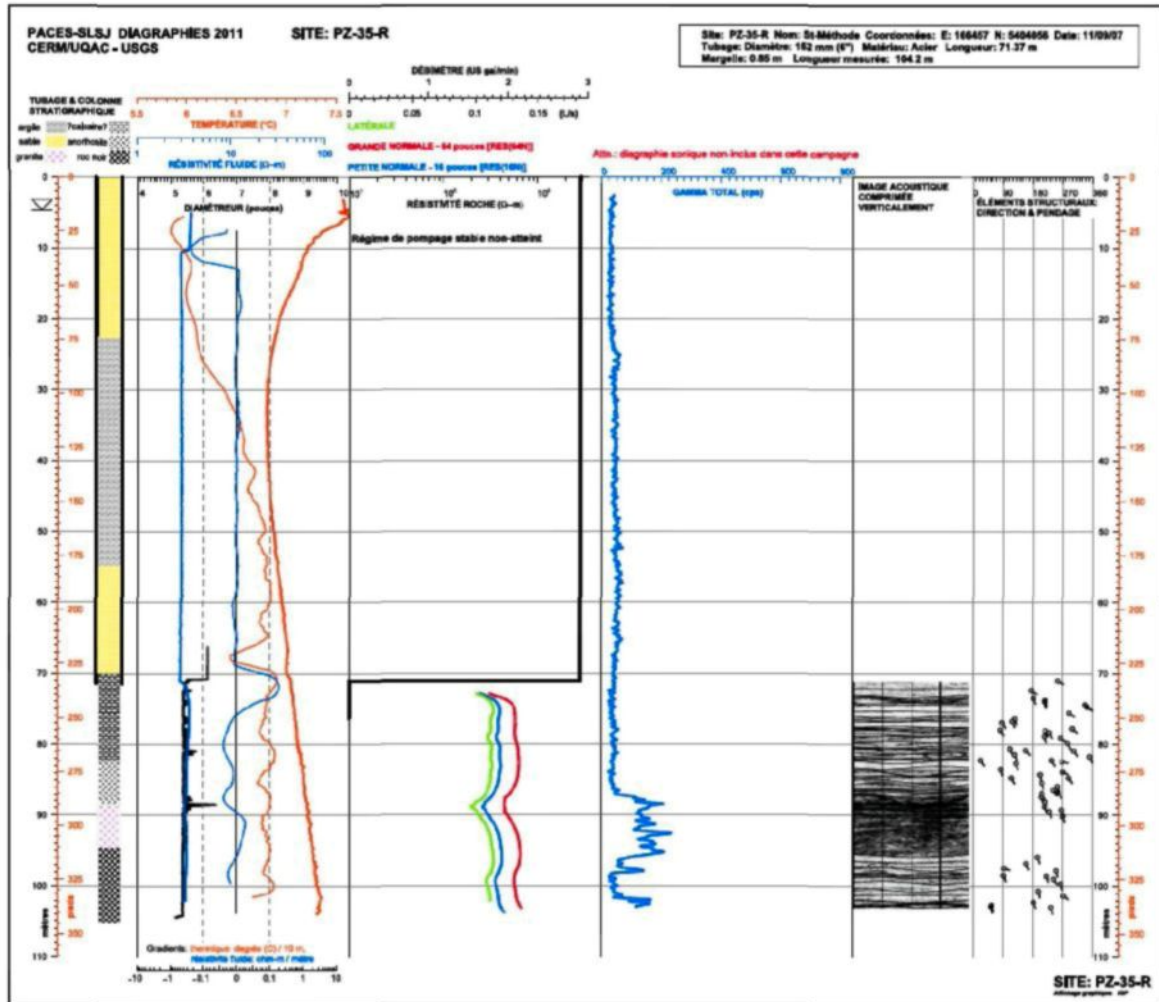
ANNEXE 4

RÉSULTATS DES DIAGRAPHIES EN FORAGE

Résultats de la diagraphie réalisée dans le piézomètre aménagé dans le roc au site de Vauvert



Résultats de la diagraphie réalisée dans le piézomètre aménagé dans le roc au site de Saint-Méthode



Résultats de la diagraphie réalisée dans le piézomètre aménagé dans le roc au site de Saint-David-de-Falardeau

