



Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
INRS-Géoresources

Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien

Par

Daniel Paradis

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe

Michel Ouellet, M.Sc., ing.
Ministère de l'Environnement

Examineur interne

René Therrien, Ph.D.
Université Laval

Codirecteur de recherche et
examineur interne

René Lefebvre, Ph.D.
INRS-Géoresources

Codirecteur de recherche

Yves Michaud, Ph.D.
Commission géologique du Canada

Directeur de recherche

Richard Martel, Ph.D., ing.
INRS-Géoresources

Septembre 2000

© droits réservés de *Daniel Paradis*, 2000

Résumé

Les activités humaines sont souvent la cause de la dégradation des sources d'eau potable. Depuis plusieurs années, certaines municipalités ont connu des problèmes de qualité de leur eau souterraine suite à la contamination par des agents polluants tels les chlorures, l'aldicarbe, les hydrocarbures et les nitrates. Certains ouvrages de captage municipaux ont même dû être abandonnés. La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des périmètres de protection (PDP) déterminés autour des ouvrages de captage constitue une méthode efficace de préservation de la qualité de l'eau souterraine.

Le PDP circonscrit un territoire comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ou de plusieurs ouvrages de captage (puits ou sources) et à l'intérieur duquel des contaminants peuvent migrer et éventuellement contaminer le ou les ouvrages de captage. Au Québec, le ministère de l'environnement (MENV) définit trois périmètres distincts : (1) le périmètre immédiat, visant à protéger le captage et ses équipements, correspondant à une zone clôturée de rayon minimal de 30 mètres autour du captage; (2) le périmètre rapproché, visant à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale, correspondant à un temps de transport de 60 jours ou à une distance minimale de 100 mètres à partir du captage et (3) le périmètre éloigné visant à protéger le captage contre les substances polluantes persistantes et défini par l'aire d'alimentation du captage.

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simple d'application à des méthodes très complexes et dispendieuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. La principale problématique dans l'établissement des PDP consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste de ces périmètres à partir d'un minimum d'informations et pour un minimum de coûts. Ainsi, les principaux objectifs de ce mémoire sont d'appliquer, de comparer et de valider différentes méthodes de détermination des PDP ainsi que d'évaluer l'influence de l'incertitude reliée à l'évaluation

des paramètres hydrogéologiques sur la forme et les dimensions de ces périmètres pour différents contextes hydrogéologiques de la MRC de Portneuf.

Les types d'ouvrage de captage considérés sont un réseau de puits (20 pointes filtrantes) situé à Pont-Rouge et aménagé dans les dépôts meubles ainsi qu'une zone de résurgence (sources) captée au contact d'un aquifère sableux et d'un aquitard située à Saint-Alban. Ces captages sont parmi les plus importants de la MRC de Portneuf.

L'approche utilisée pour la validation des méthodes consiste à faire le choix de la méthode qui représente le mieux le contexte hydrogéologique du site et à utiliser le périmètre obtenu par cette méthode comme base de comparaison pour la validation des autres méthodes. La comparaison des PDP éloignés est faite avec l'aire d'alimentation déterminée par cartographie hydrogéologique (piézométrie), alors que pour les PDP rapprochés cette comparaison est faite avec la zone de transport de 60 jours obtenue par modélisation numérique avec MODFLOW et MODPATH.

Les méthodes comparées sont des équations de bilan de masse (infiltration et cylindre), des équations analytiques simples (écoulement uniforme, temps de transport avec la loi de Darcy et temps de transport de Bear et Jacobs, 1965), la méthode empirique de Civita (1995), la cartographie hydrogéologique, la méthode 3A2E, la modélisation par éléments analytiques (*WhAEM*) et la modélisation numérique (MODFLOW-MODPATH).

Pour les PDP éloignés et rapprochés des sites de Pont-Rouge et de Saint-Alban, la méthode 3A2E donne les meilleurs résultats d'un point de vue précision-coûts. Dans tous les cas étudiés, le rapport d'aire commune obtenue par cette méthode est toujours supérieur à 82% et la quantité d'informations nécessaire à son utilisation est minimale. Cependant, puisque cette méthode est indépendante de l'écoulement, celle-ci doit être appliquée avec discernement. Pour une évaluation plus précise des PDP éloignés et rapprochés, la cartographie hydrogéologique et la modélisation numérique doivent être envisagées.

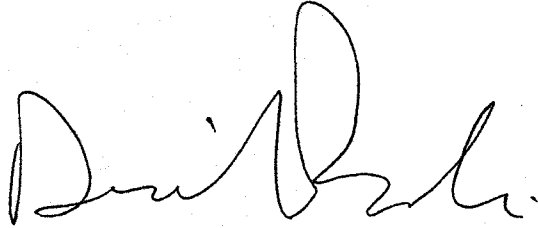
Abstract

Human activities surrounding wells and springs are often responsible for the poor quality of the drinking water obtained from groundwater. Some municipal wellfields have even been abandoned due to contamination from hydrocarbons, nitrates or other types of pollutants. The management of potential contaminant sources within wellhead protection area (WHPA) is a recognized preventive approach to preserve the quality of exploited groundwater resources. Numerous methods have been proposed for the delineation of WHPA. They range from simple to very complex and their cost varies accordingly. Until now, no comparative study has ever been conducted on WHPA delineation methods in Quebec. A need was thus felt for a comparative study that would also provide guidelines on the minimal level of characterization required and the most effective methods available for delineating a WHPA. The study covers the delineation of WHPA for wells and springs in unconfined aquifers. The study was carried out in the Portneuf area where large sand and gravel unconfined aquifers are widely used for water supply.

Two study areas were chosen, including one for wells and one for springs in different hydrogeological setting and groundwater exploitation conditions. At each site, a thorough hydrogeological characterization was carried out to provide a reference for the evaluation of the WHPA methods. The WHPA delineation methods compared include Volumetric Flow Equation, Uniform Flow Equation, Time of Travel Analytical Equation, Empirical Equation, Hydrogeologic Mapping, 3A2E Method, Analytical Element Modeling and Numerical Modeling. These methods were compared using the areas obtained for the zone of contribution (ZOC) and the 60 days zone of transport (60 d ZOT) obtained from each method. We defined a "common area ratio" as the ratio of the area of the ZOC obtained from the different WHPA methods over the area obtained from hydrogeological mapping. Similarly, a "common area ratio" for the 60 d ZOT was calculated for the area obtained by the WHPA method over the area obtained from a numerical groundwater model developed for each site.

For the ZOC and the 60 d ZOT of the Pont-Rouge and Saint-Alban sites, the 3A2E method gives the best results considering both the precision of the area delineated compared to the references as well as the ease of application of the method (amount of

data required, ease of use). In all cases, the common area ratio obtained with the 3A2E method is above 80 % and the data required for its application is minimal. However, hydrogeological mapping and numerical modeling should be considered when a more precise evaluation of the WHPA is required.



Daniel Paradis, Étudiant



Richard Martel, Directeur de
recherche

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Richard Martel pour son soutien et ses encouragements continuels. J'aimerais aussi remercier René Lefebvre particulièrement pour sa patience lors de ses explications des différentes notions d'hydrogéologie et pour la confiance qu'il m'a accordé depuis mon premier engagement à l'INRS-Géoressources à l'été 1995. Merci aussi à Yves Michaud pour son appui, son aide sur le terrain et son bon exemple de leadership.

Plusieurs autres personnes ont été impliquées dans le Projet Portneuf et ont contribué à l'avancement de ce mémoire, particulièrement Édith Bourque et Nathalie Fagnan.

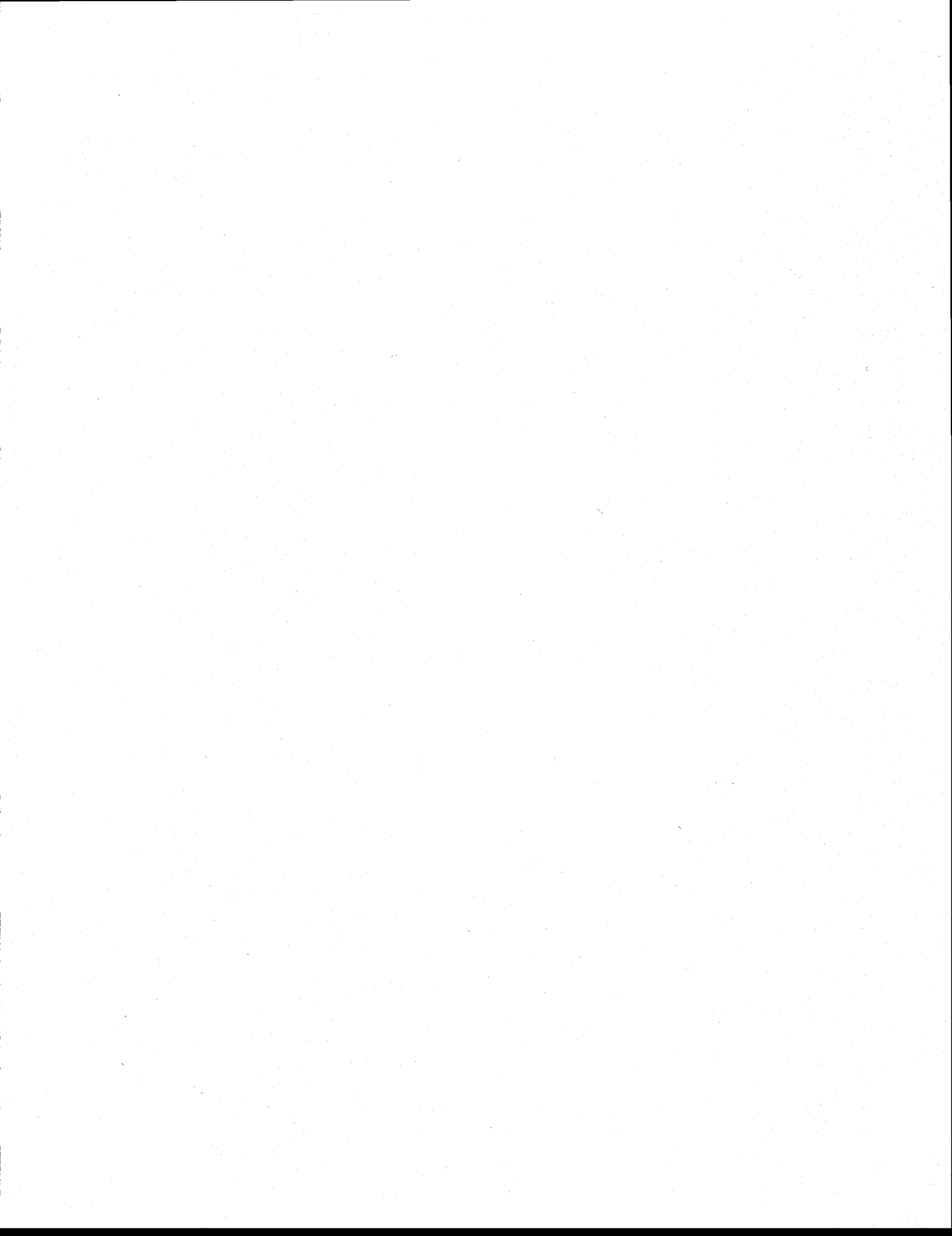
Je voudrais aussi souligner la généreuse participation financière de l'INRS-Géoressources et de la Commission géologique de Canada qui, par le biais de bourses et de salaire, m'ont permis de me concentrer sur mes travaux.

Merci.

Table des matières

Résumé.....	i
Remerciements.....	v
Table des matières	vi
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xiv
Liste des symboles	xviii
CHAPITRE 1 - Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 But et objectifs	5
1.3 Méthodologie	5
1.3.1 Choix des sites	5
1.3.2 Compilation des données existantes et travaux de terrain	6
1.3.3 Intégration et analyse des données	7
1.3.4 Choix des méthodes	7
1.3.5 Comparaison et validation des méthodes	9
1.3.6 Analyse d'incertitude	9
CHAPITRE 2 - Généralités	11
2.1 Critères de définition des périmètres de protection	11
2.1.1 Distance	12
2.1.2 Rabattement	12
2.1.3 Limites d'écoulement	12
2.1.4 Temps de transport	14
2.1.5 Capacité d'atténuation du sol	14
2.2 Méthodes de détermination des périmètres de protection	15
2.2.1 Méthodes avec calculs simples	15
2.2.2 Cartographie hydrogéologique	25
2.2.3 Méthodes combinées	26
2.2.4 Modèles semi-analytiques	29
2.2.5 Modèles numériques	30

2.3 Paramètres géométriques de comparaison	33
2.4 Analyse d'incertitude	35
CHAPITRE 3 - Application des méthodes de détermination des périmètres de protection : les puits de Pont-Rouge	37
3.1 Description du site	38
3.1.1 Contexte physique	38
3.1.2 Contexte hydrogéologique.....	44
3.1.3 Sources potentielles de contamination	57
3.2 Calcul des périmètres de protection	58
3.2.1 Périmètres de protection éloignés	58
3.2.2 Périmètres de protection rapprochés	73
CHAPITRE 4 - Application des méthodes de détermination des périmètres de protection : les sources de Saint-Alban	79
4.1 Description du site	80
4.1.1 Contexte physique	80
4.1.2 Contexte hydrogéologique	86
4.1.3 Sources potentielles de contamination	95
4.2 Calcul des périmètres de protection	96
4.2.1 Périmètres de protection éloignés	96
4.2.2 Périmètres de protection rapprochés	106
CHAPITRE 5 - Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection	111
5.1 Périmètres de protection éloignés	112
5.2 Périmètres de protection rapprochés	116
CHAPITRE 6 - Analyse d'incertitude	121
6.1 Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)	122
6.2 MODFLOW-MODPATH	125
CHAPITRE 7 - Conclusion et recommandations	131
Références	137



Annexes

Annexe A – Topographie : site des puits municipaux de Pont-Rouge	143
Annexe B – Géologie du socle rocheux : région de Grondines et de Portneuf	145
Annexe C – Géologie des formations superficielles : site des puits municipaux de Pont-Rouge	147
Annexe D – Piézométrie : site des puits municipaux de Pont-Rouge (Période de mesure : mi-juillet à mi-août 1997).....	149
Annexe E – Description des points de mesure de niveau d'eau : site des puits municipaux de Pont-Rouge	151
Annexe F – Base imperméable de l'aquifère : site des puits municipaux de Pont-Rouge	156
Annexe G – Description des points de contrôle de la base imperméable de l'aquifère : site des puits municipaux de Pont-Rouge	158
Annexe H – Essais de perméabilité <i>in situ</i> : site des puits municipaux de Pont-Rouge.....	161
Annexe I – Schémas d'aménagements des puits de l'essai de pompage de Pont-Rouge (Automne 1997)	180
Annexe J – Données de l'essai de pompage et de l'essai de récupération de Pont-Rouge (Automne 1997)	185
Annexe K – Utilisation du sol et sources potentielles de contamination : site des puits municipaux de Pont-Rouge.....	194
Annexe L - Topographie : site des sources municipales de Saint-Alban	196
Annexe M - Géologie des formations superficielles : site des sources municipales de Saint-Alban	198
Annexe N – Piézométrie : site des sources municipales de Saint-Alban	200
Annexe O - Description des points de mesure de niveau d'eau : site des sources municipales de Saint-Alban	202
Annexe P – Schémas d'aménagements des piézomètres : instrumentation des sources municipales de Saint-Alban (Automne 1997)	207
Annexe Q – Essais de perméabilité <i>in situ</i> : site des sources municipales de Saint-Alban	223
Annexe R – Mesures de niveaux d'eau : site des sources municipales de Saint-Alban (Décembre 1997 à Octobre 1998)	236

Annexe S - Utilisation du sol : site des sources municipales de Saint-Alban238

**Pochette 1 : Carte synthèse : périmètres de protection éloignés et rapprochés du site
des puits municipaux de Pont-Rouge240**

**Pochette 2 : Carte synthèse : périmètres de protection éloignés et rapprochés du site
des sources municipales de Saint-Alban242**

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Méthodes de détermination des PDP utilisées pour les puits de Pont-Rouge.....	8
Tableau 1.2	Méthodes de détermination des PDP utilisées pour les sources de Saint-Alban.....	8
Tableau 2.1	Classes de vulnérabilité des sources à la contamination selon le DTDM et corrélation avec les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine (d'après Civita, 1995).....	22
Tableau 2.2	Dimensions des PDP immédiats pour différents types d'ouvrages de captage des sources (modifiée d'après Civita, 1995).....	24
Tableau 2.3	Dimensions du PDP rapproché pour les différentes classes de vulnérabilité des sources à la contamination (d'après Civita, 1995).....	24
Tableau 2.4	Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode 3A2E pour les puits.....	28
Tableau 2.5	Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode 3A2E pour les sources.....	28
Tableau 3.1	Conditions climatiques à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier de 1964 à 1990.....	41
Tableau 3.2	Valeurs utilisées pour l'évaluation du bilan hydrologique à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier.....	42
Tableau 3.3	Composantes du bilan hydrologique à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier pour la période de 1964 à 1990.	43
Tableau 3.4	Volumes d'eau pompés aux puits municipaux de Pont-Rouge de janvier 1993 à décembre 1997.....	44
Tableau 3.5	Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage des niveaux d'eau de l'aquifère de Pont-Rouge.....	45
Tableau 3.6	Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge.....	47
Tableau 3.7	Description des forages stratigraphiques effectués sur le site des puits municipaux de Pont-Rouge (D'après GÉOHYDROTEK, 1991).....	48
Tableau 3.8	Caractéristiques des installations et des essais de perméabilité <i>in situ</i> (les valeurs en italiques sont des estimations).....	51

Tableau 3.9	Description des installations utilisées pour l'essai de pompage.....	52
Tableau 3.10	Paramètres hydrauliques obtenues par la méthode de Theis.....	54
Tableau 3.11	Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisés par le programme WhAEM pour le calcul du PDP éloigné des puits de Pont-Rouge.....	62
Tableau 3.12	Niveaux de calibration pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	62
Tableau 3.13	Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	63
Tableau 3.14	Sommaire des erreurs pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	63
Tableau 3.15	Niveaux de calibration pour la modélisation avec MODFLOW aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	67
Tableau 3.16	Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	68
Tableau 3.17	Sommaire des erreurs pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	68
Tableau 3.18	Bilan de masse du modèle numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des puits municipaux de Pont-Rouge.....	69
Tableau 3.19	Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisées pour l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).....	73
Tableau 3.20	Niveaux de calibration pour le modèle numérique local (MODFLOW) de l'aquifère des puits municipaux de Pont-Rouge.....	75
Tableau 3.21	Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).....	75
Tableau 3.22	Sommaire des erreurs pour le modèle numérique local (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).....	75
Tableau 3.23	Bilan de masse du modèle numérique local (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	75
Tableau 4.1	Conditions climatiques à la station météorologique de Saint-Alban de 1961 à 1990.....	83

Tableau 4.2	Valeurs utilisées pour l'évaluation du bilan hydrologique à la station météorologique de Saint-Alban.....	83
Tableau 4.3	Composantes du bilan hydrologique à la station météorologique de Saint-Alban pour la période de 1960 à 1990.....	84
Tableau 4.4	Débits journaliers mesurés, volumes et débits moyen annuels estimés aux sources S4 et S6 pour la période du 14 novembre 1997 au 30 septembre 1998.....	87
Tableau 4.5	Paramètres d'interpolation pour le krigeage des niveaux d'eau de l'aquifère de Saint-Alban.....	88
Tableau 4.6	Forages stratigraphiques utilisés pour l'estimation de l'épaisseur saturée de l'aquifère de Saint-Alban.....	89
Tableau 4.7	Caractéristiques des installations et des essais de perméabilité in situ pour l'évaluation de la conductivité hydraulique de l'aquifère de Saint-Alban (les valeurs en italiques sont des estimations).....	91
Tableau 4.8	Valeurs des paramètres utilisées pour le calcul de la recharge par la méthode de séparation d'hydrogramme de puits aux sources de Saint-Alban (les valeurs en italiques sont des estimations).....	92
Tableau 4.9	Valeurs des paramètres utilisées pour le calcul de la recharge par la méthode de séparation d'hydrogramme de source à Saint-Alban.....	94
Tableau 4.10	Niveaux de calibration pour la modélisation numérique (MODFLOW) pour les sources de Saint-Alban.....	99
Tableau 4.11	Comparaison entre les charges hydrauliques mesurées et calculées par MODFLOW aux différents points de contrôles de l'aquifère des sources de Saint-Alban.....	100
Tableau 4.12	Sommaire des erreurs de calibration pour la modélisation numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des sources de Saint-Alban.....	100
Tableau 4.13	Bilan de masse du modèle numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des sources de Saint-Alban.....	101
Tableau 4.14	Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisées pour l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).....	106
Tableau 5.1	Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des puits municipaux de Pont-Rouge.....	112
Tableau 5.2	Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des sources municipales de Saint-Alban.....	112

Tableau 5.3	Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge.....	116
Tableau 5.4	Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des sources municipales de Saint-Alban (N.A. = Non applicable).....	116
Tableau 6.1	Valeurs minimales, médianes et maximales de la conductivité hydraulique et de la porosité efficace.....	122
Tableau 6.2	Dimensions des PDP éloignés des puits de Pont-Rouge calculées par l'équation d'écoulement uniforme pour les valeurs minimale, médiane et maximale de la conductivité hydraulique.....	123
Tableau 6.3	Dimensions des PDP rapprochés calculées par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) pour différentes permutations de conductivité hydraulique et de porosité efficace.....	123
Tableau 6.4	Erreurs moyennes, absolues et RMS calculées pour différentes valeurs de conductance du lit de l'étang près des puits de Pont-Rouge.....	126
Tableau 6.5	Erreurs moyennes, absolues et RMS calculées pour différentes valeurs de conductivité hydraulique (K) près des puits de Pont-Rouge.....	126
Tableau 6.6	Erreurs moyennes, absolues et RMS pour différentes permutations de la conductance du lit de l'étang (C) et de la conductivité hydraulique (K) aux puits municipaux de Pont-Rouge.....	127
Tableau 6.7	Dimensions des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge calculés pour différentes permutations de conductance, de conductivité hydraulique et de porosité efficace avec MODFLOW-MODPATH.....	128

Liste des figures

Figure 2.1	Relation entre la zone d'influence (ZI), la zone de contribution (ZC), la zone de transport (ZT) et la zone d'atténuation (ZA) (d'après USEPA, 1987).....	13
Figure 2.2	Zone de contribution déterminée par l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980) (d'après USEPA, 1987).....	18
Figure 2.3	Zone de transport déterminée par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).....	21
Figure 2.4	Forme générale des PDP déterminée par les équation d'infiltration et du cylindre : (a) pour un puits; (b) pour une source.....	21
Figure 2.5	Hydrogramme de source type (modifié d'après Civita, 1995).....	23
Figure 2.6	Forme générale des PDP immédiat et rapproché selon la méthode de l'hydrogramme de source (Civita, 1995).....	23
Figure 2.7	Détermination de l'aire d'alimentation d'une source à l'aide de la piézométrie (cartographie hydrogéologique).....	25
Figure 2.8	Détermination d'un périmètre de protection par la méthode 3A2E.....	27
Figure 2.9	Détermination des PDP par MODFLOW-MODPATH.....	31
Figure 2.10	Paramètres géométriques de comparaison.....	34
Figure 2.11	Zones de confiance et d'incertitude des différents PDP générés.....	36
Figure 3.1	Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge.....	39
Figure 3.2	Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge par rapport à la physiographie de la MRC de Portneuf (d'après Fagnan, 1998).....	40
Figure 3.3	Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge par rapport aux bassins hydrologiques de la MRC de Portneuf.....	40
Figure 3.4	Semi-variogramme des niveaux d'eau utilisé pour l'interpolation par krigeage de la carte piézométrique de l'aquifère de Pont-Rouge.....	46
Figure 3.5	Semi-variogramme utilisé pour l'interpolation par krigeage de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge.....	47
Figure 3.6	Levé de géoradar Pneuif 14.....	49

Figure 3.7	Données de pompage des puits d'observation Pz2 et P-A montrant l'influence du drainage retardé.....	53
Figure 3.8	Ajustement d'une courbe de Theis aux données tardives de l'essai de pompage au puits d'observation Pz2.....	55
Figure 3.9	Ajustement d'une courbe de Theis aux données tardives de l'essai de pompage du puits d'observation P-A.....	55
Figure 3.10	Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de puits.....	56
Figure 3.11	Coupe piézométrique montrant la limite d'écoulement en aval des puits municipaux de Pont-Rouge.....	59
Figure 3.12	Distribution des éléments analytiques (<i>WhAEM</i>) utilisés pour le calcul des PDP des puits de Pont-Rouge.....	61
Figure 3.13	Superposition des cartes piézométriques produites à partir des charges calculées (<i>WhAEM</i>) et mesurées (Annexe D) et distribution spatiale des niveaux de calibration au site des puits municipaux de Pont-Rouge.....	64
Figure 3.14	Charges hydrauliques calculées par le programme <i>WhAEM</i> en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.....	65
Figure 3.15	Charges hydrauliques résiduelles obtenues par le programme <i>WhAEM</i> en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.....	65
Figure 3.16	Discrétisation de l'aquifère de Pont-Rouge pour la modélisation des PDP avec MODFLOW.....	70
Figure 3.17	Carte de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge pour la modélisation avec MODFLOW.....	70
Figure 3.18	Zones de conductivité hydraulique de l'aquifère de Pont-Rouge utilisées pour la modélisation des PDP avec MODFLOW.....	71
Figure 3.19	Cartes piézométriques produites par MODFLOW et par cartographie pour l'aquifère de Pont-Rouge et distribution spatiale des niveaux de calibration.....	71
Figure 3.20	Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.....	72
Figure 3.21	Charges hydrauliques résiduelles obtenues par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.....	72

Figure 3.22	Discrétisation du site de la prise d'eau municipale de Pont-Rouge (modèle local).....	77
Figure 3.23	Carte piézométrique du modèle numérique local (MODFLOW) et distribution des niveaux de calibration pour l'aquifère de Pont-Rouge....	77
Figure 3.24	Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).....	78
Figure 3.25	Charges hydrauliques résiduelles obtenues par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).....	78
Figure 4.1	Localisation de la région d'étude de Saint-Alban.....	81
Figure 4.2	Localisation de la région d'étude de Saint-Alban par rapport à la physiographie de la MRC de Portneuf (d'après Fagnan, 1998).....	81
Figure 4.3	Localisation de la région d'étude de Saint-Alban par rapport aux bassins hydrologiques de la MRC de Portneuf.....	82
Figure 4.4	Schéma des installations des sources de Saint-Alban.....	86
Figure 4.5	Semi-variogramme des niveaux d'eau utilisés pour l'interpolation par krigeage de la carte piézométrique de l'aquifère de Saint-Alban.....	88
Figure 4.6	Coupe hydrostratigraphique de l'aquifère alimentant les sources de Saint-Alban.....	90
Figure 4.7	Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de puits pour le piézomètre Pz12 dans le secteur des sources municipales de Saint-Alban.....	93
Figure 4.8	Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de source. Hydrogramme combiné des sources S4 et S6 de Saint-Alban.....	94
Figure 4.9	Discrétisation du domaine des sources municipales de Saint-Alban.....	102
Figure 4.10	Altitude de la base imperméable de l'aquifère des sources municipales de Saint-Alban.....	102
Figure 4.11	Distribution des zones de conductivité hydraulique du domaine des sources municipales de Saint-Alban.....	103
Figure 4.12	Distribution des zones de recharge du domaine des sources municipales de Saint-Alban.....	103

Figure 4.13	Superposition des cartes piézométriques produites par modélisation numérique (MODFLOW) et par cartographie hydrogéologique (annexe M) et distribution spatiale des niveaux de calibration.....	104
Figure 4.14	Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées pour le site des sources de Saint-Alban.....	105
Figure 4.15	Charges hydrauliques résiduelles en fonction des charges hydrauliques observées pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux sources municipales de Saint-Alban.....	105
Figure 4.16	Illustration de la méthode graphique de détermination du DTDM pour l'hydrogramme combiné des sources S4 et S6 de Saint-Alban.....	108
Figure 6.1	Zone de confiance et zone d'incertitude des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).....	124
Figure 6.2	Effet de l'étang sur la forme du périmètre rapproché des puits municipaux de Pont-Rouge par modélisation numérique (MODFLOW).....	126
Figure 6.3	Zone de confiance et zone d'incertitude des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par MODFLOW-MODPATH.....	128
Figure 6.4	Superposition des zones de confiance (a) et des zones d'incertitude (b) des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs et par MODFLOW-MODPATH.....	129

Liste des symboles

r	rayon du périmètre de protection [m]
t	temps de transport [an]
b	épaisseur saturée moyenne de l'aquifère [m]
n	porosité efficace [sans unités]
f	fraction de cercle à exclure pour représenter la configuration de l'écoulement [sans unités]
Q_{puits}	volume annuel d'extraction d'eau du puits [m^3/an]
Q_{source}	volume annuel d'eau extrait de la source [m^3/an]
$Q_{recharge}$	volume annuel d'eau extrait de la source provenant de la recharge [m^3/an]
x, y	coordonnées spatiales cartésiennes [m]
K	conductivité hydraulique [m/an]
i_{reg}	gradient hydraulique régional [sans unités]
i_{loc}	gradient hydraulique local [sans unités]
v_{moy}	vitesse intersticielle moyenne [m/an]
R	recharge moyenne annuelle [m/an]
d	distance entre l'ouvrage de captage et la limite du périmètre de protection [m]
Δh	Variation de charge hydraulique pour un événement de recharge [m]
m	Nombre d'événements de recharge
$Aire_{zC}$	Superficie de la zone de contribution ou de l'aire d'alimentation [m^2]

CHAPITRE 1

Introduction

Au Québec, l'eau souterraine représente une source d'alimentation en eau potable pour près de soixante-six pour cent (66%) des municipalités. Ces municipalités, à caractère rural pour la plupart, totalisent vingt et un pour cent (21%) de la population québécoise, soit près de 1 450 000 personnes. La moitié de cette population s'alimente en eau souterraine par le biais d'ouvrages de captage municipaux, tandis que l'autre moitié s'approvisionne à partir de puits individuels (MENVIQ, 1989). Les types d'ouvrages généralement utilisés sont des puits de surface, des puits tubulaires ou des sources aménagées (MENVIQ, 1993).

1.1 Problématique

Les activités humaines sont souvent la cause de la dégradation des sources d'eau potable. Depuis plusieurs années, certaines municipalités ont connu des problèmes de qualité de leur eau souterraine suite à la contamination par des agents polluants tels les chlorures, l'aldicarbe, les hydrocarbures et les nitrates. Certains ouvrages de captage municipaux ont même dû être abandonnés suite à de telles contaminations. La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur de périmètres de

protection (PDP) déterminés autour des ouvrages de captage constitue une méthode efficace de préservation de la qualité de l'eau souterraine.

Le principal but de la gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des PDP est d'assurer la protection (qualité) de l'eau souterraine alimentant un ouvrage de captage particulier de manière à permettre son exploitation durable. Afin de faciliter cette gestion, une démarche logique constituée de plusieurs étapes est généralement proposée (USEPA, 1993a) :

- **Constitution d'un comité de planification** composé d'intervenants d'organismes privés et publics pour la mise en place d'un programme de protection de l'eau souterraine.
- **Détermination des périmètres de protection** autour des ouvrages de captage d'eau souterraine considérés. Des techniques plus ou moins complexes peuvent être utilisées en fonction du contexte hydrogéologique.
- **Identification et localisation des sources potentielles de contamination** à l'intérieur des PDP. À cette étape, une liste des infrastructures et des activités susceptibles d'engendrer une détérioration de la qualité des eaux souterraines est dressée.
- **Gestion des aires de protection.** Les techniques de gestion peuvent varier d'une simple restriction des activités dans le PDP à la mise en place d'un programme détaillé de prévention et d'information des citoyens.
- **Planification à long terme de l'approvisionnement en eau souterraine.** Cette étape porte, entre autres, sur l'efficacité à long terme du plan de protection mis en œuvre ainsi que sur l'identification de sources alternatives d'approvisionnement en eau potable dans l'éventualité d'une contamination.

Un PDP est défini par le territoire comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ou de plusieurs ouvrages de captage (puits ou sources) et à l'intérieur duquel des contaminants peuvent migrer et éventuellement contaminer le ou les ouvrages de captage. Les PDP sont généralement divisés en trois ou quatre zones à l'intérieur desquelles des restrictions ou des interdictions sont imposées pour différentes activités humaines (Lallemand-Barrès et Roux, 1989; Environnement Canada, 1995). Ces

périmètres sont déterminés en fonction des conditions hydrogéologiques présentes et du type de contamination dont on désire se protéger.

Au Québec, la directive actuellement en vigueur établit qu'un ouvrage de captage d'eau souterraine doit être protégé par un périmètre de 30 m de rayon (MENVIQ, 1984). Pratiquement, ce périmètre est insuffisant pour protéger la ressource. C'est dans cette optique que le ministère de l'Environnement (MENV) veut instituer une nouvelle politique incitant les municipalités à établir des PDP plus efficaces autour de leurs ouvrages de captage. Cette nouvelle politique définit les PDP en trois zones distinctes (MEF, 1995) :

- **Périmètre immédiat** : Ce périmètre vise à protéger l'ouvrage de captage et ses équipements et correspond à une zone ayant un rayon minimal de 30 m autour du captage. Cette zone doit être clôturée.
- **Périmètre rapproché** : Ce périmètre vise à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale et correspond à un temps de transport de 60 jours ou à une distance minimale de 100 m à partir de l'ouvrage de captage.
- **Périmètre éloigné** : Ce périmètre vise à protéger le captage contre les substances polluantes persistantes et inclut l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage.

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simple d'application à très complexes et dispendieuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. L'importance d'un dimensionnement adéquat des PDP est cruciale. En effet, si le PDP ne couvre pas suffisamment la zone à protéger, une contamination de l'ouvrage de captage peut être appréhendée. À l'opposé, si le PDP englobe une trop grande portion du territoire, la gestion optimale de cette zone peut être difficilement assurable. Ainsi, la principale problématique dans l'établissement des PDP consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste des périmètres pour un minimum d'informations et d'expertise.

Afin d'aider les différents intervenants dans la protection des ouvrages de captage, quelques guides ont été publiés à travers le monde par différents organismes. Notons principalement le guide de l'Unites States Environmental Protection Agency (USEPA) publié en 1987 (USEPA, 1987) et réédité en 1994 (USEPA, 1994) ainsi que celui du

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de France en 1989 (Lallemand-Barrès et Roux, 1989). Un autre guide portant plus spécifiquement sur la détermination des PDP en milieu fracturé, confiné et semi-confiné a aussi été publié par l'USEPA (USEPA, 1993b) de même qu'un rapport méthodologique portant sur la détermination des PDP des sources par la cartographie hydrogéologique (USEPA, 1997). Au Québec, le MENV a publié en 1995 un guide portant sur l'établissement et la gestion des PDP (MEF, 1995). Dans ce dernier, on y suggère entre autres deux méthodes analytiques simples pour le calcul des PDP rapproché et éloigné.

Quelques études comparatives visant à valider des méthodes de détermination des PDP ou à démontrer certaines méthodologies ont été menées dans le monde, et principalement aux États-Unis. Les résultats de ces études permettent de tirer des conclusions quant à la capacité de certaines méthodes à déterminer adéquatement les PDP. Ainsi, Springer et Bair (1992), Barlow (1994) et Forster *et al.* (1997) démontrent que pour des milieux fortement anisotropes et hétérogènes, l'utilisation de modèles numériques tridimensionnels s'avère essentiel pour une détermination réaliste des PDP, tandis que Bates et Evans (1996) concluent à la nécessité d'utiliser un modèle à double porosité dans des milieux très fracturés et anisotropes. Pour leur part, Livingstone *et al.* (1996) montrent que la manière d'intégrer dans un modèle la présence d'un cours d'eau situé à proximité d'un puits de pompage peut considérablement affecter la forme des PDP. Les travaux de Bair et Roadcap (1992) démontrent qu'il est nécessaire d'utiliser un modèle qui puisse tenir compte de l'infiltration verticale et de la variation du champ d'écoulement régional dans un aquifère semi-captif. Finalement, Ramanarayanan *et al.* (1992) illustrent l'effet de la variation temporelle du débit de pompage d'un puits sur la forme des PDP.

Bien que l'expérience tirée de ces guides et de ces travaux puisse être très utile pour déterminer adéquatement les PDP, aucune méthode de détermination des PDP n'a été validée au Québec. De plus, les méthodes couramment utilisées sont généralement développées pour des puits de pompage et rares sont celles qui peuvent être employées pour des sources captées par gravité comme c'est souvent le cas dans certaines régions du Québec.

1.2 But et objectifs

Le but de ce mémoire est d'identifier le niveau minimal d'information et d'expertise nécessaire pour s'assurer d'une détermination réaliste des PDP pour des conditions représentatives du piémont laurentien. Ainsi, les principaux objectifs de ce mémoire sont d'appliquer, de comparer et de valider des méthodes de détermination des PDP ainsi que d'évaluer l'influence de l'incertitude reliée à l'évaluation des paramètres hydrogéologiques sur la forme et les dimensions de ces périmètres pour différents contextes hydrogéologiques de la MRC de Portneuf.

L'application des méthodes est faite pour des puits de pompage ainsi que pour des sources aménagées. Les aquifères de surface dans les dépôts meubles sont les seuls types d'aquifère investigués dans cette étude, principalement en raison de leur grande vulnérabilité à la contamination.

1.3 Méthodologie

Dans la région du piémont laurentien, de grand aquifères granulaires constituent souvent la principale source d'approvisionnement en eau souterraine sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, de l'Outaouais à Charlevoix. L'intérêt de la MRC de Portneuf réside dans le fait qu'elle est située dans une région présentant de bons exemples d'aquifères du piémont laurentien. De plus, 85% de la population de la MRC s'approvisionne en eau potable à partir des eaux souterraines (Fagnan, 1998).

1.3.1 Choix des sites

Deux ouvrages de captage situés dans les municipalités de Pont-Rouge et de Saint-Alban ont été sélectionnés. Les types d'ouvrage de captage considérés sont un réseau de puits aménagés dans les dépôts meubles à Pont-Rouge ainsi qu'une zone de résurgence captée au contact d'un aquifère sableux et d'un aquitard à Saint-Alban. Ces captages sont parmi les plus importants de la MRC de Portneuf et leur contexte hydrogéologique ainsi que leur localisation par rapport aux sources potentielles de contamination constituent de bons exemples de conditions rencontrées dans la MRC de Portneuf.

1.3.2 Compilation des données existantes et travaux de terrain

Bien que ces différents aquifères soient principalement exploités pour l'eau potable, les sites choisis pour cette étude sont particuliers à cause de l'abondance de l'information disponible. Cette information est nécessaire pour la formulation des modèles conceptuels et pour restreindre l'incertitude des paramètres hydrogéologiques.

Une grande partie de cette information est issue des cartes topographiques, des cartes géologiques des formations superficielles et du socle rocheux, des rapports géotechniques et hydrogéologiques, des rapports de forage, des bases de données météorologiques et hydrométriques, des cartes pédologiques ainsi que des cartes d'utilisation du sol. L'autre partie de l'information a été obtenue auprès des municipalités ainsi qu'au cours des travaux de cartographie hydrogéologique régionale du projet piémont laurentien (Fagnan *et al.*, 1999; Fagnan, 1998; Bourque *et al.*, 1996; Michaud *et al.*, 1997; Paradis *et al.*, 1997; Girard, 2000) et des travaux de terrain effectués spécifiquement pour cette étude.

La majeure partie des travaux de terrain effectués pour cette étude se sont déroulés au cours de l'été et de l'automne 1997. Les travaux de l'été 1997 ont porté sur la caractérisation de l'écoulement souterrain et la reconnaissance stratigraphique des matériaux composants les aquifères des sites à l'étude. L'information recueillie comprend des mesures de niveau d'eau et des échantillons de sédiments. Au total, près de 121 mesures de niveau d'eau et 58 échantillons de sable et gravier ont été récoltés. Les points de contrôle utilisés pour les mesures de niveau d'eau sont des puits de surface, des piézomètres, des trous à la tarière manuelle et mécanique, des résurgences, des lacs et des étangs ainsi que des rivières et des ruisseaux. Tous ces points de contrôle ont été nivelés par rapport à un repère absolu. Les échantillons de sédiments ont été pris à l'aide de tarières manuelle et mécanique. De plus, des levés de géoradar ont été effectués à Pont-Rouge et à Saint-Alban afin de mieux définir la géométrie des aquifères.

Les travaux de l'automne 1997 ont porté sur la caractérisation des propriétés hydrauliques des différents aquifères ainsi que sur la caractérisation de l'écoulement à proximité des sources de Saint-Alban. Pour la caractérisation des propriétés

hydrauliques, 15 essais de perméabilité *in situ* répartis sur l'ensemble des sites et un essai de pompage près des puits municipaux de Pont-Rouge ont été effectués. De plus, l'enregistrement depuis novembre 1996 du niveau de la surface libre dans l'aquifère de Pont-Rouge a été compilé afin de faire l'évaluation de la recharge.

Pour la caractérisation de l'écoulement à proximité des sources de Saint-Alban, 12 piézomètres ont été aménagés afin de permettre le suivi mensuel du niveau de la surface libre et ainsi permettre l'évaluation de la recharge. De plus, le suivi mensuel du débit des sources a été fait à l'aide d'un compteur d'eau ainsi que d'un contenant et d'un chronomètre. Le suivi des niveaux d'eau et des débits a été fait de novembre 1997 à septembre 1998.

1.3.3 Intégration et analyse des données

Toutes les informations recueillies sous formats informatiques, telles que mesures de capteurs de pression et données météorologiques, ont été transférées dans un chiffrier électronique pour être manipulées. Les informations se présentant sous format papier, telles que rapports hydrogéologiques et observations de terrain, ont été saisies dans une base de données ACCESS (Microsoft Corporation, 1997), tandis que toutes les informations se présentant sous forme de carte ont été numérisées à l'aide du logiciel AutoCAD (AutoDesk, 1992) et importées dans le logiciel MapInfo (MapInfo Corporation, 1996) pour permettre la visualisation de l'information géographique. L'information regroupée de cette façon a facilité l'analyse subséquente des données.

1.3.4 Choix des méthodes

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simple d'application à des méthodes très complexes et dispendieuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. Pour cette étude, le choix des méthodes a été fait de façon à couvrir la gamme complète des méthodes disponibles (Tableaux 1.1 et 1.2).

Tableau 1.1 Méthodes de détermination des PDP utilisées pour les puits de Pont-Rouge.

Méthode	Type de périmètre
Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)	Rapproché
Temps de transport (Loi de Darcy)	Rapproché
Équation du cylindre (USEPA, 1987)	Rapproché
Méthode 3A2E	Éloigné et rapproché
WhAEM (Haitjeima et al. 1994)	Éloigné et rapproché
MODFLOW-MODPATH (McDonald et Harbaugh, 1988; Pollock, 1994)	Éloigné et rapproché
Écoulement uniforme (Todd, 1980)	Éloigné
Équation d'infiltration (USEPA, 1987)	Éloigné
Cartographie hydrogéologique	Éloigné

= Méthode de référence

Tableau 1.2 Méthodes de détermination des PDP utilisées pour les sources de Saint-Alban.

Méthode	Type de périmètre
Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)	Rapproché
Temps de transport (Loi de Darcy)	Rapproché
Équation du cylindre (USEPA, 1987)	Rapproché
Hydrogramme de source (Civita, 1995)	Rapproché
Méthode 3A2E	Éloigné et rapproché
MODFLOW-MODPATH (McDonald et Harbaugh, 1988; Pollock, 1994)	Éloigné et rapproché
Écoulement uniforme (Todd, 1980)	Éloigné
Équation d'infiltration (USEPA, 1987)	Éloigné
Cartographie hydrogéologique	Éloigné

= Méthode de référence

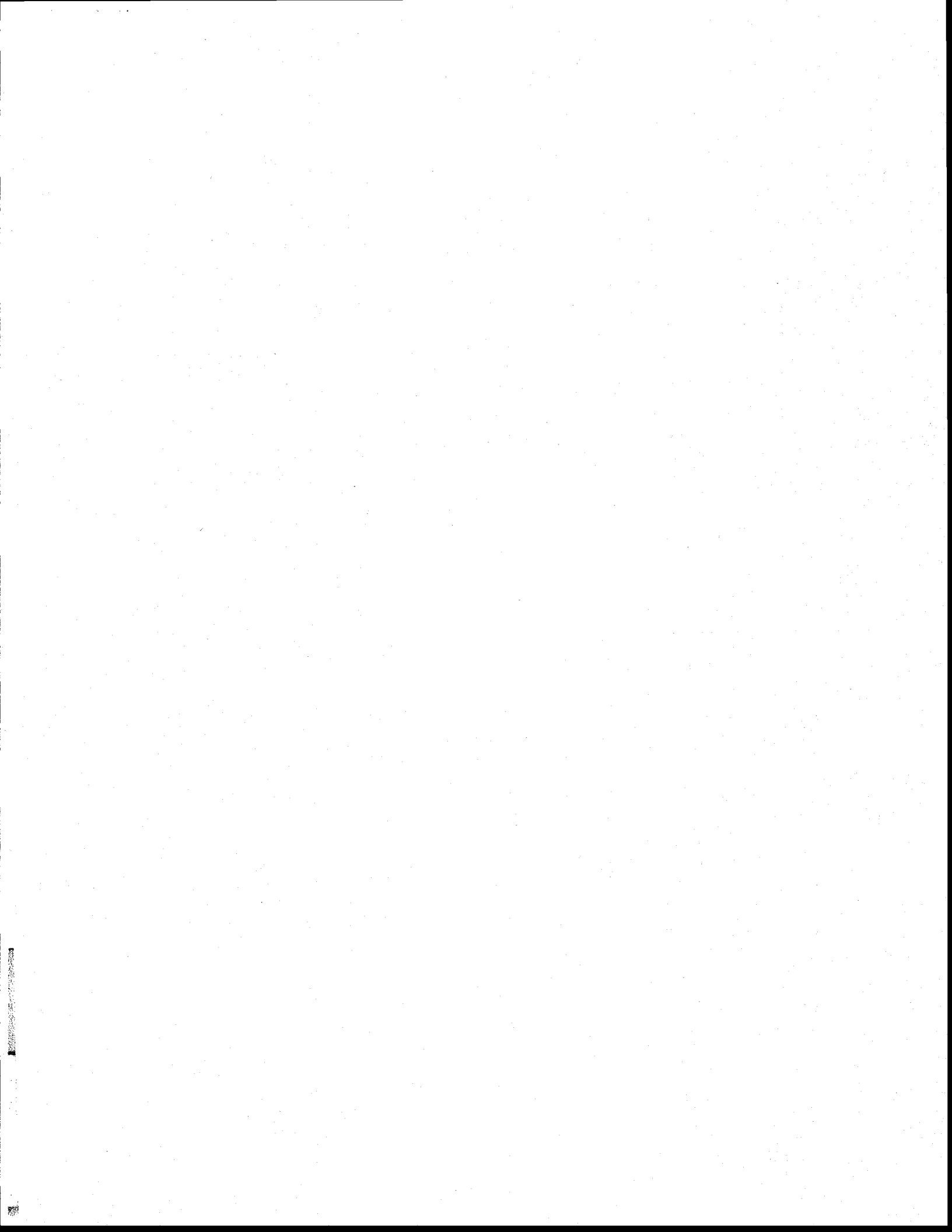
1.3.5 Comparaison et validation des méthodes

L'approche utilisée pour la validation des méthodes de détermination des PDP consiste à faire le choix de la méthode qui représente le mieux le contexte hydrogéologique du site et à utiliser ce périmètre comme base de comparaison. Pour le PDP éloigné, l'aire d'alimentation déterminée par cartographie hydrogéologique (piézométrie) est utilisée comme référence. Le périmètre éloigné déterminé par cette méthode est réaliste car il est obtenu à l'aide d'une carte piézométrique basée sur plusieurs points de mesure.

Pour le PDP rapproché, la comparaison est faite avec la zone de transport de 60 jours déterminée par un modèle numérique (MODFLOW-MODPATH). Cette méthode est la plus précise des méthodes utilisées pour déterminer le périmètre rapproché car la modélisation numérique intègre l'ensemble des caractéristiques hydrogéologiques du milieu. Les modèles numériques développés pour chacun des sites sont aussi appuyés sur une bonne caractérisation des propriétés hydrogéologiques en plus d'être calibré avec plusieurs points de mesure piézométriques.

1.3.6 Analyse d'incertitude

L'évaluation de l'influence de l'incertitude reliée à différents paramètres hydrogéologiques sur la forme et les dimensions des PDP est faite par une analyse d'incertitude. La méthode utilisée est adaptée d'Evers et Lerner (1997). La procédure décrite par ces auteurs utilise une combinaison de valeurs possibles des paramètres hydrogéologiques incertains pour générer une série de PDP. Ces PDP sont utilisés pour définir une zone d'incertitude et une zone de confiance. Cette méthode est qualitative et peut considérer l'incertitude d'un ou de plusieurs paramètres.



CHAPITRE 2

Généralités

Ce chapitre est divisé en quatre sections. La première section présente les différents critères servants à définir les périmètres de protection (PDP). Ces critères servent de base aux méthodes de détermination des PDP. La deuxième section propose une classification des méthodes de détermination des PDP et décrit les méthodes de détermination des PDP utilisées pour cette étude. La troisième section définit les paramètres géométriques utilisés pour comparer les PDP alors que la quatrième section discute de l'analyse d'incertitude.

2.1 Critères de définition des périmètres de protection

L'United States Environmental Protection Agency (USEPA) définit cinq critères de définition des PDP (USEPA, 1987) : (1) la distance, (2) le rabattement, (3) les limites d'écoulement, (4) le temps de transport et (5) la capacité d'atténuation du sol. Les valeurs attribuées à ces critères représentent des limites minimales ou maximales pour lesquelles ils cessent de fournir un degré de protection adéquat. Ces critères peuvent être utilisés seuls ou de façon combinée.

2.1.1 Distance

L'établissement des PDP par ce critère repose sur la détermination d'un rayon ou d'une distance mesurée entre l'ouvrage de captage et un point donné de l'aquifère. Le critère de distance ne tient pas compte des processus d'écoulement et de transport des contaminants. L'utilisation de la distance est basée sur l'expérience acquise dans des contextes hydrogéologiques similaires ou sur le jugement professionnel.

2.1.2 Rabattement

Il y a rabattement lorsque l'eau souterraine est retirée d'un aquifère par pompage. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits crée un gradient qui entraîne l'eau vers le point de décharge. Ainsi, il se crée un cône de rabattement au voisinage du puits (Figure 2.1). La vitesse d'écoulement de l'eau souterraine augmente à mesure que l'on s'approche du puits, ce qui a pour effet de diminuer le temps d'arrivée d'un contaminant au puits.

La zone d'influence (ZI) est la distance à partir du puits où les changements du niveau de la nappe peuvent être attribués au pompage (Figure 2.1). Dans un aquifère isotrope, homogène et sans gradient hydraulique appréciable, la zone d'influence est circulaire. Dans un milieu hétérogène ou fracturé ainsi que dans un aquifère isotrope, homogène avec un gradient hydraulique, la zone d'influence est généralement elliptique ou irrégulière.

2.1.3 Limites d'écoulement

La détermination des PDP basée sur ce critère consiste à utiliser les caractéristiques géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et géochimiques de l'aquifère. Ce critère permet de définir la zone de contribution (ZC) ou l'aire d'alimentation d'un ouvrage de captage (Figure 2.1). Le volume d'eau contenu à l'intérieur de la zone de contribution correspond à la quantité d'eau disponible pour l'ouvrage de captage. Il s'agit de la protection maximale attribuable à un captage.

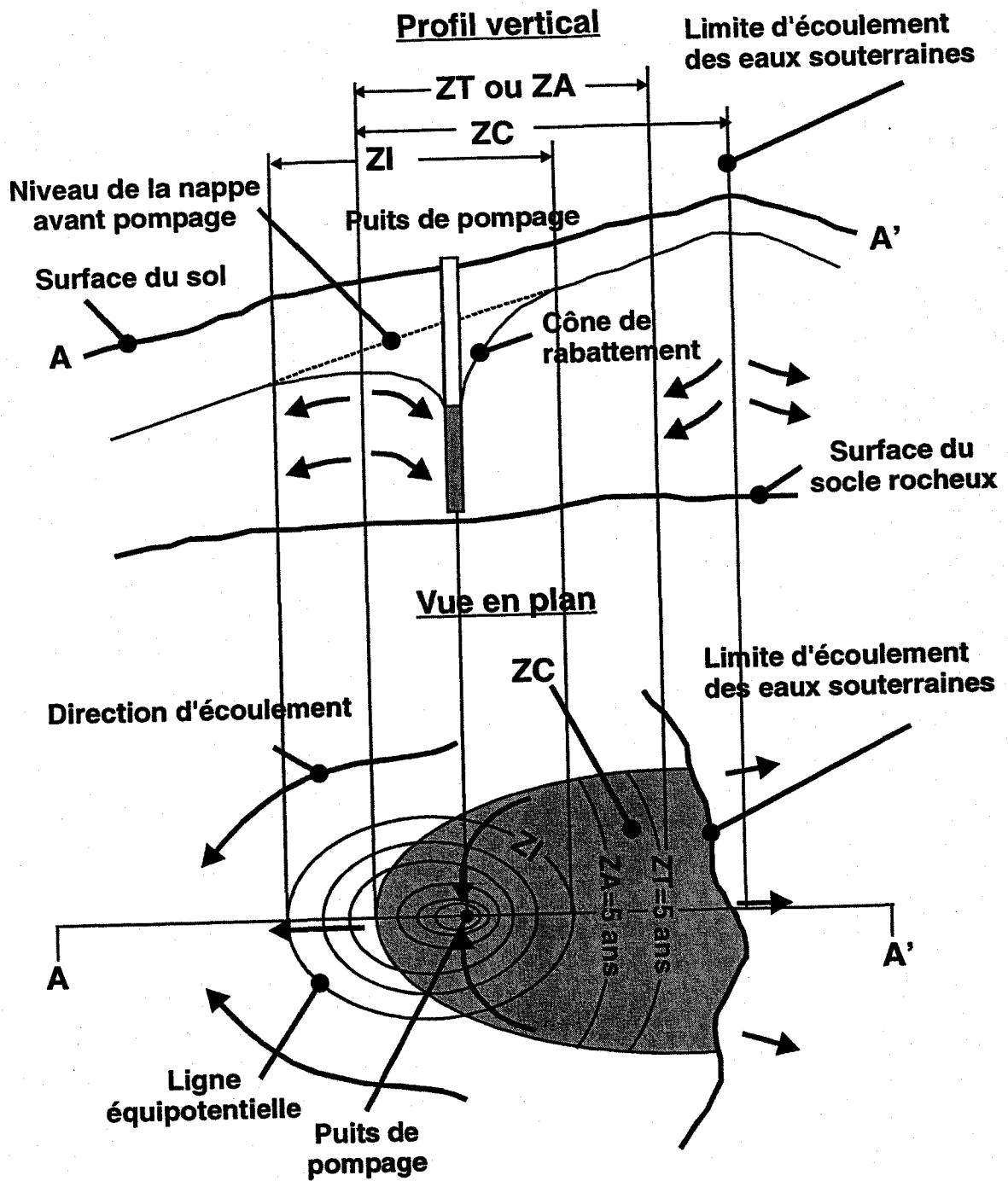


Figure 2.1 Relation entre la zone d'influence (ZI), la zone de contribution (ZC), la zone de transport (ZT) et la zone d'atténuation (ZA) (d'après USEPA, 1987).

2.1.4 Temps de transport

Le temps de transport est défini par le temps nécessaire à l'eau ou à un contaminant pour se déplacer d'un point d'entrée, à la surface du sol ou dans l'aquifère, jusqu'à son arrivée à l'ouvrage de captage. À l'intérieur de la zone de contribution du captage, on définit des courbes de temps de transport égaux appelées isochrones. Les aires formées par les différents isochrones sont appelées zones de transport (ZT) (Figure 2.1).

Le temps de transport peut tenir compte du transport en zone non-saturée et en zone saturée. Généralement, le temps de transport en zone non-saturée est négligé et est utilisé comme coefficient de sécurité. Généralement, seul le temps de transport advectif est considéré. Cependant, lorsque la dispersion d'un contaminant est importante, le temps de première arrivée devrait être utilisé.

2.1.5 Capacité d'atténuation du sol

La capacité d'atténuation des contaminants par le sol permet la réduction des PDP si la concentration du contaminant peut être réduite à un niveau acceptable avant d'atteindre l'ouvrage de captage. Les phénomènes permettant l'atténuation des contaminants sont la dilution, la dispersion, l'adsorption, la précipitation chimique et la dégradation biologique. Les aires de protection définies par ce critère sont appelées zones d'atténuation (ZA). S'il n'y a pas d'atténuation, la forme que prend la zone d'atténuation est la même que la zone de transport pour un temps donné. S'il y a atténuation, la zone aura la même forme que la zone de transport, mais sera plus petite en proportion de l'atténuation du contaminant (Figure 2.1).

En pratique, cette approche est irréaliste à cause de la difficulté à caractériser les propriétés chimiques de plusieurs contaminants. Cependant, si seulement un ou deux contaminants sont en présence, cette approche peut être très précise. Généralement, le pouvoir d'atténuation du sol est négligé et utilisé comme coefficient de sécurité.

2.2 Méthodes de détermination des périmètres de protection

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes utilisent les critères définis à la section précédente pour représenter les limites de protection des ouvrages de captage. Certaines méthodes s'appliquent aussi bien pour les puits et les sources, tandis que d'autres sont spécifiques à l'un ou l'autre de ces types de captage. Ces méthodes varient de simples d'application à des méthodes très complexes et dispendieuses. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise. Ces méthodes peuvent être classées selon leur procédure d'application ou le type d'équations résolues :

- **Méthodes avec calculs simples** : Implique l'utilisation d'équations analytiques simples, de bilans de masse et de méthodes empiriques.
- **Cartographie hydrogéologique** : Implique la détermination des caractéristiques géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et géochimiques.
- **Méthodes combinées** : Inclus les méthodes utilisant de façon complémentaire la cartographie hydrogéologique et les méthodes avec calculs simples.
- **Modèles semi-analytiques** : Implique la résolution de systèmes d'équations analytiques et numériques d'écoulement et de transport le cas échéant. Nécessite l'utilisation d'un ordinateur.
- **Modèles numériques** : Implique la résolution de systèmes d'équations numériques d'écoulement et de transport le cas échéant. Nécessite l'utilisation d'un ordinateur.

2.2.1 Méthodes avec calculs simples

Dans les méthodes avec calculs simples, nous retrouvons trois types de méthodes : (1) les équations analytiques simples, (2) les équations de bilan de masse et (3) les relations empiriques. Ces méthodes requièrent généralement peu d'informations et sont faciles d'utilisation.

Parmi les équations analytiques simples, l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980), l'équation du temps de transport avec la loi de Darcy et l'équation du temps de transport

de Bear et Jacobs (1965) ont été utilisées. Les équations d'écoulement uniforme et de temps de transport de Bear et Jacobs sont deux solutions proposées par le MENV pour déterminer les PDP éloigné et rapproché (MEF, 1995).

D'autres solutions analytiques simples existent pour représenter l'écoulement. Par exemple, Javandel et Tsang (1986) ont fait la superposition d'équations analytiques simples développées pour un seul puits pour obtenir la zone de transport d'un champ de puits à un temps infini. Grubb (1993) a généralisé les équations de Bear et Jacobs (1965) en termes de débit potentiel pour dériver des solutions analytiques simples dans des aquifères confinés, semi-captifs et de surface. Cette dernière solution permet de déterminer la zone de transport d'un puits en régime permanent à un temps infini. Yang *et al.* (1995) ont adapté les travaux de Grubb (1993) pour déterminer la zone de transport d'un puits à un temps fini, ainsi que la zone de transport d'un champ de puits à un temps infini.

Dans les équations de bilan de masse, l'équation d'infiltration et l'équation du cylindre ont été utilisées. Ces deux équations sont les équations de bilan de masse les plus couramment utilisées.

La seule méthode empirique utilisée est celle de Civita (1995). Cette méthode utilise les caractéristiques d'un hydrogramme de source pour définir les PDP immédiat et rapproché d'une source. Cette méthode a été développée en Italie et elle sera appliquée dans la MRC de Portneuf pour la valider.

2.2.1.1 Écoulement uniforme

L'équation d'écoulement uniforme permet de calculer la zone de contribution d'un puits de pompage en régime permanent dans un champ d'écoulement uniforme. Les hypothèses de base du modèle sont les suivantes :

- l'aquifère est homogène, isotrope et infini latéralement;
- l'écoulement est en régime permanent;
- la couche formant la base de l'aquifère est parfaitement imperméable;
- l'aquifère ne reçoit aucune recharge verticale;
- la dispersion hydrodynamique est négligée;

- les gradients verticaux sont négligeables;
- le puits de pompage pénètre complètement l'aquifère et est ouvert sur toute l'épaisseur saturée de l'aquifère;
- le débit de pompage est constant.

L'équation générale représentant la limite de la zone de contribution du puits de pompage est la suivante (Todd, 1980) :

$$-y/x = \tan\left[\left(2\pi K b i_{reg} / Q_{puits}\right) y\right] \quad \text{Équation 2.1}$$

Les équations 2.2, 2.3 et 2.4 sont dérivées de l'équation précédente et permettent de calculer la distance à la limite aval (A), la largeur maximale de la zone de contribution en amont par rapport à la direction d'écoulement (L) et la largeur de la zone de contribution au niveau du puits.

Distance à la limite aval (A);

$$A = \frac{Q_{puits}}{2\pi K b i_{reg}} \quad \text{Équation 2.2}$$

Largeur maximale de la zone de contribution en amont (L);

$$L = \frac{Q_{puits}}{K b i_{reg}} \quad \text{Équation 2.3}$$

Largeur de la zone de contribution au niveau du puits (B);

$$B = \frac{L}{2} \quad \text{Équation 2.4}$$

La forme de la zone de contribution est une parabole qui s'étend sur une distance A en aval du puits. À la hauteur du puits, le périmètre atteint une largeur B. Vers l'amont, la parabole atteint une largeur maximale de L. Pour simplifier le tracé, on estime que la largeur maximale est atteinte à une distance amont égale à L. Au-delà de cette distance, la zone de captage se prolonge à une largeur constante jusqu'à la ligne de partage des eaux souterraines (Figure 2.2).

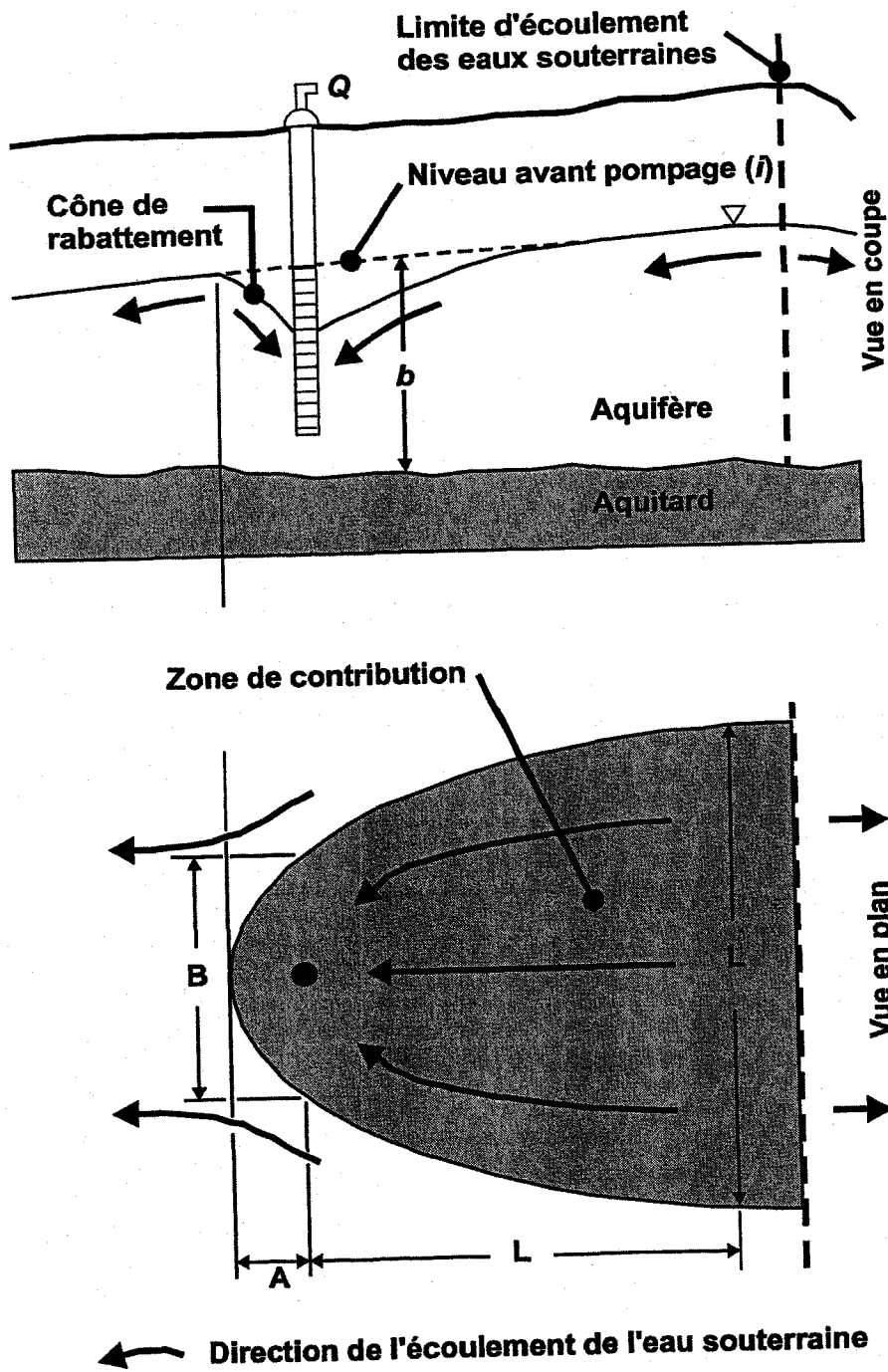


Figure 2.2 Zone de contribution déterminée par l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980) (d'après USEPA, 1987).

2.2.1.2 Temps de transport avec la loi de Darcy

La loi de Darcy (Équation 2.5) décrivant la vitesse moyenne interstitielle peut être utilisée avec la relation *temps-distance-vitesse* pour calculer les zones de transport à partir du temps de transport (Équation 2.6).

$$v_{moy} = Ki_{loc} / n \quad \text{Équation 2.5}$$

$$d = v_{moy} t = tKi_{loc} / n \quad \text{Équation 2.6}$$

L'équation 2.6 est utilisée lorsqu'une carte piézométrique ou au moins trois points de mesure du niveau piézométrique disposés en triangle sont disponibles pour calculer le sens de l'écoulement et le gradient hydraulique.

2.2.1.3 Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)

Pour les mêmes hypothèses simplificatrices que l'équation d'écoulement uniforme, mais pour un temps fini, l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) est utilisée pour déterminer les zones de transport. Pour un temps donné t , la position d'un point D en amont sur un axe parallèle à la direction d'écoulement régional est déterminée par l'équation 2.7. Cette distance détermine le rayon d'un arc de cercle dont le centre est le puits de pompage et dont les limites latérales sont la zone de contribution (Figure 2.3)

Position du point D :

$$t = \frac{nd}{Ki_{reg}} - \frac{Q_{puits} n}{2\pi K^2 i_{reg}^2 b} \ln \left[1 + \frac{2\pi K b i_{reg} d}{Q_{puits}} \right] \quad \text{Équation 2.7}$$

2.2.1.4 Équation d'infiltration

L'équation d'infiltration est un bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'ouvrage de captage et le volume d'eau rechargeant la partie de l'aquifère délimitée par la zone de contribution du captage. Cette équation assume un écoulement en régime permanent. Dans le cas d'un puits, le volume d'eau extrait correspond au volume exploité (ou débit d'exploitation), tandis que dans le cas d'une source ce volume correspond au volume d'eau d'infiltration. Ce volume d'infiltration est calculé à partir d'un hydrogramme de source.

La forme de la zone de contribution d'un puits est un cercle de rayon défini par l'équation 2.8, tandis que celle d'une source est un arc de cercle de rayon défini par l'équation 2.9 (Figure 2.4). La forme en arc de cercle de la zone de contribution d'une source est ajustée en fonction des limites physiques de l'aquifère et de la configuration de l'écoulement.

Équation d'infiltration (puits):

$$r = \sqrt{\frac{Q_{\text{puits}}}{\pi R}} \quad \text{Équation 2.8}$$

Équation d'infiltration (source):

$$r = \sqrt{\frac{Q_{\text{recharge}}}{\pi(1-f)R}} \quad \text{Équation 2.9}$$

2.2.1.5 Équation du cylindre

L'équation du cylindre est un bilan de masse entre le volume d'eau extrait par l'ouvrage de captage pour un temps donné et le volume d'eau contenu à l'intérieur d'un cylindre équivalent de l'aquifère entourant le captage. La forme de la zone de contribution d'un puits est un cercle de rayon défini par l'équation 2.10, tandis que celle d'une source est un arc de cercle de rayon défini par l'équation 2.11. La forme en arc de cercle de la zone de contribution d'une source est ajustée en fonction des limites physiques de l'aquifère et de la configuration de l'écoulement.

Équation du cylindre (puits):

$$r = \sqrt{\frac{tQ_{\text{puits}}}{\pi bn}} \quad \text{Équation 2.10}$$

Équation du cylindre (source):

$$r = \sqrt{\frac{tQ_{\text{puits}}}{\pi(1-f)bn}} \quad \text{Équation 2.11}$$

Pour le traçage de la zone de contribution, le puits correspond au centre du cercle, tandis que la source est située au foyer de l'arc de cercle (Figure 2.4).

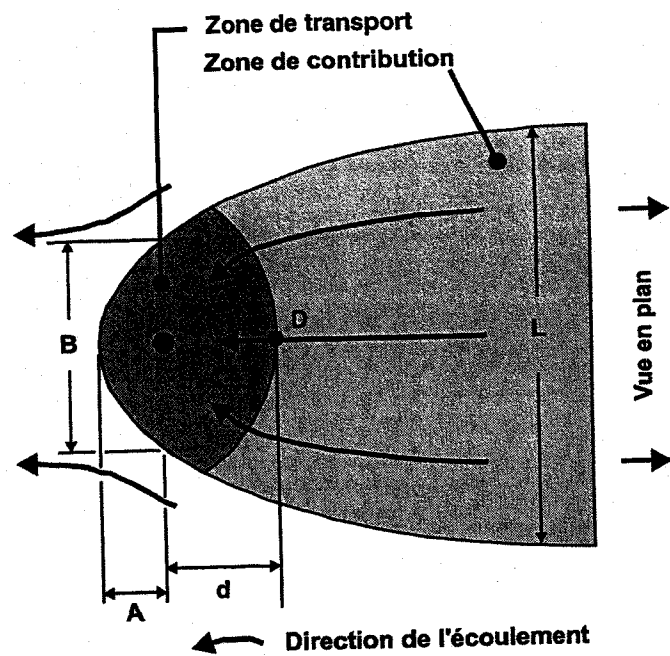


Figure 2.3 Zone de transport déterminée par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).

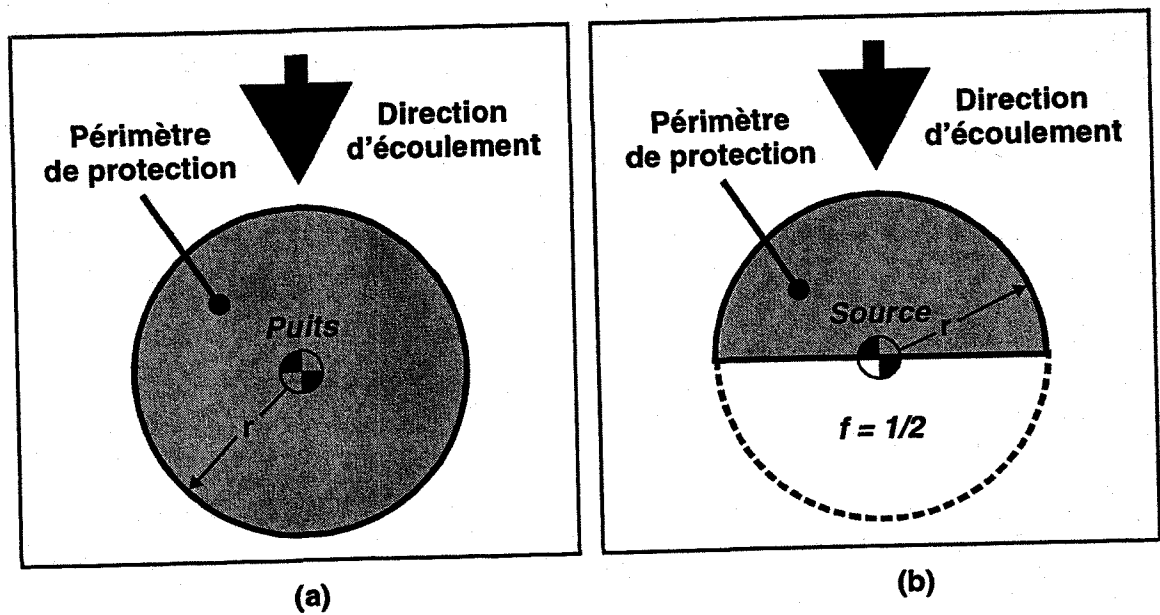


Figure 2.4 Forme générale des PDP déterminée par les équation d'infiltration et du cylindre : (a) pour un puits; (b) pour une source.

2.2.1.6 Hydrogramme de source

La détermination des PDP par la méthode d'hydrogramme de source est faite à partir de l'analyse de la courbe de récession de l'hydrogramme d'une source (Figure 2.5). Cette méthode permet la détermination des PDP immédiat et rapproché. L'explication de la méthode est donnée par Civita (1995). De façon générale, plus la pente de la courbe de récession est grande, plus les vitesses d'écoulement dans l'aquifère sont grandes.

Sur cette base, un paramètre pouvant être facilement identifiable sur un hydrogramme de source et pouvant être corrélé avec les vitesses d'écoulement dans l'aquifère a été déterminé. Ce paramètre est le demi-temps du débit maximal annuel (DTDM), c'est-à-dire le temps écoulé pour que le débit de la source soit la moitié du débit maximal enregistré au cours de l'année (Figure 2.5). Le DTDM représente le temps moyen où le processus de percolation à travers la zone non-saturée est terminé, ce qui peut être corrélé au drainage des plus gros interstices de l'aquifère.

La procédure de détermination des PDP par la méthode d'hydrogramme de source commence par l'enregistrement des débits journaliers à la source afin de construire l'hydrogramme. Le DTDM est ensuite déterminé et la classe de vulnérabilité est identifiée en utilisant le tableau 2.1. Ces classes de vulnérabilité des sources ont été déterminées par Civita (1995) à partir d'une base de donnée de près de 2000 sources instrumentées en Italie et ailleurs dans le bassin versant de la Méditerranée.

Tableau 2.1 Classes de vulnérabilité des sources à la contamination selon le DTDM et corrélation avec les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine (d'après Civita, 1995).

Classe	DTDM (jour)	Vitesse d'écoulement (m/jour)
A	< 5	~1000
B	5 < DTDM < 20	~100
C	20 < DTDM < 50	~10
D	> 50	~1

Selon cette méthode, le PDP immédiat ne doit pas être inférieur à 10 m. Ce périmètre doit tenir compte de l'étendue, de la géométrie et de la profondeur à la nappe de l'ouvrage de captage (Tableau 2.2). Les dimensions du PDP immédiat peuvent être

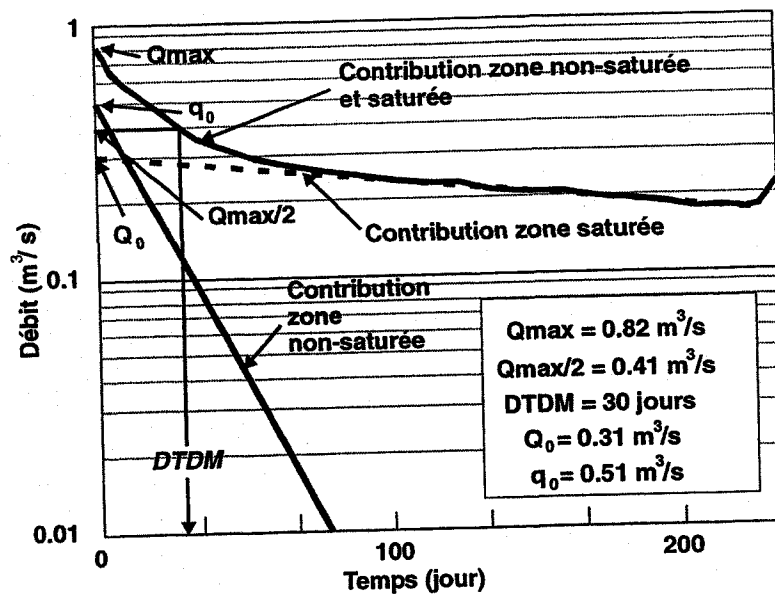


Figure 2.5 Hydrogramme de source type (modifié d'après Civita, 1995).

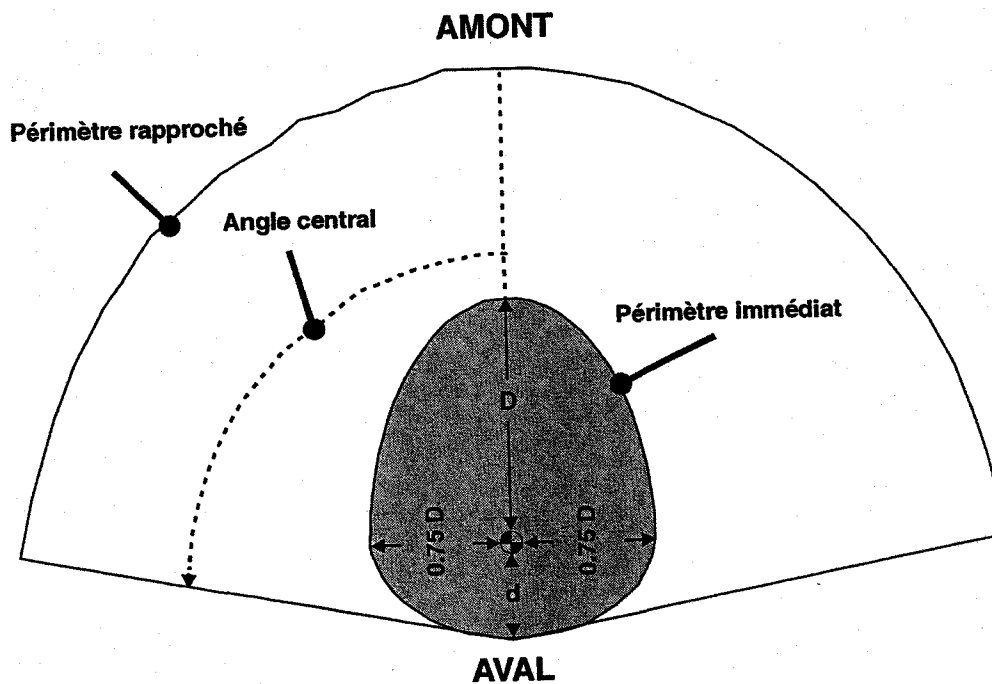


Figure 2.6 Forme générale des PDP immédiat et rapproché selon la méthode de l'hydrogramme de source (Civita, 1995).

élargies si nécessaire selon la géométrie de l'aquifère et selon les risques de contamination potentielle.

Tableau 2.2 Dimensions des PDP immédiats pour différents types d'ouvrages de captage des sources (modifiée d'après Civita, 1995).

Type d'ouvrage	Classe	Profondeur à la nappe (m)	D (m)	d (m)
Surface	A	Nul	40	10
	B	Nul	30	5
	C	Nul	20	5
	D	Nul	10	2
Ouvert sur l'aquifère	A	> 20	30	5
	B	> 20	30	4
	C	> 20	15	3
	D	> 20	10	2

D = Distance amont; d = Distance aval.

La détermination du PDP rapproché est basée sur la cartographie hydrogéologique et sur le temps de transport (Tableau 2.3). Pour dessiner la forme du PDP rapproché dans le cas des classes de vulnérabilité C et D, un secteur circulaire peut être dessiné de façon plus ou moins régulière en fonction de la géométrie et des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère. Le PDP correspond à la forme d'un demi cercle dont la base fait angle plus petit ou égal à 180 degrés (angle central inférieur ou égal à 90°). Le foyer de l'arc de cercle est positionné sur la limite aval du PDP immédiat (Figure 2.6).

Tableau 2.3 Dimensions du PDP rapproché pour les différentes classes de vulnérabilité des sources à la contamination (d'après Civita, 1995).

Classe	Distance à la limite amont (m)
A	Zone de contribution
B	Zone de contribution
C	400 à 600
D	200 à 300

2.2.2 Cartographie hydrogéologique

Dans bon nombre d'aquifères, les limites d'écoulement et le temps de transport peuvent être cartographiés par l'étude de la géologie, par des mesures piézométriques, par l'application de méthodes géophysiques et par des essais de traceurs. Les limites d'écoulement peuvent être de type géologique ou hydraulique. Les limites géologiques sont définies par des variations de lithologie ou des contrastes de perméabilité à l'intérieur de l'aquifère, tandis que les limites hydrauliques sont définies par l'écoulement de l'eau souterraine.

2.2.2.1 Piézométrie

La piézométrie comme méthode de cartographie hydrogéologique consiste à définir les limites d'écoulement hydraulique à partir de la carte piézométrique d'un aquifère. Dans les aquifères granulaires à nappe libre peu profonde, la définition de l'écoulement peut être très précise à cause de la facilité à mettre en place des puits d'observations et à obtenir un grand nombre de mesures de niveau d'eau. Cette méthode, permet de définir la zone de contribution d'un ouvrage de captage (Figure 2.7).

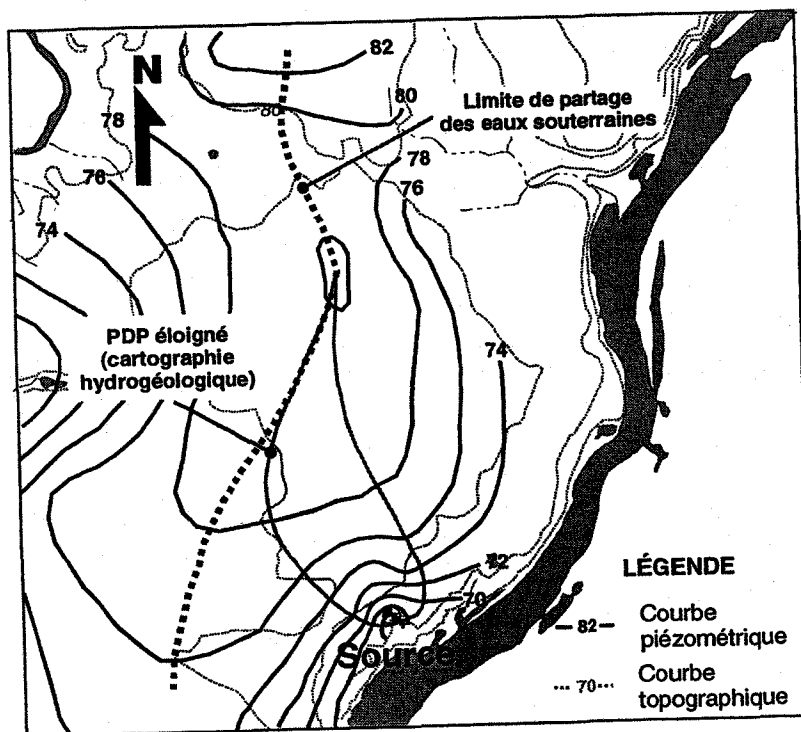


Figure 2.7 Détermination de l'aire d'alimentation d'une source à l'aide de la piézométrie (cartographie hydrogéologique).

2.2.3 Méthodes combinées

Cette catégorie de méthodes regroupe toutes les méthodes qui utilisent de façon complémentaire les méthodes avec calculs simples et la cartographie hydrogéologique. La méthode combinée utilisée pour cette étude est une adaptation d'une méthode proposée par le Cape Cod Planning and Economic Development Commission (USEPA, 1987). Le nom donné à cette méthode est un acronyme formé des 5 étapes qu'exige cette méthode (Aval, Amont, Aire, Écoulement, Ellipse). La méthode originale a été modifiée pour être utilisée sans carte piézométrique et pour permettre la définition des PDP éloignés en plus des PDP rapprochés. Ainsi, la carte piézométrique et le planimètre, originellement utilisés pour le calcul de la superficie du PDP, sont remplacés par une ellipse dont la superficie se calcule soit par l'équation d'infiltration ou par celle du cylindre, selon le type de PDP.

2.2.3.1 Méthode 3A2E

La détermination des PDP par la méthode 3A2E exige cinq étapes (Figure 2.8):

- Étape 1** - Implique la détermination de la limite aval. Les équations d'écoulement uniforme, de temps de transport avec la loi de Darcy ou la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées.
- Étape 2** - Implique la détermination de la distance amont. Les équations de temps de transport de Bear et Jacobs (1965), de temps de transport avec la loi de Darcy ou la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées.
- Étape 3** - Implique le calcul de l'aire du PDP. Les équations d'infiltration et du cylindre sont respectivement utilisées pour la détermination des périmètres éloignés et rapprochés.
- Étape 4** - Implique la détermination de la direction de l'écoulement régional à l'aide d'une carte piézométrique ou d'au moins trois mesures de niveaux d'eau dans trois puits d'observations disposés en triangle.
- Étape 5** - Implique le dessin d'une ellipse de superficie totale correspondante à celle calculée à l'étape 3 et dont les extrémités d'un des axes de l'ellipse sont orientées dans le sens de l'écoulement régional déterminé à l'étape 4 et correspondent aux limites aval (étape 1) et amont (étape 2).

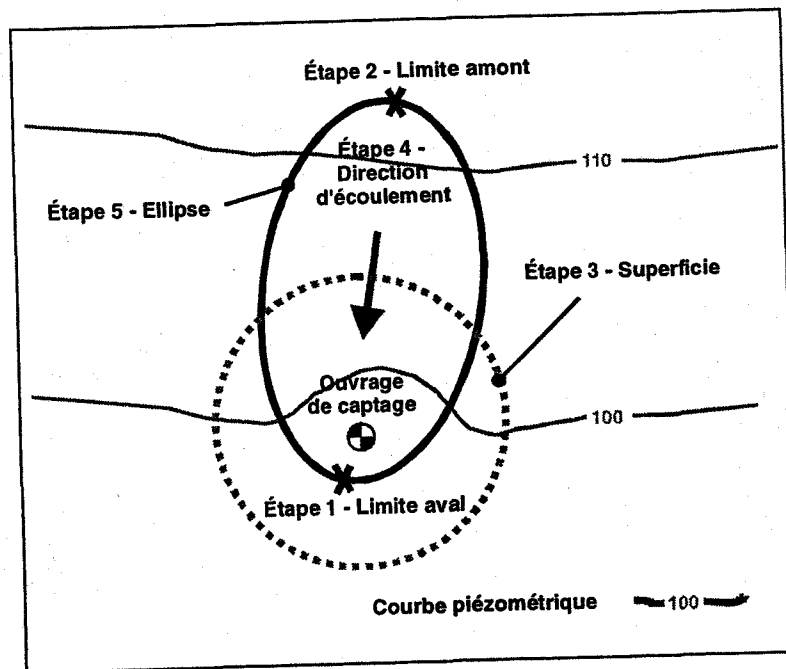


Figure 2.8 Détermination d'un périmètre de protection par la méthode 3A2E.

Les tableaux 2.4 et 2.5 présentent l'information minimale nécessaire à l'application de la méthode 3A2E pour les puits et les sources. Notons que si le débit moyen des sources est utilisé au lieu du débit provenant de la recharge, la superficie du PDP sera surdimensionnée.

Tableau 2.4 Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode 3A2E pour les puits.

PDP	Paramètre	Note
Éloigné et rapproché	Débit d'exploitation	Mesuré directement aux puits.
	Conductivité hydraulique	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon par des essais de perméabilité <i>in situ</i> .
	Épaisseur saturée	Déduite de l'analyse des journaux de forage et/ou par géophysique.
	Gradients hydrauliques et directions d'écoulement (régional et local)	Nécessite au moins 3 points de mesures pour chacun des gradients. Les points de mesure doivent être représentatifs de la surface du PDP à déterminer.
	Porosité efficace	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon estimée à l'aide de la littérature ou d'essais en laboratoire.
Éloigné	Recharge	Estimée par un bilan hydrologique ou par l'analyse d'un hydrogramme de puits.

Tableau 2.5 Informations minimales nécessaires pour l'application de la méthode 3A2E pour les sources.

PDP	Paramètre	Note
Éloigné et rapproché	Débit participant à la recharge	Calculé à l'aide d'un hydrogramme de source. Fréquence de mesure bimensuelle (recommandée).
	Conductivité hydraulique	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon par des essais de perméabilité <i>in situ</i> .
	Épaisseur saturée	Déduite de l'analyse des journaux de forage et/ou par géophysique.
	Gradient hydraulique et direction d'écoulement (régional et local)	Nécessite au moins 3 points de mesures pour chacun des gradients. Les points de mesure doivent être représentatifs de la surface du PDP à déterminer.
	Porosité efficace	Idéalement déterminée par un essai de pompage, sinon estimée à l'aide de la littérature ou d'essais en laboratoire.
Éloigné	Recharge	Estimée par un bilan hydrologique ou par l'analyse d'un hydrogramme de puits ou d'une source.

2.2.4 Modèles semi-analytiques

Certains types de modèles semi-analytiques utilisent des techniques numériques pour approximer spatialement et temporellement les solutions analytiques d'écoulement. Les logiciels de modélisation par éléments analytiques font partie de cette catégorie. D'autres types de modèles semi-analytiques utilisent des solutions exactes pour représenter l'espace avec une approximation numérique pour discrétiser le temps ou une approximation numérique pour l'espace avec des solutions exactes pour le temps. Pour le calcul des vitesses d'écoulement, tous les modèles semi-analytiques sont jumelés à des algorithmes de traçage de particules inverses ou font appel à une résolution numérique. Ces modèles nécessitent l'utilisation d'un ordinateur pour le calcul des PDP.

Parmi les modèles semi-analytiques les plus répandus, mentionnons le duo de programmes CAPZONE (Bair *et al.* 1991) et GWPATH (Shafer, 1987), la suite RESSQC, MWCAP, GPTRACK et MONTEC connue sous le nom de *WhPA* (Blandford et Huyakorn, 1992) et le modèle ROSE (Lerner, 1992) permettant l'intégration de la recharge pour les aquifères de surface. Parmi les logiciels de modélisation par éléments analytiques les plus importants, nous retrouvons *WhAEM* (Haitjema *et al.*, 1994; Strack *et al.*, 1994; Haitjema *et al.*, 1995), GFLOW (Haitjema, 1995), TWODAN (Fitts, 1992), WINFLOW (Rumbaugh, 1995) et SLAEM/MLAEM (Strack, 1990; Strack, 1992). Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel *WhAEM* développé pour l'USEPA et distribué sous licence publique.

2.2.4.1 *WhAEM*

Le logiciel Wellhead Analytic Element Model (*WhAEM*) est conçu pour déterminer les zones de transport de puits aménagés dans des aquifères relativement simples (Strack *et al.*, 1994; Haitjema *et al.*, 1994). Ce logiciel est basé sur un modèle par éléments analytiques. Ce type de modèle utilise la superposition d'équations analytiques approximées numériquement (éléments analytiques) représentant les caractéristiques de l'aquifère. Une description détaillée des éléments analytiques est présentée par Strack (1989).

Le logiciel *WhAEM* est formé de deux programmes : le préprocesseur *GAEP* et le module d'écoulement *CZAEM*. *GAEP* est un préprocesseur qui permet la définition du modèle et l'assignation des paramètres. *CZAEM* est un modèle d'écoulement en régime permanent pour des aquifères homogènes à une couche. Les simplifications mathématiques du modèle sont basées sur celles de Dupuit-Forchheimer. L'implantation de la méthode des éléments analytiques dans *CZAEM* est élémentaire, c'est-à-dire que seulement quelques éléments analytiques de bases sont supportés. Ces éléments peuvent être utilisés pour simuler les rivières, les lacs, les puits, l'écoulement uniforme et l'infiltration verticale sur une aire circulaire.

Le module *CAPZONE* du programme *CZAEM* est un module de traçage de particules permettant le calcul d'isochrones autour des puits de pompage. La définition de ces isochrones permet de déterminer des zones de transport.

2.2.5 Modèles numériques

Les modèles numériques utilisent des techniques numériques pour approximer spatialement et temporellement les équations d'écoulement de l'eau souterraine et de transport des solutés. Une grande variété de modèles numériques est disponible commercialement ou sous licence publique.

L'utilisation des modèles numériques pour déterminer les PDP se fait généralement en deux étapes (Figure 2.9). La première étape consiste à calibrer le modèle numérique d'écoulement. Pour ce faire, nous devons d'abord : (1) définir les limites, imposer les sollicitations et discrétiser le modèle par un maillage ou un réseau d'éléments; (2) imposer les propriétés hydrauliques de l'aquifère et (3) calibrer le modèle par ajustement des paramètres avec des charges et des débits mesurés. La seconde étape consiste à calculer les PDP à l'aide d'un modèle numérique de transport ou d'un algorithme de traçage de particules utilisant le modèle numérique d'écoulement calibré précédemment. Cette seconde étape peut aussi être subdivisée : (1) imposer les paramètres de transport et/ou les particules et (2) tracer les lignes d'écoulement.

Les modèles numériques sont particulièrement utiles pour déterminer les PDP lorsque les limites et le contexte hydrogéologique sont très complexes. Ces modèles sont

généralement très flexibles et permettent la représentation de tous les paramètres d'écoulement et de transport. Ces modèles donnent généralement un bon degré de précision et peuvent aussi être utilisés pour prédire la dynamique des PDP résultantes de causes naturelles ou humaines.

Parmi les modèles numériques les plus répandus, nous comptons MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988) qui est un modèle par différences finies et FEMWATER (Lin *et al.*, 1997) qui est un modèle par éléments finis. Les avantages et les inconvénients de ces types de modèle sont discutés par Anderson et Woessner (1992).

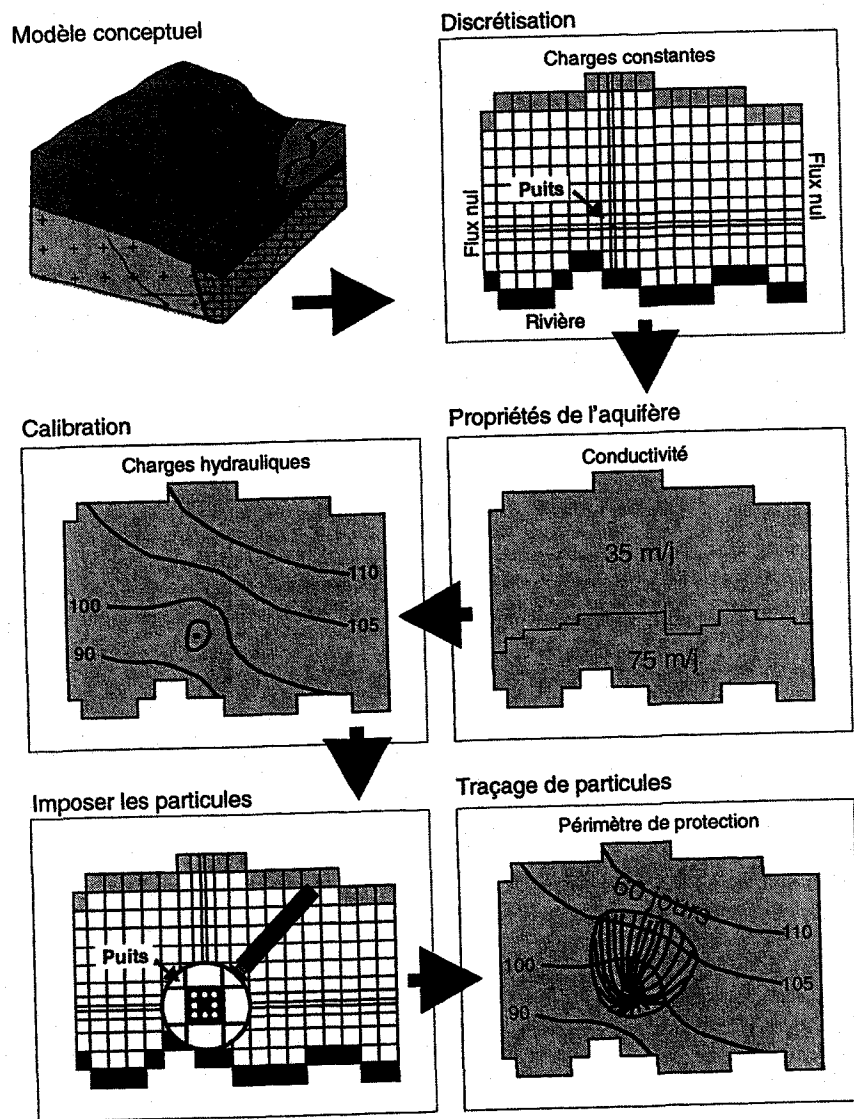


Figure 2.9 Détermination des PDP par MODFLOW-MODPATH.

2.2.5.1 MODFLOW-MODPATH

MODFLOW est un modèle numérique quasi tridimensionnel utilisé pour la simulation de l'écoulement de l'eau souterraine en milieu saturé. Des sollicitations en régime permanent et transitoire peuvent être représentées, de même que des systèmes anisotropes, hétérogènes et en couches. Ce modèle est basé sur une approche en différences finies par blocs centrés utilisant un maillage variable dans les trois axes de coordonnées spatiales. Les types d'aquifères peuvent être confinées, semi-confinées ou à nappe libre.

Des modules sont aussi disponibles pour simuler l'écoulement autour des puits, à travers les lits des rivières et dans les drains. D'autres modules permettent de définir l'évapotranspiration et la recharge. Les conditions aux limites utilisées par MODFLOW incluent les limites à charges constantes, les limites à flux spécifiés et les limites à charges hydrauliques variables. Une description détaillée de MODFLOW est présentée par McDonald et Harbaugh (1988).

MODPATH est un programme de traçage de particules avant ou inverse développé pour simuler le transport advectif des solutés, basé sur les résultats des simulations en régime permanent ou en régime transitoire obtenues par MODFLOW. MODPATH utilise un schéma semi-analytique de traçage de particules. Une description détaillée de MODPATH est présentée par Pollock (1994).

2.3 Paramètres géométriques de comparaison

Afin de quantifier la précision des différentes méthodes de détermination des PDP, la comparaison des PDP est faite à l'aide de trois paramètres géométriques (Figure 2.10);

- **Le rapport d'aire commune (RAC)** : Défini par le rapport de la superficie commune entre le PDP de référence (SC) et le PDP à comparer sur la superficie du PDP de référence (SE) (Équation 2.12). Ce rapport varie de 0 à 100%. Plus ce rapport est élevé, plus le périmètre de la méthode à comparer couvre l'ensemble du périmètre de référence.

$$RAC = \frac{SC}{SE} \times 100 \quad \text{Équation 2.12}$$

- **Le rapport d'aire non protégée (RANP)** : Défini par le rapport de la superficie non couverte par la méthode à comparer (SNP) sur la superficie du PDP de référence (SE) (Équation 2.13). Ce rapport varie de 0 à 100% et est inversement proportionnel au RAC.

$$RANP = \frac{SNP}{SE} \times 100 \quad \text{Équation 2.13}$$

- **Le rapport d'aire trop protégée (RATP)** : Défini par le rapport de la superficie trop couverte par la méthode à comparer (STP) sur la superficie du PDP de la méthode à comparer (SAC) (Équation 2.14). Ce rapport varie de 0 à 100%. Plus ce rapport est élevé, plus la superficie du PDP de la méthode à comparer protège inutilement certaines zones de l'aquifère en dehors du PDP de la méthode de référence.

$$RATP = \frac{STP}{SAC} \times 100 \quad \text{Équation 2.14}$$

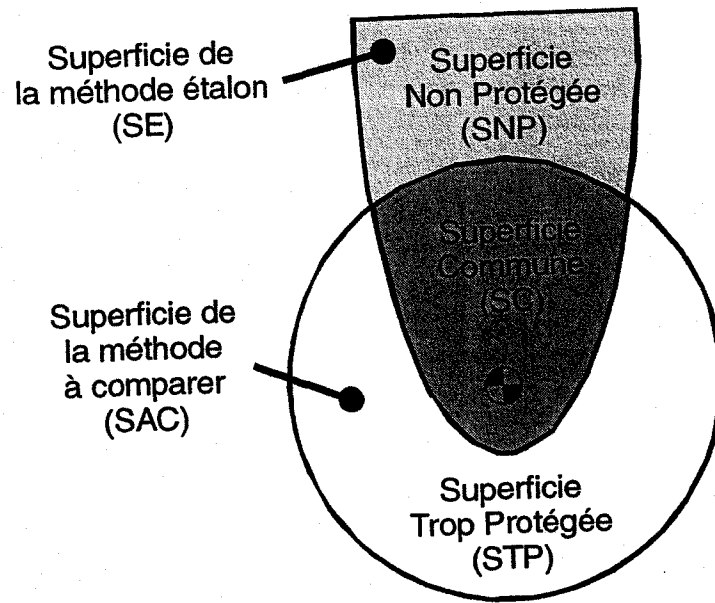


Figure 2.10 Paramètres géométriques de comparaison.

2.4 Analyse d'incertitude

L'imprécision reliée à la mesure ou à la dérivation des paramètres hydrogéologiques est bien connue. Des paramètres hydrogéologiques tels que la conductivité hydraulique ou la recharge peuvent être exprimés en termes d'intervalle de valeurs. De plus, lorsque des modèles numériques sont utilisés pour déterminer des PDP, différents modèles peuvent être calibrés et ainsi générer différents PDP tout aussi valables a priori les uns les autres.

Jusqu'à ce jour plusieurs études portant sur l'analyse d'incertitudes ont été publiées (Bhatt, 1993; Cole et Silliman, 1997; Tiedeman et Gorelick, 1993; Varljen et Shafer, 1991; Zimmerman *et al.*, 1991). Dans cette étude, la procédure utilisée pour caractériser l'incertitude reliée à la détermination des PDP est adaptée d'Evers et Lerner (1997).

Cette procédure utilise l'incertitude relative aux différents paramètres hydrogéologiques pour générer une série de PDP. Ces différents PDP sont par la suite superposés pour définir la zone de confiance et la zone d'incertitude (Figure 2.11). La zone de confiance est définie par l'intersection des PDP générés, alors que la zone d'incertitude est comprise entre les enveloppes externes de la zone de confiance et de l'ensemble des différents PDP. La zone de confiance peut être vue comme la région à l'intérieur de laquelle une goutte d'eau aurait toutes les chances d'atteindre le captage, tandis que la zone d'incertitude est la région à l'intérieur de laquelle les chances d'atteindre le captage seraient plutôt incertaines. Notons que ces zones ne sont pas subdivisées en intervalles de confiance. Une telle approche implique une bonne connaissance de l'incertitude reliée aux paramètres hydrogéologiques. Cette méthode est plutôt qualitative et permet de considérer l'incertitude d'un ou de plusieurs paramètres. De plus, les zones de confiance et d'incertitude ne sont pas absolues et peuvent dépendre des paramètres testés. Il incombe donc à l'hydrogéologue de choisir les paramètres qui ont le plus d'influence sur les dimensions du PDP.

Le rapport de la superficie de la zone de confiance sur la superficie totale (Zone de confiance + Zone d'incertitude) de l'ensemble des PDP générés est utilisé pour définir le

niveau de confiance de la méthode considérée (Équation 2.15). Ce critère varie de 0 à 100% et plus il est élevé moins il y a d'incertitude dans la forme et les dimensions du PDP.

$$\text{Niveau de confiance} = \left(\frac{\text{Zone de confiance}}{\text{Zone de confiance} + \text{Zone d'incertitude}} \right) \times 100 \quad \text{Équation 2.15}$$

L'intervalle de valeurs pour chacun des paramètres hydrogéologiques est déterminé à partir de l'analyse des valeurs mesurées ou dérivées. Lorsqu'un modèle numérique est utilisé, l'intervalle des valeurs est déterminé par une analyse de sensibilité des paramètres incertains. Cette analyse de sensibilité est faite par rapport à un modèle d'écoulement calibré par essais et erreurs. L'intervalle de valeurs de chacun des paramètres hydrogéologiques est généralement défini par les valeurs minimale, médiane et maximale. Pour chacun des paramètres hydrogéologiques considérés, ces valeurs sont permutées de façon à produire différents PDP.

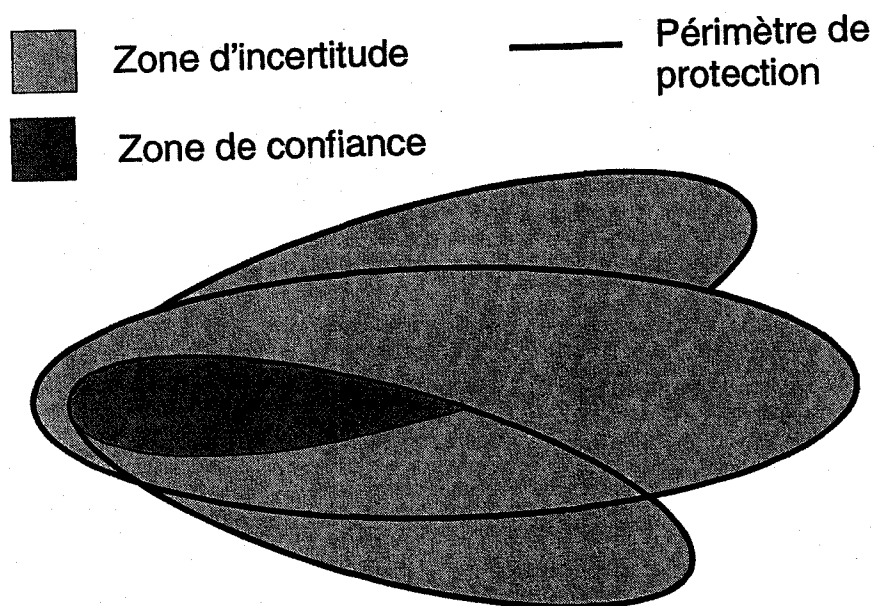


Figure 2.11 Zones de confiance et d'incertitude des différents PDP générés.

CHAPITRE 3

Application des méthodes de détermination des périmètres de protection : les puits de Pont-Rouge

Ce chapitre porte sur l'application des méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP) pour les puits municipaux de Pont-Rouge et comporte deux sections. Dans la première section, nous présentons une description du site comprenant la localisation du site, la physiographie, l'hydrographie, l'hydrologie, la géologie, l'analyse des paramètres hydrogéologiques ainsi que la description et la localisation des sources potentielles de contamination. À la deuxième section, nous présentons les résultats de l'application des différentes méthodes de détermination des PDP. L'application des méthodes est faite pour les périmètres éloigné et rapproché de l'ouvrage de captage de Pont-Rouge.

3.1 Description du site

Dans cette section, nous décrivons les principales caractéristiques de l'aquifère alimentant les puits municipaux de Pont-Rouge. Cette section est subdivisée en trois parties : le contexte physique, le contexte hydrogéologique et les sources potentielles de contamination.

3.1.1 Contexte physique

La municipalité de Pont-Rouge est située à la limite est de la MRC de Portneuf, à 50 km à l'ouest de Québec. La municipalité est accessible via l'autoroute 40 par la sortie 281 (Figure 3.1). La région d'étude entourant les puits municipaux couvre une superficie d'environ 36 km² et est bordée à l'ouest par la rivière Jacques-Cartier, à l'est et au sud par la rivière aux Pommés et au nord par la longitude 46°48' (Annexe A).

La MRC de Portneuf occupe deux régions physiographiques distinctes qui sont les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Laurentides. Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont caractérisées par un relief plat ou ondulé alors que la région des Laurentides se distingue par son relief montagneux (Figure 3.2). La région d'étude entourant les puits municipaux de Pont-Rouge est située dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cette région est caractérisée par un relief ondulé où les dépôts quaternaires contribuent à adoucir le relief irrégulier des roches ignées et métamorphiques sous-jacentes (Annexe A).

La MRC de Portneuf s'étend sur plus de cinq bassins hydrologiques qui sont, d'ouest en est : le bassin de la rivière Batiscan, le bassin de la rivière Sainte-Anne, le bassin du fleuve Saint-Laurent, le bassin de la rivière Portneuf et le bassin de la rivière Jacques-Cartier. La région d'étude entourant les puits municipaux de Pont-Rouge est située dans le bassin versant de la rivière Jacques-Cartier (Figure 3.3).

La rivière Jacques-Cartier draine la partie sud-est de la région d'étude et reçoit les eaux de deux tributaires principaux qui sont la rivière aux Pommés et la rivière Noire. Le lit de la rivière Jacques-Cartier à partir de la limite est de la MRC jusqu'au village de Pont-Rouge est constitué d'une mince couche de sables et graviers deltaïques ainsi que

d'alluvions qui reposent sur le socle rocheux. En certains endroits, la couche d'alluvions disparaît et la rivière entaille les roches ignées et métamorphiques des Laurentides. À partir du village de Pont-Rouge, la rivière s'encaisse dans les roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et ce jusqu'à son embouchure au fleuve (Fagnan, 1998).

La majorité du parcours de la rivière aux Pommes est encaissée dans les sédiments quaternaires composés principalement de sables et graviers. Seul un segment de cette rivière, tout près de son embouchure dans la rivière Jacques-Cartier, entaille les silts et argiles de la Mer de Champlain et les roches sédimentaires des Basses-Terres du Saint-Laurent et le socle rocheux Précambrien.

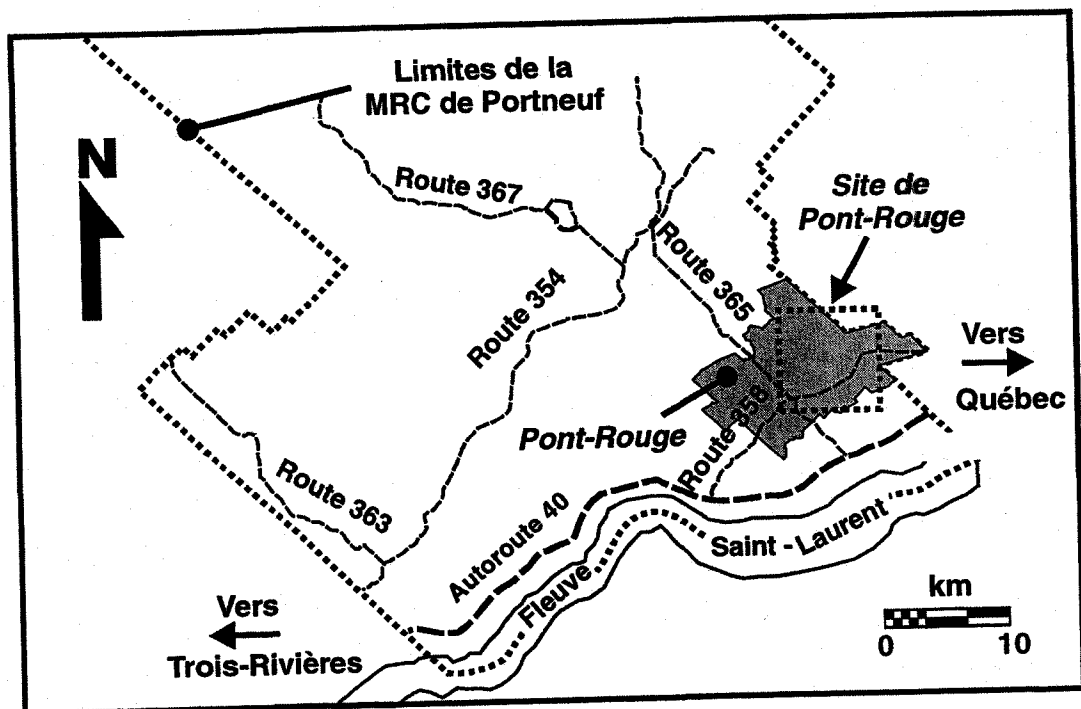


Figure 3.1 Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge.

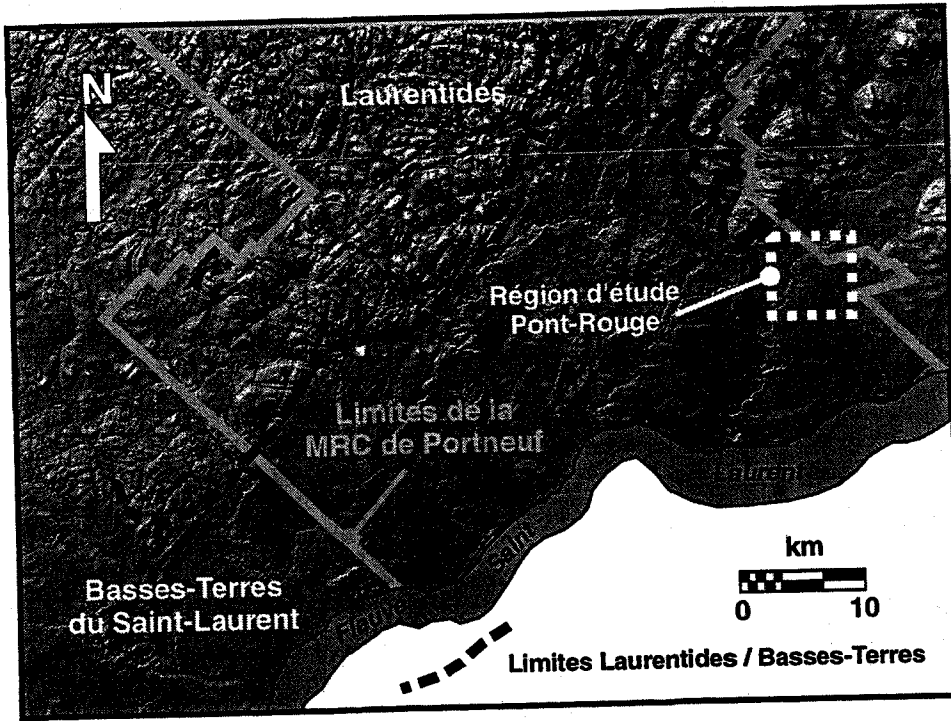


Figure 3.2 Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge par rapport à la physiographie de la MRC de Portneuf (d'après Fagnan, 1998).

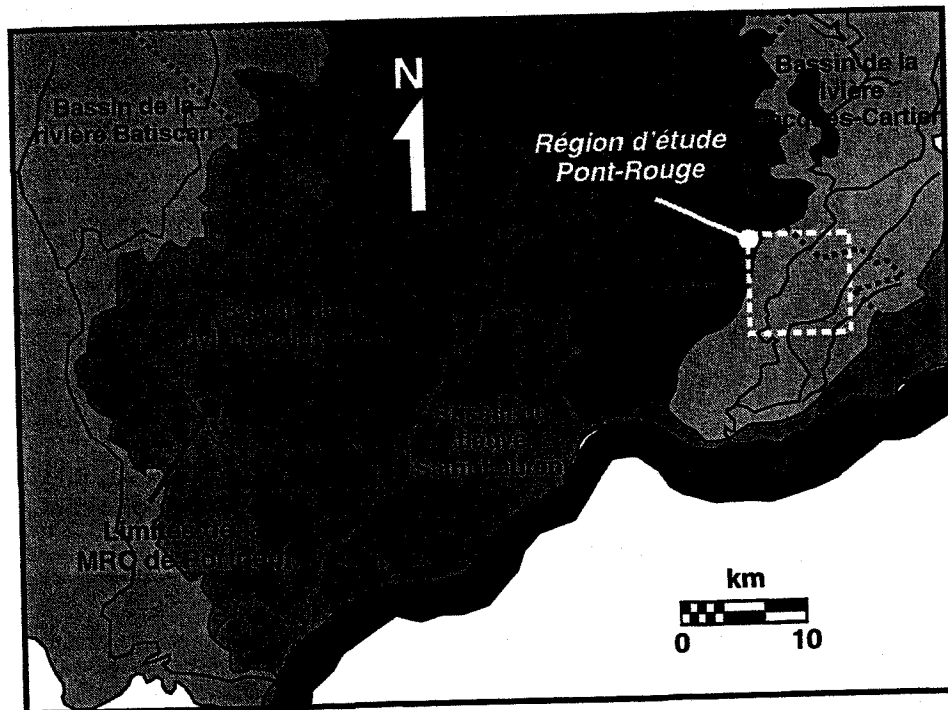


Figure 3.3 Localisation de la région d'étude de Pont-Rouge par rapport aux bassins hydrologiques de la MRC de Portneuf.

Un bilan hydrologique fournit un moyen quantitatif d'évaluer les échanges dans le cycle de l'eau. La description de la méthode employée pour faire l'évaluation des paramètres hydrologiques est donnée dans Lefebvre et Gélinas (1995). Les données météorologiques nécessaires aux calculs ont été fournies par la Direction du milieu atmosphérique du Ministère de l'Environnement et de la Faune.

L'évaluation du bilan hydrologique dans le secteur de la prise d'eau municipale de Pont-Rouge a été faite à partir des données météorologiques enregistrées à la station de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier. Cette station est située à environ cinq kilomètres au nord de la région d'étude. La température moyenne annuelle mesurée est de 3.56° Celsius. Les précipitations totales sont de l'ordre de 1271.29 mm dont 991.65 mm (78%) sous forme de pluie et 279.64 mm (22%) sous forme de neige (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Conditions climatiques à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier de 1964 à 1990 (Source : Direction du milieu atmosphérique, Ministère de l'Environnement et de la Faune).

Mois	Température moyenne (°C)	Pluie (mm)	Neige (mm)	Précipitations totales (mm)
Janvier	-13.20	24.22	63.04	87.26
Février	-11.4	20.16	53.93	74.65
Mars	-4.82	41.95	38.37	80.02
Avril	3.12	67.72	15.38	83.10
Mai	10.48	113.70	1.00	114.70
Juin	15.67	122.40	0.00	122.40
Juillet	18.42	126.50	0.00	126.50
Août	17.12	126.00	0.00	126.00
Sept.	12.02	128.60	0.00	128.60
Octobre	5.92	110.40	2.30	112.60
Novembre	-1.09	73.76	34.99	108.70
Décembre	-9.63	36.24	70.63	106.80
Annuel	3.56	991.65	279.64	1271.29

Les valeurs des coefficients nécessaires au calcul de l'emmagasinement maximal dans le sol (capacité de rétention, point de flétrissement et zone racinaire) ont été estimées à partir de la connaissance globale du terrain (Tableau 3.2). Le coefficient de

ruissellement a été déterminé à partir de la valeur de la recharge calculée par séparation d'hydrogramme de puits. En connaissant la recharge pour l'année 1997, le coefficient de ruissellement du bilan hydrologique a été ajusté par itération jusqu'à ce que la valeur de la recharge calculée par la méthode de bilan hydrologique corresponde à celle calculée par séparation d'hydrogramme de puits. En posant que le coefficient de ruissellement est constant d'une année à l'autre, cette valeur a été utilisée pour estimer la recharge pour la période de 1964 à 1990 (Tableau 3.3).

Tableau 3.2 Valeurs utilisées pour l'évaluation du bilan hydrologique à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier.

Paramètre	Valeur
Latitude nord	46°52'
Coefficient de ruissellement	0.40
Emmagasinement maximal dans le sol	100 mm
Capacité de rétention	0.05
Point de flétrissement	0.01
Zone racinaire	2500 mm

Le substrat rocheux dans la MRC de Portneuf consiste en deux grands types de roches qui sont les roches ignées et métamorphiques du Grenville et les roches sédimentaires du Paléozoïque. Du fleuve Saint-Laurent jusqu'à la limite du Plateau Laurentien, la majorité de ces roches est couverte des dépôts meubles du quaternaire. La description de ces roches et de ces dépôts meubles ainsi que leur répartition géographique sur le territoire est basée sur les travaux de Clark et Globensky (1973, 1975) et sur les travaux de cartographie des formations superficielles effectués par la Commission géologique du Canada (Cloutier *et al.*, 1997).

Le roc sous-jacent à l'argile dans la partie sud de la région d'étude de Pont-Rouge est un calcaire cristallin appartenant au groupe de Trenton d'âge Ordovicien moyen. Pour la région plus au nord, le roc est composé de migmatite non différenciée de la province de Grenville (Annexe B). Les dépôts meubles dans ce secteur sont composés de sédiments deltaïques et littoraux associés au retrait de la Mer de Champlain, il y a environ 10 000 ans. Ces dépôts sont généralement composés de sable et de gravier. En surface on retrouve des sables fins suivi des sables moyens à grossiers et du gravier

Tableau 3.3 Composantes du bilan hydrologique à la station météorologique de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier pour la période de 1964 à 1990.

Mois	Précipitations totales (mm)	Ruissellement (mm)	Infiltration (mm)	Évapo-transpiration potentielle (mm)	Évapo-transpiration réelle (mm)	Variation d'emma-gasinement dans le sol (mm)	Emma-gasinement dans le sol (mm)	Variation emma-gasinement dans l'eau souterraine (mm)
Janvier	87.26	34.90	52.36	0.00	0.00	0.00	100.00	52.36
Février	74.65	29.86	44.79	0.00	0.00	0.00	100.00	44.79
Mars	80.02	32.01	48.01	0.00	0.00	0.00	100.00	48.01
Avril	83.10	33.24	49.86	19.81	19.81	0.00	100.00	30.05
Mai	114.70	45.88	68.82	71.50	71.50	-2.68	97.32	0.00
Juin	122.40	48.96	73.44	106.60	106.60	-33.16	64.16	0.00
Juillet	126.50	50.60	75.90	125.70	125.70	-49.80	14.36	0.00
Août	126.00	50.40	75.60	107.80	89.96	-14.36	0.00	0.00
Sept.	128.60	51.44	77.16	66.15	66.15	11.01	11.01	0.00
Octobre	112.60	45.04	67.56	30.28	30.28	37.28	48.29	0.00
Nov.	108.70	43.48	65.22	0.00	0.00	51.71	100.00	13.51
Déc.	106.80	42.72	64.08	0.00	0.00	0.00	100.00	64.08
Total	1271.3	508.53	762.80	527.84	510.00	-	-	252.80

en profondeur. À la base de ces dépôts on retrouve un silt argileux peu perméable contenant des coquillages (Annexe C).

3.1.2 Contexte hydrogéologique

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les résultats de l'analyse des paramètres hydrogéologiques de l'aquifère alimentant les puits municipaux de Pont-Rouge. Les données utilisées sont issues des quelques rapports hydrogéologiques existants, ainsi que des campagnes de caractérisation effectuées au cours de l'été et de l'automne 1997.

3.1.2.1 Débit d'exploitation

L'ouvrage de captage d'eau souterraine de Pont-Rouge, nommé source Paquet-Carpentier, est constitué de vingt pointes filtrantes aménagées dans une faible épaisseur de dépôts meubles (environ 6 m). Ce captage sert 67% de la population des municipalités de Pont-Rouge et de Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge, soit plus de 4000 personnes.

L'évaluation du débit moyen annuel des pointes filtrantes a été réalisée à l'aide de l'enregistrement des volumes d'eau pompés depuis la mise en service du captage en janvier 1993 (Tableau 3.4). Le débit moyen annuel calculé est de 950 212 m³/an (2603 m³/jour).

Tableau 3.4 Volumes d'eau pompés aux puits municipaux de Pont-Rouge de janvier 1993 à décembre 1997 (Source : Municipalité de Pont-Rouge).

Mois	Volume (m ³)				
	1993	1994	1995	1996	1997
Janvier	70 744	84 523	74 876	77 753	70 787
Février	62 425	84 700	67 866	74 727	63 283
Mars	74 390	92 862	75 430	80 312	71 340
Avril	69 385	90 139	75 510	75 328	68 730
Mai	78 941	93 263	89 250	86 167	83 370
Juin	80 355	101 590	96 640	89 334	96 454
Juillet	83 537	94 006	89 618	75 615	93 040
Août	76 754	86 100	81 677	79 889	88 920
Septembre	73 081	80 495	80 290	74 978	76 630
Octobre	72 226	76 845	79 999	75 211	77 315
Novembre	69 740	74 310	75 760	69 525	72 167
Décembre	78 513	77 898	76 900	67 449	73 098
Total annuel	890 091	1 036 731	963 816	926 288	935 134

3.1.2.2 Piézométrie

En tout, 65 mesures de niveau d'eau nivelés et 64 points de contrôles estimés à partir des cartes topographiques et de dépôts quaternaires ont été utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique. Les points de mesures sont distribués sur une superficie d'environ 36 km² et la période de mesure s'échelonne principalement, de la mi-juillet à la mi-août 1997.

L'interpolation des mesures a été faite par krigeage. Les paramètres nécessaires au krigeage ont été déterminés à l'aide du module de géostatistique du logiciel GMS (ECGL, 1998) (Tableau 3.5). Un semi-variogramme linéaire a été utilisé pour représenter la variance des mesures de charges hydrauliques en fonction de la distance (Figure 3.4). Les axes de recherche minimal et maximal utilisés sont respectivement de 3500 m et de 5000 m. De cette façon, en ne prenant que la partie linéaire du semi-variogramme, nous respectons la règle de stationnarité justifiant l'emploi du krigeage. La carte piézométrique résultante et la description des points de mesures utilisés sont présentés respectivement aux annexes D et E.

Tableau 3.5 Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage des niveaux d'eau de l'aquifère de Pont-Rouge.

Paramètres du semi-variogramme	
Modèle du semi-variogramme	Linéaire
Effet de pépite	0
Pente	0.09
Azimut de l'axe maximal	20°
Azimut de l'axe minimal	110°
Tolérance angulaire	40°
Largeur de bande	5000 m
Paramètres de recherche	
Rayon de recherche maximal	5000 m
Rayon de recherche minimal	3500 m
Azimut principal de recherche	110°

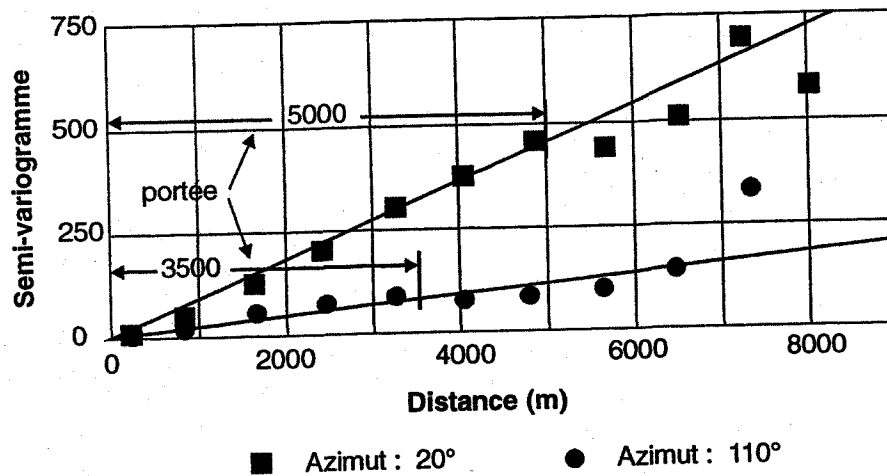


Figure 3.4 Semi-variogramme des niveaux d'eau utilisé pour l'interpolation par krigeage de la carte piézométrique de l'aquifère de Pont-Rouge.

3.1.2.3 Gradient hydraulique régional

Le gradient hydraulique régional a été calculé à l'aide des mesures de niveau d'eau prises dans les piézomètres *P-93-2*, *P-93-3* et *P-A* situés en amont hydraulique de l'ouvrage de captage. Le gradient hydraulique régional calculé est de 0.018 orienté 171°N (Voir l'annexe D pour la localisation des piézomètres).

3.1.2.4 Base imperméable de l'aquifère

La base imperméable de l'aquifère a été déterminée à partir de la description stratigraphique de plus de 70 forages provenant principalement de l'annuaire des puisatiers du Québec. Les matériaux constituant la base imperméable sont des silts et des argiles de la Mer de Champlain, des roches sédimentaires d'âge paléozoïques et des roches métamorphiques et magmatiques d'âge précambriennes.

L'interpolation des mesures a été faite par krigeage en suivant la même méthodologie que pour la formation aquifère, mais avec un axe de recherche de 7000 m (Tableau 3.6 et Figure 3.5). La carte de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère ainsi que la description des points de contrôles utilisés sont présentées respectivement aux annexes F et G.

Tableau 3.6 Paramètres utilisés pour l'interpolation par krigeage de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge.

Paramètres du semi-variogramme	
Modèle du semi-variogramme	Linéaire
Effet de pépite	0
Pente	0.13
Azimut de l'axe maximal	40°
Azimut de l'axe minimal	130°
Tolérance angulaire	40°
Largeur de bande	7000 m
Paramètres de recherche	
Rayon de recherche maximal et minimal	7000 m
Azimut principal de recherche	130°

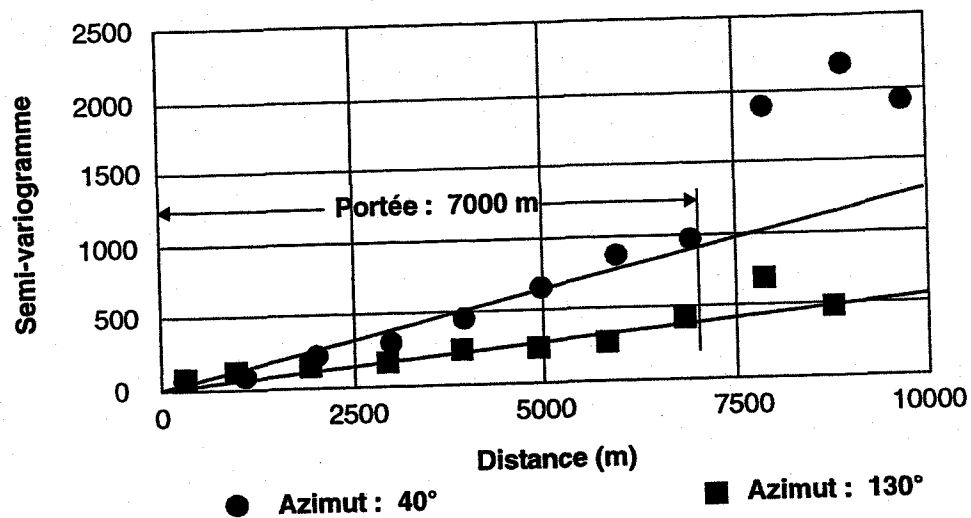


Figure 3.5 Semi-variogramme utilisé pour l'interpolation par krigeage de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge.

3.1.2.5 Épaisseur de sable saturée à proximité des puits

La détermination de l'épaisseur saturée de sable à proximité des puits municipaux de Pont-Rouge a été faite à l'aide d'un profil de géoradar (Pneuf 14) (Figure 3.6) et des forages stratigraphiques effectués par la firme GÉOHYDROTEK en 1991 (GÉOHYDROTEK, 1991) (Tableau 3.7). Le profil de géoradar d'une longueur de 210 m a été effectué sur le site de l'essai de pompage de l'automne 1997 (Voir l'annexe E pour la localisation du profil et l'annexe I pour la description des sondages Pz1, Pz2 et Pu1). Le profil est orienté dans le sens de l'écoulement vers la prise d'eau municipale. Celui-ci montre la présence d'un faible réflecteur sous les puits Pz1, Pu1 et Pz2. Ce réflecteur correspond au contact du gravier et des silts argileux constituant la base imperméable

de l'aquifère. À mesure que l'on s'approche des puits municipaux ce réflecteur disparaît en raison de l'atténuation du signal électromagnétique par les silts et les argiles. L'épaisseur saturée moyenne de l'aquifère à proximité des puits municipaux a été estimée à 9 m.

Tableau 3.7 Description des forages stratigraphiques effectués sur le site des puits municipaux de Pont-Rouge (D'après GÉOHYDROTEK, 1991).

Piézomètre	Profondeur (m)	Description	Niveau statique (m)	Épaisseur saturée (m)
<i>P-1</i>	0-5.49	Sable moyen	1.4	4.10
	5.49-6.10	Sable Argileux		
<i>P-2</i>	0-6.40	Sable moyen	1.4	5.61
	6.40-7.01	Sable grossier		
	7.01-7.62	Sable argileux		
<i>P-3</i>	0-5.49	Sable moyen	1.4	4.10
	5.49-6.10	Sable argileux		
<i>P-4</i>	0-1.83	Sable moyen	1.4	4.10
	1.83-2.74	Sable argileux		
	2.74-5.49	Sable moyen		
	5.49-6.10	Silt		
<i>P-5</i>	0-4.57	Sable moyen	1.4	3.17
	4.57-5.18	Sable argileux		
	5.18-5.49	Silt argileux		
Profondeur moyenne (m)			1.4	4.22
Altitude moyenne du contact (m)			99.93	97.11

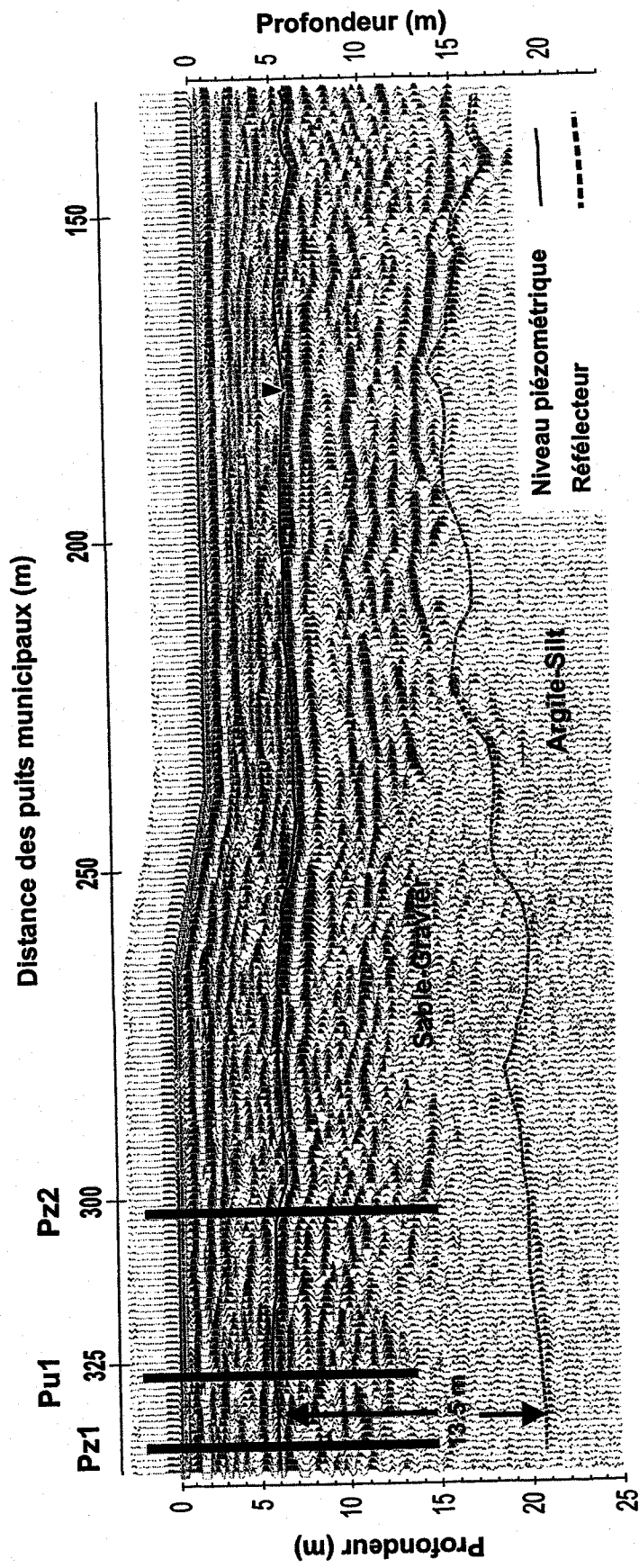


Figure 3.6 Levé de géoradar Pneufl4.

3.1.2.6 Conductivité hydraulique et porosité efficace

La conductivité hydraulique des matériaux granulaires composant l'aquifère alimentant les puits municipaux de Pont-Rouge a été évaluée par des essais de perméabilité *in situ* et un essai de pompage tandis que la porosité efficace a été estimée par l'essai de pompage. Notons que la remontée de la surface libre après l'arrêt du pompage a été mesurée, mais que ces données n'ont pas été interprétées à cause de l'absence de méthodes valables pour leur interprétation (Chapuis, 1999).

3.1.2.6.1 Essais de perméabilité *in situ*

La conductivité hydraulique a été évaluée par 9 essais de perméabilité *in situ* à choc hydraulique de niveau ascendant. Pour ce faire, les piézomètres *Pz1*, *Pz2*, *P-A*, *P-B*, *P-93-1*, *P-93-2*, *P-93-3*, *P-90-43* et *P-90-44* ont été utilisés (Voir l'annexe E pour la localisation). L'analyse de ces essais a été faite par la méthode Bouwer et Rice (1976) (Annexe H).

Le tableau 3.8 présente les caractéristiques des installations et des essais ainsi que les valeurs de conductivité obtenues. La valeur obtenue dans le piézomètre *P-A* est très faible comparativement aux valeurs des autres piézomètres. Ceci s'explique par le fait qu'une partie de la crépine de ce piézomètre est ouverte dans des matériaux fins. De plus, les courbes des piézomètres *P-B* et *Pz2* ne sont pas interprétables par la méthode de Bouwer et Rice (1976) car la réponse de la colonne d'eau au choc hydraulique est oscillatoire. Pour ces cas, la méthode de Uffink (1984) a été utilisée. Cependant, les caractéristiques oscillatoires de la colonne d'eau dans *P-B* ne permettent pas d'obtenir de solution par la méthode d'Uffink (Annexe H).

3.1.2.6.2 Essais de pompage

En février 1991, un essai de pompage a été effectué par la firme GÉOHYDROTEK (GÉOHYDROTEK, 1991) avec les puits municipaux actuels. Cependant, la géométrie des installations, la proximité d'un étang et l'interférence avec le système de pompage municipal existant de l'époque rendaient impossible toute interprétation de l'essai. C'est pourquoi en octobre 1997, un second essai de pompage a été réalisé pour évaluer les propriétés hydrauliques de l'aquifère.

Le site du second essai de pompage est situé en amont de la prise d'eau municipale (environ 300 m) de façon à éviter toutes interférences avec l'étang et le système de pompage municipal (Voir l'annexe E pour la localisation). Pour cet essai, le puits *Pu1* a servi de puits de pompage et les puits *Pz1*, *Pz2* et *P-A* ont servi de puits d'observation (Tableau 3.9). Les schémas d'aménagement des puits *Pu1*, *Pz1* et *Pz2* sont présentés à l'annexe I.

Tableau 3.9 Description des installations utilisées pour l'essai de pompage.

Géométrie des installations	Pu1	Pz1	Pz2	P-A
UTM X (NAD 83/en m)	215 604	215 596	215 617	215 584
UTM Y (NAD 83/en m)	5 180 510	5 180 521	5 180 490	5 180 537
Distance du puits Pu1 (m)	-	11.34	24.94	33.24
Altitude du sol (m)	111.7	111.7	111.7	111.7
Profondeur de la nappe par rapport au sol (m)	6.96	6.91	7.12	6.6
Profondeur du sommet de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe (m)	3.28	6.33	6.12	8.52
Profondeur de la base de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe (m)	6.29	7.56	7.35	9.75
Profondeur de la base de l'aquifère par rapport au niveau initiale de la nappe (m)	13.49	13.86	12.3	14.02
Rayon du puits (cm)	5.08	2.54	2.54	2.54

L'essai de pompage d'une durée de 52 heures a été exécuté du 3 au 5 octobre 1997 au taux de 270 l/min. Le suivi de la remontée du niveau dynamique après l'arrêt du pompage a été fait jusqu'à récupération quasi complète du niveau de la nappe, soit pendant près de 62 heures (du 5 au 8 octobre 1997). L'excédant du pompage a été évacué dans l'étang situé à proximité de la station de pompage (environ 285 m de *Pu1*).

Les courbes de rabattement en fonction du temps enregistrées au cours de l'essai de pompage aux puits d'observation *Pz2* et *P-A* sont présentées à la figure 3.7¹. La forme de ces courbes suggère l'influence d'un drainage retardé (Driscoll, 1986). En effet, la couche de sable moyen constituant la partie supérieure de l'aquifère se draine plus lentement que la couche de gravier très fin sous-jacente. Ce phénomène donne le même effet que la présence d'une limite positive (limite de recharge). À cause de ce phénomène, on ne peut utiliser les méthodes de Neumann (1975) et de Moench (1997) pour l'interprétation en raison de la double forme en « S » des courbes. Dans ce cas, Driscoll (1986) suggère l'application de la méthode de Theis aux données tardives (Figures 3.8 et 3.9). Idéalement, la durée de l'essai aurait dû être prolongée pour atteindre le régime permanent. Puisque la portion de la courbe utilisable pour l'analyse est très courte, les valeurs de conductivité hydraulique obtenues doivent être utilisées avec prudence (Tableau 3.11).

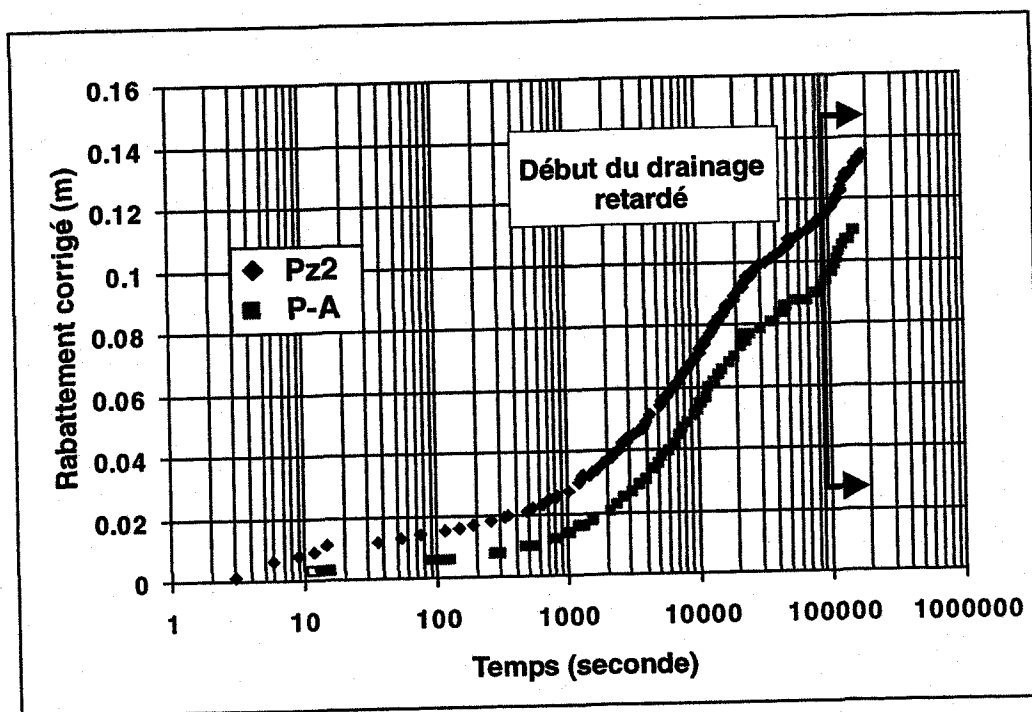


Figure 3.7 Données de pompage des puits d'observation *Pz2* et *P-A* montrant l'influence du drainage retardé.

¹ Les données du puits d'observation *Pz1* ne sont pas disponibles à cause du bris d'un des capteurs de pression utilisés pour l'essai.

De plus, puisque le régime permanent n'est pas atteint, les valeurs de porosité efficace obtenues doivent être vues comme des limites inférieures (Moench, 1994). Les mesures du rabattement prises au cours de l'essai de pompage et de la remonté sont présentées à l'annexe J.

Tableau 3.10 Paramètres hydrauliques obtenues par la méthode de Theis.

Puits d'observation	Conductivité hydraulique (m/sec)	Porosité efficace
<i>Pz2</i>	7.9E-4	0.17
<i>P-A</i>	7.2E-4	0.15
<i>Moyenne géométrique</i>	7.6E-4	0.16

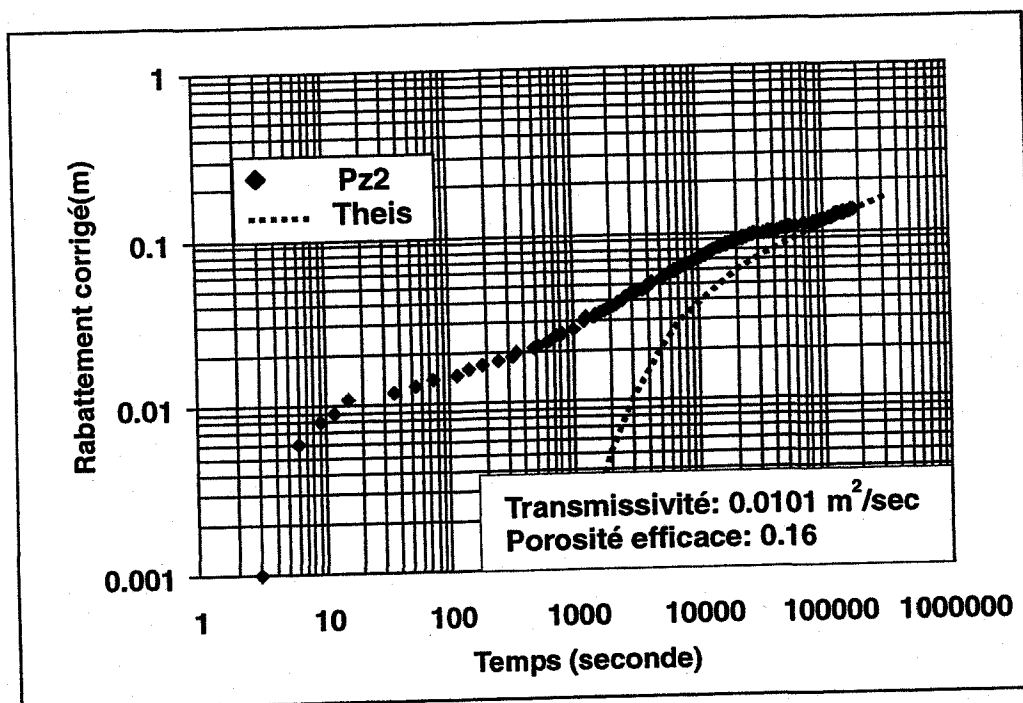


Figure 3.8 Ajustement d'une courbe de Theis aux données tardives de l'essai de pompage au puits d'observation Pz2.

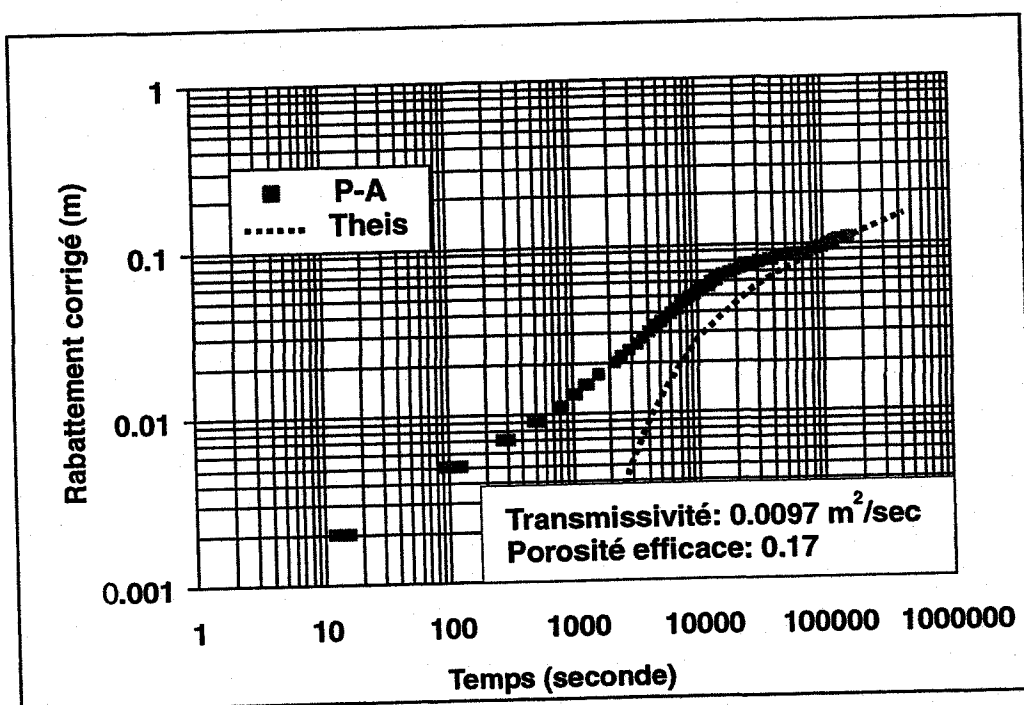


Figure 3.9 Ajustement d'une courbe de Theis aux données tardives de l'essai de pompage du puits d'observation P-A.

3.1.2.7 Recharge

L'évaluation de la recharge a été effectuée par la séparation de l'hydrogramme de puits mesuré au puits d'observation *FR-96-003* (voir l'annexe D pour la localisation du puits). Notons que l'hydrogramme du puits d'observation *FR-96-003* est la seule série de mesures montrant un cycle hydrologique complet permettant l'évaluation de la recharge. La période d'enregistrement s'étend de novembre 1996 à décembre 1998. La méthode de séparation d'hydrogramme de puits est une adaptation de la technique utilisée par Meyboom (1961) pour la séparation d'hydrogramme de rivières. Cette méthode consiste à faire la somme des variations de charges hydrauliques causées pour chaque événement de recharge et à multiplier cette somme par la porosité efficace des matériaux composants l'aquifère (Équation 3.1).

$$R = \sum_{i=1}^m \Delta h_i$$

Équation 3.1

La figure 3.10 illustre la méthode de séparation d'hydrogramme de puits. Une mise en garde doit être ici faite par rapport à l'utilisation de l'équation 3.1 pour des puits dont la position de la crépine est profonde par rapport à la surface de la nappe libre. En effet, si le puits est profond, on peut s'attendre à ce qu'il y ait atténuation de la variation de charge hydraulique par rapport à la variation de la nappe libre, à cause des effets de dissipation de l'énergie dans le système. La crépine du puits d'observation *FR-96-003* a donc été aménagée près de la surface de la nappe libre afin d'éviter une sous estimation de la recharge.

La valeur de porosité efficace utilisée pour le calcul est de 20%. Une valeur supérieure à celle obtenue par l'essai de pompage de la section 3.1.2.6.2 a été choisie parce que le régime permanent n'avait pas été atteint au cours de l'essai. La recharge annuelle ainsi obtenue pour l'année 1997 est de 224 mm/an. Notons que cette valeur a été utilisée pour estimer le coefficient de ruissellement lors de la détermination des paramètres du bilan hydrologique (Section 3.1.1).

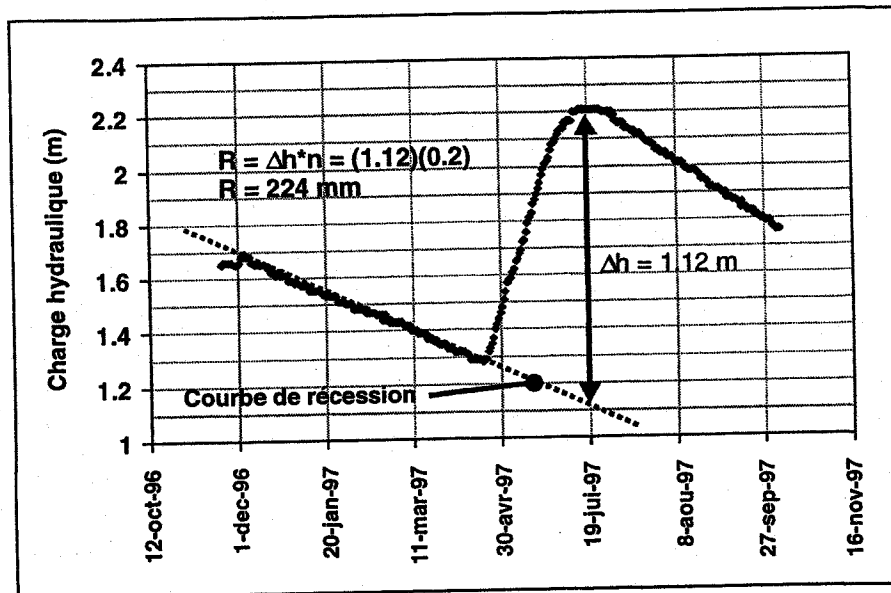


Figure 3.10. Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de puits.

3.1.3 Sources potentielles de contamination

Dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge, les sources potentielles de contamination sont principalement d'origine agricole (Annexe K). En effet, la majorité des terres en amont hydraulique des puits municipaux est utilisée pour la culture des céréales et des pommes de terres. Ces activités ne sont pas sans lien avec les concentrations mesurées en nitrates dépassant parfois la norme d'eau potable de 10 mg/L. Notons que seules les activités du côté sud de la ligne de partage des eaux et au nord de la rivière aux Pommes sont susceptibles d'affecter la qualité de l'eau potable des puits municipaux.

3.2 Calcul des périmètres de protection

Cette section présente l'application des méthodes de détermination des PDP et est divisée en deux sous sections traitant respectivement des PDP éloignés et rapprochés. Les méthodes utilisées pour les calculs font références à la section 2.2 et les PDP issus de l'application de ces méthodes sont présentés à la carte synthèse des PDP des puits de Pont-Rouge, placée à la pochette I.

3.2.1 Périmètres de protection éloignés

Le PDP éloigné correspond à l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage. Ce périmètre vise à protéger le captage des substances polluantes persistantes. Dans le cas où l'aire d'alimentation couvre un très grand domaine ou lorsque l'on utilise le temps de transport comme critère de détermination des PDP, l'aire d'alimentation peut être remplacée par un périmètre correspondant à un temps de transport de 20 ou 25 ans.

3.2.1.1 Équation d'écoulement uniforme

Les dimensions du PDP éloigné calculées par l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980) sont données par les équations 2.2, 2.3 et 2.4. Le débit d'exploitation utilisé est de 2603 m³/jour, l'épaisseur saturée de l'aquifère de 9 m, alors que le gradient hydraulique régional est de 0.018. La valeur de conductivité hydraulique employée correspond à la moyenne géométrique des conductivités mesurées par l'essai de pompage (Section 3.1.2.6.2) et cette valeur est de 75.3 m/jour.

La superficie du PDP éloigné donnée par l'équation d'écoulement uniforme est de 0.58 km². La distance à la limite aval est de 35 m. La limite amont du périmètre correspond à la limite de partage des eaux souterraines et la distance à cette limite est de 2580 m, alors que la largeur de la zone de captage au niveau des puits et la largeur maximale de la zone de captage en amont sont respectivement de 109 et 217 m.

3.2.1.2 Équation d'infiltration

L'équation d'infiltration pour les puits est donnée par l'équation 2.8. La valeur de recharge utilisée est de 254 mm/an et le débit de pompage des puits de 2603 m³/an. La forme du PDP éloigné calculée par l'équation d'infiltration est un cercle de 1091 m de rayon centré sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 3.74 km².

3.2.1.3 Cartographie hydrogéologique

La forme du PDP éloigné tracée par la méthode de cartographie hydrogéologique a été déterminée à l'aide de la carte piézométrique de l'annexe D. Les limites d'écoulement sont exclusivement des limites hydrauliques. La limite amont correspond à la limite de partage des eaux souterraines tandis que la limite aval a été déterminée à partir de la coupe piézométrique de la figure 3.11. Sur cette figure, on remarque que la présence de la rivière aux Pommès n'affecte pas le pompage des puits.

La superficie du périmètre éloigné est de 3.06 km². La distance à la limite amont en suivant le sens d'écoulement est de 3 034 m, alors que la largeur de la zone de captage au niveau des puits est de 288 m. La distance à la limite aval est de 72 m.

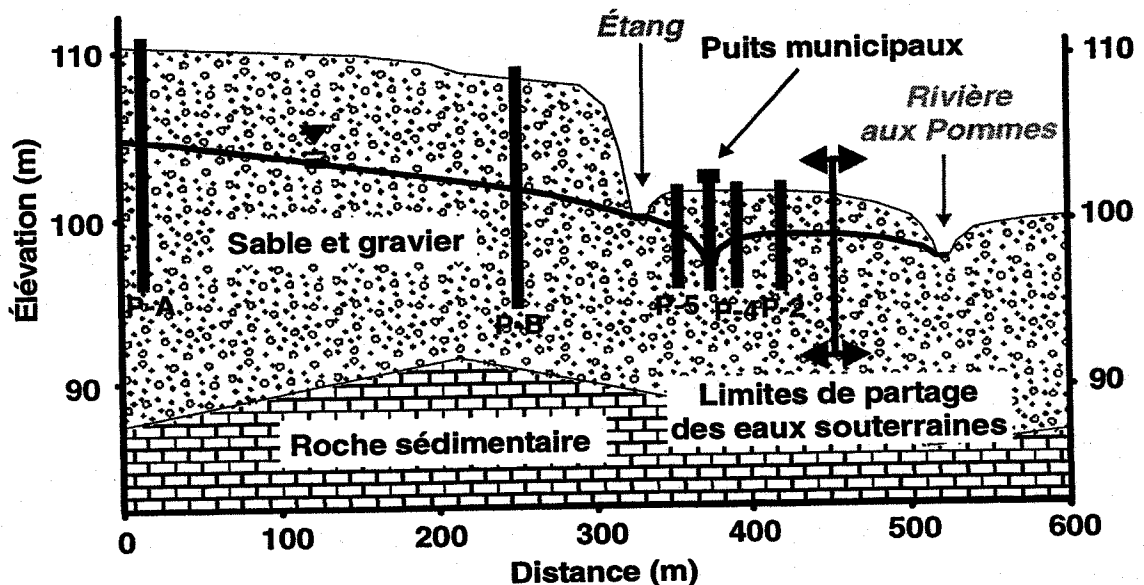


Figure 3.11 Coupe piézométrique montrant la limite d'écoulement en aval des puits municipaux de Pont-Rouge.

3.2.1.4 Méthode 3A2E

La procédure de détermination du PDP éloigné par la méthode 3A2E est discutée à la section 2.2.3.1. Les limites aval et amont sont fixées par cartographie hydrogéologique (Section 3.2.1.3), alors que la superficie du périmètre a été déterminée par l'équation d'infiltration (Section 3.2.1.2).

La forme du PDP éloigné donnée par la méthode 3A2E est une ellipse de demi-grand axe de 2714 m et de demi-petit axe de 1762 m dont les extrémités du grand axe sont fixés sur les limites amont et aval. La superficie de ce périmètre est de 3.7 km².

3.2.1.5 WhAEM

La détermination des PDP par le programme semi-analytique WhAEM est discutée de façon générale à la section 2.2.4.1. Pour le site des puits municipaux de Pont-Rouge, la rivière Jacques-Cartier, la rivière aux Pommes et certains cours d'eau secondaires ont été modélisés par des éléments linéaires. Les vingt puits municipaux sont représentés par quatre éléments de puits. L'emplacement et la valeur de la charge hydraulique de référence ont été ajustés pour simuler l'eau souterraine s'écoulant de l'amont vers la limite nord-est du domaine (Figure 3.12). Le programme ne permettant pas de modéliser une base imperméable d'altitude variable, ce paramètre a été fixé à 80 m. Cette valeur correspond à l'altitude minimale de la base imperméable observée sur le domaine.

En utilisant une valeur de recharge répartie uniformément sur la totalité du domaine, il est impossible de calibrer raisonnablement le modèle. Pour ce faire, nous avons ajusté l'emplacement du cercle de recharge sur la partie nord-est du domaine et ajusté par essais et erreurs les valeurs de conductivité hydraulique et de recharge jusqu'à calibration du modèle. Les valeurs de conductivité hydraulique et de recharge obtenues sont respectivement de 17.4 m/jour et 3750 mm/an (Tableau 3.11). On remarque que la valeur attribuée à la recharge est physiquement impossible. Cependant, cette façon de faire n'affecte en rien la forme des PDP puisque l'algorithme de traçage de particules n'utilise pas la valeur de recharge, mais plutôt la distribution des charges hydrauliques, la conductivité hydraulique et la porosité efficace pour le calcul des PDP. On observe aussi que la valeur de conductivité hydraulique est faible par rapport aux valeurs mesurées. Il s'agit du meilleur ajustement des paramètres de conductivité et de

recharge qu'il soit possible d'obtenir. La conséquence de cette faible valeur de conductivité hydraulique est que les dimensions des PDP seront sous-estimées.

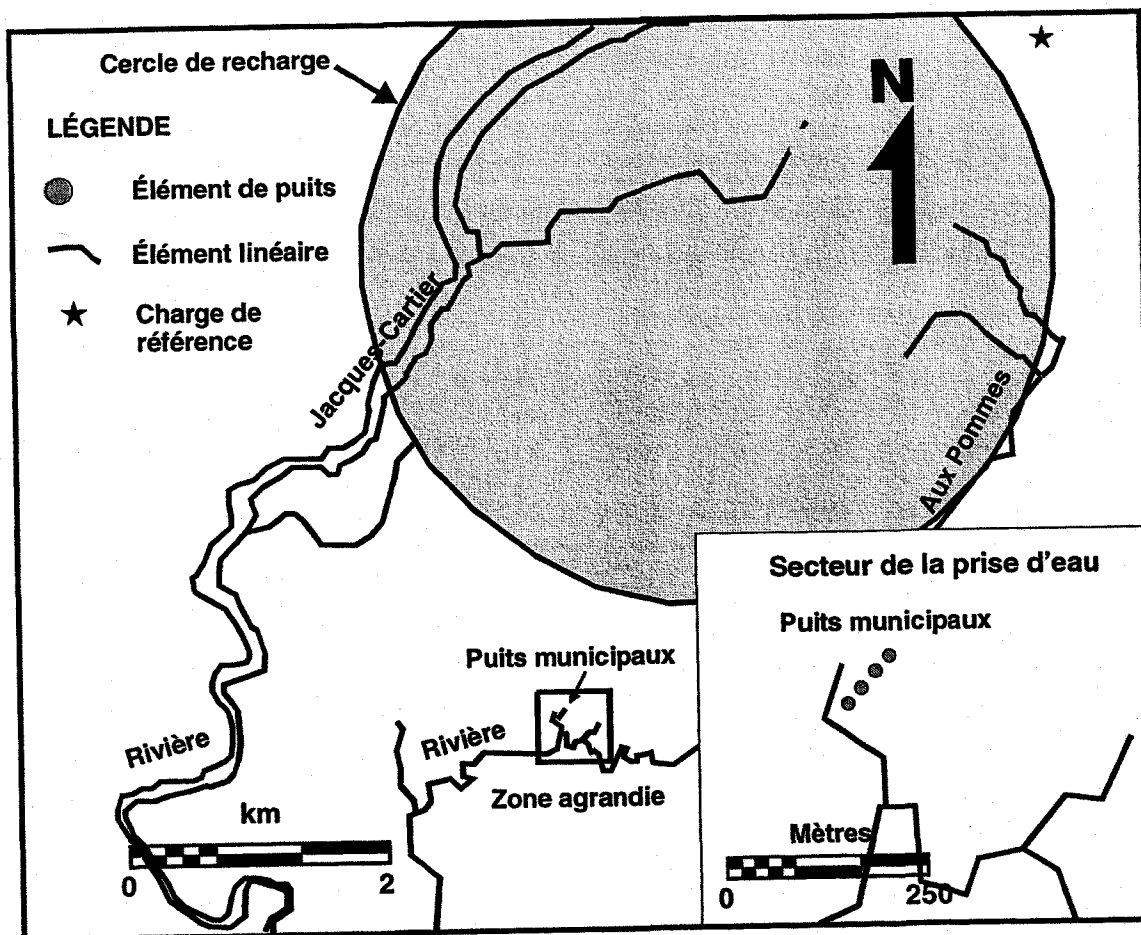


Figure 3.12 Distribution des éléments analytiques (WhAEM) utilisés pour le calcul des PDP des puits de Pont-Rouge.

Douze points de contrôles répartis sur l'ensemble du domaine ont été utilisés pour la calibration du modèle. La définition des niveaux de calibration pour les charges hydrauliques est basée sur l'estimation de l'erreur sur les mesures et sur le degré de réalisme du modèle. La quantification de ces niveaux n'est pas absolue et laisse place au jugement (Tableau 3.12). De plus, l'erreur RMS a été utilisée comme indicateur de calibration. Le modèle est considéré calibré lorsque le ratio de l'erreur RMS sur la perte de charge totale du système est inférieur à 5%. Ainsi, l'erreur sur les charges hydrauliques constitue seulement une petite partie de la réponse globale du système (Anderson et Woessner, 1992). Pour ce modèle, l'erreur RMS cible est de 2.15 m.

Tableau 3.11 Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisés par le programme WhAEM pour le calcul du PDP éloigné des puits de Pont-Rouge.

Puits	Coordonnée X (m/NAD 83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Débit (m ³ /an)	Rayon (m)
1	215820	5180283	237 555	0.381
2	215831	5180294	237 555	0.381
3	215842	5180305	237 555	0.381
4	215853	5180316	237 555	0.381
	Coordonnée X (m/NAD83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Rayon (m)	Recharge (mm/an)
	215877	5185209	3654.19	3750
Base (m)	Épaisseur (m)	Conductivité (m/jour)	Porosité	Charge de référence (m)
80	100	17.4	0.20	135

Tableau 3.12 Niveaux de calibration pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Niveau de calibration	Cible
Niveau 1	± 1.0 m
Niveau 2	± 2.0 m
Niveau 3	± 3.0 m

De façon générale, les charges calculées aux différents points de contrôles sont comparables aux charges observées dans la mesure où elles se retrouvent presque toutes à l'intérieur de l'un ou l'autre des niveaux de calibration (Tableau 3.13). De plus, le tableau 3.14 révèle qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques puisque l'erreur moyenne est pratiquement nulle. On y remarquera aussi que l'erreur RMS cible a été atteinte.

Tableau 3.13 Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

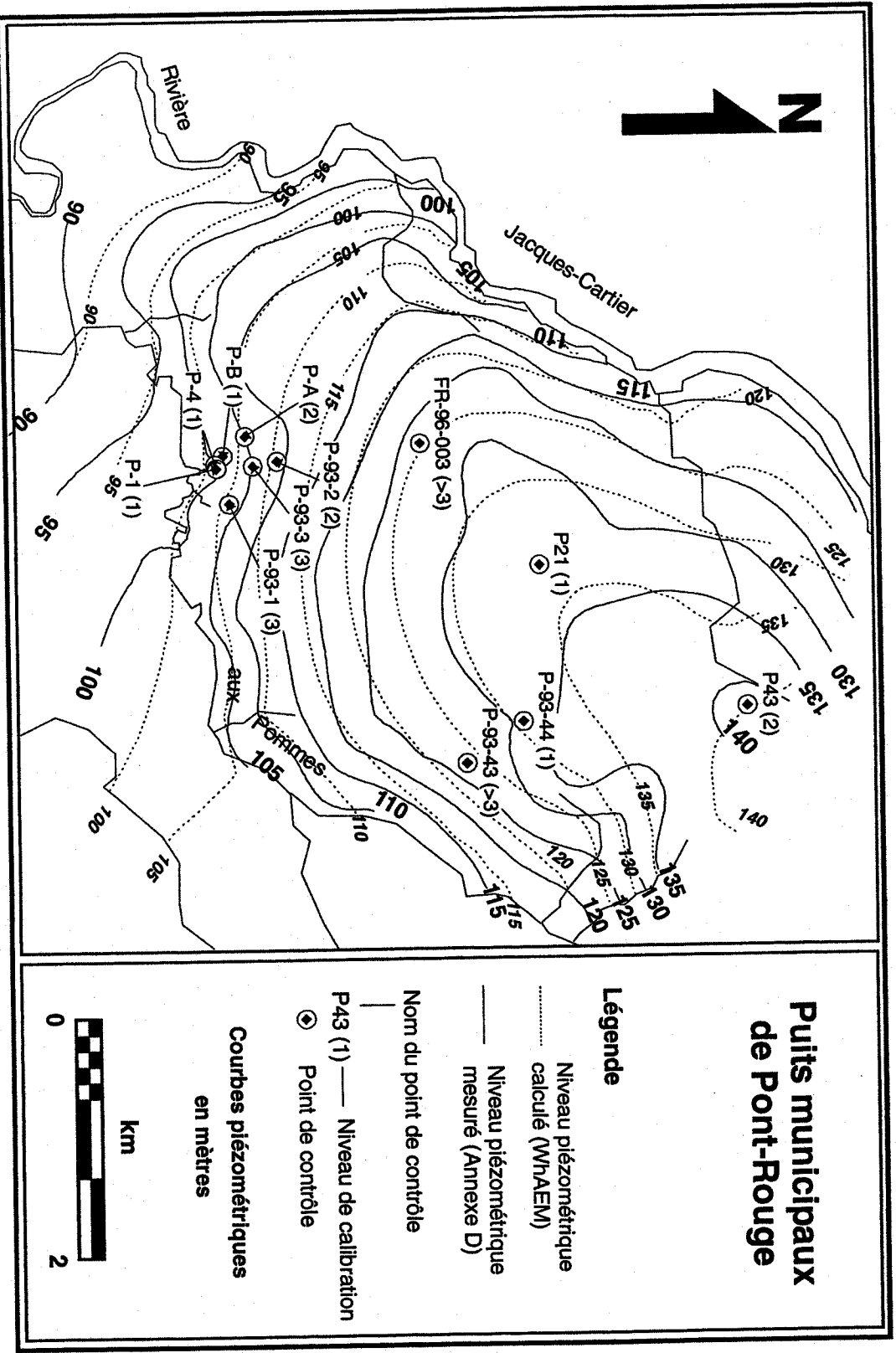
Point de contrôle	Coordonnée X (m/NAD 83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Charge mesurée (m)	Charge calculée (m)	Résiduelle (m)
FR-96-003	215 661	5 182 016	127.83	124.79	-3.04
P-93-1	216 153	5 180 399	102.97	105.79	2.82
P-93-2	215 792	5 180 795	108.67	110.62	1.95
P-93-3	215 833	5 180 604	105.16	107.64	2.48
P-90-43	218 404	5 182 385	127.51	123.21	-4.3
P-90-44	218 040	5 182 869	130.31	130.94	0.63
P-A	215 584	5 180 537	105.08	106.8	1.72
P-B	215 736	5 180 345	101.94	101.96	0.02
P43	217 931	5 184 764	141.23	139.8	-1.43
P21	216 707	5 183 022	134.34	133.7	-0.64
P-4	215 820	5 180 279	98.2	98.39	0.19
P-1	215 853	5 180 288	99.17	99.31	0.14

Tableau 3.14 Sommaire des erreurs pour la modélisation par éléments analytiques (WhAEM) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Type d'erreur	Valeur (m)
Erreur moyenne	-0.05
Erreur absolue moyenne	1.61
RMS	2.07

L'examen visuel de la carte piézométrique présentée à la figure 3.13 révèle que la distribution des charges calculées par le programme WhAEM est comparable à celle des charges observées de l'annexe D. Sur cette figure, le niveau de calibration pour chacun des points de contrôles est aussi indiqué. De plus, la distribution des écarts entre les charges observées et calculées est présentée aux figures 3.14 et 3.15. L'examen de ces figures indique que l'erreur est plutôt distribuée par blocs. Cette distribution est attribuée à l'incapacité du modèle à représenter adéquatement la géométrie de la base imperméable de l'aquifère.

Le PDP éloigné a été déterminé par l'algorithme de traçage de particules WGEN du programme CZAEM pour un temps de transport de 25 ans. La porosité de drainage utilisée est de 20%. La superficie du périmètre est de 1.094 km². La distance à la limite aval est de 58 m alors que la distance à la limite amont en suivant la direction d'écoulement est de 4020 m. La largeur du périmètre au niveau des puits est de 276 m.



Puits municipaux de Pont-Rouge

Légende

- Niveau piézométrique calculé (WHAEM)
- Niveau piézométrique mesuré (Annexe D)

Nom du point de contrôle

- P43 (1) — Niveau de calibration
- ⊙ Point de contrôle

Courbes piézométriques en mètres

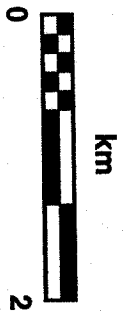


Figure 3.13 Superposition des cartes piézométriques produites à partir des charges calculées (WHAEM) et mesurées (Annexe D) et distribution spatiale des niveaux de calibration au site des puits municipaux de Pont-Rouge.

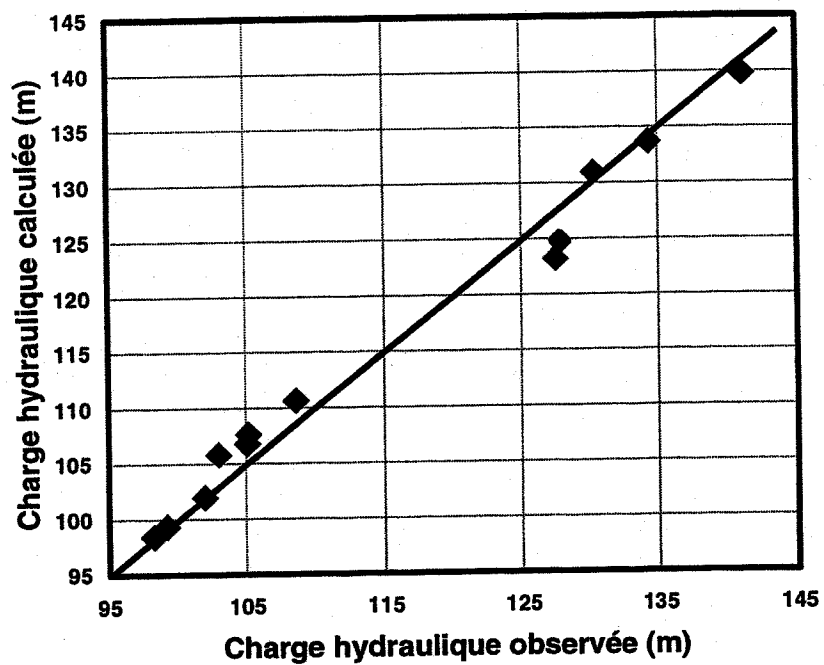


Figure 3.14 Charges hydrauliques calculées par le programme WhAEM en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.

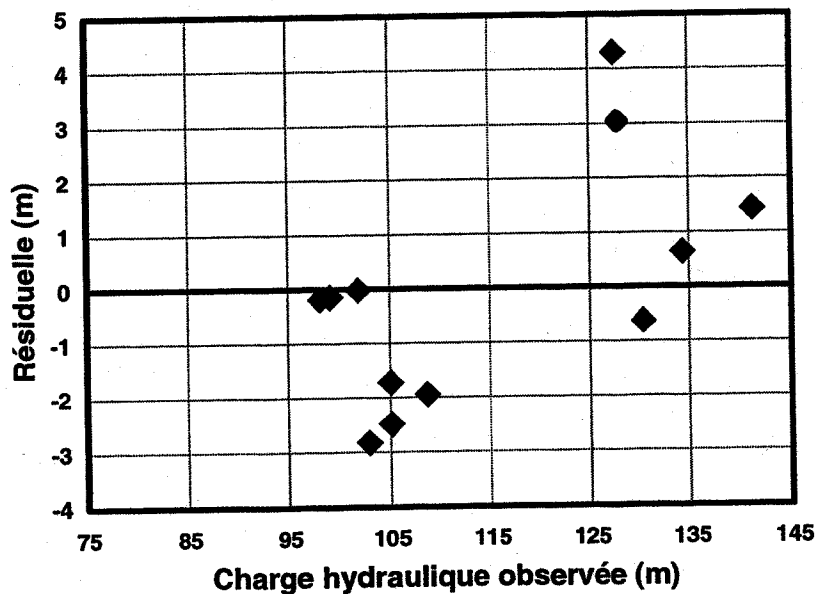


Figure 3.15 Charges hydrauliques résiduelles obtenues par le programme WhAEM en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.

3.2.1.6 MODFLOW-MODPATH

La détermination des PDP des puits municipaux de Pont-Rouge par modélisation numérique est réalisée à l'aide d'un modèle bidimensionnel. Ce choix est justifié pour deux raisons : (1) l'épaisseur saturée de l'aquifère est faible par rapport à l'étendue de l'aquifère et (2) les différents horizons de sable et de gravier constituant l'aquifère peuvent être considérés homogènes en raison de leur faible contraste de conductivité hydraulique.

Les limites latérales du modèle numérique ont été déterminées à partir de la carte piézométrique de l'annexe D. Ainsi, la rivière aux Pommes au sud-est et un ruisseau secondaire au nord-est sont représentés par des éléments de rivière dont les conductances des lits ont été ajustées au cours de la modélisation (0.18 à 0.75 m²/jour/m). La limite de partage des eaux souterraines au nord-ouest et la limite sud-ouest sont respectivement représentées par une limite à flux nul et une charge constante correspondante à une ligne équipotentielle de la carte piézométrique. De plus, les vingt puits municipaux ont été représentés par trois éléments de puits pénétrant complètement l'aquifère (Figure 3.16).

Le maillage utilisé est constitué de 3752 cellules réparties sur 67 colonnes et 56 lignes orienté à 45° dans l'axe des puits municipaux. La dimension de la plus petite cellule est de 20 m par 20 m et est centrée sur l'un des puits. Le pas d'accroissement des cellules est de 10% et la taille maximale des cellules est de 200 m par 200 m (Figure 3.16).

L'aquifère à nappe libre reçoit annuellement par la surface du sol environ 254 mm d'eau provenant de l'infiltration des pluies et de la fonte des neiges (Section 3.1.2.7). Cette valeur a été appliquée uniformément sur l'ensemble de l'aquifère. La base imperméable de l'aquifère est constituée de sable argileux d'origine pro-deltaïque, de calcaire cristallin de l'Ordovicien moyen et de gneiss de la province de Grenville (Section 3.1.1). Ces matériaux sont considérés imperméables à cause de leurs grands contrastes de perméabilité avec les sables et graviers sus-jacents. L'altitude de la base imperméable de l'aquifère a été représentée par des zones d'égale élévation à partir de la carte de l'annexe F (Figure 3.17).

Les valeurs de conductivité hydraulique de l'aquifère ajustées au cours de la calibration varie de 5 à 35 m/jour (Figure 3.18). Ces valeurs sont plus faibles que celles mesurées au cours de l'essai de pompage, mais se retrouvent tout de même dans la limite inférieure des valeurs mesurées par les essais de perméabilité *in situ* à choc hydraulique. Ces valeurs faibles sont expliquées par le fait que le modèle numérique ne tient pas compte des conductivités hydrauliques verticales qui peuvent être d'au moins un ordre de grandeur plus faibles que les conductivités horizontales. Ainsi, pour une valeur fixe de la recharge (254 mm/an), les conductivités hydrauliques du modèle doivent être plus faible pour retenir l'eau dans le modèle et calibrer avec les charges hydrauliques observées. Les zones de conductivité ont été déterminées à l'aide de la carte des dépôts quaternaires de l'annexe C et par la connaissance du terrain.

Treize points de contrôle répartis sur l'ensemble du domaine ont permis la calibration du modèle. L'erreur RMS cible pour ce modèle est de 2.15 m, alors que le premier niveau de calibration a été fixé à 0.75 m (Tableau 3.15).

Tableau 3.15 Niveaux de calibration pour la modélisation avec MODFLOW aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Niveau de calibration	Cible
Niveau 1	±0.75 m
Niveau 2	±1.50 m
Niveau 3	±2.25 m

La calibration du modèle est effectuée pour une simulation en régime permanent avec un débit de pompage de 2603 m³/jour repartis uniformément aux trois puits du modèle. Les charges calculées aux différents points de contrôles sont comparables aux charges observées dans la mesure ou elles se retrouvent toutes à l'intérieur de l'un ou l'autre des niveaux de calibration (Tableau 3.16). De plus, le tableau 3.17 révèle qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques puisque l'erreur moyenne est pratiquement nulle. On y remarquera aussi que l'erreur RMS cible de 2.15 m a été atteinte.

Tableau 3.16 Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Point de contrôle	Coordonnée X (m/NAD 83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Charge mesurée (m)	Charge calculée (m)	Résiduelle (m)
<i>FR-96-003</i>	215661	5182016	127.84	126.72	-1.12
<i>P-93-1</i>	216153	5180399	102.97	103.53	0.56
<i>P-93-2</i>	215792	5180795	108.67	109.21	0.54
<i>P-93-3</i>	215833	5180604	105.16	105.56	0.40
<i>P-90-43</i>	218404	5182385	127.51	128.49	0.98
<i>P-90-44</i>	218040	5182869	130.31	132.17	1.86
<i>P-A</i>	215584	5180537	105.08	104.93	-0.15
<i>P50</i>	218282	5181328	118.53	118.16	-0.37
<i>P18</i>	217503	5181136	119.01	119.04	0.03
<i>P36</i>	217578	5183422	136.33	134.30	-2.03
<i>P19</i>	217212	5182238	130.23	130.08	-0.15
<i>P12</i>	214488	5181288	111.96	111.80	-0.16
<i>P-1</i>	215853	5180288	99.17	99.31	0.14

Tableau 3.17 Sommaire des erreurs pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Erreur	Valeur (m)
Erreur moyenne	0.04
Erreur absolue moyenne	0.65
RMS	0.91

L'examen visuel de la carte piézométrique présentée à la figure 3.19 révèle que la distribution des charges calculées par MODFLOW est comparable à celle des charges observées de l'annexe D. Sur cette figure, le niveau de calibration pour chacun des points de contrôles est aussi indiqué. De plus, la distribution des écarts entre les charges observées et calculées est présentée aux figures 3.20 et 3.21. L'examen de ces figures indique que l'erreur est distribuée de façon aléatoire et que le modèle est bien calibré.

Le bilan de masse du modèle avec pompage est de -0.43% (Tableau 3.18). Ce bilan signifie qu'il sort un peu plus d'eau dans le système qu'il en entre. Les valeurs de flux entrant ($0 \text{ m}^3/\text{j}$) et de flux sortant ($7461 \text{ m}^3/\text{j}$) obtenues pour l'ensemble des cellules de rivières indiquent que l'aquifère recharge les rivières et que la présence de la rivière aux Pommès n'affecte pas le pompage des puits. Cette dernière constatation concorde avec la coupe piézométrique de la figure 3.11.

Tableau 3.18 Bilan de masse du modèle numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des puits municipaux de Pont-Rouge.

Flux entrant (m³/jour)	
Charges constantes	1837.6
Rivières	0
Recharge	10 921
Total	12 759
Flux sortant (m³/jour)	
Charges constantes	2748.3
Rivières	7461.6
Puits	2604
Total	12 814
Différence (%)	-0.43

Le PDP éloigné a été déterminé avec MODPATH par traçage de particules inverse. Le nombre de particules utilisées est de 1800 pour l'ensemble des trois puits équivalents, c'est-à-dire 100 particules réparties sur chacune des six faces des cellules des puits. Le temps de transport utilisé pour le traçage du périmètre éloigné est de 25 ans. La porosité de drainage a été fixée à 20%. La superficie du périmètre obtenu est de 2.95 km². La distance à la limite aval est de 98 m, alors que la distance à la limite amont en suivant la direction d'écoulement est de 2900 m. La largeur du périmètre au niveau des puits est de 943 m.

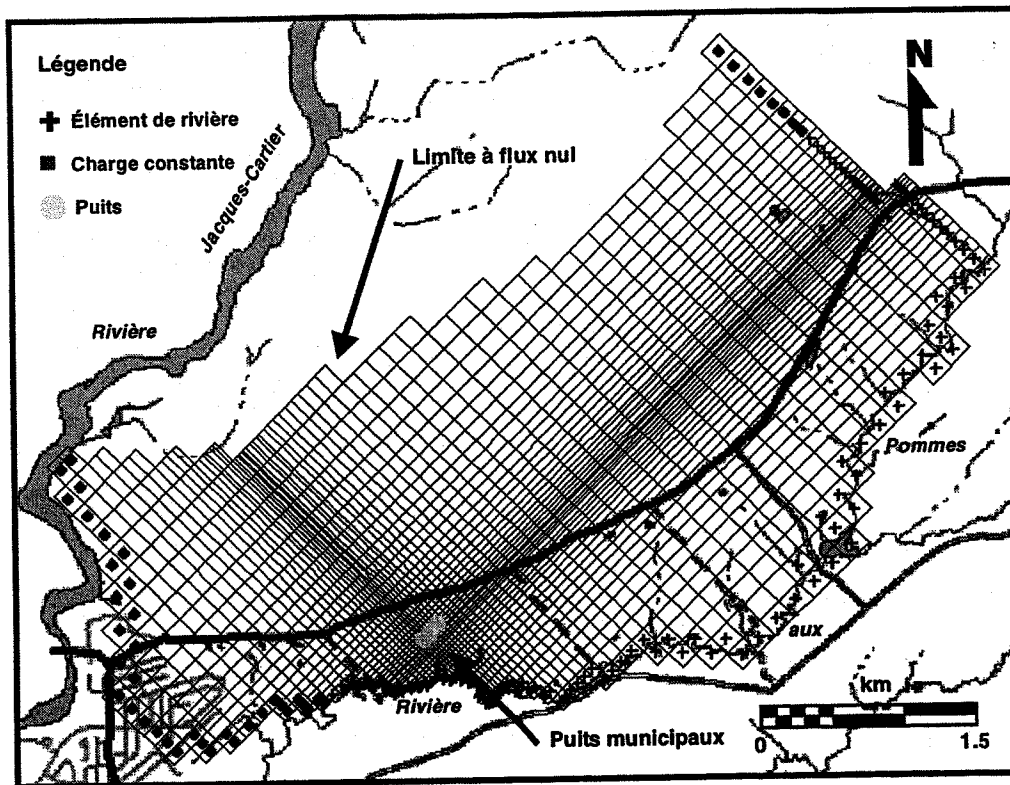


Figure 3.16 Discrétisation de l'aquifère de Pont-Rouge pour la modélisation des PDP avec MODFLOW.

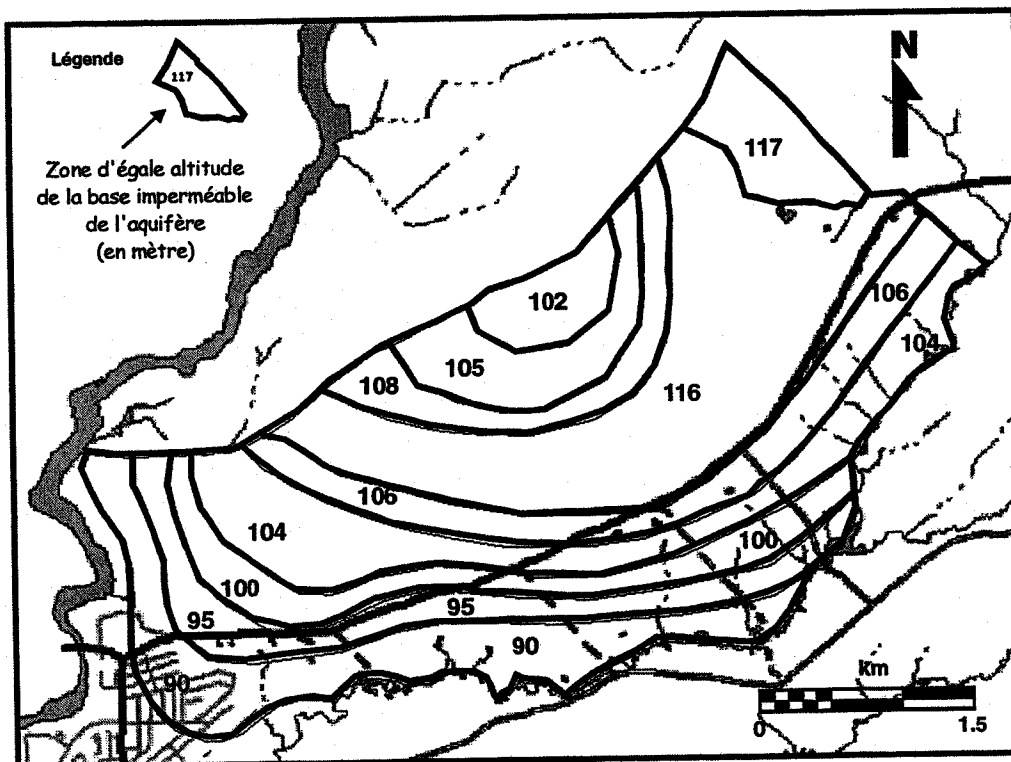


Figure 3.17 Carte de l'altitude de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge pour la modélisation avec MODFLOW.

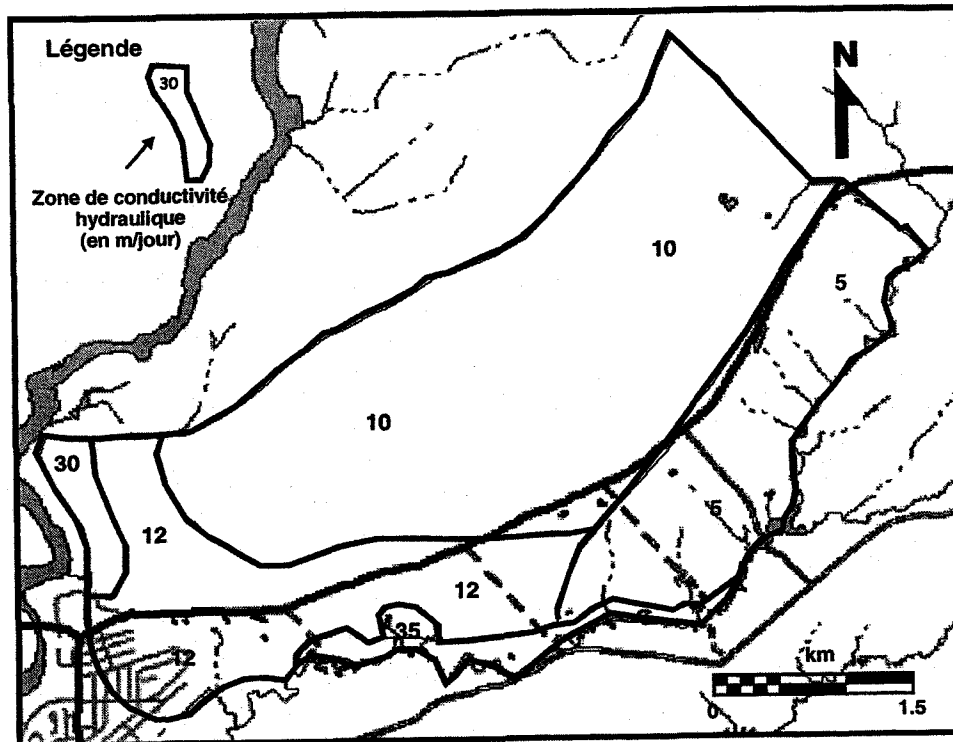


Figure 3.18 Zones de conductivité hydraulique de l'aquifère de Pont-Rouge utilisées pour la modélisation des PDP avec MODFLOW.

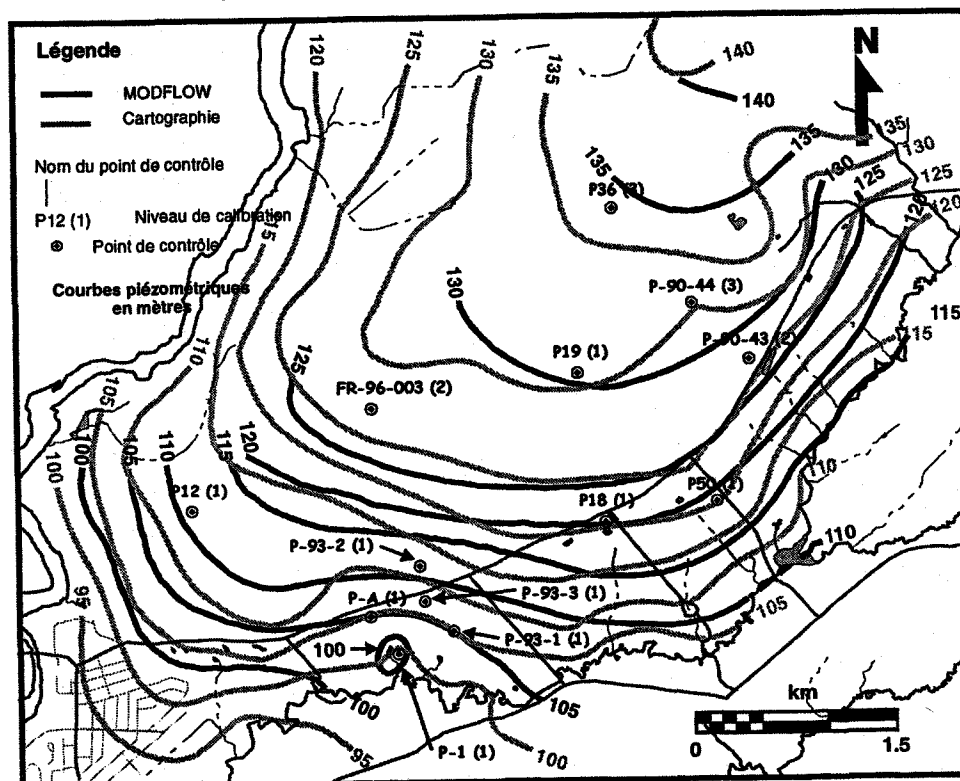


Figure 3.19 Cartes piézométriques produites par MODFLOW et par cartographie pour l'aquifère de Pont-Rouge et distribution spatiale des niveaux de calibration.

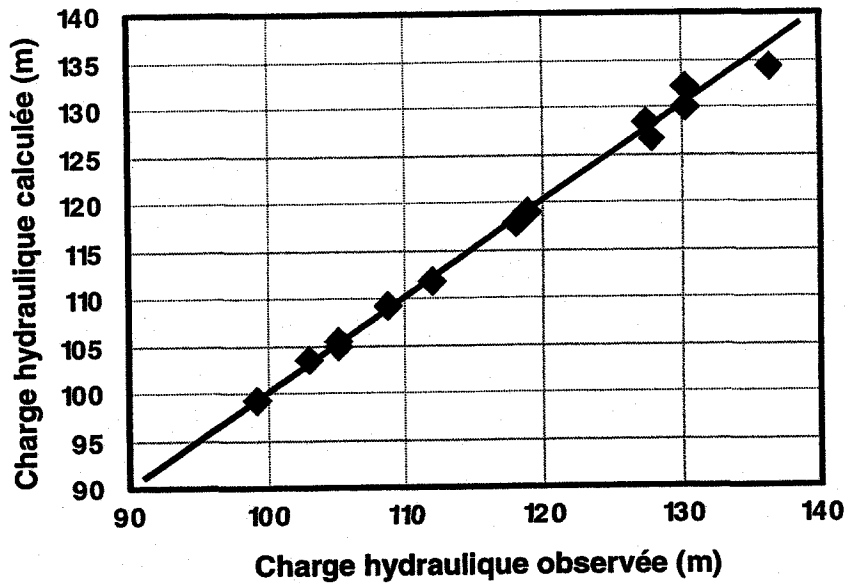


Figure 3.20 Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.

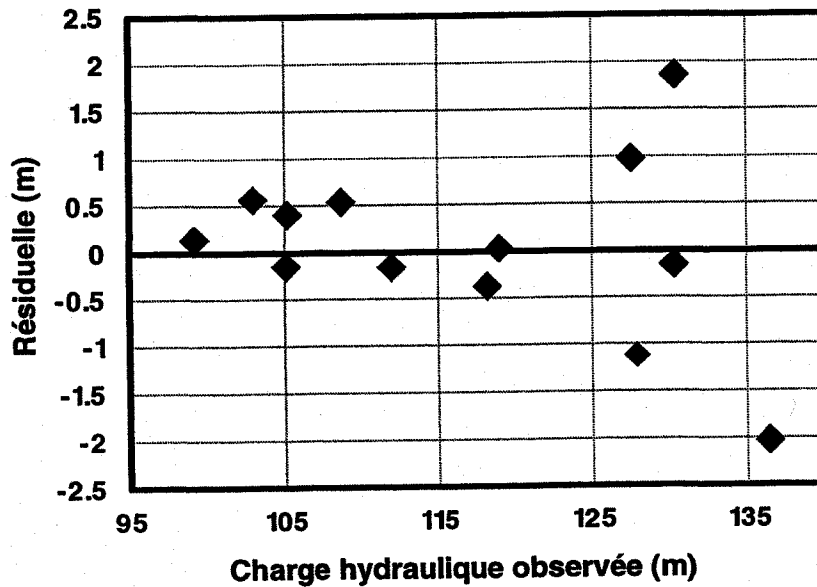


Figure 3.21 Charges hydrauliques résiduelles obtenues par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge.

3.2.2 Périmètres de protection rapprochés

Le PDP rapproché correspond à un temps de transport de 60 jours ou à une distance minimale de 100 m à partir de l'ouvrage de captage. Ce périmètre vise à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale.

3.2.2.1 Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)

Le rayon du PDP rapproché calculé par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) est donné par l'équation 2.7. Ce périmètre a été obtenu de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme. Les valeurs des paramètres hydrogéologiques sont données au tableau 3.19.

Tableau 3.19 Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisées pour l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).

Paramètre	Valeur
Débit de pompage (m ³ /jour)	2603
Temps de transport (jours)	60
Épaisseur saturée(m)	9
Porosité efficace	0.20
Conductivité hydraulique (m/jour)	75.3
Gradient hydraulique local	0.018

La superficie du périmètre rapproché est de 86 950 m². Le rayon inscrit à l'intérieur du périmètre éloigné déterminé par l'équation d'écoulement uniforme est de 417 m, la largeur de la zone de captage au niveau des puits est de 109 m, alors que la distance à la limite aval est de 35 m.

3.2.2.2 Équation du cylindre

L'équation du cylindre pour les puits est donnée par l'équation 2.10. La valeur de porosité efficace employée est de 0.20, l'épaisseur saturée de l'aquifère de 9 m, alors que le débit des puits est de 2603 m³/jour. La forme du PDP rapproché donnée par l'équation du cylindre est un cercle de 153 m de rayon centré sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 73 496 m².

3.2.2.3 Méthode 3A2E

Pour l'application de la méthode 3A2E, la détermination de la limite aval est faite par cartographie hydrogéologique, la limite amont par l'équation du temps de transport basée sur la loi de Darcy et la superficie du périmètre par l'équation du cylindre. Les valeurs des paramètres utilisés sont données dans les sections respectives traitant des méthodes citées. La forme du PDP rapproché est une ellipse de demi-grand axe de 188 m et de demi-petit axe de 124 m, dont les extrémités du grand axe sont fixés sur les limites aval et amont. La superficie de ce périmètre est de 73 496 m².

3.2.2.4 WhAEM

Le modèle utilisé pour la détermination du PDP rapproché par le programme WhAEM est le même que celui de la section 3.2.1.5 pour le périmètre éloigné. La forme du périmètre est obtenue à l'aide de l'algorithme de traçage de particules WGEN du programme CZAEM pour un temps de transfert de 60 jours. La porosité de drainage utilisée est de 20%. La superficie du périmètre est de 50 700 m². La distance à la limite aval est de 58 m alors que la distance à la limite amont en suivant la direction d'écoulement est de 178 m. La largeur du périmètre au niveau des puits est de 220 m.

3.2.2.5 MODFLOW-MODPATH

La détermination du PDP rapproché des puits municipaux de Pont-Rouge par modélisation numérique est réalisée par télescopie du modèle numérique utilisé à la section 3.2.1.6 pour définir le périmètre éloigné (modèle régional). Le modèle local est bidimensionnel et les limites latérales sont définies à partir de la distribution des charges hydrauliques du modèle régional. Ainsi, les limites ouest et est sont à flux nul et les limites nord et sud à charges imposées. Le maillage utilisé est constitué de 2360 cellules réparties sur 59 colonnes et 40 lignes. La dimension de la plus petite cellule est de 10 m par 10 m centrée sur l'un des puits. Le pas d'accroissement des cellules est de 10% et la taille maximale des cellules est de 50 m par 50 m (Figure 3.22). Les valeurs des paramètres hydrogéologiques sont les mêmes que celles du modèle régional et aucune modification n'a été nécessaire pour la calibration du modèle local.

Cinq points de contrôles ont été utilisés pour la calibration du modèle local. L'erreur RMS cible pour ce modèle est de 0.75 m, alors que le premier niveau de calibration a été fixé à 0.5 m (Tableau 3.20).

Tableau 3.20 Niveaux de calibration pour le modèle numérique local (MODFLOW) de l'aquifère des puits municipaux de Pont-Rouge.

Niveau de calibration	Cible
Niveau 1	± 0.5 m
Niveau 2	± 1.0 m
Niveau 3	± 1.5 m

La calibration du modèle est effectuée pour une simulation en régime permanent avec un débit de pompage de 2603 m³/jour réparti uniformément aux trois puits du modèle. Le modèle est très bien calibré puisque la majorité des charges calculées aux différents points de contrôles se retrouve à l'intérieur du premier niveau de calibration (Tableau 3.21). De plus, le tableau 3.22 révèle qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques puisque l'erreur moyenne est pratiquement nulle. On y remarquera aussi que l'erreur RMS cible de 0.75 m a été atteinte.

Tableau 3.21 Comparaison des charges hydrauliques mesurées et calculées aux différents points de contrôles pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).

Point de contrôle	Coordonnée X (m/NAD 83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Charge observée (m)	Charge calculée (m)	Residuelle (m)
P-93-1	216153	5180399	102.97	103.41	0.44
P-93-2	215792	5180795	108.67	109.36	0.69
P-93-3	215833	5180604	105.16	105.53	0.37
P-A	215584	5180537	105.08	104.66	-0.42
P-1	215853	5180288	99.17	98.84	-0.33

Tableau 3.22 Sommaire des erreurs pour le modèle numérique local (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).

Erreur	Valeur (m)
Erreur moyenne	0.16
Erreur absolue moyenne	0.44
RMS	0.46

À la figure 3.23, le niveau de calibration pour chacun des points de contrôles est présenté. De plus, la distribution des écarts entre les charges observées et calculées est présentée aux figures 3.24 et 3.25. L'examen de ces figures indique que l'erreur est distribuée de façon aléatoire et que le modèle est bien calibré. Le bilan de masse du modèle avec pompage est de -1.69% (Tableau 3.23). Ce bilan signifie qu'il sort un peu plus d'eau du système qu'il en entre.

Tableau 3.23 Bilan de masse du modèle numérique local (MODFLOW) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

Flux entrant (m³/jour)	
Charges constantes	3677
Recharge	857.73
Total	4534.8
Flux sortant (m³/jour)	
Charges constantes	2008.2
Puits	2604
Total	4612.2
Différence (%)	-1.69

Le PDP rapproché a été déterminé avec MODPATH par traçage de particules inverse. Le nombre de particules utilisées est de 1800 pour l'ensemble des trois puits équivalents. Le temps de transport utilisé pour le traçage du périmètre rapproché est de 60 jours. La porosité de drainage a été fixée à 20%. La superficie du périmètre obtenu est de 71 540 m². La distance à la limite aval est de 71 m, alors que la distance à la limite amont en suivant la direction d'écoulement est de 256 m. La largeur du périmètre au niveau des puits est de 222 m.

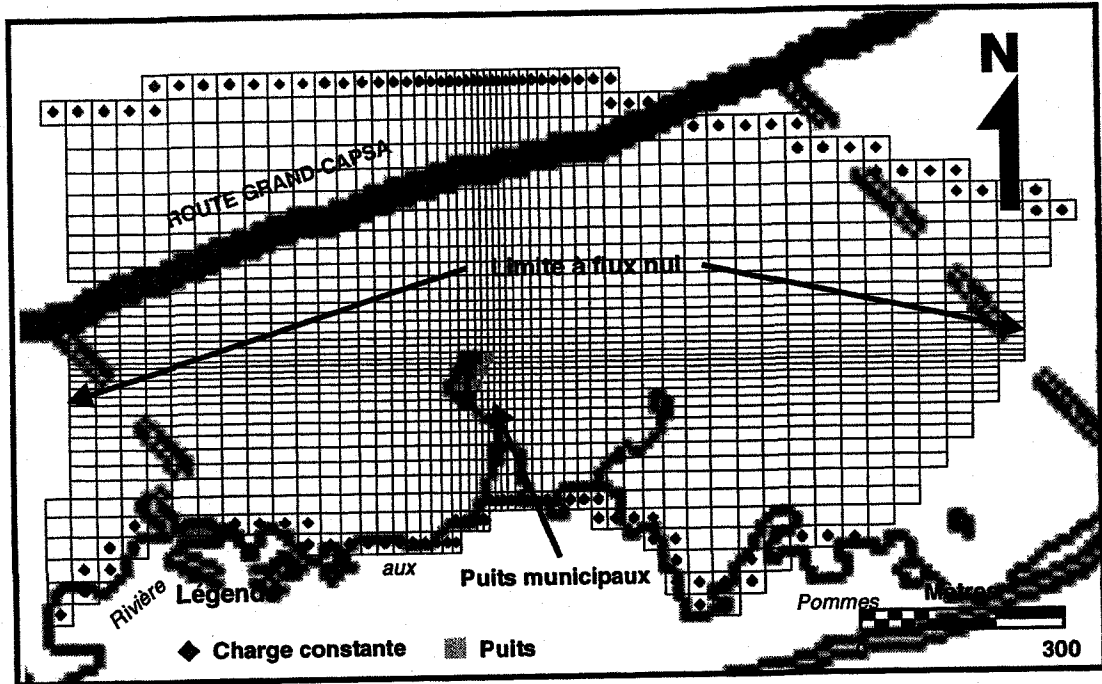


Figure 3.22 Discretisation du site de la prise d'eau municipale de Pont-Rouge (modèle local).

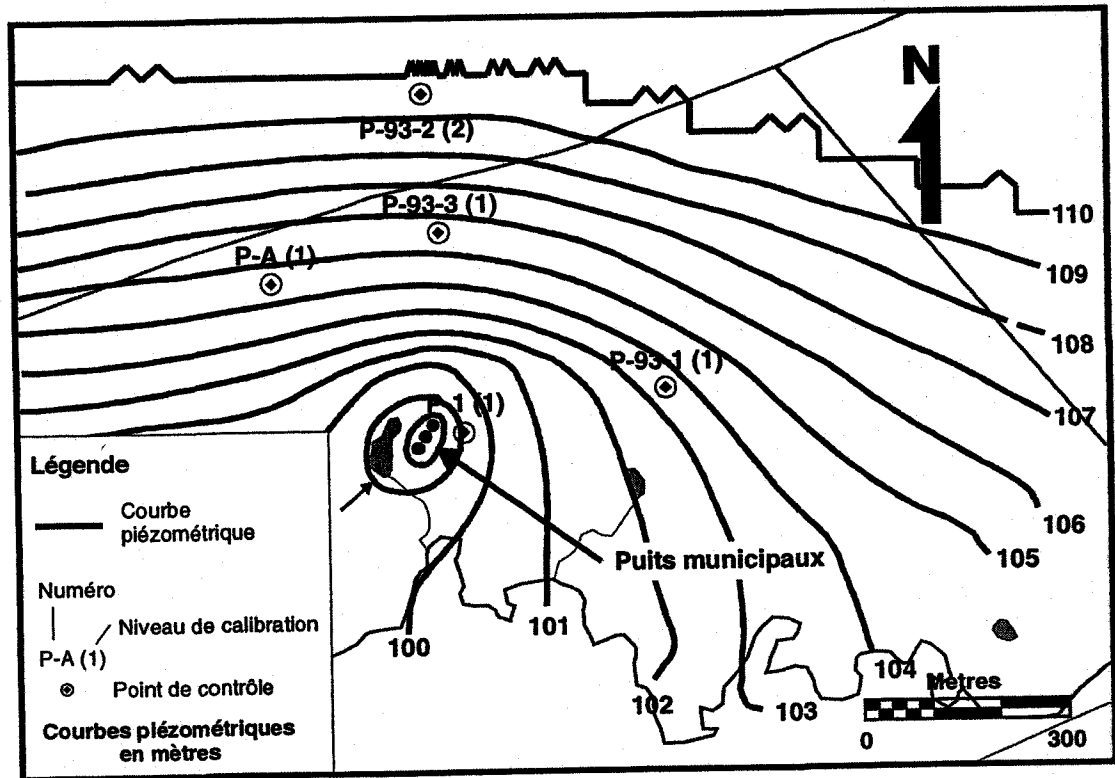


Figure 3.23 Carte piézométrique du modèle numérique local (MODFLOW) et distribution des niveaux de calibration pour l'aquifère de Pont-Rouge.

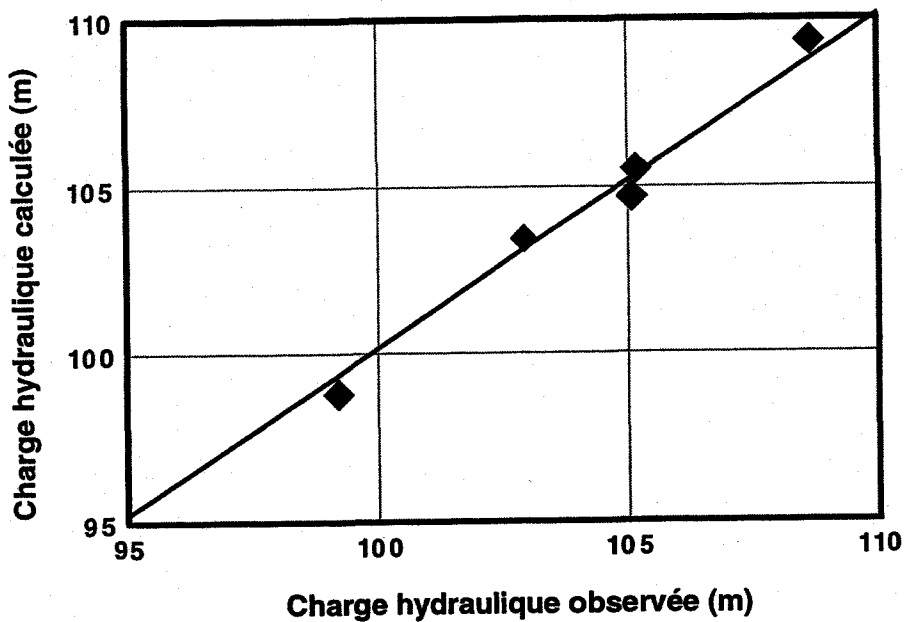


Figure 3.24 Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).

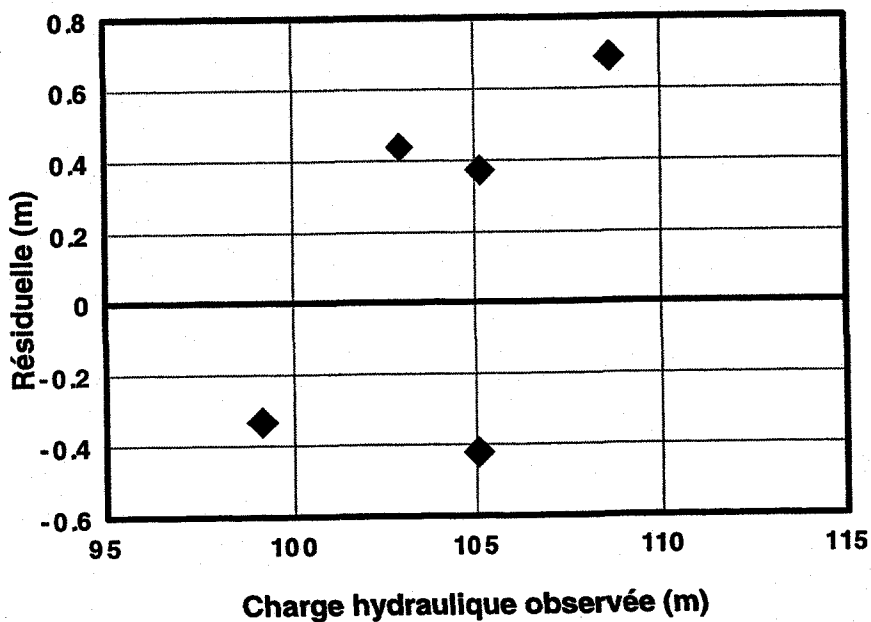


Figure 3.25 Charges hydrauliques résiduelles obtenues par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées dans le secteur des puits municipaux de Pont-Rouge (Modèle local).

CHAPITRE 4

Application des méthodes de détermination des périmètres de protection : les sources de Saint-Alban

Ce chapitre porte sur l'application des méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP) pour les sources municipales de Saint-Alban et comporte deux sections. Dans la première section, nous présentons une description du site comprenant la localisation du site, la physiographie, l'hydrographie, l'hydrologie, la géologie, l'analyse des paramètres hydrogéologiques ainsi que la description et la localisation des sources potentielles de contamination.

À la deuxième section, nous présentons les résultats de l'application des différentes méthodes. Cette application est faite pour les périmètres éloigné et rapproché de l'ouvrage de captage de Saint-Alban.

4.1 Description du site

Dans cette section, nous décrivons les principales caractéristiques de l'aquifère alimentant les sources municipales de Saint-Alban. Cette section est subdivisée en trois parties : le contexte physique, le contexte hydrogéologique et les sources potentielles de contamination.

4.1.1 Contexte physique

La municipalité de Saint-Alban est située au centre de la MRC de Portneuf, à environ 90 km à l'ouest de Québec. La municipalité est accessible via l'autoroute 40 par la sortie 254 et les routes 363 et 354 (Figure 4.1). Le site entourant les sources municipales couvre une superficie d'environ 12 km² et est bordé au sud-est par la rivière Sainte-Anne et au nord-ouest par la rivière Noire (Annexe L).

La région d'étude entourant les sources municipales de Saint-Alban est située dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent (Figure 4.2). Cette région est caractérisée par un relief plat où les dépôts quaternaires contribuent à adoucir le relief montagneux des roches ignées et métamorphiques. Cependant, les abords des rivières Sainte-Anne et Noire sont caractérisés par des pentes abruptes résultant de l'érosion fluviale et des glissements de terrain (Annexe L).

Le site des sources municipales de Saint-Alban est situé dans le bassin versant de la rivière Sainte-Anne (Figure 4.3). La rivière Sainte-Anne draine la partie sud-est du site des sources municipales de Saint-Alban. Cette région d'étude est comprise entre la rivière Sainte-Anne et un de ses tributaires principaux la rivière Noire qui draine la partie nord-ouest (Annexe L).

Au niveau de la région d'étude, les rivières Sainte-Anne et Noire entaillent les argiles marines de la Mer de Champlain. Les pentes abruptes qui bordent la rivière Sainte-Anne consistent en des séquences d'argiles marines surmontées de sable. En plusieurs endroits, la nappe phréatique fait résurgence et l'eau ruisselante forme de petits cours d'eau (sources) qui se jettent dans la rivière Sainte-Anne. Les pentes qui bordent la

rivière Noire sont moins imposantes que celles de la rivière Sainte-Anne et l'épaisseur de sable y est aussi moins importante (Fagnan, 1998).

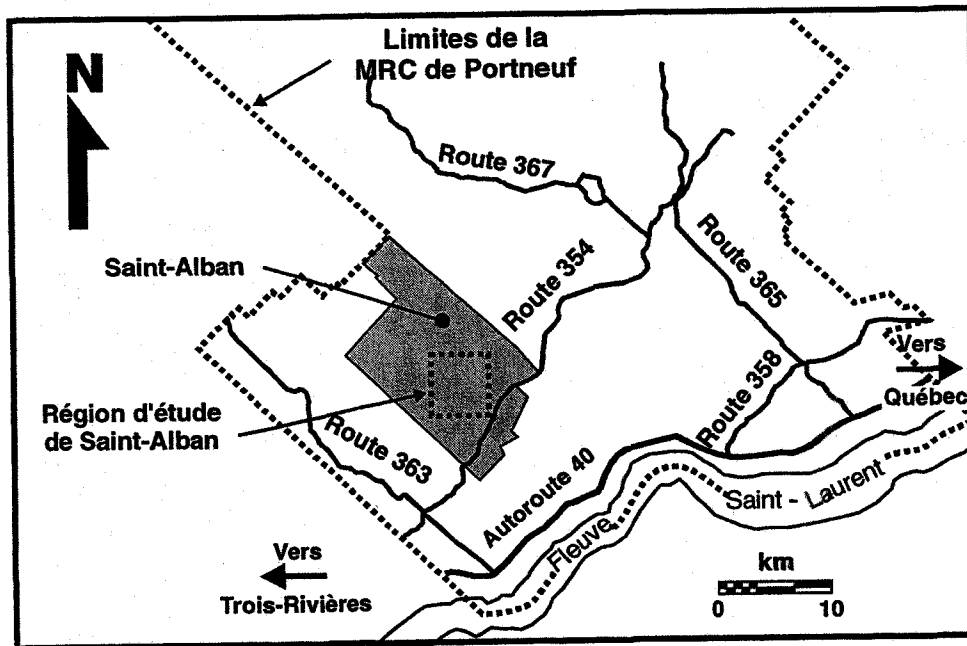


Figure 4.1 Localisation de la région d'étude de Saint-Alban.

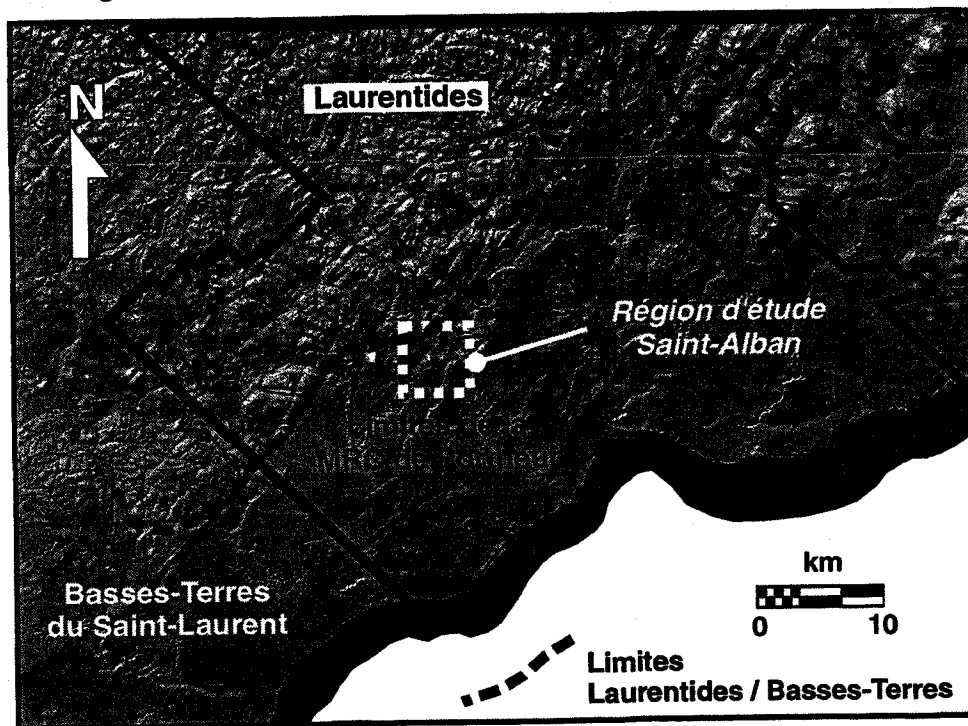


Figure 4.2 Localisation de la région d'étude de Saint-Alban par rapport à la physiographie de la MRC de Portneuf (d'après Fagnan, 1998).

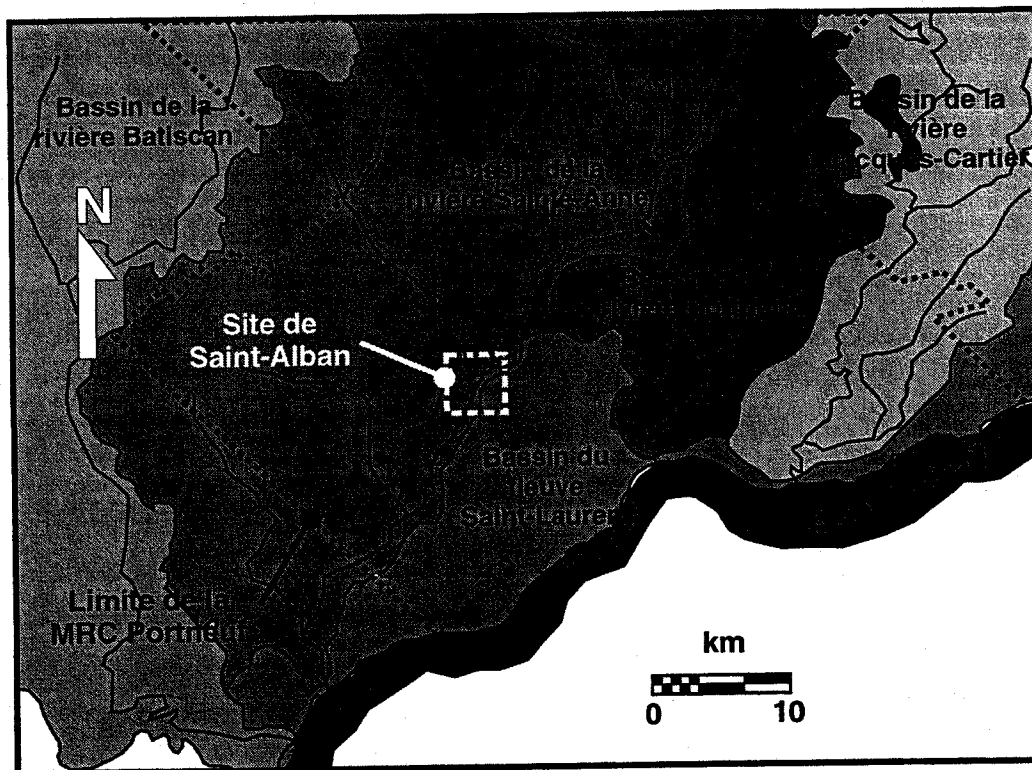


Figure 4.3 Localisation de la région d'étude de Saint-Alban par rapport aux bassins hydrologiques de la MRC de Portneuf.

L'évaluation du bilan hydrologique dans le secteur des sources municipales de Saint-Alban a été faite à partir des données météorologiques enregistrées à la station de Saint-Alban. Cette station est située à environ onze kilomètres au sud-ouest de la région d'étude. La température moyenne annuelle mesurée sur une période de 29 ans entre 1961 et 1990 à la station météorologique de Saint-Alban est de 3.88°C. Les précipitations totales sont de l'ordre de 1079.51 mm dont 852.18 mm (79%) sous forme de pluie et 227.33 mm (21%) sous forme de neige (Tableau 4.1).

La capacité de rétention, le point de flétrissement, la zone racinaire et le coefficient de ruissellement ont été estimés à partir de la connaissance globale du terrain (Tableau 4.2). Ces valeurs ont été utilisées pour faire le calcul des composantes du bilan hydrologique (Tableau 4.3).

Tableau 4.1 Conditions climatiques à la station météorologique de Saint-Alban de 1961 à 1990 (Source : Direction du milieu atmosphérique, Ministère de l'Environnement et de la Faune)..

Mois	Température moyenne (°C)	Pluie (mm)	Neige (mm)	Précipitations totales (mm)
Janvier	-13.3	12.81	51.63	64.44
Février	-11.7	13.19	47.06	60.25
Mars	-4.61	29.92	33.46	63.38
Avril	3.67	59.77	10.61	70.38
Mai	10.99	101.3	0.47	101.77
Juin	16.2	103.9	0	103.9
Juillet	18.93	115.5	0	115.5
Août	17.51	116.1	0	116.1
Septembre	12.48	113.5	0	113.5
Octobre	6.43	94.34	1.44	95.78
Novembre	-0.53	65.47	22.91	88.38
Décembre	-9.5	26.38	59.75	86.13
Annuel	3.88	852.18	227.33	1079.51

Tableau 4.2 Valeurs utilisées pour l'évaluation du bilan hydrologique à la station météorologique de Saint-Alban.

Paramètre	Valeur
Latitude nord	46°43'
Coefficient de ruissellement	0.3
Emmagasinement maximal dans le sol	100 mm
Capacité de rétention	0.05
Point de flétrissement	0.01
Zone racinaire	2500 mm

Tableau 4.3 Composantes du bilan hydrologique à la station météorologique de Saint-Alban pour la période de 1960 à 1990.

Mois	Précipitations totales (mm)	Ruisselement (mm)	Infiltration (mm)	Evapo-transpiration potentielle (mm)	Evapo-transpiration réelle (mm)	Variation d'humidité dans le sol (mm)	Emmagasinement sol (mm)	Variation d'humidité souterraine (mm)
Janvier	64.4	19.3	45.1	0.0	0.0	0.0	60.0	45.1
Février	60.3	18.1	42.2	0.0	0.0	0.0	60.0	42.2
Mars	63.4	19.0	44.4	0.0	0.0	0.0	60.0	44.4
Avril	70.4	21.1	49.3	21.5	21.5	0.0	60.0	27.8
Mai	101.8	30.5	71.2	72.7	72.7	-1.5	58.5	0.0
Juin	103.9	31.2	72.7	108.5	108.5	-35.8	22.7	0.0
Juillet	115.5	34.7	80.9	127.5	103.6	-22.7	0.0	0.0
Août	116.1	34.8	81.3	109.1	81.3	0.0	0.0	0.0
Sept.	113.5	34.1	79.5	66.5	66.5	12.9	12.9	0.0
Octobre	95.8	28.7	67.0	31.2	31.2	35.9	48.8	0.0
Nov.	88.4	26.5	61.9	0.0	0.0	11.2	60.0	50.7
Déc.	86.1	25.8	60.3	0.0	0.0	0.0	60.0	60.3
Total	1079.5	323.9	755.7	537.1	485.3	-	-	270.4

Le roc dans la région des sources municipales de Saint-Alban est principalement un orthogneiss d'âge Précambrien. Pour la région plus au sud, le roc est composé de calcaire d'âge Paléozoïque (Annexe B).

Les dépôts meubles dans le secteur des sources de Saint-Alban sont composés de sédiments deltaïques et littoraux associés au retrait de la Mer de Champlain. Ces dépôts meubles sont généralement composés de sable et de gravier. À la base de ces dépôts on retrouve un sable silto-argileux constituant la base imperméable de l'aquifère (Annexe M).

4.1.2 Contexte hydrogéologique

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons les résultats de l'analyse des paramètres hydrogéologiques de l'aquifère alimentant les sources municipales de Saint-Alban. Les données utilisées sont issues des campagnes de caractérisation effectuées au cours de l'été et de l'automne 1997.

4.1.2.1 Ouvrage de captage

Les installations de pompage des sources de Saint-Alban sont situées au pied d'une pente abrupte en bordure nord de la rivière Sainte-Anne (Annexe L). L'ouvrage de captage est constitué de deux bassins recouverts artificiellement de gravier. Les bassins sont creusés à même le silt argileux et captent l'eau souterraine émergeant au contact du sable et du sable silto-argileux (aquitard). L'eau est acheminée vers le réservoir de pompage à l'aide d'une tubulure de ciment et d'un tuyau d'amené (Figure 4.4). Ce captage alimente 50% de la population de Saint-Alban, soit environ 580 personnes.

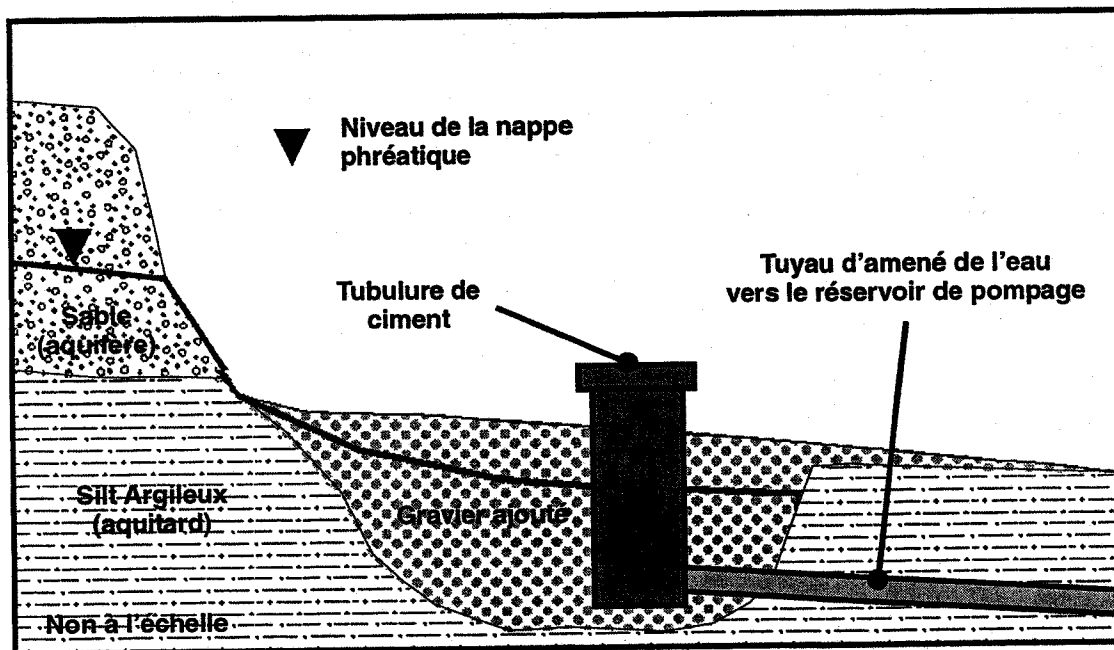


Figure 4.4 Schéma des installations des sources de Saint-Alban.

L'évaluation du débit moyen annuel des sources a été réalisée par la mesure du débit à la sortie des tuyaux de chacun des bassins de captage. La mesure du débit de la

source S4 a été réalisée à l'aide d'un compteur d'eau et le débit de la source S6 à l'aide d'un contenant et d'un chronomètre. La période de mesure débute le 14 novembre 1997 et se termine le 30 septembre 1998. L'estimation des volumes d'eau écoulés est faite par l'intégration des courbes de débits en fonction du temps. Le débit total moyen annuel est de 218 279 m³/an, soit 41 361 m³/an (19%) pour la source S4 et 176 918 m³/an (81%) pour la source S6 (Tableau 4.4).

Tableau 4.4 Débits journaliers mesurés, volumes et débits moyen annuels estimés aux sources S4 et S6 pour la période du 14 novembre 1997 au 30 septembre 1998.

Date	Débit source S4 (m ³ /jour)	Volume estimé S4 (m ³)	Débit source S6 (m ³ /jour)	Volume estimé S6 (m ³)	Volume combiné estimé (m ³)
14-nov-97	147	-	444	-	-
29-janv-98	128	10522	412	32548	43070
12-mars-98	119	5210	400	17073	22284
9-avr-98	115	3287	480	12343	15631
23-avr-98	115	1621	493	6822	8443
7-mai-98	115	1618	542	7253	8871
21-mai-98	113	1599	545	7616	9215
18-juin-98	104	3053	542	15239	18293
30-sept-98	74	9349	538	56208	65557
Volume total (m ³)		36261		155 105	191 367
Débit moyen (m ³ /an)		41360		176 917	218 278

4.1.2.2 Piézométrie

En tout, 54 mesures de niveau d'eau nivelées et 46 points de contrôle estimés à partir des cartes topographiques et des dépôts quaternaires ont été utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique de l'aquifère entourant les sources municipales de Saint-Alban. L'ensemble des points de mesures est distribué sur une superficie d'environ 12 km² et la période de mesure s'échelonne du début à la fin juillet 1997 (Annexe O).

L'interpolation des mesures de niveau d'eau a été faite par krigeage. Les paramètres nécessaires au krigeage ont été déterminés à l'aide du module de géostatistique de GMS (ECGL, 1998) (Tableau 4.5). Un semi-variogramme linéaire a été utilisé pour représenter la variance des mesures en fonction de la distance (Figure 4.5). Afin de

respecter la règle de stationnarité justifiant l'emploi du krigeage, les axes de recherche minimal et maximal sont respectivement de 1750 m et de 2500 m. La carte piézométrique résultante ainsi que la description des points de mesures utilisés sont présentées respectivement aux annexes N et O.

Tableau 4.5 Paramètres d'interpolation pour le krigeage des niveaux d'eau de l'aquifère de Saint-Alban.

Paramètres du semi-variogramme	
Modèle du variogramme	Linéaire
Effet de pépite	0
Pente	0.018
Anisotropie - pente	Aucune
Tolérance angulaire	40°
Largeur de bande	2500 m
Paramètres de recherche	
Rayon de recherche maximal	2500 m
Rayon de recherche minimal	1750 m
Azimut principal de recherche	40°

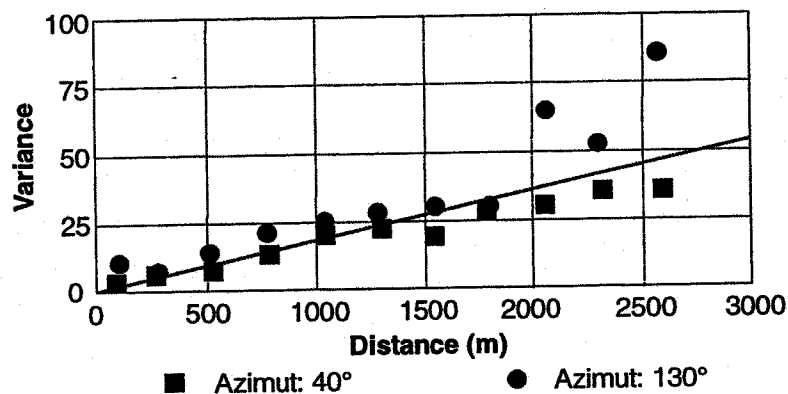


Figure 4.5 Semi-variogramme des niveaux d'eau utilisés pour l'interpolation par krigeage de la carte piézométrique de l'aquifère de Saint-Alban.

4.1.2.3 Gradient hydraulique

On observe sur la carte piézométrique de l'annexe N que le gradient hydraulique à proximité des sources est très variable. Pour le calcul des PDP éloigné et rapproché, nous avons utilisé des gradients hydrauliques distincts. Pour le périmètre éloigné, un gradient hydraulique régional moyen de 0.0095 239°N représentatif de la superficie du

PDP éloigné a été calculé à partir des points de contrôles A13, A34 et Pz14. Pour le périmètre rapproché, le gradient hydraulique local est de 0.036 251°N et a été obtenu à partir des points de contrôles Pz12, Pz6 et Pz14 (Voir l'annexe N pour la localisation des points de contrôles).

4.1.2.4 Épaisseur saturée de l'aquifère

L'épaisseur saturée de l'aquifère à proximité des sources municipales de Saint-Alban a été déterminée à partir des forages stratigraphiques du tableau 4.6. De plus, nous présentons à la figure 4.6 une coupe hydrostratigraphique représentative de l'aquifère des sources de Saint-Alban (Voir l'annexe L pour la localisation de la coupe). L'épaisseur saturée de l'aquifère est estimée à 3 m.

Tableau 4.6 Forages stratigraphiques utilisés pour l'estimation de l'épaisseur saturée de l'aquifère de Saint-Alban.

Forage	Distance à partir de S4 (m)	Élévation du sol (m)	Élévation de la nappe libre (m)	Élévation base imperméable (m)
S4	0	63.4	61.51	61
Pz14	30	66.86	66.44	65.21
Pz10	80	78.24	69.87	65.78
Pz4	130	81.86	71.18	65.96
A13	1330	80.58	80.18	79.68

4.1.2.5 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique des matériaux granulaires composant l'aquifère des sources de Saint-Alban a été évaluée par six essais de perméabilité *in situ* à choc hydraulique de niveau ascendant. Les piézomètres Pz1, Pz4, Pz6, Pz12, P-90-60 et P-91-71 ont servi à effectuer ces essais (Tableau 4.7).

L'analyse du rabattement en fonction du temps a été faite par la méthode de Bouwer et Rice (1976). Selon cette méthode, la conductivité hydraulique moyenne (moyenne géométrique) de l'aquifère est de 1.84×10^{-4} m/s (15.9 m/jour). Les schémas d'aménagements des piézomètres Pz1 à Pz14 et les données des essais de perméabilité *in situ* sont présentés respectivement aux annexes P et Q.

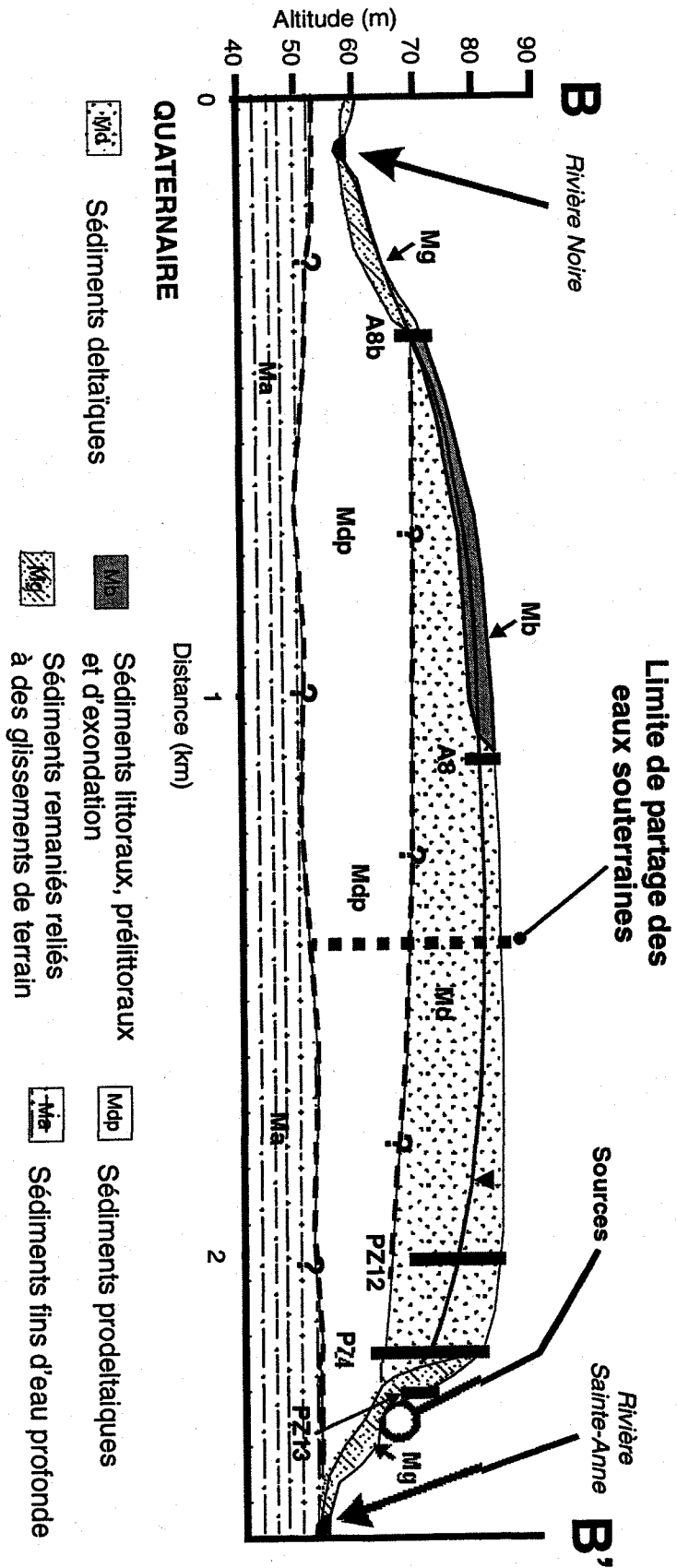


Figure 4.6 Coupe hydrostratigraphique de l'aquifère alimentant les sources de Saint-Alban.

Tableau 4.7 Caractéristiques des installations et des essais de perméabilité *in situ* pour l'évaluation de la conductivité hydraulique de l'aquifère de Saint-Alban (les valeurs en *italiques* sont des estimations).

	PZ1	PZ4	PZ6	PZ12	P-90-60	P-91-71
Piezomètre						
Rabattement initiale mesuré (m)	0.458	0.535	0.815	0.765	1.63	1.73
Rayon piézomètre (m)	0.01905	0.01905	0.01905	0.01905	0.01905	0.01905
Épaisseur saturée (m)	3.66	2.03	5.46	4.36	2.64	5.40
Longueur crépinée (m)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.61	0.61
Niveau statique dans piézomètre (m)	2.72	1.56	1.44	1.81	2.13	2.01
Ratio des conductivités hydrauliques verticale et horizontale	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Lithologie						
	Sable fin gris	Sable fin à moyen	Gravier très fin	Sable fin à moyen	Sable fin gris	Sable moyen à grossier
Rabattement initiale calculé (m)	0.4137	0.5512	1.002	0.923	1.574	2.052
Conductivité hydraulique horizontale (m/sec)	7.63E-05	1.51E-04	6.60E-04	3.25E-04	7.44E-05	2.12E-04
Conductivité hydraulique horizontale (m/sec) – Moyenne géométrique						
						1.84E-04

4.1.2.6 Recharge

Dans cette sous-section, l'évaluation de la recharge a été effectuée par deux méthodes : (1) la méthode de séparation d'hydrogramme de puits et (2) la méthode de séparation d'hydrogramme de source.

4.1.2.6.1 Séparation d'hydrogramme de puits

La recharge annuelle évaluée par la méthode de séparation d'hydrogramme de puits est faite à partir des enregistrements des fluctuations du niveau de la nappe libre aux piézomètres *P-90-60* et *Pz12* (Voir l'annexe R pour la localisation des piézomètres). La période de mesures s'étend de décembre 1997 à octobre 1998.

On observe à la figure 4.7 qu'il s'est produit au cours de la période de mesure deux événements de recharge. Le premier événement débute vers la mi-mars et se termine à la mi-mai, tandis que le deuxième a lieu au cours de l'automne (fin septembre à début octobre). Malgré le manque de données pour définir la courbe automnale, il est tout de même possible d'estimer la recharge pour cette période. La recharge moyenne annuelle obtenue par la méthode de séparation d'hydrogramme de puits pour la période de décembre 1997 à octobre 1998 est de 268 mm/an (Tableau 4.8). Cette valeur correspond à la moyenne des valeurs obtenues aux piézomètres *Pz12* et *P-90-60*. Notons que la valeur de la recharge calculée par cette méthode est dépendante de l'estimation de la porosité efficace. Puisqu'il n'y a pas de mesures précises de ce paramètre, la méthode de séparation d'hydrogramme de puits a été utilisée en parallèle avec la méthode de séparation d'hydrogramme de sources.

Tableau 4.8 Valeurs des paramètres utilisées pour le calcul de la recharge par la méthode de séparation d'hydrogramme de puits aux sources de Saint-Alban (les valeurs en *italiques* sont des estimations).

Piezomètre	Variation charges hydrauliques printanière (mm)	Variation charges hydrauliques automnale (mm)	Somme des variations annuelles (mm)	Matériau composant partie crepines	Porosité efficace estimée	Recharge annuelle (mm/an)
Pz12	1117	300	1417	Sable fin à moyen	<i>0.19</i>	269
P-90-60	1400	375	1775	Sable fin gris	<i>0.15</i>	266

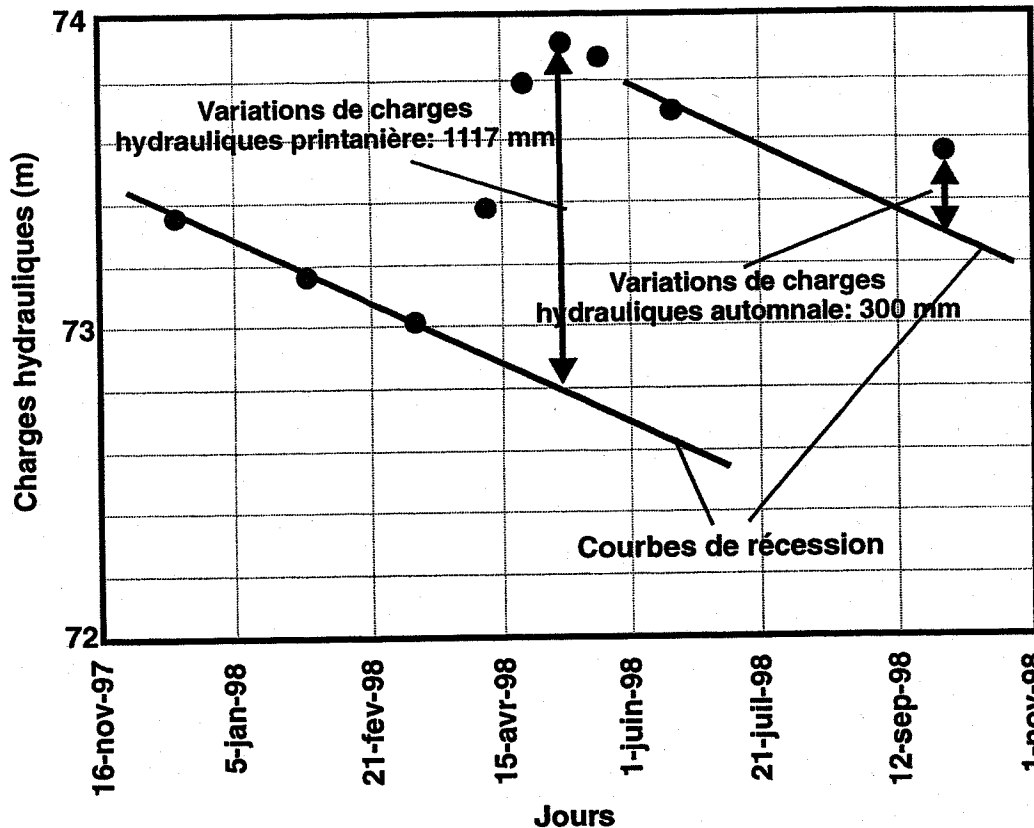


Figure 4.7 Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de puits pour le piézomètre *Pz12* dans le secteur des sources municipales de Saint-Alban.

4.1.2.6.2 Séparation d'hydrogramme de source

L'évaluation de la recharge effectuée par la méthode de séparation d'hydrogramme de sources nécessite la connaissance du volume d'eau rechargeant l'aquifère ainsi que la superficie de la zone de contribution (Figure 4.8) (Équation 4.1).

$$R = Q_{recharge} / Aire_{zc} \quad \text{Équation 4.1}$$

L'évaluation de la recharge a été faite à partir de l'hydrogramme cumulé des sources S4 et S6 (Tableau 4.4). La période de mesure débute en décembre 1997 et se termine en octobre 1998. La superficie de la zone de contribution a été calculée à l'aide de la carte piézométrique. Tout comme pour l'hydrogramme de puits de la figure 4.7, on observe sur l'hydrogramme de source de la figure 4.8 qu'il s'est produit au cours de l'année deux événements de recharge. La recharge annuelle obtenue par la méthode de séparation

d'hydrogramme de sources est de 261 mm/an. Cette valeur est similaire à la valeur obtenue par la méthode de séparation d'hydrogramme de puits.

Tableau 4.9 Valeurs des paramètres utilisées pour le calcul de la recharge par la méthode de séparation d'hydrogramme de source à Saint-Alban.

Source	Variation débit printanier (m^3/j)	Variation débit automnale (m^3/j)	Somme des variations annuelles (m^3/j) - $Q_{recharge}$	Superficie zone de contribution (m^2) - $A_{réz$	Recharge annuelle (mm/an) - R
S4 & S6	181	25	206	288 300	261

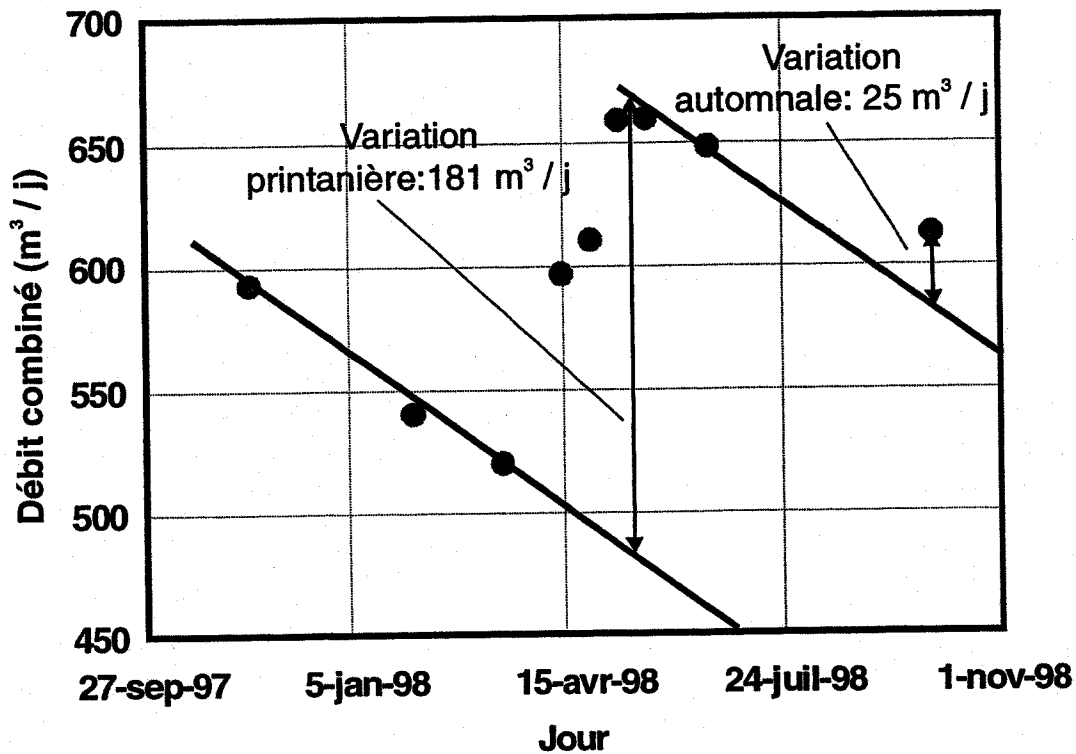


Figure 4.8 Illustration de la méthode de séparation d'hydrogramme de source. Hydrogramme combiné des sources S4 et S6 de Saint-Alban.

4.1.3 Sources potentielles de contamination

Dans le secteur des sources municipales de Saint-Alban, les sources potentielles de contamination sont principalement d'origine agricole. En effet, la majorité des terres en amont hydraulique des sources est utilisée pour la culture de céréales et de pommes de terres. Toutefois, aucun dépassement des normes de potabilité de l'eau n'a été enregistré depuis la mise en service des installations. L'annexe S présente la carte d'utilisation du sol.

Néanmoins, nous recommandons à la municipalité de suivre l'évolution de la qualité de l'eau souterraine dans le réseau de puits d'observation mis en place en décembre 1997 ainsi que dans les sources S4 et S6. Certains de ces puits peuvent être utilisés comme puits d'alerte par rapport aux différentes activités agricoles.

4.2 Calcul des périmètres de protection

Cette section qui présente l'application des méthodes de détermination des PDP est divisée en deux parties traitant respectivement des PDP éloignés et rapprochés. Les méthodes utilisées pour les calculs font référence à la section 2.2 et les PDP issus de l'application de ces méthodes sont présentés à la carte synthèse des PDP des sources de Saint-Alban, placée à la pochette 2.

4.2.1 Périmètres de protection éloignés

Le PDP éloigné correspond à l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage. Ce périmètre vise à protéger le captage des substances polluantes persistantes. Dans le cas où l'aire d'alimentation couvre un très grand domaine ou lorsque l'on utilise le temps de transport comme critère de détermination des PDP, l'aire d'alimentation de l'ouvrage de captage peut être remplacée par un périmètre correspondant à un temps de transport de 20 ou 25 ans.

4.2.1.1 Équation d'écoulement uniforme

Les dimensions du PDP éloigné calculées par l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980) sont données par les équations 2.2, 2.3 et 2.4. Le débit d'exploitation utilisé est de 598 m³/jour, l'épaisseur saturée de l'aquifère de 3 m, alors que le gradient hydraulique régional est de 0.0095. La valeur de conductivité hydraulique employée correspond à la moyenne géométrique des conductivités mesurées par les essais de perméabilité *in situ* (Section 4.1.2.5) et cette valeur est de 15.9 m/jour.

La superficie du PDP éloigné donnée par l'équation d'écoulement uniforme est de 1 051 000 m². Puisqu'il n'y a aucune contribution de l'eau souterraine de l'aval à cause des limites physiques de l'aquifère, la partie aval du périmètre a été tronquée. La limite amont du périmètre correspond à la limite de partage des eaux souterraines et la distance à cette limite est de 910 m, alors que la largeur de la zone de captage au niveau des sources est de 683 m.

4.2.1.2 Équation d'infiltration

L'équation d'infiltration pour les sources est donnée par l'équation 2.9. La recharge utilisée est de 261 mm/an et le volume d'eau rechargeant l'aquifère est de 75 190 m³. Ces valeurs correspondent à celles de l'année 1998, puisque aucune valeur moyenne couvrant plusieurs années d'observation n'est disponible.

La forme du PDP éloigné calculée par l'équation d'infiltration est un demi-cercle de 428 m de rayon centré sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 288 084 m².

4.2.1.3 Cartographie hydrogéologique

La forme du PDP éloigné tracée par la méthode de cartographie hydrogéologique a été déterminée à l'aide de la carte piézométrique de l'annexe N. Les limites d'écoulement sont exclusivement des limites hydrauliques.

La superficie du périmètre éloigné obtenue est de 288 300 m². La limite amont du périmètre s'étend jusqu'à un point haut de la surface piézométrique. La distance à cette limite en suivant le sens d'écoulement est de 1 237 m, alors que la largeur de la zone de captage au niveau des sources est de 117 m. Puisqu'il n'y a aucune contribution de l'eau souterraine de l'aval, la distance à la limite aval est pratiquement nulle.

4.2.1.4 Méthode 3A2E

La procédure de détermination du PDP éloigné par la méthode 3A2E est discutée à la section 2.2.3.1. Les limites aval et amont sont fixées par cartographie hydrogéologique (Section 4.2.1.3), alors que la superficie du périmètre a été déterminée par l'équation d'infiltration (Section 4.2.1.2).

La forme du PDP éloigné donnée par la méthode 3A2E est une ellipse de demi-grand axe de 910 m et de demi-petit axe de 404 m dont l'une des extrémités du grand axe est fixée sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 288 084 m².

4.2.1.5 MODFLOW-MODPATH

La détermination des PDP des sources municipales de Saint-Alban par modélisation numérique est réalisée à l'aide d'un modèle bidimensionnel. Ce choix est justifié pour deux raisons : (1) l'épaisseur saturée de l'aquifère est faible par rapport à l'étendue de l'aquifère et (2) les différents horizons de sable et de gravier constituant l'aquifère peuvent être considérés homogènes en raison de leur faible contraste de conductivité hydraulique.

La rivière Sainte-Anne et la rivière Noire n'ont pas été utilisées comme limites du modèle puisqu'elles ne sont pas connectées hydrauliquement avec l'aquifère. Ainsi, pour simuler la résurgence de l'eau souterraine près des rivières, un drain a été placé à l'altitude correspondant au contact entre l'aquifère et l'aquitard. La conductance du drain a été ajustée en cours de modélisation. De la même façon, les deux sources sont représentées par un drain dont la conductance est modifiée de façon à ce que le débit calculé corresponde au débit mesuré. Les valeurs de conductance des drains varient de 0.5 à 10 m²/jour/m. La représentation des sources par des drains, au lieu d'utiliser des puits, est justifiée par le fait que MODFLOW travaille difficilement avec des puits dont l'épaisseur saturée est faible. En effet, les cellules représentées par des puits sont continuellement sèches et impossible à remouiller. Les autres limites du modèle (flux nul et charges constantes) sont déduites à partir de la carte piézométrique de l'annexe N (Figure 4.12).

Le maillage utilisé est constitué de 8800 cellules réparties sur 80 colonnes et 110 lignes orientées à 40° par rapport à l'axe est-ouest. La dimension de la plus petite cellule est de 5 m par 5 m et elle est centrée sur l'une des sources. Le pas d'accroissement des cellules est de 10% et la taille maximale des cellules est de 50 m par 50 m (Figure 4.12).

La base imperméable de l'aquifère est constituée de sable silto-argileux d'origine pro-deltaïques (Section 4.1.5). Ces matériaux sont considérés imperméables à cause de leurs grands contrastes de perméabilité avec les sables et graviers sus-jacents (Girard, 2000). Très peu d'information est disponible concernant l'altitude de la base imperméable. Nous avons déterminé des zones d'égale élévation à partir de la carte

topographique, des affleurements de sable silto-argileux observés sur le terrain et des quelques forages disponibles (Figure 4.13).

Les valeurs de conductivité hydraulique de l'aquifère ajustées au cours de la calibration varient de 11 à 12 m/jour. Ces valeurs sont plus faibles que la moyenne géométrique des valeurs mesurées par les essais de perméabilité *in situ* (15.9 m/jour), mais elles sont près de celles-ci (Figure 4.14).

Des valeurs de recharge plus élevée que 261 mm/an ont du être utilisées afin de permettre la calibration du modèle numérique avec les valeurs de conductivité retenues. Ces valeurs de recharge varient de 0 à 584 mm/an et sont attribuées aux différentes zones de recharge estimées à partir des hydrogrammes de puits et de la topographie du sol (Figure 4.15). Notons, que l'utilisation d'une valeur de recharge plus élevée que celle mesurée n'affecte pas directement la forme et les dimensions des PDP. En effet, la recharge n'entre pas dans le calcul des vitesses d'écoulement avec MODPATH et est plutôt utilisée dans MODFLOW pour ajuster les charges hydrauliques.

Quatorze points de contrôle répartis sur l'ensemble du domaine ont permis la calibration des charges hydrauliques du modèle. L'erreur RMS cible pour ce modèle a été fixée à 0.65 mètre, alors que le premier niveau de calibration a été fixé à 0.50 mètre (Tableau 4.10).

Tableau 4.10 Niveaux de calibration pour la modélisation numérique (MODFLOW) pour les sources de Saint-Alban.

Niveau de calibration	Cible
Niveau 1	± 0.50 m
Niveau 2	± 1.00 m
Niveau 3	± 1.50 m

La calibration du modèle a été effectuée pour une simulation en régime permanent. Les charges calculées sont comparables aux charges observées dans la mesure ou toutes les charges calculées aux différents points de contrôles se retrouvent à l'intérieur des deux premiers niveaux de calibration (Tableau 4.11). Le tableau 4.12 présente les différentes erreurs issues de la calibration du modèle. Nous remarquons que l'erreur RMS obtenue est inférieure à la valeur cible de 0.65 mètre.

Tableau 4.11 Comparaison entre les charges hydrauliques mesurées et calculées par MODFLOW aux différents points de contrôles de l'aquifère des sources de Saint-Alban.

Point de contrôle	Coordonnée X (m/NAD 83)	Coordonnée Y (m/NAD 83)	Charge mesurée (m)	Charge calculée (m)	Résiduelle (m)
P91-71	413 791	5 177 240	73.06	73.26	0.2
a31	413 533	5 178 579	77.27	76.49	-0.78
a41	414 291	5 180 084	83.03	83.21	0.18
a13	414 348	5 179 556	80.18	81.09	0.91
a8	414 273	5 178 910	79.57	80.05	0.48
a39	414 906	5 178 979	75.26	75.84	0.58
a7	414 582	5 178 695	78.84	77.88	-0.96
a33	414 147	5 178 724	78.81	77.54	-1.27
P90-60	414 200	5 178 101	75.72	75.07	-0.65
pz1	414 446	5 178 107	71.48	71.54	0.06
pz3	414 545	5 178 141	68.11	68.85	0.74
pz9	414 592	5 178 179	69.04	68.87	-0.17
pz7	414 661	5 178 161	69.77	69.58	-0.19
pz12	414 547	5 178 317	73.36	73.71	0.35

Tableau 4.12 Sommaire des erreurs de calibration pour la modélisation numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des sources de Saint-Alban.

Type d'erreur	Valeur (m)
Erreur moyenne	0.02
Erreur absolue moyenne	0.48
RMS	0.56

Le débit des sources a aussi été utilisé pour la calibration. Le flux obtenu par les drains du modèle numérique représentant les sources est de 573 m³/jour. Le débit des sources mesuré étant de 598 m³/jour, l'écart entre le débit calculé et le débit mesuré est de 4.2%.

L'examen visuel de la carte piézométrique produite par la modélisation numérique indique que la distribution des charges calculées est comparable aux charges observées de l'annexe N (Figure 4.16). La distribution des écarts entre les charges observées et calculées est présentée aux figures 4.17 et 4.18. De plus, la distribution spatiale de l'erreur est présentée à la figure 4.16 où le niveau de calibration pour chacun des points de contrôles est indiqué. On observe sur ces figures que l'erreur est distribuée de façon aléatoire et qu'il n'y a pas d'erreur systématique.

Le tableau 4.13 présente le bilan de masse du système. On observe que ce bilan est nul, c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre le volume d'eau entrant et sortant du système.

Tableau 4.13 Bilan de masse du modèle numérique (MODFLOW) pour l'aquifère des sources de Saint-Alban.

Flux entrant (m³/jour)	
Charges constantes	0
Drains	0
Recharge	4709.5
Total	4709.5
Flux sortant (m³/jour)	
Charges constantes	918.9
Drains	3790.6
Total	4709.5
Différence (%)	0.00

Le PDP éloigné a été déterminé avec MODPATH par traçage de particules inverse. Le nombre de particules utilisées est de 1536. Les particules sont distribuées sur les cellules de drains représentant les sources. La porosité efficace retenue pour les simulations est de 19%.

Ainsi, la superficie du périmètre éloigné obtenue par modélisation numérique est de 319 900 m². La distance à la limite amont en suivant le sens d'écoulement est de 1 290 m, alors que la largeur de la zone de captage au niveau des sources est de 120 m. Puisqu'il n'y a aucune contribution de l'eau souterraine de l'aval, la distance à la limite aval est pratiquement nulle. Ce périmètre correspond à un temps de transport de 25 ans.

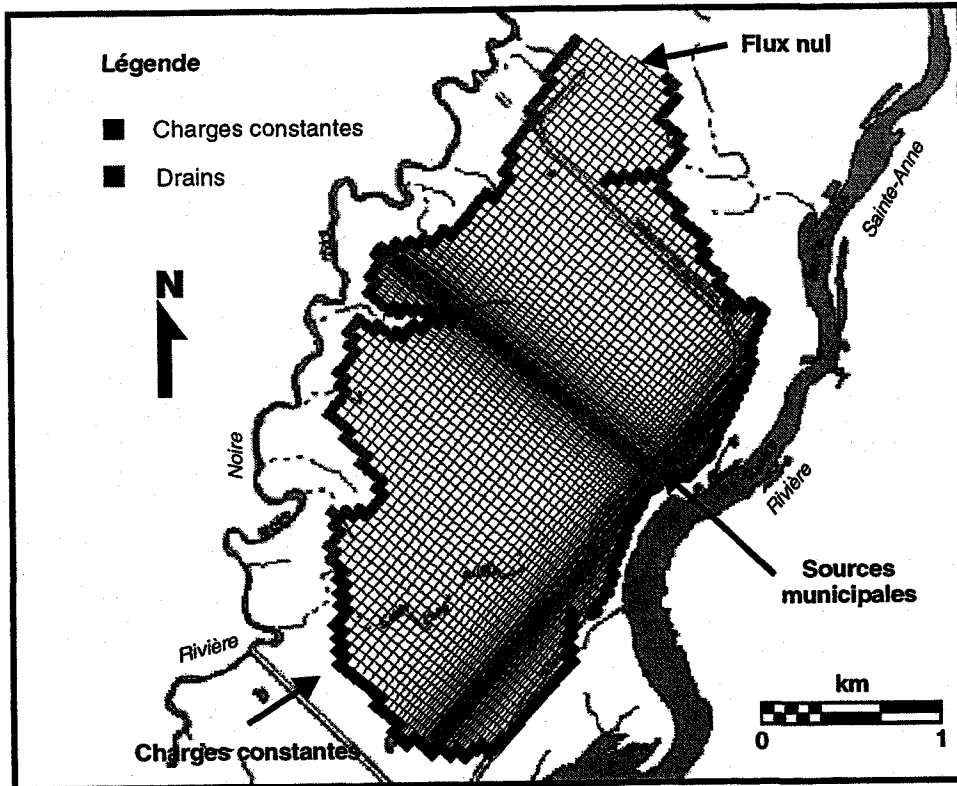


Figure 4.9 Discretisation du domaine des sources municipales de Saint-Alban.

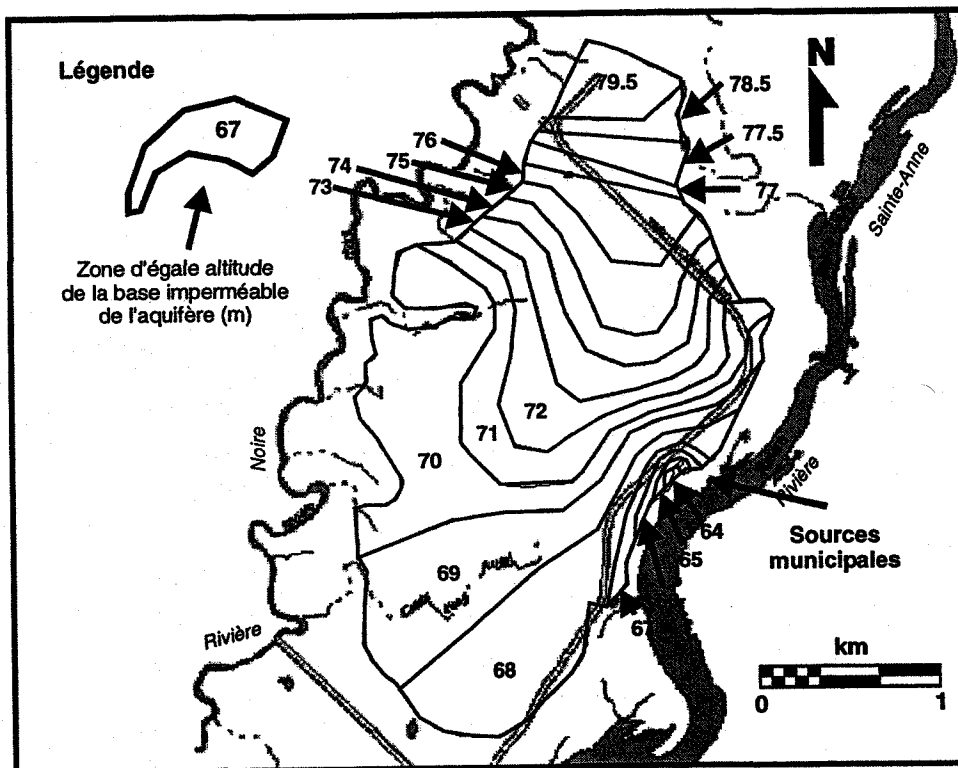


Figure 4.10 Altitude de la base imperméable de l'aquifère des sources municipales de Saint-Alban.

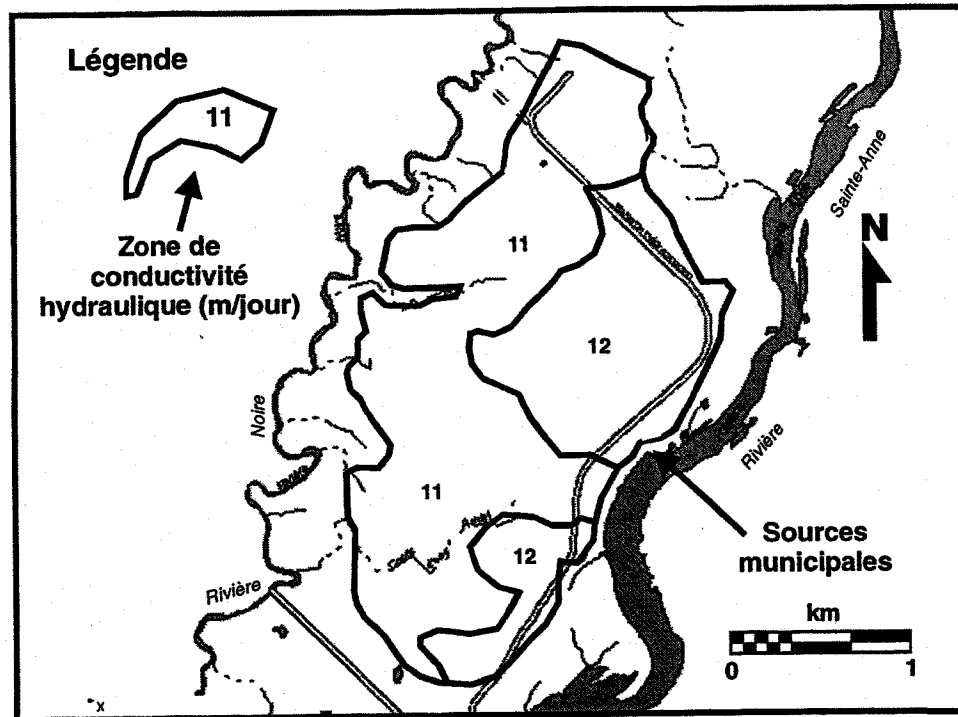


Figure 4.11 Distribution des zones de conductivité hydraulique du domaine des sources municipales de Saint-Alban.

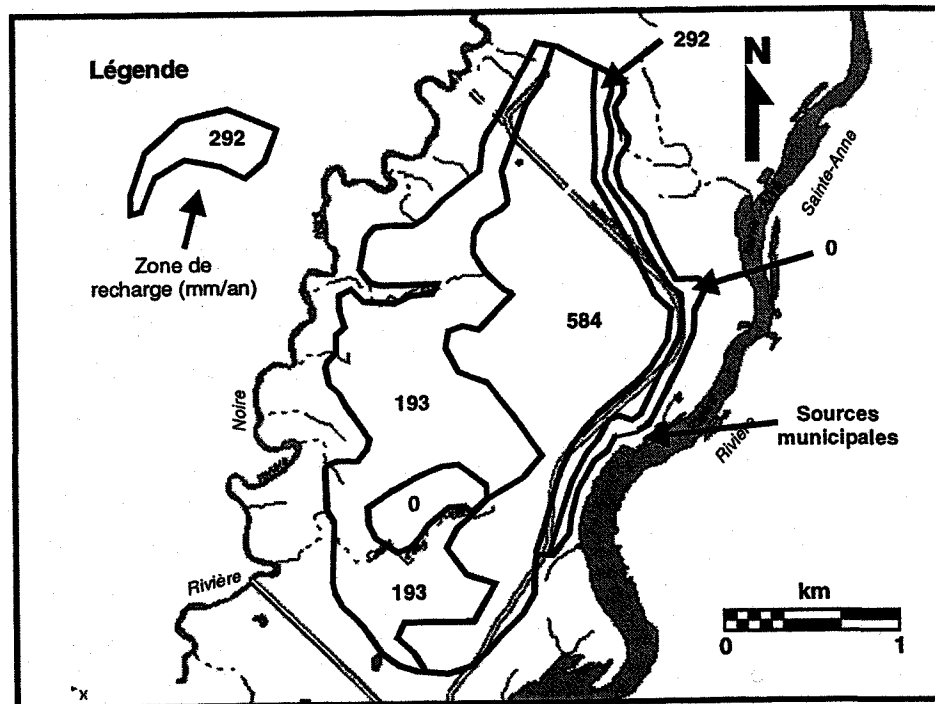


Figure 4.12 Distribution des zones de recharge du domaine des sources municipales de Saint-Alban.

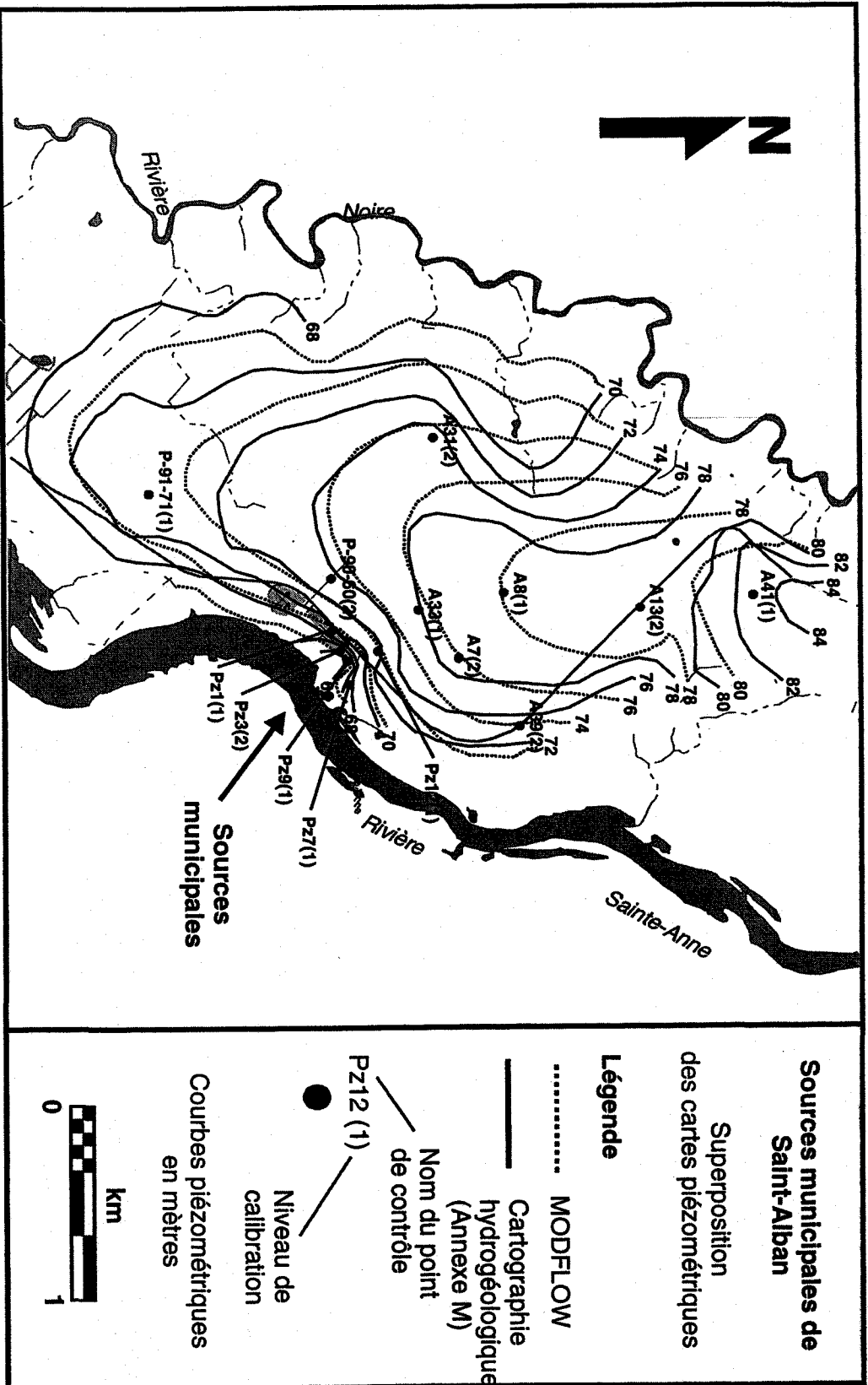


Figure 4.13 Superposition des cartes piézométriques produites par modélisation numérique (MODFLOW) et par cartographie hydrogéologique (annexe M) et distribution spatiale des niveaux de calibration.

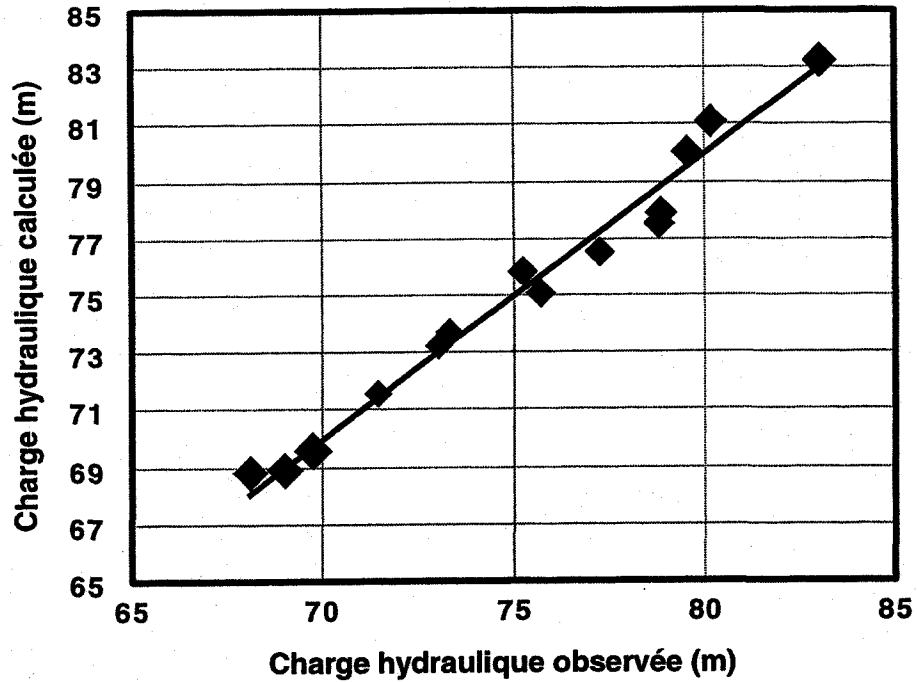


Figure 4.14 Charges hydrauliques calculées par MODFLOW en fonction des charges hydrauliques observées pour le site des sources de Saint-Alban.

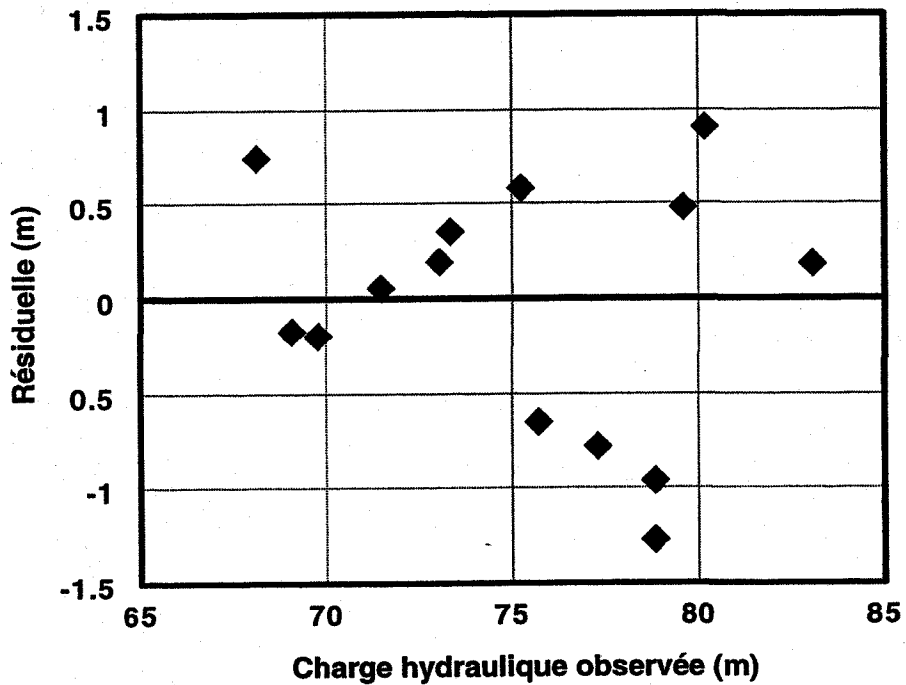


Figure 4.15 Charges hydrauliques résiduelles en fonction des charges hydrauliques observées pour la modélisation numérique (MODFLOW) aux sources municipales de Saint-Alban.

4.2.2 Périmètres de protection rapprochés

Le PDP rapproché correspond à un temps de transport de 60 jours ou à une distance minimale de 100 m à partir de l'ouvrage de captage. Ce périmètre vise à protéger le captage contre les sources de contamination bactérienne ou virale.

4.2.2.1 Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)

Le rayon du PDP rapproché calculé par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) est donné par l'équation 2.7. Ce périmètre a été obtenu de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme (Section 2.2.1.3). Les valeurs des paramètres hydrogéologiques sont données au tableau 4.14. Rappelons que le gradient hydraulique se rapportant à la superficie couverte par le périmètre rapproché a été utilisé (gradient local).

Tableau 4.14 Valeurs des paramètres hydrogéologiques utilisées pour l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).

Paramètre	Valeur
Débit des sources (m ³ /jour)	598
Temps (jours)	60
Épaisseur saturée(m)	2.9
Porosité efficace	0.19
Conductivité hydraulique (m/jour)	15.9
Gradient hydraulique local	0.036

La superficie du périmètre rapproché obtenue est de 124 916 m². La limite amont du périmètre s'étend jusqu'à un point haut de la surface piézométrique. Le rayon inscrit à l'intérieur du périmètre éloigné déterminé par l'équation d'écoulement uniforme est de 282 m, la largeur de la zone de captage au niveau des sources est de 564 m, alors que la distance à la limite aval est pratiquement nulle.

4.2.2.2 Temps de transport (Loi de Darcy)

Le rayon du PDP rapproché calculé par l'équation du temps de transport avec la loi de Darcy est donné par l'équation 2.6. La valeur de conductivité hydraulique employée est de 15.9 m/jour, la porosité efficace de 0.19 et le gradient hydraulique local de 0.036.

La forme du PDP rapproché donnée par l'équation du temps de transport avec la loi de Darcy est un demi-cercle de 190 m de rayon centré sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 56 706 m².

4.2.2.3 Équation du cylindre

L'équation du cylindre pour les sources est donnée par l'Équation 2.11. La valeur de porosité efficace employée est de 0.19 et l'épaisseur saturée de l'aquifère de 2.9 m. Le débit utilisé est le débit total mesuré aux sources, soit 598 m³/jour. La forme du PDP rapproché donnée par l'équation du cylindre est un demi-cercle de 190 m de rayon centré sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 56 706 m².

4.2.2.4 Hydrogramme de source (Civita, 1995)

L'hydrogramme utilisé pour la détermination du PDP rapproché est la combinaison des hydrogrammes des sources S4 et S6. On observe sur la figure 4.16 que les variations annuelles du débit des sources ne sont pas assez grandes pour permettre une évaluation directe du DTDM. Une extrapolation du DTDM doit donc être faite et la valeur obtenue est de 564 jours. Cette valeur est supérieure à un an, ce qui physiquement est inconcevable. Ainsi, cette méthode ne peut pas être utilisée dans le présent contexte hydrogéologique.

4.2.2.5 Méthode 3A2E

Pour l'application de la méthode 3A2E, la détermination de la limite aval est faite par cartographie hydrogéologique, la limite amont par l'équation du temps de transport basée sur la loi de Darcy et la superficie du périmètre par l'équation du cylindre.

La forme du PDP rapproché donnée par cette méthode est une ellipse de demi-grand axe de 190 m et de demi-petit axe de 95 m, dont l'une des extrémités du grand axe est fixée sur le captage. La superficie de ce périmètre est de 56 706 m².

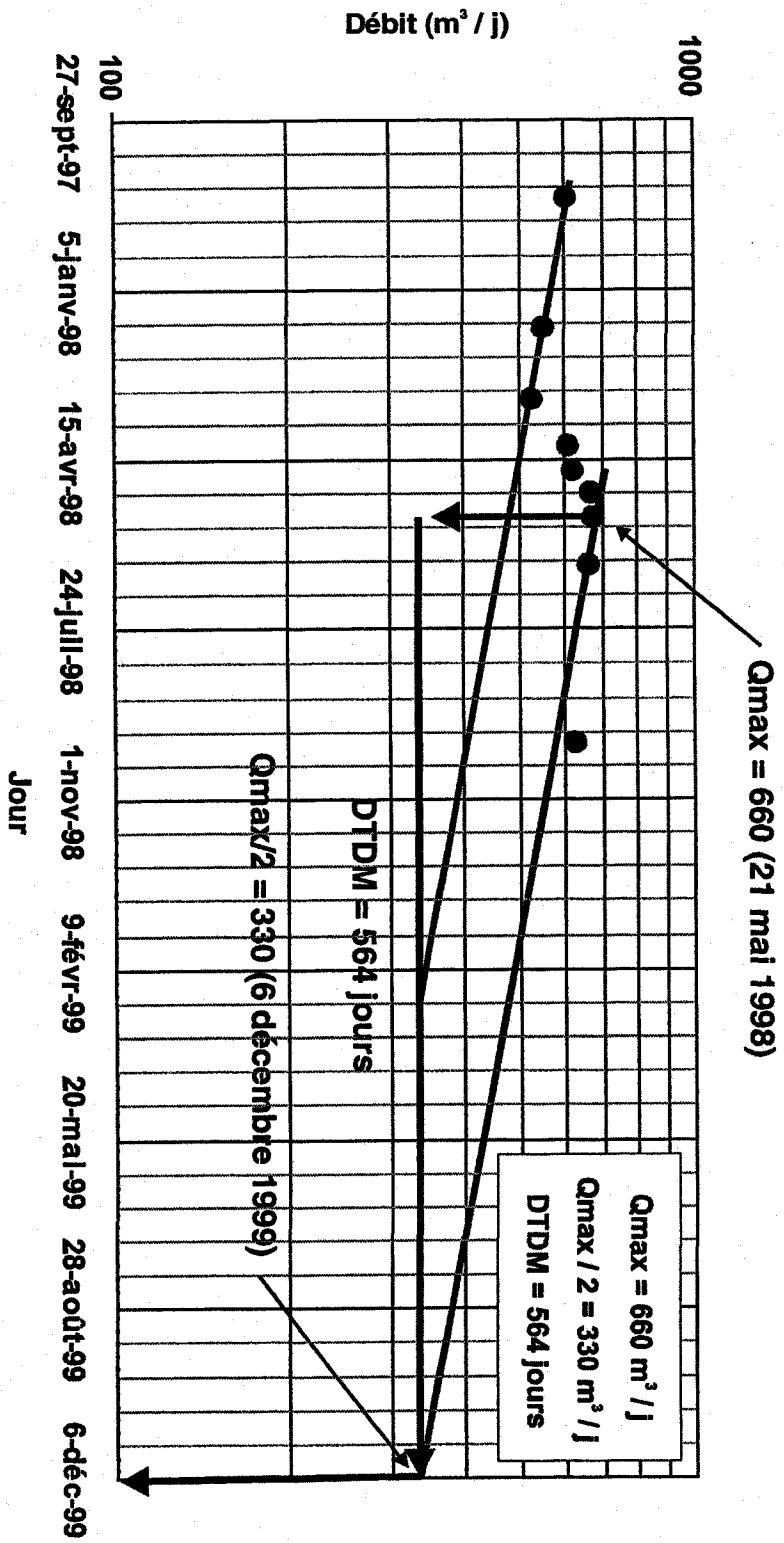
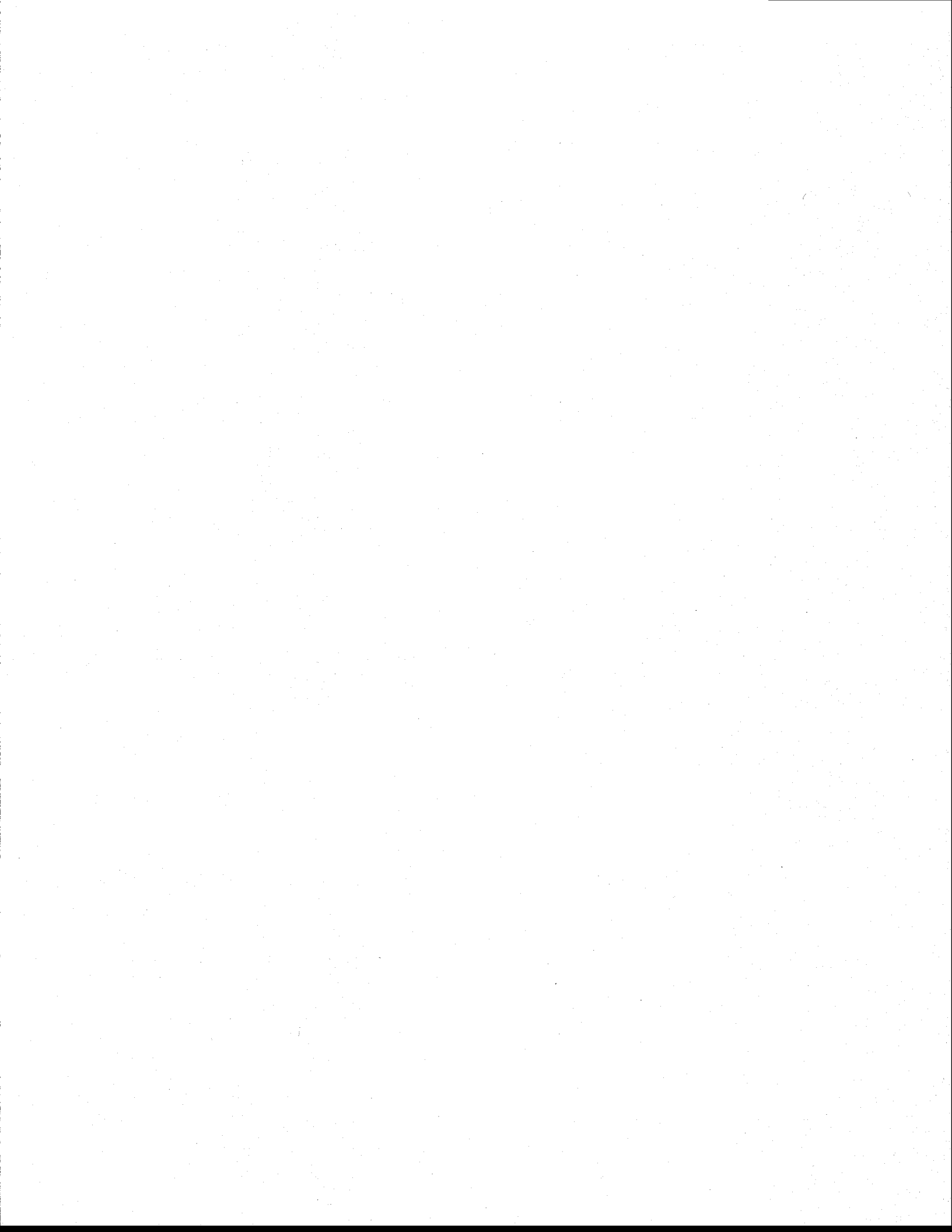


Figure 4.16 Illustration de la méthode graphique de détermination du DTDM pour l'hydrogramme combiné des sources S4 et S6 de Saint-Alban.

4.2.2.6 MODFLOW-MODPATH

La détermination du PDP rapproché des sources municipales de Saint-Alban par modélisation numérique a été faite à l'aide du modèle numérique de la section 4.2.1.5 qui a servi à la détermination du périmètre éloigné. Aucun maillage télescopique n'a été réalisé, car les superficies de ces deux périmètres sont sensiblement du même ordre de grandeur. Le PDP rapproché a été déterminé avec MODPATH par traçage de particules inverses. Le nombre de particules utilisées est de 1536 répartis sur l'ensemble des drains représentant les sources.

La superficie du périmètre rapproché ainsi obtenue par modélisation numérique est de 27 990 m². La distance à la limite amont est de 152 m et la largeur de la zone de captage au niveau des sources est de 120 m.



CHAPITRE 5

Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection

Ce chapitre porte sur la comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection (PDP) pour les puits municipaux de Pont-Rouge et les sources municipales de Saint-Alban. L'analyse de ces méthodes est réalisée séparément pour les périmètres éloignés et rapprochés et conjointement pour les deux sites à l'étude. L'évaluation des méthodes de détermination des PDP est réalisée par la comparaison des périmètres obtenus par les différentes méthodes avec le périmètre servant de référence. Pour les périmètres éloignés la comparaison est effectuée avec la cartographie hydrogéologique, alors que pour les périmètres rapprochés la comparaison est effectuée avec un modèle numérique d'écoulement (MODFLOW-MODPATH).

Les paramètres géométriques de comparaison utilisés pour la discussion font référence à la section 2.3 et les cartes synthèses des PDP des puits municipaux de Pont-Rouge et des sources municipales de Saint-Alban permettent de mieux suivre l'analyse (Pochettes 1 et 2).

5.1 Périmètres de protection éloignés

Les tableaux 5.1 et 5.2 résument les valeurs des paramètres géométriques de comparaison obtenues pour les PDP éloignés des puits municipaux de Pont-Rouge et des sources municipales de Saint-Alban.

Tableau 5.1 Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des puits municipaux de Pont-Rouge.

Méthode	Superficie (km ²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
Cartographie hydrogéologique	3.06	-	-	-
Écoulement uniforme	0.58	18	82	5
Équation d'infiltration	3.74	36	64	71
Méthode 3A2E	3.74	95	5	22
WhAEM	1.09	34	66	5
MODFLOW-MODPATH	2.95	82	18	15

Tableau 5.2 Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des sources municipales de Saint-Alban.

Méthode	Superficie (m ²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
Cartographie hydrogéologique	288 300	-	-	-
Écoulement uniforme	1 051 000	96	4	74
Équation d'infiltration	288 084	45	55	55
Méthode 3A2E	288 084	85	15	15
MODFLOW-MODPATH	319 900	88	12	21

Cartographie hydrogéologique

La précision de la cartographie hydrogéologique n'est pas évaluée ici puisque le périmètre déterminé par cette méthode est utilisé comme référence. Cependant, puisque la carte piézométrique utilisée pour définir le périmètre de référence est basée sur un ensemble détaillé de mesures de niveaux d'eau, cette méthode est considérée très précise et réaliste.

Écoulement uniforme

Les résultats obtenus par l'équation d'écoulement uniforme sont très variables pour les deux sites étudiés. En effet, le rapport d'aire commune (RAC) pour les puits de Pont-Rouge est de seulement 18%, tandis que pour les sources de Saint-Alban le RAC est de 96% et le rapport d'aire trop protégée (RATP) de 74%. Ceci indique que, dans le premier cas, le périmètre issu de l'équation d'écoulement uniforme couvre insuffisamment la superficie à protéger, alors que, dans le deuxième cas, la superficie à protéger est couverte exagérément.

Cette méthode n'est pas précise car les hypothèses d'écoulement uniforme et d'aquifère infini latéralement ne sont pas valides dans les contextes hydrogéologiques de Pont-Rouge et de Saint-Alban. Ceci est d'autant plus vrai pour les sources de Saint-Alban où, en plus, les gradients hydrauliques verticaux ne sont pas négligeables à proximité des sources. De plus, cette méthode ne tient pas compte du bilan de masse entre le volume d'eau exploité par l'ouvrage de captage et le volume d'eau rechargeant l'aquifère.

Équation d'infiltration

Pour l'équation d'infiltration, on observe que la superficie à protéger en amont n'est pas couverte, alors qu'en aval pour les puits et latéralement pour les sources, le périmètre de référence est largement dépassé. Cette méthode est imprécise car la représentation du PDP par un cercle est indépendante de la configuration de l'écoulement. Dans un aquifère avec un gradient hydraulique très faible, la forme du PDP peut être assimilée à un cercle. Cependant, dans un aquifère avec un gradient hydraulique non négligeable,

comme dans le cas des aquifères de Pont-Rouge et de Saint-Alban, le PDP ne peut pas être représenté par un cercle.

Néanmoins, la superficie du périmètre calculée par cette méthode est comparable à la superficie déterminée par cartographie hydrogéologique. Ainsi, le bilan de masse est conservé et nous pouvons penser que l'hypothèse d'écoulement en régime permanent est respectée et que l'estimation de la recharge est bonne.

Méthode 3A2E

Avec un RAC de 95% et un RATP de 22% pour les puits de Pont-Rouge ainsi qu'un RAC de 85% et un RATP de 15% pour les sources de Saint-Alban, la méthode 3A2E est précise. Les avantages de cette méthode sont : (1) la possibilité d'intégrer les limites aval et amont de l'aquifère et (2) la conservation du bilan de masse.

Malgré cette précision, cette méthode doit être utilisée avec précaution parce qu'elle est indépendante de la configuration de l'écoulement. L'assimilation du PDP à une ellipse permet d'imiter la forme des PDP des aquifères granulaires avec gradient hydraulique non négligeable.

MODFLOW-MODPATH

On observe, pour les deux sites étudiés, que les PDP éloignés épousent presque parfaitement les périmètres de références respectifs. Pour les puits de Pont-Rouge cela se traduit par un RAC de 82%, un RATP de 15% et une superficie presque identique à la superficie du périmètre de référence. Pour les sources de Saint-Alban, le RAC est de 88%, le RATP de 21% et une superficie aussi presque identique à celle du périmètre de référence.

Cette méthode est très précise car elle permet l'intégration de beaucoup de paramètres hydrogéologiques. Ainsi, l'altitude variable de la base imperméable de l'aquifère de Pont-Rouge et les résurgences de l'aquifère de Saint-Alban ont pu être représentées.

WhAEM

Le fait que le programme *WhAEM* puisse générer un champ d'écoulement non uniforme permet d'obtenir des PDP avec des formes plus réalistes. En effet, on observe que le périmètre éloigné des puits de Pont-Rouge est orienté dans la même direction que celui du périmètre de référence. Cependant, puisque ce programme ne permet pas l'intégration d'une base imperméable d'altitude variable, la calibration des charges hydrauliques pour l'aquifère de Pont-Rouge est difficile à réaliser (Section 3.2.1.5). Ceci a fait en sorte que la superficie du périmètre éloigné est inférieure à celui du périmètre de référence (RAC de 34%).

5.2 Périmètres de protection rapprochés

Les tableaux 5.3 et 5.4 résument les valeurs des paramètres géométriques de comparaison obtenues pour les PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge et des sources municipales de Saint-Alban.

Tableau 5.3 Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge.

Méthode	Superficie (m ²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
MODFLOW/MODPATH	71 540	-	-	-
Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)	86 950	68	32	44
Équation du cylindre	73 496	65	35	37
Méthode 3A2E	73 496	82	18	20
WhAEM	50 700	71	29	0

Tableau 5.4 Valeurs des paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des sources municipales de Saint-Alban (N.A. = Non applicable).

Méthode	Superficie (m ²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
MODFLOW/MODPATH	27 990	-	-	-
Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)	124 916	95	5	79
Temps de transport (Loi de Darcy)	56 706	95	5	53
Équation du cylindre	35 816	95	5	26
Hydrogramme de source (Civita, 1995)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Méthode 3A2E	35 816	92	8	28

MODFLOW-MODPATH

La précision de la modélisation numérique avec MODFLOW-MODPATH n'est pas évaluée ici puisque cette méthode est utilisée comme référence. Cependant, la modélisation numérique est considérée comme la méthode la plus précise des méthodes employées pour la détermination des périmètres rapprochés parce qu'elle permet l'intégration de la plupart des paramètres hydrogéologiques. De plus, les modèles numériques des sites de Pont-Rouge et de Saint-Alban ont été calibrés avec plusieurs mesures de niveaux d'eau prises sur le terrain et avec le débit des sources pour le modèle de Saint-Alban

Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)

Dans le contexte hydrogéologique des puits de Pont-Rouge, l'équation du temps de transport protège inutilement l'aquifère en amont (RATP de 44%) et insuffisamment les portions latérales (RAC de 68%). Néanmoins, la superficie obtenue par cette méthode est du même ordre de grandeur que la superficie du périmètre de référence (différence de l'ordre de 20%). Le périmètre déterminé par l'équation du temps de transport pour les sources de Saint-Alban englobe la presque totalité du périmètre de référence (RAC de 95%). Cependant, ce périmètre est beaucoup trop large (RATP de 79%) et sa superficie est environ 4.5 fois supérieure à la superficie de la méthode de référence.

L'imprécision de l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs vient en grande partie du fait qu'elle est utilisée de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme. En effet, si les limites aval et latérales obtenues par l'équation d'écoulement uniforme sont mal définies, cette erreur se répercute directement sur le périmètre rapproché.

De plus, l'équation du temps de transport doit être utilisée seulement si l'aquifère peut être considéré infini latéralement et que les gradients hydrauliques verticaux sont négligeables. Si on compare les distances amont obtenues avec celles de la méthode de référence, nous pouvons penser que ces hypothèses ne sont pas valides pour les puits de Pont-Rouge (Temps de transport = 282 m et MODFLOW-MODPATH = 152 m),

ni pour les sources de Saint-Alban (Temps de transport = 417 m et MODFLOW-MODPATH = 256 m).

Temps de transport (Loi de Darcy)

On observe que le périmètre rapproché des sources de Saint-Alban obtenu par la loi de Darcy couvre presque entièrement le périmètre de référence (RAC de 95%). Cependant cette méthode couvre inutilement certaines parties de l'aquifère (RATP de 53%).

Si les gradients hydrauliques verticaux sont négligeables et que l'aquifère est homogène et isotrope, l'équation de Darcy peut être précise. Pour les sources de Saint-Alban, la différence entre la limite amont des périmètres déterminés par la loi de Darcy et par la méthode de référence (Darcy = 192 m et MODFLOW-MODPATH = 152 m) peut être expliqué par les différences de conductivité hydraulique utilisées par ces deux méthodes. En effet, la conductivité hydraulique du modèle numérique est 25% inférieure à celle utilisée avec l'équation de Darcy.

Afin d'accroître la précision de cette méthode, les distances entre le captage et la limite du périmètre devraient être calculées dans différentes directions. Ces distances devraient être utilisées à la place d'un unique rayon circulaire. Ceci est d'autant plus vrai dans le contexte des sources de Saint-Alban, où le gradient hydraulique varie selon la direction.

Équation du cylindre

On observe pour l'équation du cylindre que la superficie du périmètre de référence des puits de Pont-Rouge n'est pas couverte en amont, alors qu'en aval elle est largement dépassée. Ceci se traduit par un RAC de 65% et un RATP de 37%. Pour les sources de Saint-Alban, le périmètre déterminé par cette équation englobe la presque totalité du périmètre de référence (RAC de 95%). De plus, le périmètre est bien ajusté en amont et seuls les côtés du périmètre de référence sont trop protégés (RATP de 26%).

Cette méthode est imprécise car la représentation du PDP par un cercle est indépendante de l'écoulement. Néanmoins, les superficies obtenues par cette méthode pour les sites de Pont-Rouge et de Saint-Alban sont comparables aux superficies des périmètres de références respectifs.

Hydrogramme de source (Civita, 1995)

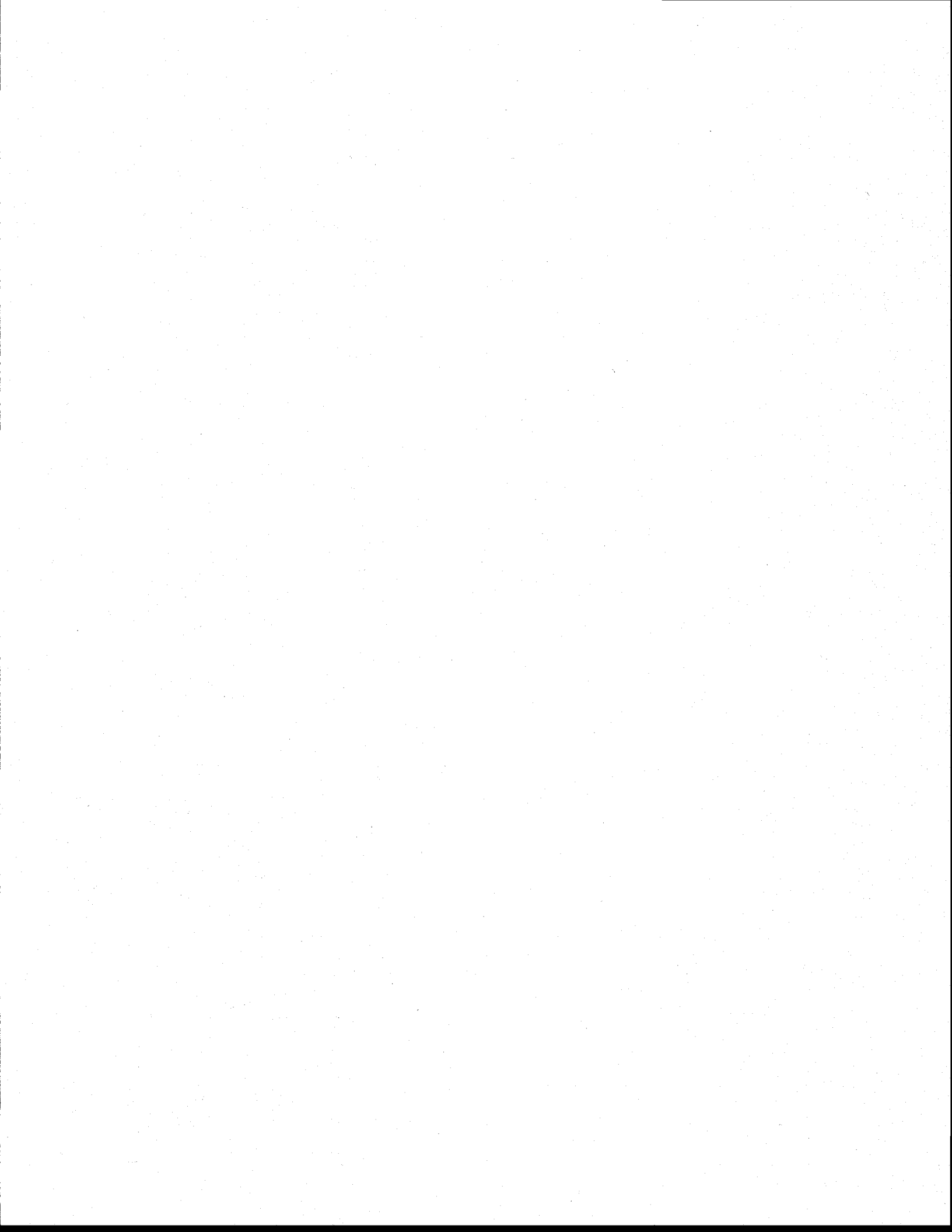
La méthode d'hydrogramme de source (Civita, 1995) est inapplicable dans le cas des sources de Saint-Alban à cause des faibles fluctuations annuelles du débit des sources (Section 4.2.2.4). Pour être applicable dans les conditions hydrogéologiques de la MRC de Portneuf, cette méthode devrait être adaptée. Pour ce faire, des essais de traceurs devraient être réalisés à différents sites afin de définir des classes de vulnérabilité selon les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine. Le DTDM devrait aussi être redéfini afin de faciliter l'application de la méthode.

Méthode 3A2E

Pour les puits de Pont-Rouge et les sources de Saint-Alban, la méthode 3A2E a été utilisée avec l'équation du cylindre. Pour les puits, le RAC est de 82%, alors que pour les sources, le périmètre englobe la presque totalité du périmètre de référence (RAC de 92%). La forme elliptique de ces périmètres est similaire à la forme des périmètres de référence respectifs bien qu'elle soit plus allongée pour les puits et plus évasée latéralement pour les sources. Les mises en garde de la section 5.1 concernant les limitations de cette méthode sont aussi faites.

WhAEM

La forme du périmètre rapproché obtenue par le programme WhAEM pour les puits de Pont-Rouge est similaire à celle du périmètre de référence, même si ses dimensions sont légèrement inférieures (RAC de 71%). On remarquera que la précision du programme WhAEM est meilleure pour le PDP rapproché que pour le PDP éloigné (RAC de 71% vs 34%). Ceci est expliqué par le fait que l'erreur associée à l'incapacité du modèle à représenter la géométrie de la base imperméable de l'aquifère est moins grande à l'échelle du périmètre rapproché qu'à celle du périmètre éloigné.



CHAPITRE 6

Analyse d'incertitude

Dans ce chapitre, nous analysons l'effet sur les dimensions des PDP de l'incertitude reliée à l'évaluation des paramètres hydrogéologiques. Cette analyse est effectuée pour le PDP rapproché des puits municipaux de Pont-Rouge. Pour ce faire, deux méthodes ont été retenues : (1) l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) utilisée de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980) et (2) la modélisation numérique par différences finies avec MODFLOW-MODPATH. Ces méthodes ont été choisies afin d'illustrer les différentes marges d'incertitude qui peuvent exister entre les méthodes de détermination des PDP.

Le choix des paramètres hydrogéologiques utilisés pour l'analyse d'incertitude est arbitraire (Section 2.4). Pour les deux méthodes retenues, nous avons fait le choix des paramètres qui, selon nous, avaient le plus d'influence sur les dimensions des PDP rapprochés. Ce choix est basé sur notre connaissance de l'incertitude reliée à la mesure ou à la dérivation des paramètres hydrogéologiques de l'aquifère alimentant les puits municipaux de Pont-Rouge.

6.1 Temps de transport (Bear et Jacobs, 1965)

L'analyse d'incertitude de l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) est faite de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme (Todd, 1980). Les paramètres hydrogéologiques analysés sont la conductivité hydraulique et la porosité efficace. Les raisons qui justifient ce choix sont : (1) les mesures de conductivité hydraulique effectuées par les essais de perméabilité *in situ* à choc hydraulique et de pompage présentent une grande variabilité (voir la section 3.1.2.6) et (2) la valeur de porosité efficace a été estimée à partir des résultats d'un essai de pompage incomplet. Le tableau 6.1 présente les valeurs minimales, médianes et maximales de chacun des paramètres retenus. Ces valeurs ont été déterminées, pour la porosité efficace à partir de la connaissance de la valeur de ce paramètre pour des matériaux similaires et pour la conductivité hydraulique à partir des mesures effectuées sur le terrain par les essais de perméabilité *in situ* et l'essai de pompage.

Tableau 6.1 Valeurs minimales, médianes et maximales de la conductivité hydraulique et de la porosité efficace.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur médiane	Valeur maximale
Conductivité hydraulique (m/jour)	20	57	93
Porosité efficace	0.15	0.20	0.25

Après avoir fixé les intervalles de valeurs des différents paramètres hydrogéologiques, les dimensions du PDP éloigné sont calculées par l'équation d'écoulement uniforme pour les valeurs minimale, médiane et maximale de la conductivité hydraulique (Tableau 6.2). Les PDP éloignés du tableau 6.2 sont par la suite utilisés avec l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) pour déterminer les PDP rapprochés. Pour les intervalles de valeurs des paramètres hydrogéologiques du tableau 6.1, neuf permutations sont possibles (Tableau 6.3). À partir de la superposition des périmètres rapprochés, les zones de confiance et d'incertitude sont tracées (Figure 6.1). La superficie de la zone de confiance est de 33 970 m², alors que la superficie de la zone d'incertitude est de 261 930 m². Ceci représente un niveau de confiance de 11.5%. Le périmètre obtenu à la section 3.2.2.1 est aussi présenté à la figure 6.1. On remarquera que celui-ci est situé entre les limites des zones de confiance et d'incertitude.

Tableau 6.2 Dimensions des PDP éloignés des puits de Pont-Rouge calculées par l'équation d'écoulement uniforme pour les valeurs minimale, médiane et maximale de la conductivité hydraulique.

Paramètre	Minimale	Médiane	Maximale
Conductivité hydraulique (m/jour)	20	57	93
Distance à la limite aval A (m)	129	45	28
Largeur maximal de la zone de captage en amont L (m)	814	288	175
Largeur de la zone de captage au niveau du puits B (m)	407	144	87

Tableau 6.3 Dimensions des PDP rapprochés calculées par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965) pour différentes permutations de conductivité hydraulique et de porosité efficace.

Conductivité hydraulique (m/jour)	Porosité efficace	Distance à la limite aval (m)	Largeur de la zone de captage au niveau du puits (m)	Distance à la limite amont (m)	Aire (m ²)
20	0.15	129	407	299	183 000
20	0.20	129	407	245	151 800
20	0.25	129	407	212	132 500
57	0.15	45	144	525	142 600
57	0.20	45	144	414	110 900
57	0.25	45	144	345	90 510
93	0.15	28	87	770	135 700
93	0.20	28	87	590	102 100
93	0.25	28	87	485	82 990

L'analyse de la forme des différents PDP rapprochés obtenues pour chacune des neuf permutations, montre que la forme du périmètre est très sensible aux valeurs de conductivité hydraulique et de porosité efficace. Ceci est exprimé par un niveau de confiance aussi faible que 11.5%. C'est pourquoi une bonne caractérisation de la porosité efficace et surtout de la conductivité hydraulique s'avère essentielle afin de réduire l'incertitude de ces paramètres et augmenter le niveau de confiance de la méthode.

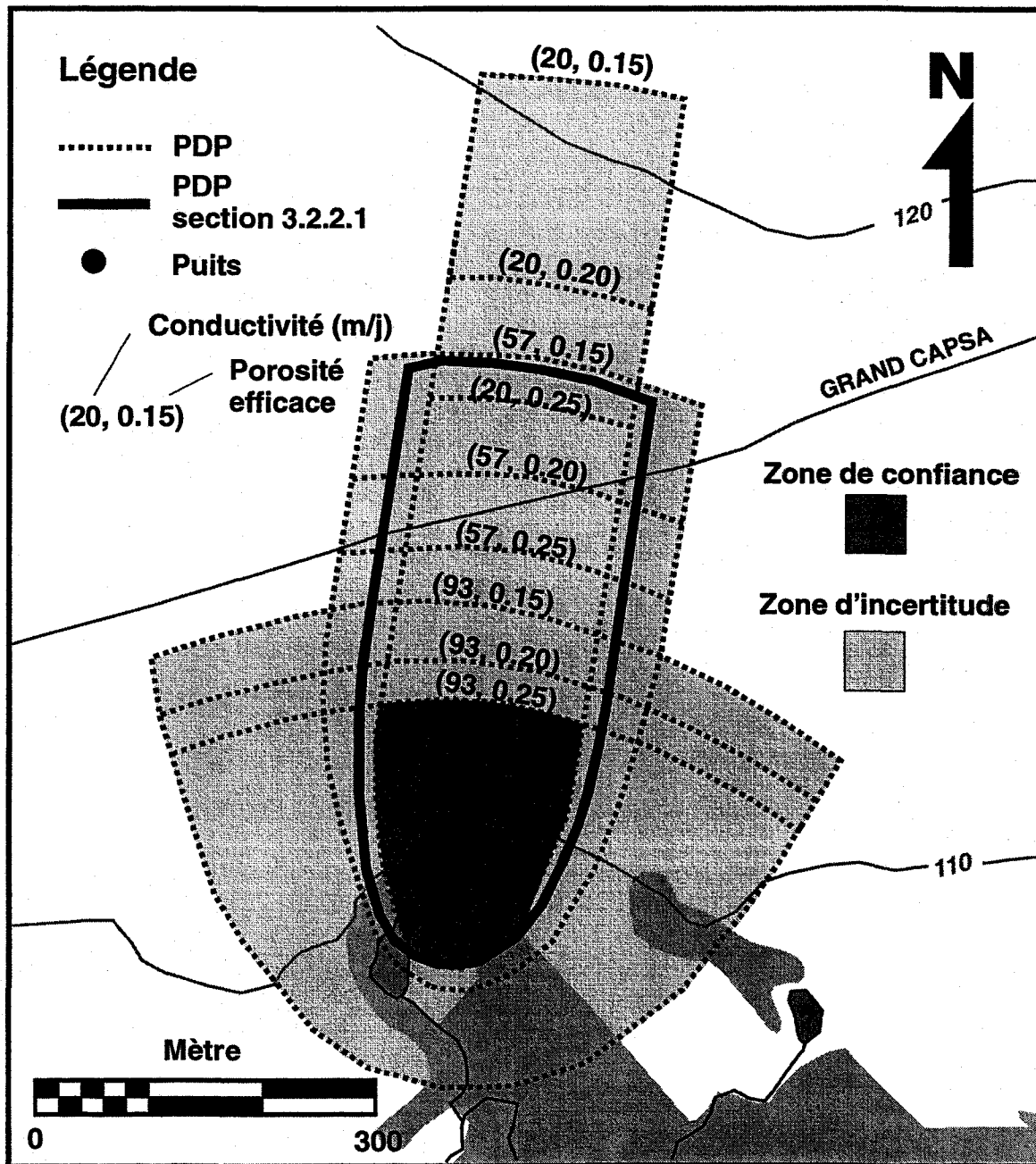


Figure 6.1 Zone de confiance et zone d'incertitude des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965).

6.2 MODFLOW-MODPATH

Les paramètres retenus pour l'analyse d'incertitude avec la modélisation numérique par MODFLOW-MODPATH sont la conductance du lit de l'étang situé à proximité des puits municipaux, la conductivité hydraulique et la porosité efficace. Les raisons motivant le choix de la conductivité hydraulique et de la porosité efficace sont les mêmes que celles discutées à la section 6.1. La présence d'un étang à proximité des puits municipaux (moins de 40 m) pose des interrogations sur son influence sur la forme du PDP rapproché et c'est pourquoi la conductance du lit a été retenue dans cette analyse.

L'intervalle de valeurs de la porosité efficace est le même que celui présenté à la section 6.1. Les intervalles de valeurs de la conductivité hydraulique et de la conductance du lit de l'étang ont été déterminés par une analyse de sensibilité par rapport au modèle numérique d'écoulement calibré par essais et erreurs à la section 3.2.2.5. Par la suite, chacun des paramètres a été varié de façon indépendante et le champ d'écoulement correspondant fut simulé. Lorsque l'erreur RMS est supérieure à 0.70 m ou lorsque la distribution des charges résiduelles est jugée mauvaise, la simulation est rejetée. Le choix de la valeur de l'erreur RMS a été déterminé de façon à ce que le ratio de l'erreur RMS sur la perte de charges totale du modèle local soit inférieur à 5%.

Les tableaux 6.4 et 6.5 présentent respectivement les erreurs moyennes, absolues et RMS calculées pour différentes valeurs de conductance du lit de l'étang et de conductivité hydraulique. La simulation avec une conductance nulle signifie que l'étang n'est pas considéré dans le modèle ou que le lit de l'étang est parfaitement imperméable. Cette simulation correspond au modèle calibré à la section 3.2.2.5. La figure 6.2 montre l'effet de l'étang sur la forme du PDP rapproché pour les différentes valeurs de conductance du tableau 6.4. La variation de la conductivité hydraulique pour les différentes zones de ce paramètre a été calculée de façon proportionnelle afin de réduire le nombre de simulations.

Tableau 6.4 Erreurs moyennes, absolues et RMS calculées pour différentes valeurs de conductance du lit de l'étang près des puits de Pont-Rouge.

Conductance par unité de surface du lit de l'étang ($m^2/l/m^2$)	Erreur moyenne (m)	Erreur absolue (m)	RMS (m)
1000	0.51	0.58	0.62
10	0.49	0.56	0.60
0.1	0.26	0.41	0.47
0	0.15	0.45	0.47

Tableau 6.5 Erreurs moyennes, absolues et RMS calculées pour différentes valeurs de conductivité hydraulique (K) près des puits de Pont-Rouge.

K en amont du puits (m/l)	K autour du puits (m/l)	Erreur moyenne (m)	Erreur absolue (m)	RMS (m)	Note
24	70	0.71	0.78	0.89	RMS>0.70m – Non retenue
18	52	0.54	0.64	0.67	Retenue
12	35	0.15	0.45	0.47	Modèle 3.7.2.4
9.5	28	0.46	0.50	0.55	Retenue
8	23	0.26	0.44	0.48	Puits à sec – Non retenue
6	18	0.85	0.85	0.93	RMS>0.70m – Non retenue

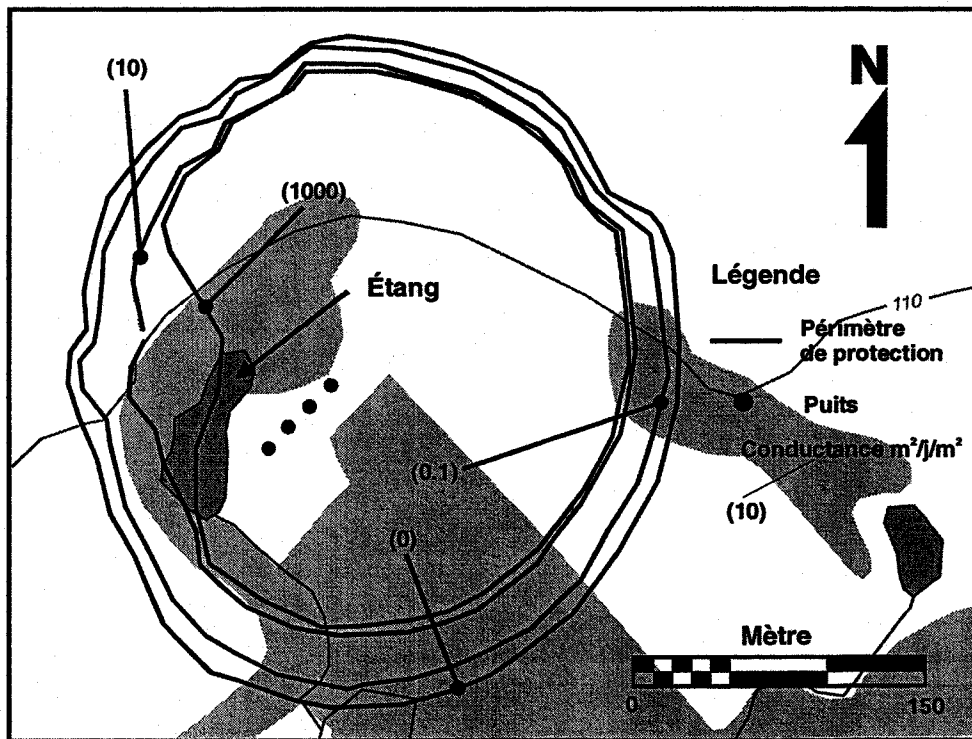


Figure 6.2 Effet de l'étang sur la forme du périmètre rapproché des puits municipaux de Pont-Rouge par modélisation numérique (MODFLOW).

Lorsque les plages de valeurs de la conductance du lit de l'étang et de la conductivité hydraulique de l'aquifère sont définies, une série de simulations du champ d'écoulement (MODFLOW) est effectuée pour différentes permutations de ces deux paramètres (Tableau 6.6). Pour la conductance du lit de l'étang, les deux valeurs extrêmes des simulations de l'analyse de sensibilité soit 0 et 1000 m²/l/m² ont été utilisées, tandis que pour la conductivité hydraulique les trois paires de valeurs présentées au tableau 6.5 et rencontrant les critères de calibration ont été utilisées.

Tableau 6.6 Erreurs moyennes, absolues et RMS pour différentes permutations de la conductance du lit de l'étang (C) et de la conductivité hydraulique (K) aux puits municipaux de Pont-Rouge.

C de l'étang (m ² /l/m ²)	K en amont du puits (m/l)	K autour du puits (m/l)	Erreur moyenne (m)	Erreur absolue (m)	RMS (m)	Note
0	18	52	0.54	0.64	0.67	Retenue
0	12	35	0.16	0.44	0.46	Retenue
0	9.5	28	-0.16	0.61	0.76	Charge P-1=-1.45m – Non retenue
1000	18	52	0.59	0.68	0.74	Charge P-1=1.11m – Non retenue
1000	12	35	0.51	0.58	0.62	Retenue
1000	9.5	28	0.40	0.42	0.53	Retenue

À partir des simulations retenues présentées au tableau 6.6, les PDP rapprochés ont été déterminés par traçage de particules inverses (MODPATH) pour différentes valeurs de porosité efficace (Tableau 6.7). Afin de réduire le nombre de simulations, nous avons utilisé seulement les valeurs extrêmes de la porosité efficace du tableau 6.1. À partir de la superposition des périmètres rapprochés, les zones de confiance et d'incertitude ont été tracées (Figure 6.3). La superficie de la zone de confiance est de 37 530 m², alors que la superficie de la zone d'incertitude est de 79 970 m². Ceci représente un niveau de confiance de 31.9%. Cette valeur du niveau de confiance plus élevée que celle obtenue par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs est attribuable au fait que l'intervalle de valeurs de la conductivité hydraulique est bien borné par l'analyse de sensibilité. Le périmètre obtenu à la section 3.2.2.5 est aussi présenté à la figure 6.3. On remarquera que celui-ci est situé entre les limites des zones de confiance et d'incertitude.

Tableau 6.7 Dimensions des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge calculés pour différentes permutations de conductance, de conductivité hydraulique et de porosité efficace avec MODFLOW-MODPATH.

Conductance de l'étang (m ² /f/m ²)	Conductivité en amont du puits (m/f)	Conductivité autour du puits (m/f)	Porosité efficace	Distance à la limite aval (m)	Largeur de la zone de captage au niveau du puits (m)	Distance à la limite amont (m)	Aire (m ²)
0	18	52	0.15	100	324	253	102 300
0	18	52	0.25	91	254	194	61 740
0	12	35	0.15	125	369	230	109 700
0	12	35	0.25	106	283	188	67 490
1000	12	35	0.15	69	233	215	68 620
1000	12	35	0.25	72	178	165	43 420
1000	9.5	28	0.15	76	269	191	60 840
1000	9.5	28	0.25	72	210	150	38 400

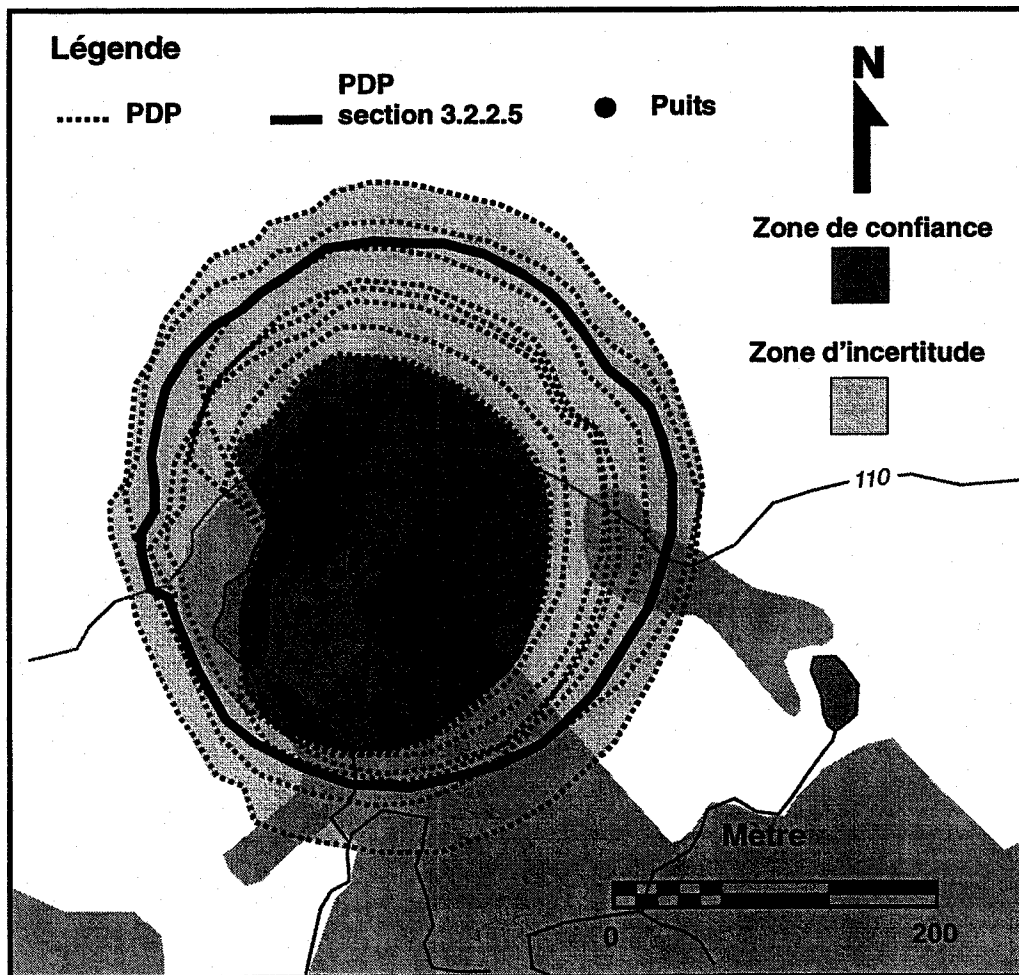


Figure 6.3 Zone de confiance et zone d'incertitude des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par MODFLOW-MODPATH.

En comparant les deux méthodes, nous observons que les valeurs des superficies des zones de confiance sont semblables : 33 970 m² par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs contre 37 530 m² par MODFLOW-MODPATH. Cependant, ces zones ne coïncident pas à cause de la mauvaise représentativité de l'équation du temps de transport des conditions hydrogéologiques (Figure 6.4a). La superficie de la zone d'incertitude obtenue par MODFLOW-MODPATH est presque entièrement comprise à l'intérieur de celle calculée par l'équation du temps de transport (Figure 6.4b). Par contre, la superficie de cette dernière méthode est beaucoup plus importante que celle calculée par la modélisation numérique : 261 930 m² par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs contre 79 970 m² par MODFLOW-MODPATH.

Les résultats de cette analyse d'incertitude pourraient aussi servir de base pour la gestion des activités potentiellement polluantes contenues à l'intérieur des PDP. Ainsi, la zone de confiance pourrait faire l'objet d'un contrôle strict, alors que la zone d'incertitude pourrait laisser place à plus de latitude.

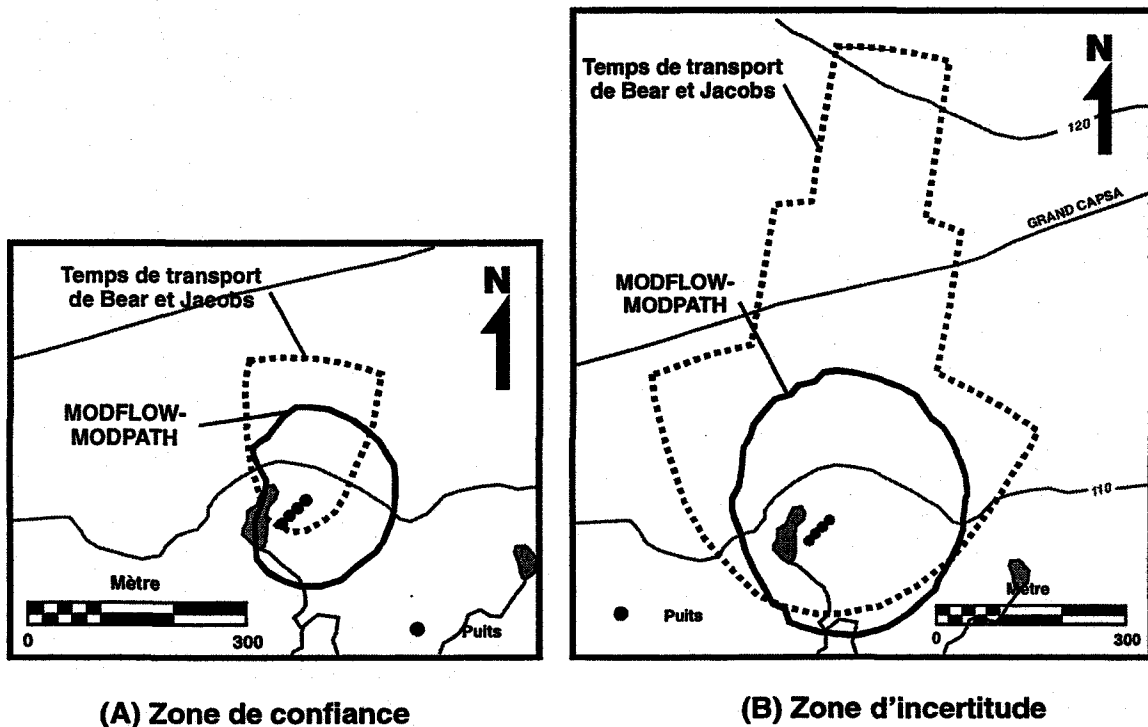


Figure 6.4 Superposition des zones de confiance (a) et des zones d'incertitude (b) des PDP rapprochés des puits municipaux de Pont-Rouge générés par l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs et par MODFLOW-MODPATH.

CHAPITRE 7

Conclusion et recommandations

Dans cette étude, nous avons appliqué et comparé différentes méthodes de détermination des PDP qui, pour la plupart, sont des méthodes largement utilisées à travers le monde. Bien qu'aucun critère de validation n'ait été quantitativement défini, cet exercice a permis d'apprécier la précision relative des différentes méthodes entre elles, par rapport aux périmètres de référence. Cette appréciation est faite à l'aide des différents paramètres géométriques de comparaison et par l'examen visuel de la forme et de l'étendu des PDP. Cette étude a aussi permis de faire ressortir les limites d'application de chacune de ces méthodes.

Bien que le choix du périmètre de référence soit arbitraire, dans la mesure où nous devons faire le choix de « la méthode la plus précise » sans en faire la démonstration, nous pouvons sans craindre avancer que les périmètres de référence obtenus par cartographie hydrogéologique et par modélisation numérique sont fiables. La raison principale est que, même s'il n'est pas possible de les comparer avec « la réalité », ces références sont appuyés sur d'important travaux de caractérisation.

L'analyse d'incertitude, présentée au chapitre 6, montre que l'erreur sur l'évaluation de certains paramètres hydrogéologiques (i.e. la conductivité hydraulique) peut conduire à un large éventail de possibilités dans la forme et les dimensions des PDP. Cette marge d'incertitude dépend à la fois de la méthode utilisée et du choix des paramètres analysés. L'appréciation de cette incertitude est faite à l'aide du niveau de confiance déterminé pour chacune des méthodes et des valeurs absolues des superficies des zones de confiance et d'incertitude. Ceci nous amène à voir le processus de détermination des PDP non pas comme une recherche de la meilleure solution, mais plutôt comme un éventail de possibilités défini par des zones de confiance et d'incertitude.

Ainsi, nous avons pu reconnaître que la précision d'une méthode de détermination des PDP est à la fois fonction de sa capacité à représenter les conditions hydrogéologiques du milieu et de l'incertitude reliée aux paramètres hydrogéologiques. La précision des PDP peut donc être améliorée en choisissant une méthode dont les hypothèses rencontrent les conditions hydrogéologiques et par l'amélioration de la qualité et l'augmentation de la quantité d'informations utilisées pour caractériser les conditions hydrogéologiques.

Dans l'ensemble, l'établissement des PDP doit être vu comme un processus itératif. Dans un premier temps, l'établissement des PDP peut être fait avec des méthodes simples et un nombre limité d'informations pour circonscrire la zone de recherche. Par la suite, en fonction de la quantité de données disponibles, de la complexité du contexte hydrogéologique, des risques de contamination de l'eau souterraine et du degré de protection souhaité, l'utilisation de méthodes plus complexes et une caractérisation intensive peuvent être envisagées pour réduire l'incertitude.

Conclusion spécifique

L'application de certaines méthodes comme l'équation du temps de transport de Bear et Jacobs (1965), l'équation d'écoulement uniforme ou la modélisation par éléments analytiques (WhAEM), peut ne pas représenter toujours adéquatement les PDP. Ceci s'explique par le fait que les hypothèses de ces méthodes ne s'accordent pas avec les caractéristiques hydrogéologiques des sites étudiés. En effet, même si les aquifères

étudiés sont relativement homogènes par rapport à leurs propriétés hydrauliques (i.e. conductivité hydraulique), il en n'est pas de même pour leur géométrie et leurs limites qui sont beaucoup plus complexes. De plus, si une de ces méthodes est utilisée pour définir les PDP des sources, on veillera à utiliser le volume d'eau provenant de la recharge au lieu du volume total extrait du captage pour éviter un surdimensionnement des PDP.

Plus particulièrement, l'approche utilisant l'équation d'écoulement uniforme et l'équation du temps de transport de Bear et Jacob suggérée par le MENV n'est pas recommandable. Cette approche simplifie à l'extrême les conditions d'écoulement et est très sensible aux variations des propriétés hydrogéologiques. De plus, la méthode de l'hydrogramme de source de Civita (1995), utilisée pour la détermination des PDP rapprochés des sources de Saint-Alban, n'est pas applicable à cause des caractéristiques de l'hydrogramme de source.

Les PDP obtenus par modélisation numérique avec MODFLOW-MODPATH sont comparables aux périmètres de référence pour les deux sites étudiés. La grande flexibilité des modèles numériques pour l'intégration des propriétés hydrogéologiques permet généralement d'obtenir une bonne précision des PDP. Par contre, à cause de la quantité d'information et de l'expertise nécessaire au développement d'un modèle numérique, cette méthode est souvent très coûteuse à utiliser. Cependant, dans certains contextes hydrogéologiques complexes ou lorsque des prédictions sont nécessaires, les modèles numériques peuvent être les seules méthodes envisageables.

Même si la cartographie hydrogéologique a été ici utilisée uniquement comme méthode de référence, cette méthode est généralement très précise lorsque plusieurs points de contrôle piézométriques et géologiques sont disponibles. Dans des aquifères granulaires où la surface de la nappe libre peut être assimilée à la topographie du sol, l'utilisation de la cartographie hydrogéologique peut être très avantageuse. Cependant, cette méthode n'est utile que pour déterminer l'aire d'alimentation d'un captage et celle-ci doit être utilisée de façon complémentaire avec d'autres méthodes pour définir les PDP rapprochés.

Pour tous les cas étudiés, la méthode 3A2E représente de façon réaliste les PDP rapprochés et éloignés. Un des avantages de cette méthode est que le bilan de masse est conservé entre le débit d'exploitation du captage et la recharge de l'aquifère. En respectant le bilan de masse, on s'assure d'un dimensionnement adéquat de la superficie du PDP. Le second avantage de cette méthode est le peu d'information et d'expertise requis pour son application. Ces données sont généralement disponibles dans les rapports hydrogéologiques décrivant l'aménagement des puits d'exploitation. Pour l'évaluation de la recharge par l'établissement d'un bilan hydrologique, les données sont disponibles au ministère de l'Environnement du Québec (MENV). Par contre, pour les sources aménagées, les données nécessaires ne sont généralement pas toutes disponibles puisque aucune étude hydrogéologique n'est requise pour l'aménagement de tels captages. Dans ce cas, des travaux de caractérisation devront être planifiés et ceux-ci devront inclure la mesure du débit des sources.

Malgré la précision obtenue par la méthode 3A2E, celle-ci doit être utilisée avec précaution puisqu'elle est pratiquement indépendante de l'écoulement. En fait, seul le gradient hydraulique est utilisé. L'assimilation du PDP à une ellipse permet d'imiter la forme des PDP dans des aquifères granulaires avec un gradient hydraulique non négligeable. Néanmoins, la méthode 3A2E est un compromis entre l'imprécision des méthodes simples (équations de bilan de masse et analytiques simples) et la complexité des modèles numériques. Ainsi, cette méthode représente bien le niveau minimal d'informations et d'expertise nécessaire pour s'assurer d'une détermination réaliste des PDP en milieu granulaire.

Recommandations

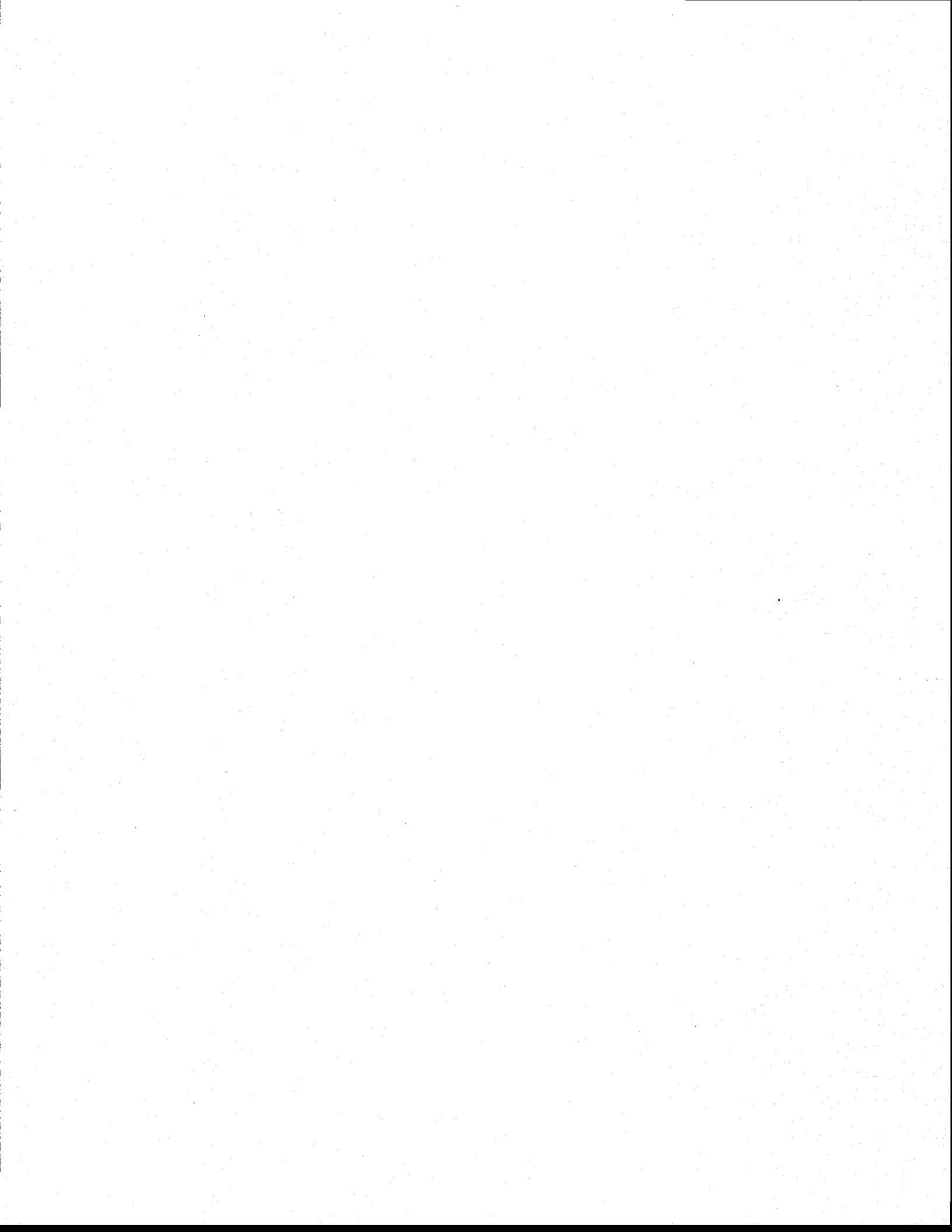
À la lumière des conclusions précédentes, voici les recommandations faites :

- Afin d'augmenter le degré de confiance des PDP rapprochés de référence pour les sites de Pont-Rouge et de Saint-Alban, il serait intéressant de comparer les temps de transport obtenus avec les modèles numériques (MODFLOW-MODPATH) avec ceux obtenus par des essais de traceurs. L'élaboration de modèles numériques à saturation variable, comme FEMWATER, FRAC3D ou FEFLOW, pourrait aussi être

envisagée, surtout à Saint-Alban où la majorité des limites de l'aquifère sont des faces de suintement.

- L'application de la méthode de séparation d'hydrogramme de source de Civita (1995) est simple et économique. C'est pourquoi il serait intéressant d'adapter cette méthode pour les conditions hydrogéologiques de la MRC de Portneuf. Pour ce faire, des essais de traceurs devraient être réalisés à différents sites afin de définir des classes de vulnérabilité selon les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine. Le DTDM devrait aussi être redéfini afin de faciliter l'application de la méthode dans des milieux granulaires.
- Bien que la méthode 3A2E ait donné de bons résultats dans les contextes étudiés, cette méthode devrait être validée pour d'autres aquifères granulaires du Québec, afin de s'assurer de sa fiabilité.
- En plus d'étudier l'incertitude relative à l'estimation des paramètres hydrogéologiques, l'effet des variations annuelles de certains paramètres (i.e. le gradient hydraulique) et l'incertitude reliée à l'application d'une méthode par différents utilisateurs devraient aussi être envisagés.
- La gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des PDP devrait inclure l'analyse d'incertitude. Ainsi, la zone de confiance pourrait faire l'objet d'un contrôle strict, alors que la zone d'incertitude pourrait laisser place à plus de latitude.

Enfin, d'autres études comparatives portant sur les méthodes de détermination des PDP en milieux confinés et fracturés devraient être envisagées. Ces études permettraient d'élargir nos connaissances et de développer une méthodologie face à l'établissement des PDP pour différents contextes hydrogéologiques. Une fois cette connaissance technique acquise, l'établissement d'une méthodologie de gestion des sources potentielles de contamination contenues à l'intérieur des PDP qui intégrerait à la fois les aspects scientifiques, sociaux, économiques et législatifs devrait être mis de l'avant.



Références

- ANDERSON, M. P. et W. W. Woessner.** 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. London : Academic Press. 381 p.
- AUTODESK.** 1992. AutoCAD. Version : 12.0.
- BAIR, E. S., C. M. Safreed et E. A. Stasny.** 1991. *A Monte Carlo-Based Approach for Determining Traveltime-related Capture Zones of Wells Using Convex Hulls as Confidence Regions*. Ground Water, Vol. 29, no. 6, p. 849-855.
- BAIR, E. S. et G. S. Roadcap.** 1992. *Comparison of Flow Used to Delineate Capture Zones of Wells: 1. Leaky-Confined Fractured-Carbonate Aquifer*. Ground Water, Vol. 30, no. 2, p. 199-211.
- BARLOW, P. M.** 1994. *Two and Three-Dimensional Pathline Analysis of Contributing Areas To Public-Supply Wells of Cape Cod, Massachusetts*. Ground Water, Vol. 32, no. 3, p. 399-410.
- BATES, J. K. et J. F. Evans.** 1996. *Evaluation of Wellhead Protection Area Delineation Methods, Applied to the Municipal Well Field at Elmore, Ottawa County, Ohio*. Ohio Journal of Science, Vol. 96, no. 1, p. 13-22.
- BEAR, J. et M. Jacobs.** 1965. *On the movement of water bodies injected into aquifers*. Journal of Hydrology. vol. 3, p. 37-57.
- BHATT, K.** 1993. *Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values*. Journal of hydrogeology. Vol. 149, p. 1-8.
- BLANDFORD, T. N. et P. S. Huyakorn.** 1992. *WhPA-Wellhead protection area delineation code, version 2.0*. U.S. EPA, Office of Ground-Water, Washington, DC.
- BOURQUE, É., LAFLÈCHE, M. R., LEFEBVRE, R. et MICHAUD, Y.** 1996. *Résultats initiaux de la caractérisation géochimique des aquifères du piedmont laurentien dans la MRC de Portneuf (Québec)*; dans *Recherches en cours 1996-E*; Commission géologique du Canada, p. 225-232.
- BOUWER, H. H. et R. C. Rice.** 1976. *A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells*. Water Resources Research, Vol. 12, no. 3, p. 423-428.
- CHAPUIS, R. P.** 1999. Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Publication du Québec. Sainte-Foy (Québec).
- CIVITA, M. V.** 1995. *A methodology for delineation and design of spring protection area system*. In: XXVI International Congress of International Association of Hydrogeologists (Edmonton, Alberta, Canada, June 4-10 1995). International Association of Hydrogeologists, Sec. A, Mem. #3.
- CLARK, T.H. et Y. Globensky.** 1973. Rapport Géologique-148. Portneuf et parties de Saint-Raymond et de Lyster. Service de l'exploration géologique, Ministère des

- Richesses Naturelles, Direction générale des Mines. 109 p.
- CLARK, T.H. et Y. Globensky.** 1975. Rapport Géologique-154. Région de Grondines. Service de l'exploration géologique, Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des Mines. 157 p.
- CLOUTIER, M., M. Parent et A.M. Bolduc.** 1997. Géologie des formations superficielles, région de Saint-Marc-des-Carières, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public 3544, échelle 1 :100000.
- COLE, B. E. et S. E. Silliman.** 1997. *Capture Zones for Passive Wells in Heterogeneous Unconfined Aquifers*. Ground Water, Vol. 35, no. 1, p. 92-98.
- DRISCOLL, F. G.** 1986. Groundwater and Wells. Second Edition. Johnson Divison, St.Paul, Minnesota. 1089 p.
- ENGINEERING COMPUTER GRAPHICS LABORATORY (ECGL).** 1998. GMS : GroundWater Modeling System. Version : 2.1. Brigham Young University, Provo (Utah).
- ENVIRONNEMENT CANADA.** 1995. *Groundwater quality protection practices: Fraser River Action Plan*. Vancouver (Colombie-Britannique), 52 p.
- EVERS, S. et D. N. Lerner.** 1997. *How Uncertain Is Our Estimate of a Wellhead Protection Zone?* Ground Water, Vol. 36, no. 1, p. 49-57.
- FAGNAN, Nathalie.** 1998. *Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf*. Mémoire de Maîtrise, Sainte-Foy (Québec), INRS-Géoressources, 215 p.
- FAGNAN, N., BOURQUE, É., MICHAUD, Y., LEFEBVRE, R., BOISVERT, É., PARENT, M. et MARTEL, R.** 1999. *Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la Mer de Champlain*. Hydrogéologie, BRGM, Numéro spécial sur l'hydrogéologie au Québec.
- FITTS, C.** 1992. TWODAN. University of Southern Maine.
- FORSTER, C. B., T. E. Lachmar et D. S. Olivier.** 1997. *Comparaison of Models for Delineating Wellhead Protection Areas in Confined to Semiconfined Aquifers in Alluvial Basins*. Ground Water, Vol. 35, no. 4, p. 689-697.
- GÉOHYDROTEK.** 1991. *Essai de pompage d'un système de captage à puits multiples à Pont-Rouge, Qc*. Rapport hydrogéologique, 7 p.
- GIRARD, Frédéric.** 2000. Architecture et hydrostratigraphie d'un complexe morainique et deltaïque dans la région de Saint-Raymond de Portneuf, Québec. Mémoire de maîtrise, INRS-Géoressources, 175 p. (en préparation)
- GRUBB, S.** 1993. *Analytical model for estimation of steady-state capture zone of pumping wells in confined and unconfined aquifers*. Ground Water. vol. 31, p. 27-32.

- HAITJEMA, H. M., J. Wittman, V. Kelson et N. Bauch.** 1994. *WhAEM : Program documentation for the wellhead analytic element model.* EPA/600/R-94/210. 117 p.
- HAITJEMA, H. M.** 1995. *GFLOW : Analytic element groundwater flow model.* Haitjema Software.
- HAITJEMA, H. M., O. D. L. Strack et S. R. Kraemer.** 1995. *Demonstration of the analytic element method for wellhead protection, project summary.* EPA/600/SR-94/210.
- JAVENDEL, I. et C. F. Tsang.** 1986. *Capture-zone types curves : A tool for aquifer cleanup.* Ground Water. vol. 24, p. 616-625.
- LALLEMAND-BARRÈS, A. et J.-C. Roux.** 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, Manuels et méthodes. numéro 19. BRGM. France.
- LERNER, D. N.** 1992. *Well catchments and time-of-travel zones in aquifers with recharge.* Water Resources Research. vol. 28, no. 10, p. 2621-2628.
- LEFEBVRE, G. et P. Gélinas.** 1995. Hydrogéologie : GGL-10355. Notes de cours. Université Laval.
- LIN, H. C., D. R. Richards, C. A. Talbot, G. T. Yeh, J. R. Cheng, H. P. Cheng et N. L. Jones.** 1997. *FEMWATER : A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variability saturated media.* Technical Report CHL-97-12. Engineering Computer Graphics Laboratory. 141 p.
- LIVINGSTONE, S., T. Franz et N. Guiguer.** 1996. *Managing Ground-water Resources Using Wellhead Protection Programs.* Geoscience Canada, Vol. 22, no. 3, p. 121-128.
- MAPINFO CORPORATION.** 1996. MapInfo: Desktop Mapping Software. Version : 4.1. Troy (New-York).
- McDONALD, M.G. et A. W. Harbaugh.** 1988. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.* Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS, 576 p.
- MEYBOON, P.** 1961. *Estimating Ground-Water Recharge from Stream Hydrographs.* Journal of Geophysical Research, Vol. 66, no. 4, p. 1203-1214.
- MICHAUD, Y., FORTIER, R., PARENT, M. et PILON, J.** 1997. *L'utilisation du géoradar et des méthodes électriques pour la cartographie des formations aquifères du piémont laurentien, Québec;* dans Recherches en cours 1997-E; Commission géologique du Canada, p. 73-82.
- MICROSOFT CORPORATION.** 1997. Access. Version : 4.0.

- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC.** 1984. Captage et distribution de l'eau. Directive no. 001. Québec (Québec).
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC.** 1989. L'eau potable au Québec : Un premier bilan de sa qualité. Québec (Québec).
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC.** 1993. Système domestique d'approvisionnement d'eau : le puits. Direction des écosystèmes urbains, Québec (Québec).
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE DU QUÉBEC.** 1995. Guide: les périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine. Direction des politiques des secteurs agricole et naturel. Publication du Québec. Sainte-Foy (Québec).
- MOENCH, A. F.** 1994. *Specific Yield as Determined by Type-Curve Analysis of Aquifer-Test Data*. Ground Water, Vol. 32, no. 6, p. 949-957.
- MOENCH, A. F.** 1997. *Flow to a Well of Finite Diameter in a Homogenous, anisotropic Water Table Aquifer*. Water Resource Research, Vol. 33, no. 6, p. 1397-1407.
- NEUMAN, S. P.** 1975. *Analysis of Pumping Test Data from Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response*. Water Resource Research, Vol. 10, no. 2, p. 303-312.
- PARADIS, D., LEFEBVRE, R. et MICHAUD, Y.** 1997. *Analyse hydrologique pour l'évaluation de la recharge en eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Portneuf sur le piémont laurentien (Québec)*; dans Recherches en cours 1997-E; Commission géologique du Canada, p. 83-88.
- POLLOCK, D. W.** 1994. *User's guide for MODFLOW/MODPATH-PLOT, version 3. A particul-tracking post-processing package for MODFLOW, the USGS finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report. 94-464.
- RAMANARAYANAN, T. S., D. E. Storm, M. D. Smolen et M. A. Kizer.** 1992. *Comparaison of an analytical model and numerical model for delineating wellhead protection areas*. In: The American Society of Agricultural Engineers Meeting Presentation (Charlotte, North Carolina, 21-24 Juin 1992). The American Society of Agricultural Engineers, 922036.
- RUMBAUGH, J.** 1995. WINFLOW : Ground Water Flow Model for Windows. Environmental Simulations Inc.
- SHAFER, J. M.** 1987. *Reverse pathline calculation of time-related capture zones in non uniform flow*. Ground Water. V. 25, no. 3, p. 283-289.
- SPRINGER, A. E. et E. S. Bair.** 1992. *Comparaison of Methods Used to Delineate Capture Zones of Wells: 2. Stratified-Drift Buried-Valley Aquifer*. Ground Water, Vol. 30, no. 6, p. 908-917.

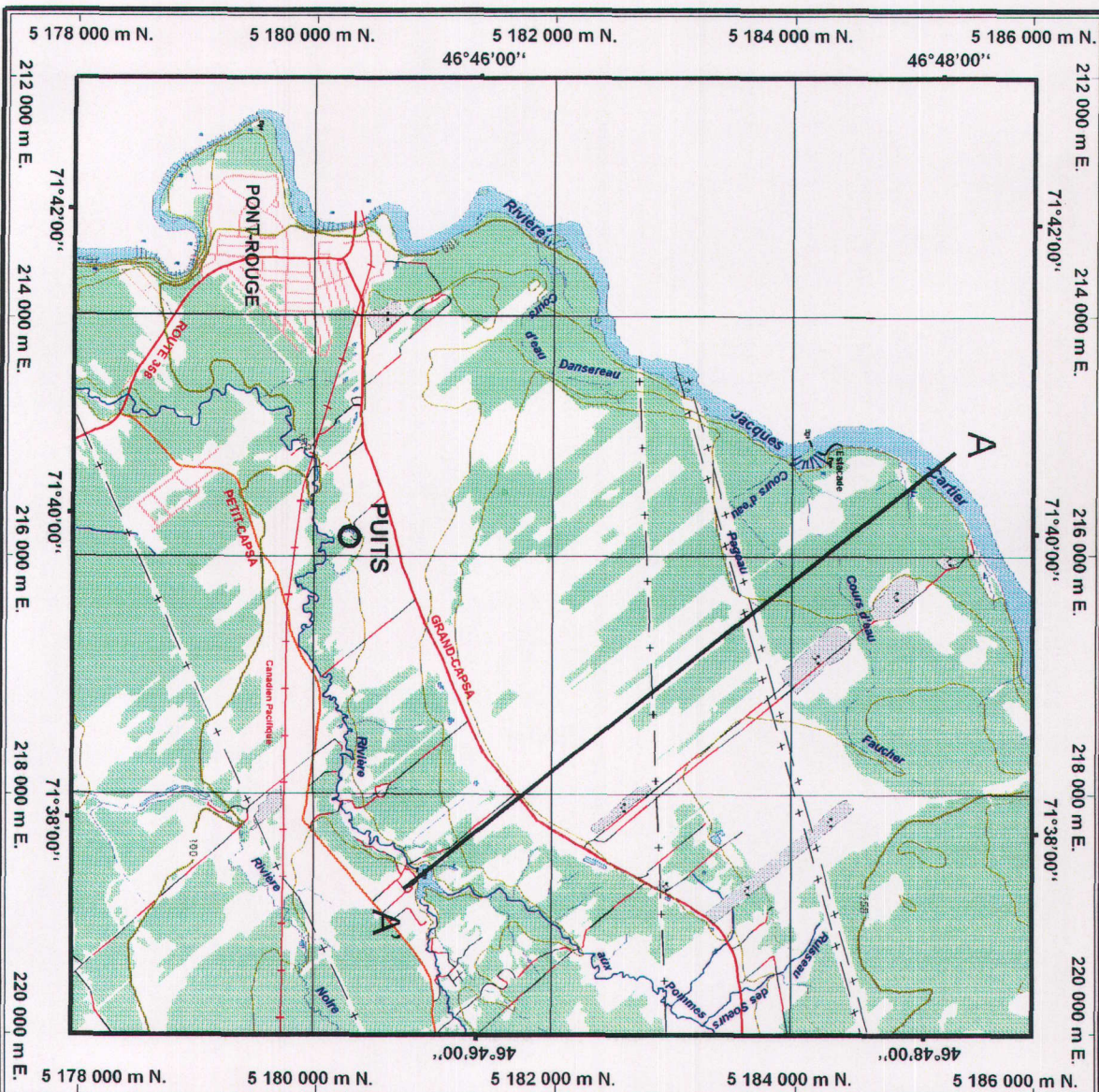
- STRACK, O. D. L.** 1989. Groundwater Mechanics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- STRACK, O. D. L.** 1990. SLAEM : Single Layer Analytic Element Model. Strack Consulting.
- STRACK, O. D. L.** 1992. MLAEM : Multiple Layers Analytic Element Model. Strack Consulting
- STRACK, O. D. L., E.I. Anderson, M. Baker, W.C. Olsen, J.C. Panda, R.W. Pennings, D.R. Steward et S.R. Kraemer.** 1994. CZAEM : User's guide. EPA/600/R-94/174. 53 p.
- TIEDEMAN, C. et S. M. Gorelick.** 1993. *Analysis of uncertainty in optimal groundwater contaminant capture design*. Water Resources Research, vol. 29, no. 7, p. 2139-2153.
- TODD, D. K.** 1980. Groundwater Hydrology. Second Edition : États-Unis.
- UFFINK, G.J.M.** 1984. Theory of the oscillating slug test. Nat. Institut for Public Health and Environmental Hygiene. Bilthoven. Unpublished research report, 18 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** 1987. Guidelines For Delineation Of Wellhead Protection Areas. EPA-440/5-93-001. Office of Ground-Water Protection, Washington, DC.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** 1993a. Wellhead Protection: A guide for Small Communities. EPA/625/R-93/002. Office of Water, Washington, DC.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** 1993b. Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined, Fractured and Karst Aquifer Settings. EPA813K93001. Office of Water, Washington, DC.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** 1994. Handbook: Ground Water and Wellhead Protection. EPA/625/R-94/001. Office of Water, Washington, DC.
- VARLJEN, M. D. et J. M. Shafer.** 1991. *Assessment of Uncertainty in Time-Related Capture Zones Using Conditional Simulation of Hydraulic Conductivity*. Ground Water, Vol. 29, no. 5, p. 737-748.
- YANG, Y. L., R. D. Spencer et M. G. Todd.** 1995. *Analytical solutions for determination of the non-steady-state and steady-state capture zones*. Ground Water Monitoring and Remediation. vol. p. 101-106.
- ZIMMERMAN, D., Hanson et P. Davis.** 1991. *Parameter Estimation Techniques and Uncertainty in Ground Water Flow Model Prediction*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, DOE Publication DE91 000405.

ANNEXE A

Topographie : site des puits municipaux de Pont-Rouge

Sources des données :

Topographie : Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec



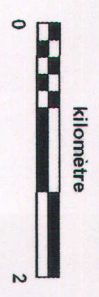
TOPOGRAPHIE

Site des puits municipaux de Pont-Rouge

LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Rue
- Sentier
- Ligne électrique
- Chemin de fer
- Sablière
- Marécage
- Courbe de niveau

Équidistance des courbes: 10 mètres



Projection: MTM - NAD 83 - Zone 7

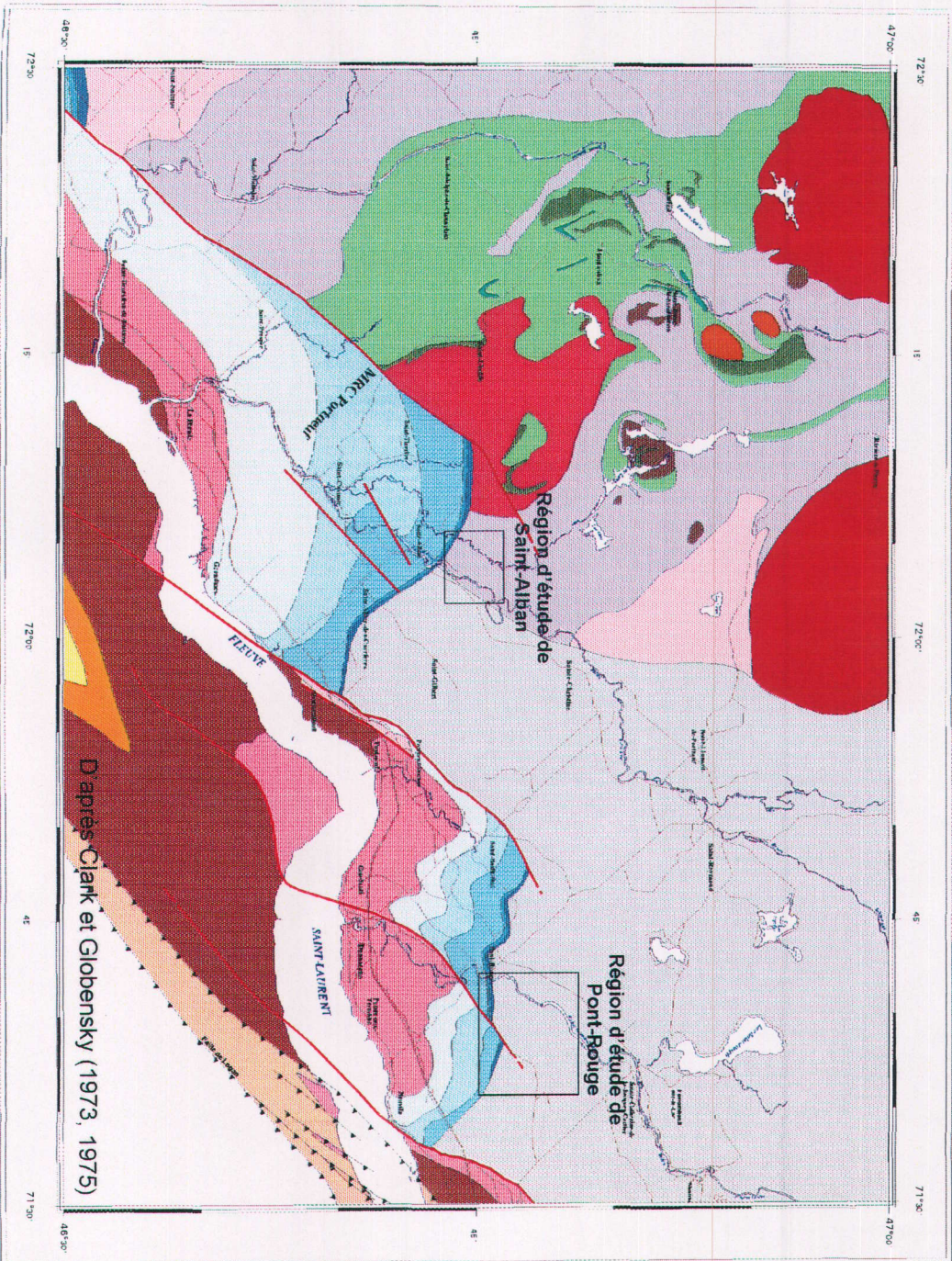
ANNEXE B

Géologie du socle rocheux : région de Grondines et de Portneuf

Sources des données :

Rapports géologiques du MRN : Clark et Globensky (1973, 1975)

Réseaux routier et hydrographique : Géomatique Canada (Secteur des
Sciences de la Terre)



- LEGENDE**
- ORDOVICIEN SUPERIEUR**
- Formation de Beauport (sable rouge, gres vert)
 - Formation de Lorraine
 - Formation de Pontgrais (calcaire, shale)
 - Formation de Nicolet (sable, gres)
- ORDOVICIEN MOYEN**
- GROUPE DE SAINT-ROSALE**
- Formation de Lotbiniere (shale siliceux)
 - Formation de Sainte-Suzanne et des Fonds (sables, dolomite)
- GROUPE DUTICA**
- Shale et calcaire
- GROUPE DE TRENTON**
- Formation de Nouvelle (calcaire argileux, shale)
 - Monture de St-Casimir (calcaire cristallin)
 - Formation de Deschambault (calcaire cristallin conoidal)
 - Formation de Fecteau, de Ste-Anne et de Font-Rouge (calcaire cristallin)
- GROUPE DE SLACK, GINER**
- Formation de Lavey et de Lowville et de Parantelle (dolomite, calcaire, gres)
- PRECAMBRIEN**
- SUITE DE RIVIERE-A-PIERRE**
- Granite et monzome porphyroide
- GRANITE DE SAINT-JUBALDE**
- Granite eulgranalire
- COMPLEXE DE LA BOSTONNAIS**
- Ophiolites granodioritiques, trachytiques et dioritiques
 - Micaschistes
- GROUPE DE MONTVALJEAN**
- Amphibolite
 - Quartzite
- AUTRES LITHOLOGES**
- Porphyroites quartziteuses localement a niveaux de quartzite, de marbre et de amphibolite
 - Lenticulaire eulgranalire locale
 - Grales granodioritiques dominiants
 - Ophiolites granodioritiques, trachytiques et dioritiques
 - Idolite, quartzite et diorite
- SYMBLES**
- Contour géologique classique
 - Contour géologique approximatif
 - Faible normale observée
 - Faible de caractérisation

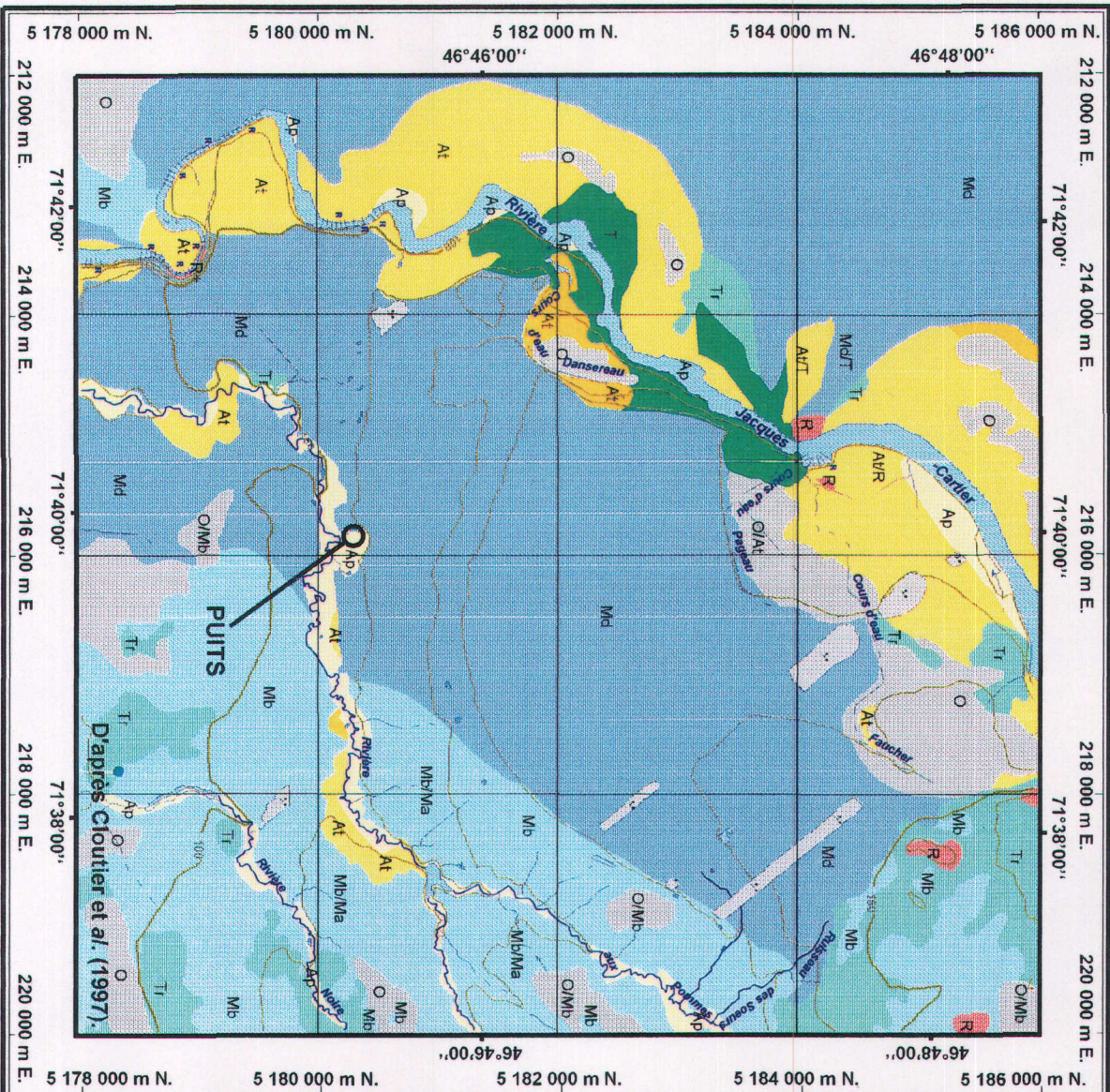
ANNEXE C

Géologie des formations superficielles : site des puits municipaux de Pont-Rouge

Sources des données :

Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.* (1997)

Topographie : Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec



GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Puits municipaux de Pont-Rouge

LÉGENDE

- Dépôts organiques
- Alluvions actuelles
- Alluvions des terrasses fluviales
- Sédiments deltaïques
- Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation
- Sédiments fins d'eau profonde
- Till remanié
- Till en couverture continue
- Roche sédimentaires paléozoïques
- Roche ignées et métamorphiques précambriennes



ANNEXE D

**Piézométrie : site des puits municipaux de
Pont-Rouge (Période de mesure : mi-juillet à
mi-août 1997)**

PIÉZOMÉTRIE

Puits municipaux
de Pont-Rouge

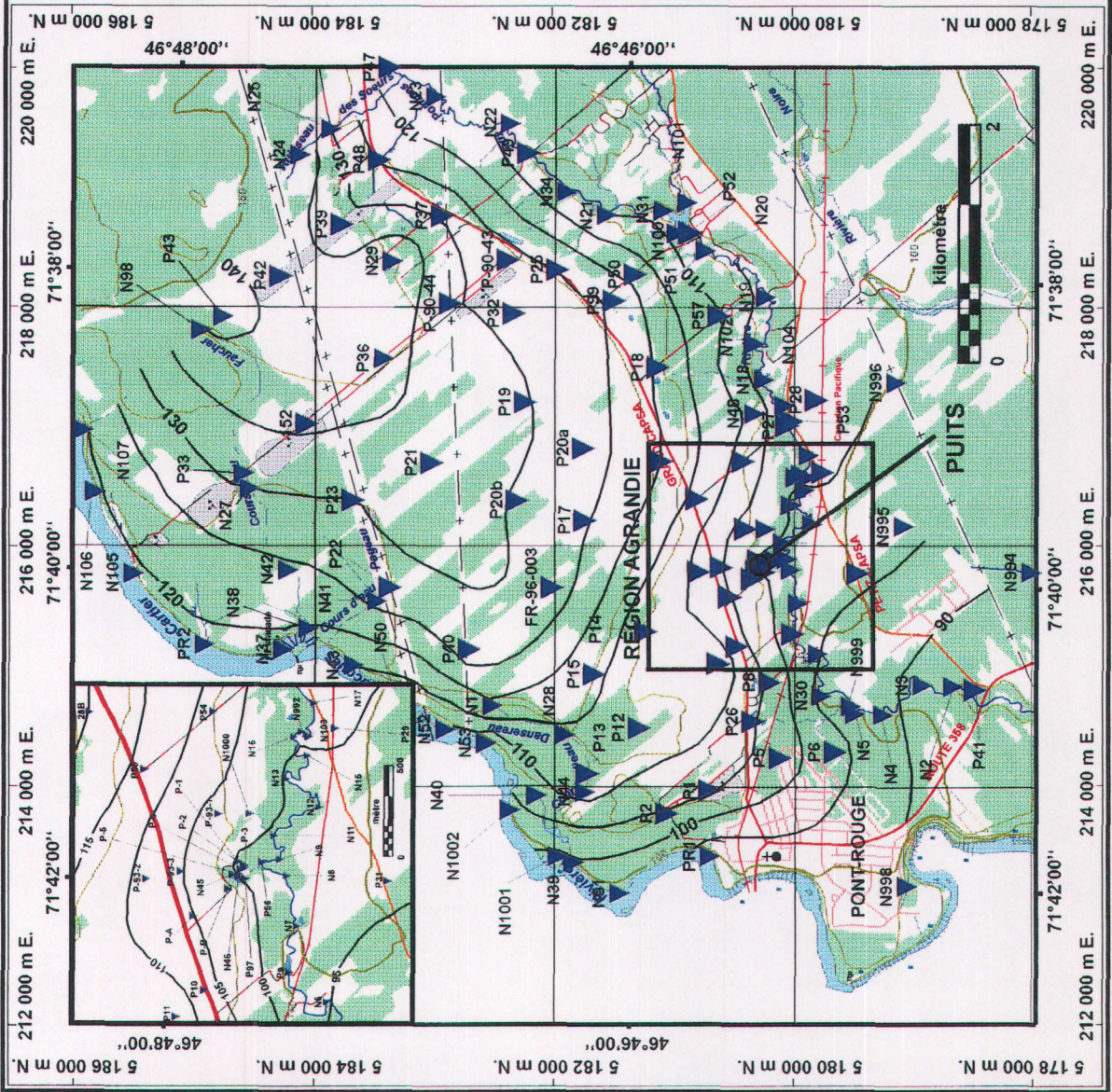
LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Rue
- Sentier
- Ligne électrique
- Chemin de fer
- Sablière
- Maréage
- Courbe de niveau
- Courbe piézométrique
- Point de mesure

Équidistance des courbes
de niveaux: 10 mètres
Équidistance des courbes
piézométriques: 5 mètres

Période de mesure: mi-juillet à mi-août 1997
Interpolation: Krigage - Variogramme linéaire

Projection: UTM NAD 83 - Zone 7



ANNEXE E

**Description des points de mesure de niveau
d'eau : site des puits municipaux de Pont-
Rouge**

Points mesurés

Date	Type de mesure	Numero	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
15-août-97	sablière	P1	0	105,91	213970	5180698	105,91	Eau dans fond sablière
17-août-97	puits surface	P2	3,34	107,82	213774	5181058	104,48	Puits alimentant maison/chalet
04-août-97	eau affleurante	P5	0	103,1	214242	5180114	103,1	
04-août-97	fossé	P6	0	97,2	214288	5179654	97,2	
04-août-97	eau affleurante	P8	0	104,21	214871	5180199	104,21	
05-août-97	ruisseau	P9	0	96,97	215274	5180008	96,97	Rivière aux Pommes
29-juil-97	forage	P10	5,05	111,58	215173	5180475	106,53	MNB97-132
29-juil-97	forage	P11	4,24	118,36	215027	5180633	114,12	MNB97-133; MNB97-134
29-juil-97	forage	P12	8,67	120,63	214488	5181288	111,96	MNB97-135
05-août-97	ruisseau	P13	0	112,95	214111	5181719	112,95	Cours d'eau Dansereau
30-juil-97	forage	P14	7,35	118,79	215293	5181238	111,44	MNB97-136
30-juil-97	forage	P15	9,63	125,56	214940	5181660	115,93	MNB97-137
30-juil-97	forage	P17	9,78	135,2	216223	5181738	125,42	MNB97-138
03-juil-97	tarrière	P18	0,77	119,78	217503	5181136	119,01	MNB97-139
01-août-97	forage	P19	5,44	135,67	217212	5182238	130,23	MNB97-140
31-août-97	forage	P20a	7,53	134,98	216826	5181754	127,45	MNB97-141
31-août-97	forage	P20b	7,09	136,34	216386	5182308	129,25	MNB97-142
01-août-97	forage	P21	3	137,34	216707	5183022	134,34	MNB97-143
07-août-97	ruisseau	P22	0	127,87	215664	5183367	127,87	Cours d'eau Pageau
07-août-97	ruisseau	P23	0	129,79	216391	5183682	129,79	Cours d'eau Pageau
07-août-97	ruisseau	P25	3,55	128,68	218322	5181972	125,13	
17-août-97	puits surface	P26	0,69	105,98	214546	5180342	105,29	
04-juil-97	tarrière	P27	0	100,84	217015	5180057	100,84	
06-août-97	rivière	P28	2,38	104,67	217231	5179811	102,29	MNB97-145
04-juil-97	tarrière	P29	4,12	104,76	216626	5179759	100,64	
17-août-97	puits de surface	P31	0,44	96,79	215779	5179465	96,35	MNB97-146
04-juil-97	forage	P32	6,79	135,25	217953	5182337	128,46	MNB97-147
08-août-97	ruisseau	P33	0	131,64	216618	5184589	131,64	
01-août-97	forage	P36	3,33	139,66	217578	5183422	136,33	MNB97-149
08-août-97	eau affleurante	P37	0,5	130	218774	5182937	129,5	MNB97-150
08-août-97	eau affleurante	P39	0	130,12	218702	5183776	130,12	MNB97-151; MNB97-152
08-août-97	eau affleurante	P40	8,65	136,57	215149	5182709	127,92	
30-juil-97	forage	P41	0	86,75	214806	5178481	86,75	
06-août-97	rivière	P42	0	138,42	218271	5184285	138,42	
08-août-97	eau affleurante	P43	0	141,23	217931	5184764	141,23	
08-août-97	eau affleurante	P47	0	117,51	220019	5183375	117,51	Rivière aux Pommes
08-août-97	ruisseau	P48	0	124,64	219243	5183464	124,64	
08-août-97	rivière	P49	0	111,47	219299	5182219	111,47	Rivière aux Pommes

Date	Type de mesure	Numéro	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
06-juil-97	tarrière	P50	0,59	119,12	218282	5181328	118,53	MNB97-154
07-août-97	lac	P51	0	108,71	218631	5180877	108,71	Rivière aux Pommes en haut du barrage
07-août-97	rivière	P52	0	105,5	218628	5180864	105,5	Rivière aux Pommes en bas du barrage
08-juil-97	tarrière	P53	2,14	104,02	217049	5180019	101,88	MNB97-155
08-juil-97	tarrière	P54	2,71	110,82	216717	5180428	108,11	MNB97-156
08-juil-97	tarrière	P55	2,62	116,16	216400	5180810	113,54	MNB97-157
05-août-97	ruisseau	P56	0	98,11	215884	5180155	98,11	Rivière aux Pommes en bas de la prise d'eau Paquet
07-août-97	ruisseau	P57	0	110,59	217934	5180628	110,59	Lac de la Prise d'eau Paquet
23-juil-97	lac	P97	0	100,2	215791	5180250	100,2	
07-août-97	lac	P99	0	123,97	218061	5181504	123,97	Mesure par rapport au sol
22-juil-97	puits d'observation	FR-96-003	9,02	136,86	215661	5182016	127,84	
17-août-97	puits surface	288	3,1	123,08	216714	5181109	119,98	Mesure par rapport au sol
23-juil-97	puits d'observation	P-A	6,6	111,68	215584	5180537	105,08	Mesure par rapport au sol
23-juil-97	puits d'observation	P-B	7,1	109,04	215736	5180345	101,94	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
23-juil-97	piézomètre	P-1	2,01	101,18	215886	5180290	99,17	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
24-juil-97	piézomètre	P-2	2,45	101,33	215865	5180259	98,88	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
25-juil-97	piézomètre	P-3	2,44	101,2	215852	5180254	98,76	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
26-juil-97	piézomètre	P-4	3,31	101,51	215840	5180275	98,2	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
27-juil-97	piézomètre	P-5	2,3	101,66	215818	5180289	99,36	Piézomètre de la Prise d'eau Paquet; Mesure par rapport au sol
17-août-97	piézomètre	P-90-43	6,93	134,44	218404	5182385	127,51	Piézomètre du MEF
17-août-97	piézomètre	P-90-44	5,15	135,46	218040	5182869	130,31	Piézomètre du MEF
17-août-97	piézomètre	152	5,6	141,35	217033	5184066	135,75	Piézomètres (un de 9,14 m et 18,29 m) aménagés pour l'ancien LES; La mesure retenue est celle du piézomètre de 9,14 m
17-août-97	piézomètre	P-93-1	6,88	109,85	216153	5180399	102,97	Piézomètre de Philippe Perrier
29-juil-97	piézomètre	P-93-2	7,2	115,87	215792	5180795	108,67	Piézomètre de Philippe Perrier
17-août-97	piézomètre	P-93-3	8,13	113,29	215833	5180604	105,16	Piézomètre de Philippe Perrier
15-août-97	rivière	PR1	0	91,02	213418	5180694	91,02	Rivière Jacques-Cartier
été 1996	rivière	PR2	0	118,86	215188	5184912	118,86	Rivière Jacques-Cartier

Points estimés

Date	Type de mesure	Numero	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
	ruisseau	N1	0	119	214677	5182511	119,00	Carte topographique (cours d'eau Dansereau)
	ruisseau	N2	0	87,52	214834	5178663	87,52	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N3	0	88,74	214846	5178922	88,74	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N4	0	91,15	214597	5179251	91,15	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N5	0	92,2	214605	5179485	92,20	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N6	0	95,38	215110	5179801	95,38	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N7	0	97,44	215531	5179966	97,44	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N8	0	97,87	215809	5180023	97,87	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N9	0	98,25	215900	5180060	98,25	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N11	0	98,5	216032	5180091	98,50	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N12	0	98,96	216191	5179844	98,96	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N13	0	99,38	216347	5180026	99,38	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N15	0	99,91	216476	5179911	99,91	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N16	0	100,17	216580	5179985	100,17	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N17	0	100,45	216765	5179876	100,45	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N18	0	102,05	217400	5180253	102,05	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N18	0	103,75	218093	5180237	103,75	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N19	0	105,21	218479	5180740	105,21	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N20	0	109,77	218782	5181562	109,77	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N22	0	112,75	219548	5182366	112,75	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N23	0	115,84	219773	5182989	115,84	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N24	0	139,5	219286	5184129	139,50	Interpolation (ruis. Des Soeurs)
	ruisseau	N25	0	129,5	219504	5183870	129,50	Interpolation (ruis. Des Soeurs)
	ruisseau	N27	0	129,5	216488	5184542	129,50	Carte topographique (cours d'eau Faucher)
	ruisseau	N28	0	114,25	214436	5181905	114,25	Carte topographique (cours d'eau Dansereau)
	lac	N29	0	140	218392	5183351	140,00	Carte topographique
	ruisseau	N30	0	93,56	214756	5179768	93,56	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N31	0	108,73	218817	5181095	108,73	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N34	0	110,53	218973	5181897	110,53	Interpolation (rivière aux Pommes)
	ruisseau	N37	0	118,64	215149	5184265	118,64	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	ruisseau	N38	0	119,5	215326	5184052	119,50	Carte topographique (cours d'eau Faucher)
	ruisseau	N39	0	99,5	213368	5181833	99,50	Carte topographique
	ruisseau	N40	0	106,24	213930	5182146	106,24	Carte topographique
	ruisseau	N41	0	126,17	215549	5183474	126,17	Interpolation (cours d'eau Pageau)
	ruisseau	N42	0	124,1	215809	5184219	124,10	Carte topographique (cours d'eau Faucher)
	ruisseau	N43	0	114,93	215013	5183671	114,93	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	ruisseau	N44	0	111,42	213955	5181742	111,42	Carte topographique (cours d'eau Dansereau)
	lac	N45	0	100,2	215812	5180324	100,20	Altitude même que N97 (prise Paquet)

Date	Type de mesure	Numero	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
	lac	N46	0	100,2	215797	5180289	100,20	Altitude même que N97 (prise Paquet)
	lac	N48	0	109	217118	5180332	109,00	Carte topographique
	rivière	N50	0	111,99	214789	5183244	111,99	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N51	0	95,26	213109	5181449	95,26	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N52	0	108,7	214479	5182906	108,70	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N53	0	106,2	214366	5182567	106,20	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	ruisseau	N98	0	139,75	217819	5184947	139,75	Carte topographique (cours d'eau Faucher)
	lac	N100	0	108,72	218624	5180981	108,72	Interpolation (rivière aux Pommes)
	lac	N101	0	108,72	218882	5180899	108,72	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N102	0	102,71	217701	5180331	102,71	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N103	0	100,27	216582	5179904	100,27	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N104	0	101,32	217184	5180080	101,32	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N105	0	119,12	215781	5185504	119,12	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N106	0	119,36	216458	5185926	119,36	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N107	0	119,53	216979	5185925	119,53	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N992	0	100,22	216607	5179943	100,22	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N994	0	89,5	215787	5178015	89,5	Carte topographique
	eau affleurante	N995	0	96,5	216173	5179078	96,5	Carte topographique
	eau affleurante	N996	0	99,5	217374	5179140	99,5	Carte topographique (cours d'eau Faucher)
	ruisseau	N998	0	89	213162	5179051	89	Interpolation (rivière aux Pommes)
	rivière	N999	0	92,46	214669	5179523	92,46	Interpolation (rivière aux Pommes)
	lac	N1000	0	107	216152	5180232	107	Carte topographique
	rivière	N1001	0	98,81	213417	5181982	98,81	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)
	rivière	N1002	0	102,82	213809	5182365	102,82	Interpolation (rivière Jacques-Cartier)

ANNEXE F

Base imperméable de l'aquifère : site des puits municipaux de Pont-Rouge

BASE IMPERMÉABLE

Puits municipaux
de Pont-Rouge

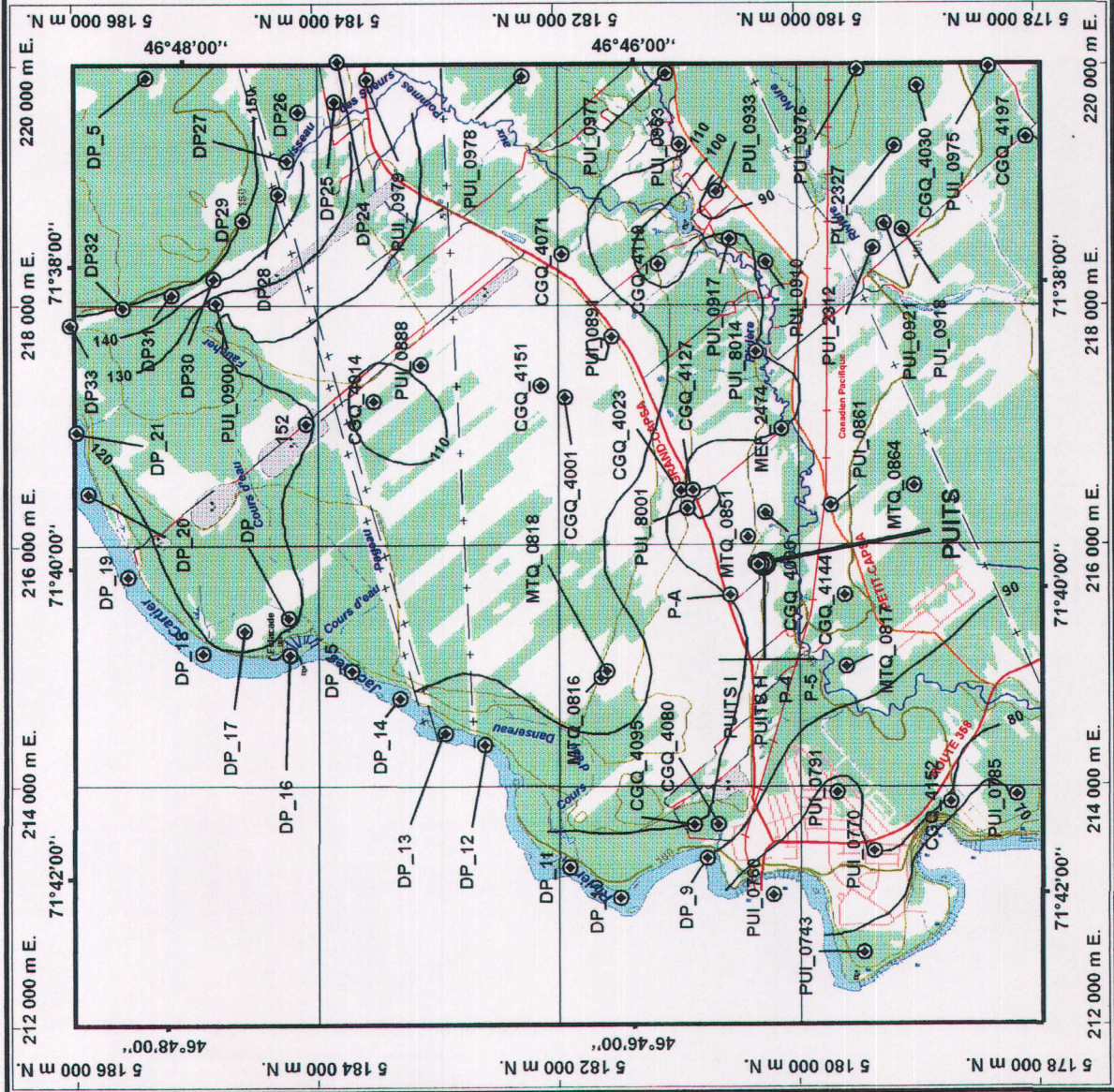
LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Rue
- Sentier
- Ligne électrique
- Chemin de fer
- Sablière
- Marécage
- Courbe de niveau
- Altitude de la base imperméable
- Numéro
- Point de mesure

Équidistance des courbes: 10 mètres



Projection: UTM NAD 83 - Zone 7



ANNEXE G

**Description des points de contrôle de la base
imperméable de l'aquifère : site des puits
municipaux de Pont-Rouge**

Points mesurés

Numéro	UTM X NAD 83 (m)	UTM X NAD 83 (m)	Altitude du contact (m)	Type de contact
CGQ_4001	217241	5181910	117	ROC
CGQ_4014	217210	5183510	103	ROC
CGQ_4023	216459	5180945	105	ROC
CGQ_4030	219847	5178960	98	ROC
CGQ_4071	218440	5181933	114	ROC
CGQ_4080	213665	5180642	97	ARGILE
CGQ_4090	216272	5180242	99	ROC
CGQ_4095	213661	5180842	100	ARGILE
CGQ_4119	218356	5181131	92	ROC
CGQ_4127	216461	5180845	85	ROC
CGQ_4144	215585	5179578	97	ARGILE
CGQ_4151	217337	5182112	115	ROC
CGQ_4152	213852	5178695	83	ROC
CGQ_4197	219414	5178051	83	ROC
MEF_2474	216974	5180105	99	ARGILE
MTQ_0816	214895	5181615	116	ROC
MTQ_0817	214985	5179566	94	ARGILE
MTQ_0818	214946	5181566	115	ROC
MTQ_0851	216069	5180387	102	ARGILE
MTQ_0864	216496	5178995	93	ARGILE
PUI_0743	212588	5179421	65	ROC
PUI_0760	213073	5180180	69	ROC
PUI_0770	213439	5179337	79	ROC
PUI_0785	213911	5178146	72	ROC
PUI_0791	213933	5179647	76,71	ROC
PUI_0861	216333	5179692	94	ROC
PUI_0888	217517	5183115	111	ROC
PUI_0891	217747	5181520	121	ARGILE
PUI_0900	218035	5184825	119	ROC
PUI_0910	218372	5180231	97	ROC
PUI_0917	218567	5180535	103	ARGILE
PUI_0918	218644	5179086	93	ROC
PUI_0921	218692	5179238	98	ARGILE
PUI_0933	218964	5180643	82	ROC
PUI_0953	219362	5180750	109	ARGILE
PUI_0975	220008	5178362	90	ROC
PUI_0976	219987	5179462	95	ROC
PUI_0977	219957	5181062	117	ARGILE
PUI_0978	219933	5182261	109	ARGILE
PUI_0979	219909	5183561	124	ARGILE
PUI_2312	218489	5179333	101	ROC
PUI_2327	219342	5179149	101	ROC
PUI_8001	216309	5180892	90	ROC
PUI_8014	217620	5180317	99	ROC

Points estimés

Numéro	UTM X NAD 83 (m)	UTM X NAD 83 (m)	Altitude du contact (m)	Type de contact
DP_5	219925	5185404	160,9	ROC
P-A	215585	5180537	100	ARGILE
152	217024	5184076	122	ROC
P-5	215818	5180289	96,48	SILT
P-4	215840	5180276	96,02	SILT
PUITS I	215851	5180326	95	SILT
PUITS H	215837	5180305	95,9	SILT
DP	215400	5184224	121	ROC
DP_9	213380	5180734	89	ROC
DP_10	213049	5181452	93	ROC
DP_11	213306	5181875	96	ROC
DP_12	214334	5182591	104	ROC
DP_13	214432	5182919	106,7	ROC
DP_14	214724	5183297	110	ROC
DP_15	214954	5183699	113	ROC
DP_16	215090	5184214	118	ROC
DP_17	215295	5184594	124	ROC
DP_18	215104	5184941	118,2	ROC
DP_19	215745	5185562	118,56	ROC
DP_20	216437	5185891	118,72	ROC
DP_21	216955	5185991	118,89	ROC
DP24	220058	5183810	130,88	TIII
DP25	219724	5183834	132,04	TIII
DP26	219639	5184137	0	TIII
DP27	219226	5184228	0	TIII
DP28	218947	5184301	0	TIII
DP29	218729	5184599	149,66	TIII
DP30	218237	5184841	147,68	TIII
DP31	218104	5185193	148,06	TIII
DP32	217994	5185600	148,93	TIII
DP33	217849	5186043	141,96	TIII

ANNEXE H

Essais de perméabilité *in situ* : site des puits municipaux de Pont-Rouge

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-A

Essai no.: 103

Date: 24-Aug-97

Unité crépinée: Silt ?

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 104.95

Rayon du forage (m): -

Longueur de la crépine (m): 1.23

Rayon du tubage (m): 0.01905

Lecture de la sonde avant l'essai:

pieds	metres
6.850	2.088

Pression en hauteur d'eau

Pression d'air avant l'essai:

kPa	metres
12.0	1.22

Pression en hauteur d'eau

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

Eau grise et dense dans le fond du piézomètre.

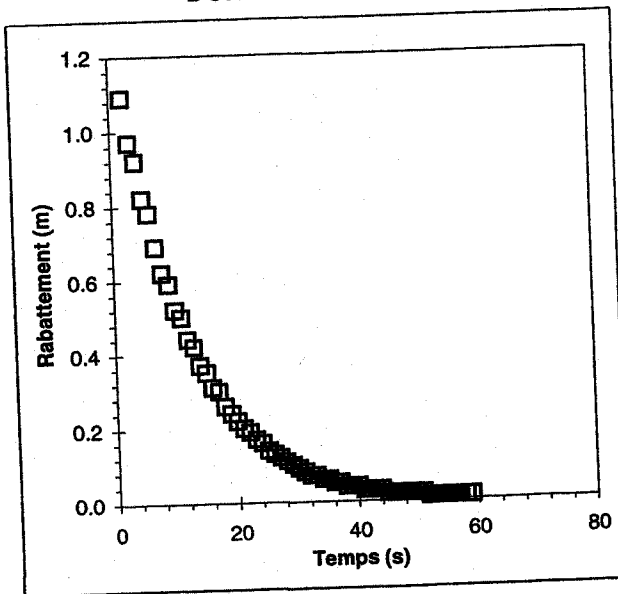
Épaisseur saturée (m): 13.81
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 91.14

Déplacement initial dans le puits (m): 1.22

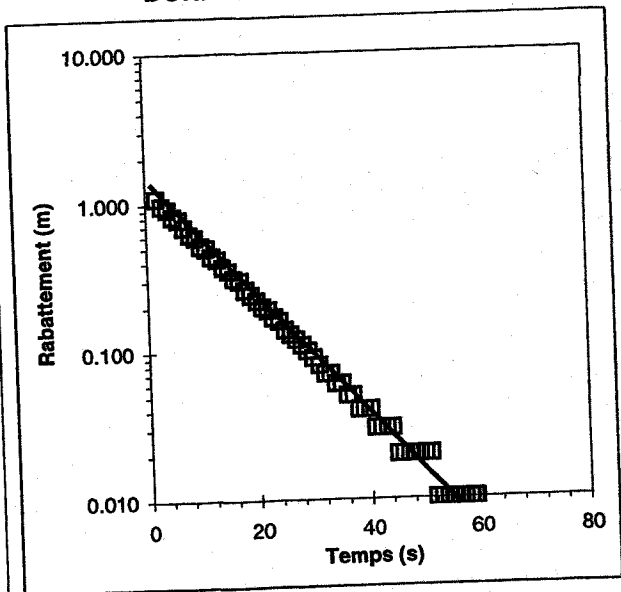
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 8.28
Élévation du fond du puits (m): 96.68

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $6.12E-05$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*
SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-A

Date: 24-Aug-97

Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)
2	1.09	22	0.19	42	0.03
3	0.97	23	0.17	43	0.03
4	0.92	24	0.16	44	0.03
5	0.82	25	0.14	45	0.02
6	0.78	26	0.13	46	0.02
7	0.69	27	0.12	47	0.02
8	0.62	28	0.11	48	0.02
9	0.59	29	0.1	49	0.02
10	0.52	30	0.09	50	0.02
11	0.5	31	0.08	51	0.02
12	0.44	32	0.07	52	0.01
13	0.42	33	0.07	53	0.01
14	0.37	34	0.06	54	0.01
15	0.35	35	0.06	55	0.01
16	0.31	36	0.05	56	0.01
17	0.3	37	0.05	57	0.01
18	0.26	38	0.04	58	0.01
19	0.24	39	0.04	59	0.01
20	0.22	40	0.04		
21	0.2	41	0.03		

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-B

Essai no.: 107

Date: 24-Aout-97

Unité crépinée: Gravier ?

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 105.08
Rayon du forage (m): -

Longueur de la crépine (m): 1.23
Rayon du tubage (m): 0.01905

	pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	6.768	2.063	

	KPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	20.0	2.04	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

Fuite d'air à travers le piézomètre. Niveau d'eau presque stable.

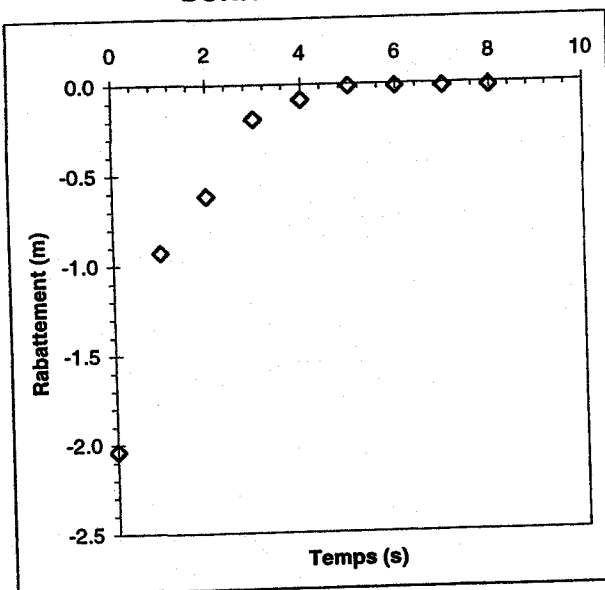
Épaisseur saturée (m): 10.68
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 94.4

Déplacement initial dans le puits (m): 2.04

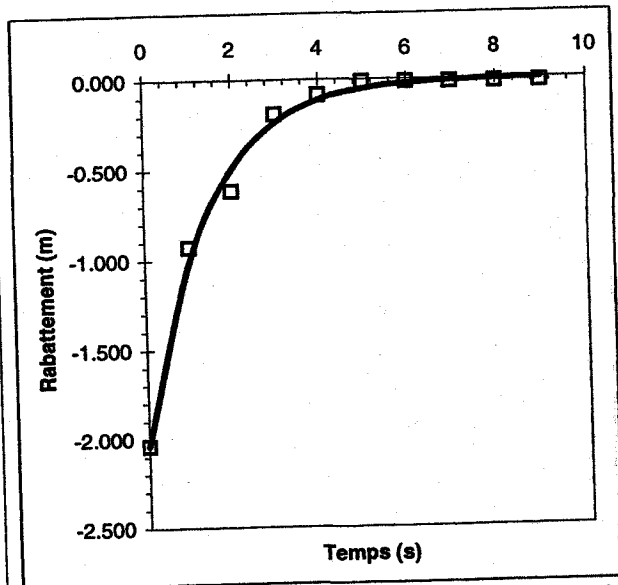
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 5.29
Élévation du fond du puits (m): 99.79

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: N.D.

Méthode: Ufink

Essai de perméabilité *in situ*
SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-B

Date: 24-Aout-97

Temps (sec)	Rabatement observé (m)	Rabatement calculé (m)
0	-2.04	-2.04
1	-0.92964	-1.007973069
2	-0.61722	-0.493030143
3	-0.1923288	-0.238653672
4	-0.0874776	-0.114259945
5	-0.0134112	-0.054061422
6	-0.01524	-0.025247823
7	-0.0188976	-0.01161874
8	-0.0188976	-0.005255706
9	-0.0188976	-0.002328589

Équation: $h = h_0 * \exp(-\gamma * (t+dt)) * \cos(w * (t+dt))$

h_0	-2.04	dt	0.1
γ	0.7	w	0

Paramètres formation		Paramètres calculés	
α	0.25	β	0.989949494
β	0.019	γ	0.707106781
γ	0.019	ω	0.25
ω	0	δ	0.141897055
δ	1.23	ϵ	-21.211051

Calcul de la solution de Uffink par la méthode de Newton-Raphson

Équation: $f(x) = ca \ln(cb*x) - x + cc = 0$

Dérivée $df/dx = f'(x) = ca/x - 1$

Méthode: $f(p+1) = f(p) + f'(p) * (x(p+1) - x(p)) = 0$ où p est le no. d'itération

Nouveau x: $x(p+1) = x(p) - f(p) / f'(p)$

x(p)	f(p)	f'(p)	x(p+1)	f(p+1)
0	-47.42732124	-0.82088627	-52.17848232	-0.001343404

Résultat: $K (m/s) = -0.001343404$

$ca = 1/B$

$cb = 1.26/(8 \text{ Alpha})$

$cc = (\text{teta} - \pi) / \text{racine}(1-B^2)$

$x = 8 KD / (rc^2 \text{ Oméga})$

$T' = 4KD / (rc^2 \text{ Oméga})$

$K = (x rc^2 \text{ Oméga}) / (8 D)$

$\text{teta} = \text{atan}(\text{racine}(1-B^2)/B)$

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-93-3

Essai no.: 108

Date: 24-Aug-97

Unité crépinée: Sable moyen

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 105.14
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.3
Rayon du tubage (m): 0.01905

	piézo	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	2.750	0.838	

	kPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	7.0	0.71	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

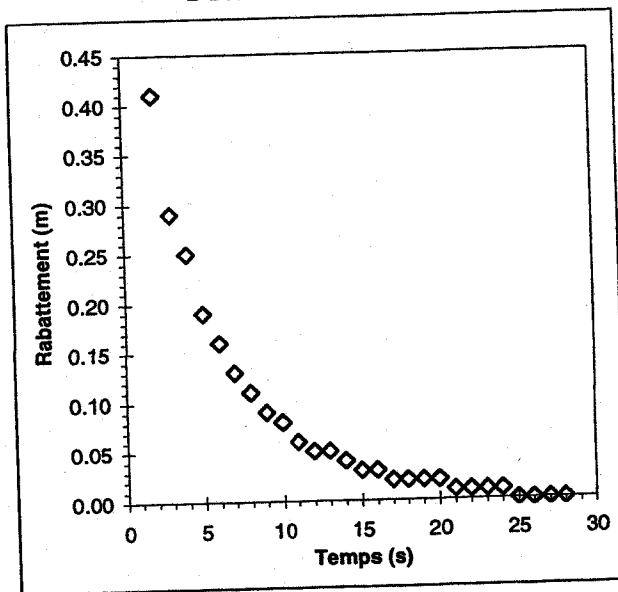
Épaisseur saturée (m): 12.55
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 92.585

Déplacement initial dans le puits (m): 0.71

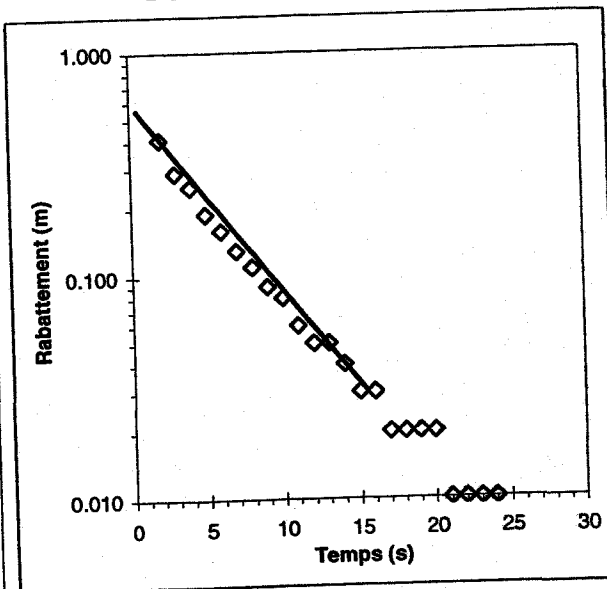
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 0.88
Élévation du fond du puits (m): 104.26

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $3.18E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-93-3

Date: 24-Aug-97

Temps (sec)	Tabattement (m)
2	0.41
3	0.29
4	0.25
5	0.19
6	0.16
7	0.13
8	0.11
9	0.09
10	0.08
11	0.06
12	0.05
13	0.05
14	0.04
15	0.03
16	0.03
17	0.02
18	0.02
19	0.02
20	0.02
21	0.01
22	0.01
23	0.01
24	0.01
25	0
26	0
27	0
28	0

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-93-2

Essai no.: 124

Date: 24-Aug-97

Unité crépinée: Sable moyen

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 108.56
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.3
Rayon du tubage (m): 0.01905

	piédes	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	2.750	0.838	

	psi	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	15.0	1.53	

PARAMÈTRES D'INTERPRÉTATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

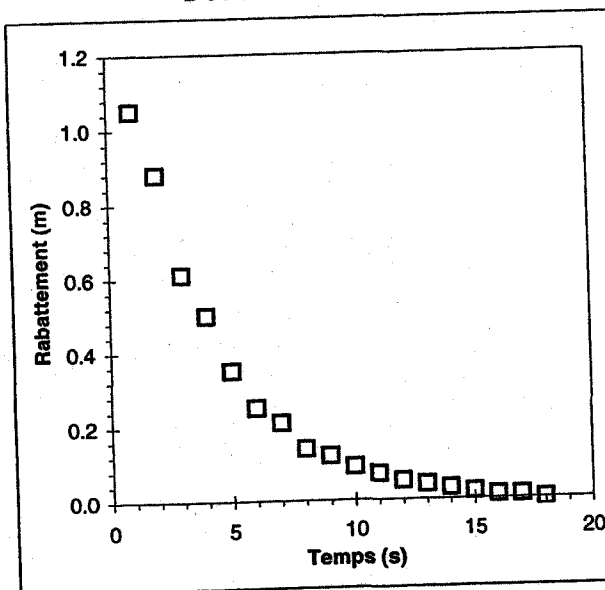
Épaisseur saturée (m): 8.37
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 100.19

Déplacement initial dans le puits (m): 1.53

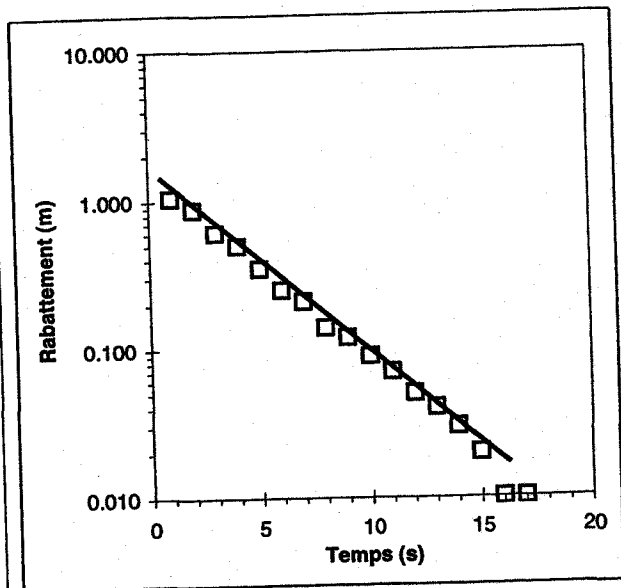
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.89
Élévation du fond du puits (m): 106.67

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $3.48E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-93-2

Date: 24-Aug-97

Temps (sec)	Rabatement (m)
1	1.05
2	0.88
3	0.61
4	0.5
5	0.35
6	0.25
7	0.21
8	0.14
9	0.12
10	0.09
11	0.07
12	0.05
13	0.04
14	0.03
15	0.02
16	0.01
17	0.01
18	0

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-93-1

Essai no.: 115

Date: 24-Aug-97

Unité crépinée: Gravier très fin

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 102.94
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.3
Rayon du tubage (m): 0.01905

	pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	6.793	2.071	

	piés	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	12.5	1.27	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

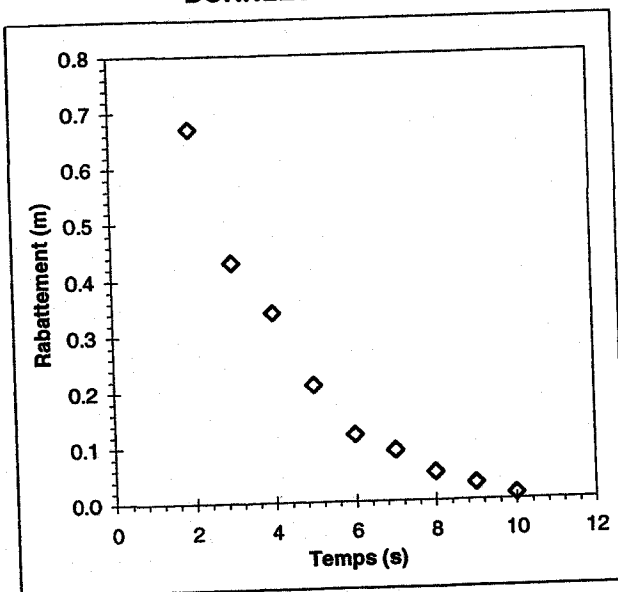
Épaisseur saturée (m): 10.69
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 92.25

Déplacement initial dans le puits (m): 1.27

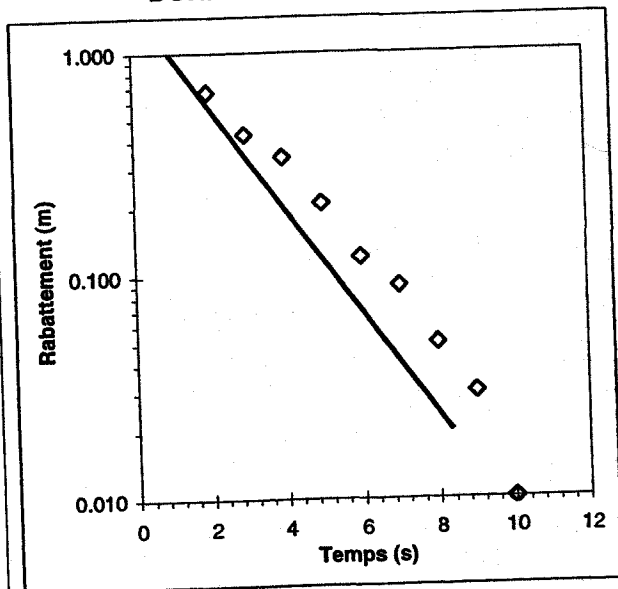
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.96
Élévation du fond du puits (m): 100.98

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $7.17E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-93-1

Date: 24-Aug-97

Temps (sec)	Abattement (m)
2	0.67
3	0.43
4	0.34
5	0.21
6	0.12
7	0.09
8	0.05
9	0.03
10	0.01

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-90-44 Essai no.: 120

Date: 24-Aug-97

Unité crépînée: Sable moyen à grossier

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 130.27
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.61
Rayon du tubage (m): 0.01905

	piés	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	3.443	1.049	

	KPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	5.5	0.56	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Épaisseur saturée (m): 15.03
Élévation de la base de l'unité crépînée (m): 115.24

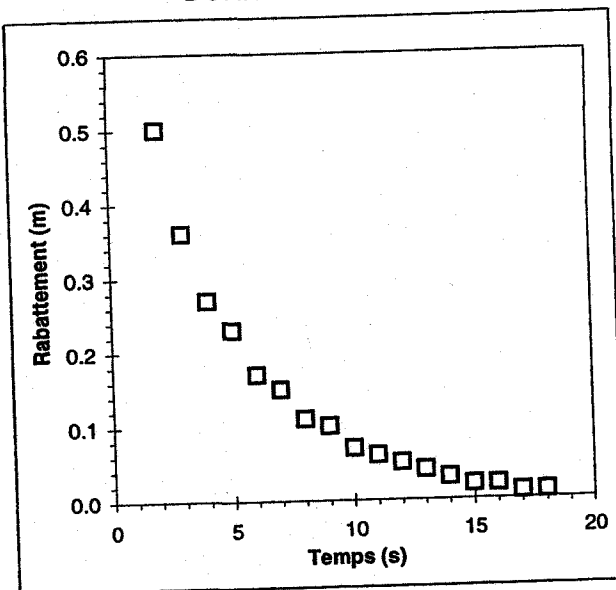
Note:

Déplacement initial dans le puits (m): 0.56

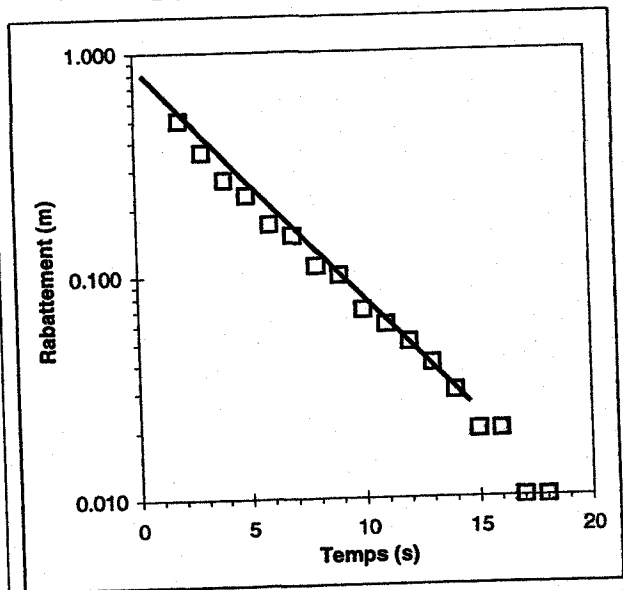
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.06
Élévation du fond du puits (m): 129.21

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $2.32E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-90-44

Date: 24-Aug-97

Temps (s)	Rabatement (m)
2	0.5
3	0.36
4	0.27
5	0.23
6	0.17
7	0.15
8	0.11
9	0.1
10	0.07
11	0.06
12	0.05
13	0.04
14	0.03
15	0.02
16	0.02
17	0.01
18	0.01

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-90-43 Essai no.: 42

Date: 21-Aug-97

Unité crépinée: Sable moyen à grossier

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 126.79
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.61
Rayon du tubage (m): 0.01905

Lecture de la sonde avant l'essai:

pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
5.950	1.814	

Pression d'air avant l'essai:

kPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
14.5	1.48	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Épaisseur saturée (m): 11.79

Note:

Niveau d'eau non stabilisé.

Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 115

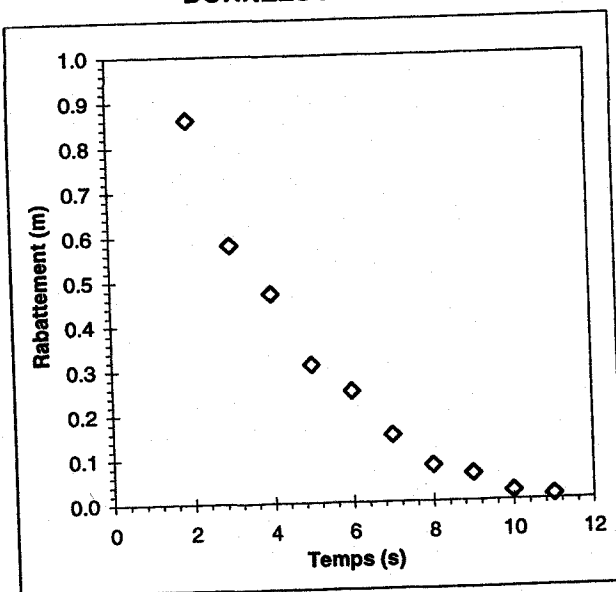
Déplacement initial dans le puits (m): 1.48

Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 2.86

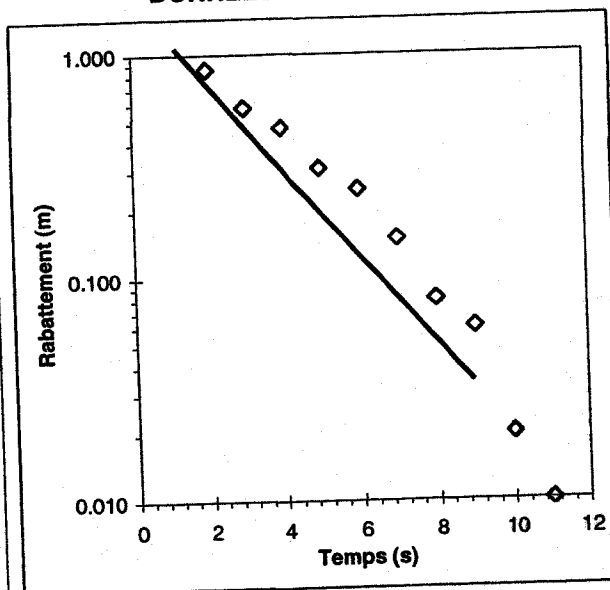
Élévation du fond du puits (m): 123.93

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $3.52E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*
SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-90-43

Date: 24-Aug-97

Temps (sec)	Abaissement (m)
2	0.86
3	0.58
4	0.47
5	0.31
6	0.25
7	0.15
8	0.08
9	0.06
10	0.02
11	0.01

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: PZ1

Essai no.: 888101

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Gravier très fin

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 104.72
Rayon du forage (m): 0.1015

Longueur de la crépine (m): 1.23
Rayon du tubage (m): 0.0508

Lecture de la sonde avant l'essai:

pieds	mètres
3.963	1.208

Pression en hauteur d'eau

Pression d'air avant l'essai:

kPa	mètres
9.5	0.97

Pression en hauteur d'eau

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

Récupération très rapide.

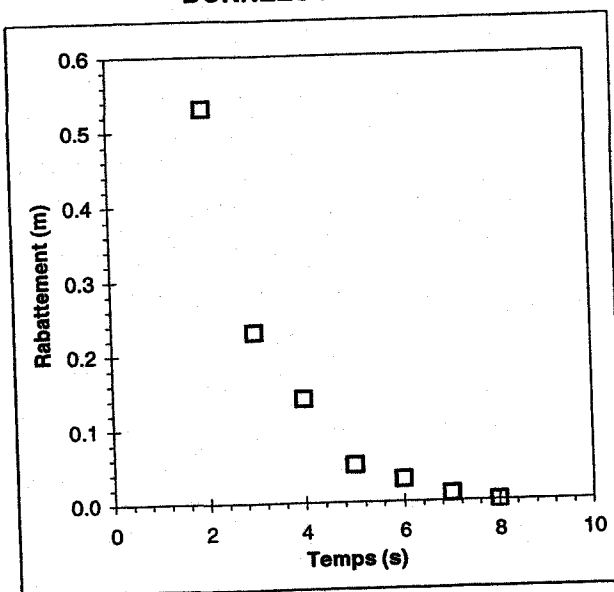
Épaisseur saturée (m): 13.86
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 90.86

Déplacement initial dans le puits (m): 1.208

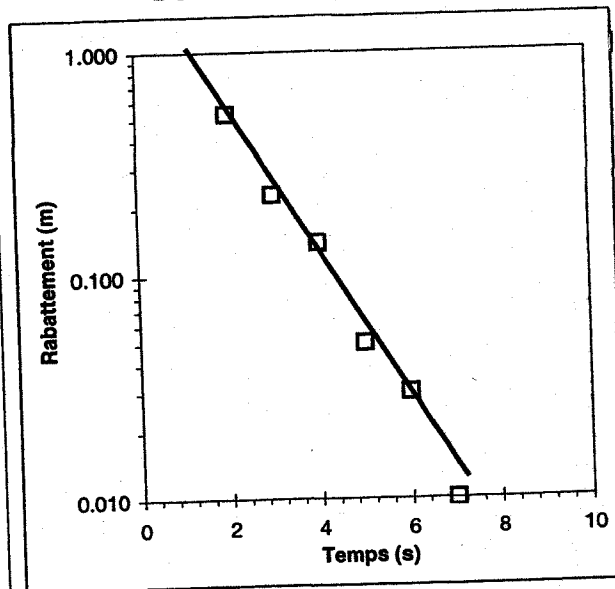
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 7.72
Élévation du fond du puits (m): 97.00

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $6.60E-04$ m/s

Méthode: Boulwar & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: PZ1

Date: 30-Sep-98

Temps (s)	Rabattement (m)
2	0.53
3	0.23
4	0.14
5	0.05
6	0.03
7	0.01
8	0

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION

Piézomètre: PZ2

Essai no.: 888201

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Gravier très fin

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 104.51
Rayon du forage (m): 0.1015

Longueur de la crépine (m): 1.23
Rayon du tubage (m): 0.0508

	pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	4.542	1.384	

	KPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	6.25	0.64	

PARAMÈTRES D'INTERPRÉTATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

Fuite d'air à travers le piézomètre. Niveau d'eau stable.

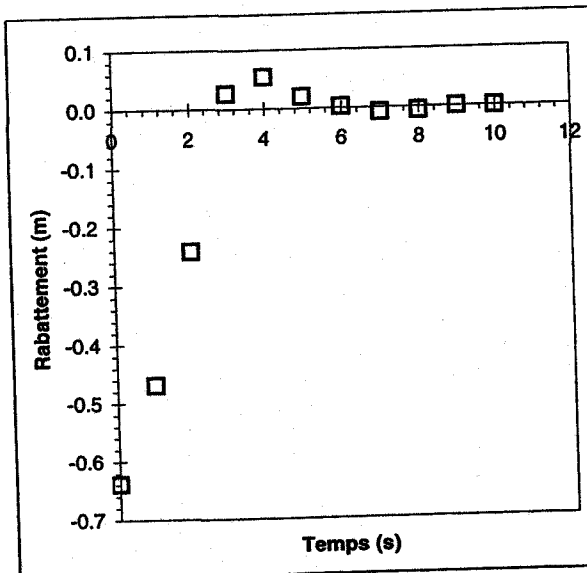
Épaisseur saturée (m): 12.30
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 92.21

Déplacement initial dans le puits (m): 0.64

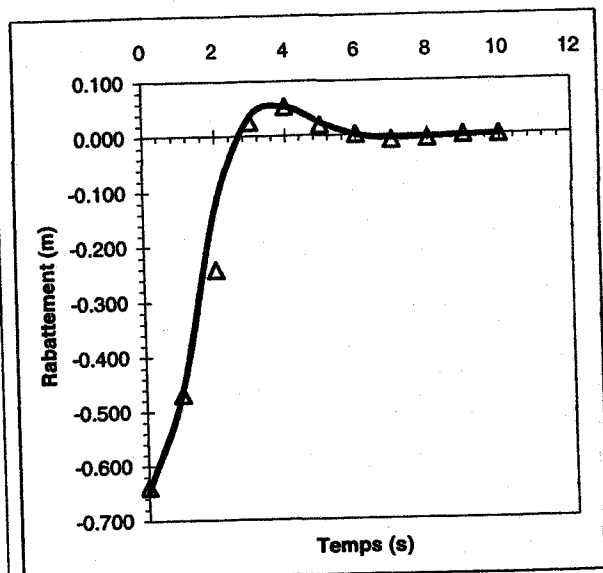
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 7.51
Élévation du fond du puits (m): 97.00

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $4.10E-04$

Méthode: Uffink

Essai de perméabilité *in situ*
SITE DE PONT-ROUGE

Piézomètre: PZ2

Date: 30-Sep-98

Temps (sec)	Rabattement observé (m)	Rabattement calculé (m)
0	-0.6388288	-0.647304776
1	-0.4696968	-0.464310087
2	-0.2420112	-0.127025288
3	0.025908	0.036076523
4	0.0536448	0.053596424
5	0.019812	0.024192182
6	0.0021336	0.001718685
7	-0.0079248	-0.004904663
8	-0.0057912	-0.003451789
9	0	-0.000921538
10	0	0.000282276

Équation: $h = h_0 * \exp(-\gamma * (t+dt)) * \cos(w * (t+dt))$

h_0	-2.04		0.1
γ	0.7		0

Paramètres formation		Paramètres calculés	
β	0.25	β	0.989949494
γ	0.019	ω	0.707106781
α	0.019	α	0.25
δ	0	δ	0.141897055
D	1.23		62.83185307
			43.98229715
			1.010152545
			0.63
			-21.211051

Calcul de la solution de Uffink par la méthode de Newton-Raphson

Équation: $f(x) = ca \ln(cb*x) - x + cc = 0$

Dérivée: $df/dx = f'(x) = ca/x - 1$

Méthode: $f(p+1) = f(p) + f'(p) (x(p+1) - x(p)) = 0$ où p est le no. d'itération

Nouveau x: $x(p+1) = x(p) - f(p) / f'(p)$

0	-47.42732124	-0.82088627	-52.17848232	-0.001343404
---	--------------	-------------	--------------	--------------

Résultat: $K (m/s) = -0.001343404$

$ca = 1/B$

$cb = 1.26/(8 \text{ Alpha})$

$cc = (\text{teta} - \pi) / \text{racine}(1-B^2)$

$x = 8 KD / (rc^2 \text{ Oméga})$

$T' = 4KD / (rc^2 \text{ Oméga})$

$K = (x rc^2 \text{ Oméga}) / (8 D)$

$\text{teta} = \text{atan}(\text{racine}(1-B^2)/B)$

ANNEXE I

Schémas d'aménagements des puits de l'essai de pompage de Pont-Rouge (Automne 1997)

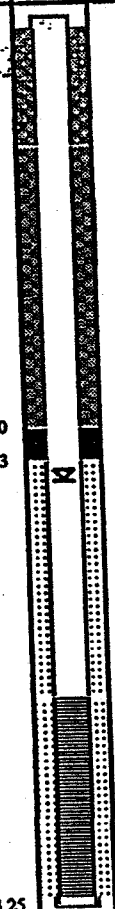
No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PU1 (FR97-003)

Projet : Essai de pompage Pont-Rouge

Coordonnées (NAD 83/Zone 7) : 215 604 m E., 5 180 510 m N.

Localisation : Prise d'eau municipale Pont-Rouge, Qc.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PUITS				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	111.63							
1		Sable Moyen				Ciment	1.83		6.96	<p>FORAGE Type foreuse: Casera CT 150 Type forage: Tarière creuse Diamètre: 24.1 cm Longueur: 15.24 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soudure 40 Diamètre interne: 10.16 cm Longueur totale: 13.79 m Margelle: ??? m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soudure 40 Diamètre interne: 10.16 cm Profondeur: 10.24 m Longueur: 2.79 m Ouverture: 0.51 mm (no. 20)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: ??? m</p>
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10			102.63			Sable en Place	10.24			
11		Gravier Très fin					13.25			
12										
13										
14										
15			96.39	MNB97-216						
16		Fin du Forage								



Date : 9 octobre 1997

Supervisé par : Édith Bourque et Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZI (FR97-001)

Projet : Essai de pompage Pont-Rouge

Coordonnées (NAD 83/Zone 7) : 215 596 m E., 5 180 521 m N.

Localisation : Prise d'eau municipale Pont-Rouge, Qc.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PUITS D'OBSERVATION				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	111.63							
0.61		Sable Moyen	102.63	MNB97-200		Ciment	0.61		6.91	<p>FORAGE Type foreuse: Cariera CT 150 Type forage: Tarière creuse Diamètre: 20.3 cm Longueur: 15.24 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 5.08 cm Longueur totale: 16.44 m Margelle: 777 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 5.08 cm Profondeur: 12.99 m Longueur: 1.20 m Ouverture: 0.51 mm (no. 20)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Tube interne: 7.70 m</p>
1				MNB97-201						
2				MNB97-202						
3				MNB97-203						
4				MNB97-204						
5				MNB97-205						
6				MNB97-206						
7		MNB97-207								
9.14		Gravier Très fin	96.39	208@210		Bentonite Granulaire	9.14	10.36	13.24	
10.36				MNB97-211			Gravier Filtre (90 µ)	10.36	13.24	
13.24				MNB97-212			Sable en Place	13.24	14.47	
14.47		Fin du Forage		213@214			14.47			

Date : 8 octobre 1997

Supervisé par : Édith Bourque et Daniel Paradis

Feuille : 1

CGQ Centre géotechnique de Québec

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ2 (FR97-002)

Projet : Essai de pompage Pont-Rouge

Coordonnées (NAD 83/Zone 7) : 215 617 m E., 5 180 490 m N.

Localisation : Prise d'eau municipale Pont-Rouge, Qc.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PUITS D'OBSERVATION				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	111.63			Ciment	0.61			<p>FORAGE Type foreuse: Carter CT 150 Type forage: Tarière creuse Diamètre: 20.3 cm Longueur: 15.24 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 5.08 cm Longueur totale: 15.81 m Margelle: ??? m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 5.08 cm Profondeur: 12.99 m Longueur: 1.20 m Ouverture: 0.51 mm (no. 20)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Tube interne: 7.57 m</p>
1		Sable Moyen				Coulis de Bentonite		N	7.12	
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9			102.63			Bentonite Granulaire	9.14			
10		Gravier Très fin				Gravier Filtre (90 µ)	10.36		13.24	
11										
12										
13										
14										
14				MNB97-215		Sable en Place	13.72			
15			96.39				14.63		14.47	
16		Fin du Forage								

Date : 9 octobre 1997

Supervisé par : Édith Bourque et Daniel Paradis

Feuille : 1



LÉGENDE

Lithologie



Gravier



Sable

Composantes des puits



Tubulure et ciment



Tubulure et coulis de bentonite



Tubulure et bentonite



Tubulure et sable filtrant



Crépine et sable filtrant

Types d'échantillonnage



Tarière



Cuillère fendue

ANNEXE J

**Données de l'essai de pompage et de l'essai
de récupération de Pont-Rouge (Automne
1997)**

Essai de pompage

SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION ET CONDITIONS DE L'ESSAI

Piézomètre: Pz2 Essai no.: B Date: 5-Oct-97
Coordonnées NAD 83/Zone 7: 215 617 m E, 5 180 490 m N Rayon: 2.54 cm
Type d'essai: Pompage Puits de pompage: Pu1
Durée de l'essai: 52 heures Distance du puits de pompage: 24.94 m

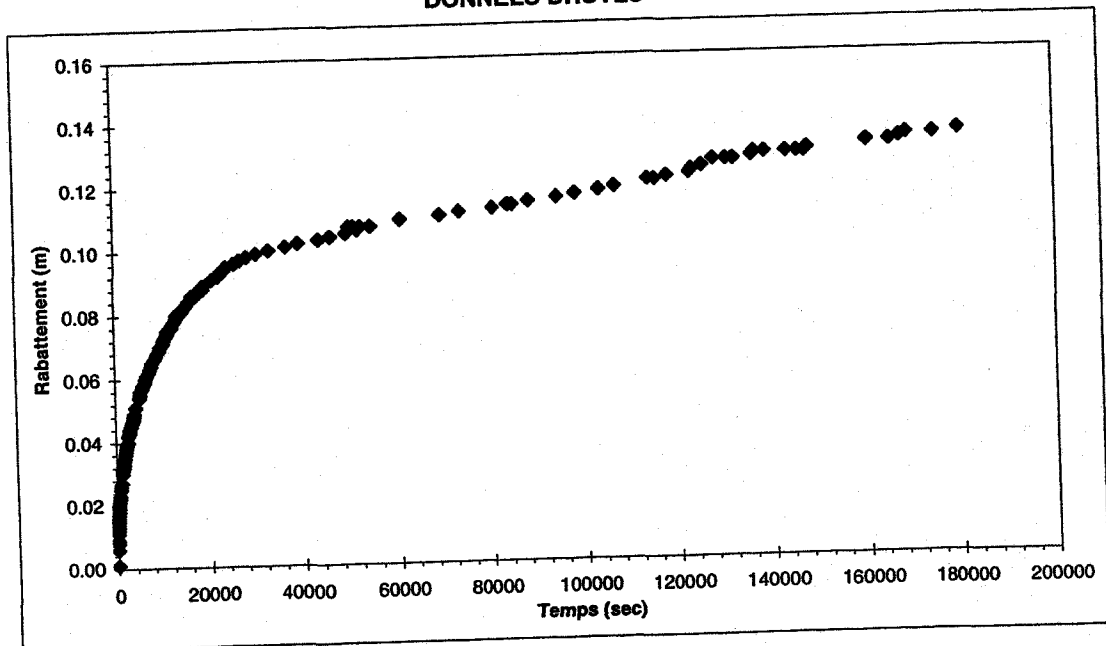
GÉOMETRIE DE L'AQUIFÈRE

Élévation du sol : 111.70 m
Profondeur de la nappe par rapport au sol : 7.12 m
Profondeur du sommet de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 6.12 m
Profondeur de la base de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 7.35 m
Profondeur de la base de l'aquifère par rapport au sol : 12.3 m

Unité crépinée: Gravier très fin

GRAPHIQUE

DONNÉES BRUTES



Essai de pompage
SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

Piézomètre: Pz2

Date: 5-Oct-97

Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)
3	0.001	0.001	6338	0.059	0.059	50033	0.107	0.106
6	0.006	0.006	6518	0.060	0.060	50933	0.107	0.106
9	0.008	0.008	6758	0.061	0.061	51833	0.106	0.105
12	0.009	0.009	7238	0.062	0.062	52433	0.107	0.106
15	0.011	0.011	7478	0.063	0.063	54533	0.107	0.106
36	0.012	0.012	7778	0.064	0.064	60833	0.109	0.108
54	0.013	0.013	7898	0.065	0.065	69233	0.110	0.109
75	0.014	0.014	8378	0.066	0.066	73433	0.111	0.110
117	0.015	0.015	8798	0.067	0.067	80633	0.112	0.111
147	0.016	0.016	9098	0.068	0.068	83933	0.113	0.112
189	0.017	0.017	9578	0.069	0.069	84833	0.113	0.112
252	0.018	0.018	9698	0.070	0.070	88433	0.114	0.113
324	0.019	0.019	10298	0.071	0.071	94433	0.115	0.114
348	0.020	0.020	10478	0.072	0.071	98333	0.116	0.115
486	0.021	0.021	10838	0.073	0.072	103433	0.117	0.116
534	0.022	0.022	11258	0.074	0.073	106733	0.118	0.117
636	0.023	0.023	11378	0.075	0.074	113933	0.120	0.119
726	0.025	0.025	12218	0.076	0.075	115433	0.120	0.119
792	0.025	0.025	12398	0.077	0.076	118133	0.121	0.120
816	0.026	0.026	12938	0.078	0.077	122933	0.122	0.121
1011	0.027	0.027	13238	0.079	0.078	123533	0.123	0.122
1212	0.030	0.030	13358	0.080	0.079	125633	0.124	0.123
1275	0.031	0.031	14498	0.081	0.080	128033	0.126	0.124
1287	0.032	0.032	14738	0.082	0.081	130733	0.126	0.124
1478	0.032	0.032	15578	0.083	0.082	132233	0.126	0.124
1538	0.033	0.033	15938	0.084	0.083	136133	0.127	0.125
1658	0.034	0.034	16598	0.085	0.084	136733	0.128	0.126
1778	0.035	0.035	16778	0.086	0.085	138833	0.128	0.126
1898	0.036	0.036	17498	0.086	0.085	143333	0.128	0.126
2078	0.037	0.037	17858	0.087	0.086	145733	0.128	0.126
2198	0.038	0.038	18998	0.088	0.087	147233	0.128	0.126
2258	0.039	0.039	19178	0.089	0.088	147833	0.129	0.127
2498	0.040	0.040	20978	0.091	0.090	160433	0.131	0.129
2618	0.042	0.042	22358	0.092	0.091	165233	0.131	0.129
2858	0.043	0.043	22598	0.093	0.092	167333	0.132	0.130
2918	0.044	0.044	23558	0.094	0.093	168833	0.133	0.131
3218	0.045	0.045	23978	0.095	0.094	174533	0.133	0.131
3518	0.046	0.046	25733	0.096	0.095	179933	0.134	0.132
3758	0.047	0.047	26933	0.097	0.096			
3878	0.048	0.048	28433	0.098	0.097			
3998	0.049	0.049	30533	0.099	0.098			
4298	0.051	0.051	33233	0.100	0.099			
5138	0.054	0.054	36833	0.101	0.100			
5258	0.055	0.055	39533	0.102	0.101			
5318	0.056	0.056	43733	0.103	0.102			
5738	0.057	0.057	46133	0.104	0.103			
5918	0.058	0.058	49433	0.105	0.104			

Essai de pompage

SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION ET CONDITIONS DE L'ESSAI

Piézomètre: P-A Essai no.: B Date: 5-Oct-97
Coordonnées NAD 83/Zone 7: 215 584 m E, 5 180 537 m N Rayon: 2.54 cm
Type d'essai: Pompage Puits de pompage: Pu1
Durée de l'essai: 52 heures Distance du puits de pompage: 33.24 m

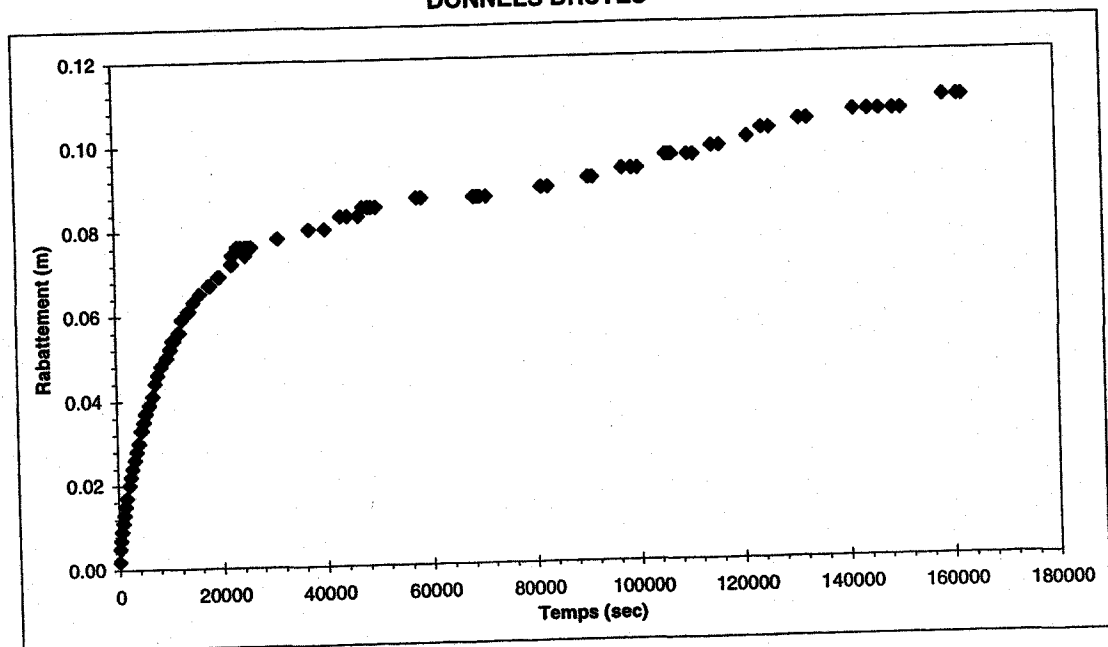
GÉOMETRIE DE L'AQUIFÈRE

Élévation du sol : 111.70 m
Profondeur de la nappe par rapport au sol : 6.60 m
Profondeur du sommet de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 8.52 m
Profondeur de la base de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 9.75 m
Profondeur de la base de l'aquifère par rapport au sol : 14.02 m

Unité crépinée: Gravier très fin

GRAPHIQUE

DONNÉES BRUTES



Essai de pompage
SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

Piézomètre: P-A

Date: 5-Oct-97

Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Rabatement corrigé (m)
12	0.002	0.002	1271	0.015	0.015	24960	0.076	0.076
14	0.002	0.002	1283	0.015	0.015	25620	0.076	0.076
16	0.002	0.002	1290	0.015	0.015	26100	0.076	0.076
94	0.005	0.005	1322	0.015	0.015	31320	0.078	0.078
99	0.005	0.005	1328	0.015	0.015	37320	0.080	0.080
111	0.005	0.005	1332	0.015	0.015	40320	0.080	0.080
119	0.005	0.005	1336	0.015	0.015	43320	0.083	0.083
130	0.005	0.005	1338	0.015	0.015	44520	0.083	0.083
277	0.007	0.007	1345	0.015	0.015	46620	0.083	0.083
282	0.007	0.007	1380	0.015	0.015	47520	0.085	0.085
286	0.007	0.007	1620	0.017	0.017	48420	0.085	0.085
290	0.007	0.007	2160	0.020	0.020	49020	0.085	0.085
292	0.007	0.007	2460	0.022	0.022	49920	0.085	0.085
314	0.007	0.007	2820	0.024	0.024	49920	0.087	0.087
319	0.007	0.007	3300	0.026	0.026	57720	0.087	0.087
489	0.009	0.009	3720	0.028	0.028	58620	0.087	0.087
491	0.009	0.009	4140	0.030	0.030	68520	0.087	0.087
493	0.009	0.009	4560	0.033	0.033	69120	0.087	0.087
497	0.009	0.009	4680	0.033	0.033	69720	0.087	0.087
502	0.009	0.009	5100	0.035	0.035	70920	0.087	0.087
505	0.009	0.009	5460	0.037	0.037	81720	0.089	0.089
507	0.009	0.009	6240	0.039	0.039	82920	0.089	0.089
509	0.009	0.009	6900	0.041	0.041	90720	0.091	0.091
512	0.009	0.009	7380	0.044	0.044	91620	0.091	0.091
519	0.009	0.009	7860	0.046	0.046	97320	0.093	0.093
521	0.009	0.009	8580	0.048	0.048	97320	0.093	0.093
570	0.009	0.009	9660	0.050	0.050	99120	0.093	0.093
573	0.009	0.009	10320	0.052	0.052	100320	0.093	0.093
577	0.009	0.009	10800	0.054	0.054	105720	0.096	0.096
786	0.011	0.011	11100	0.054	0.054	106320	0.096	0.096
810	0.011	0.011	12000	0.056	0.056	106920	0.096	0.096
821	0.011	0.011	12120	0.056	0.056	109920	0.096	0.096
824	0.011	0.011	12600	0.059	0.059	111120	0.096	0.096
828	0.011	0.011	13860	0.061	0.061	114720	0.098	0.098
830	0.011	0.011	14160	0.061	0.061	116220	0.098	0.098
836	0.011	0.011	14820	0.063	0.063	116220	0.098	0.098
838	0.011	0.011	16140	0.065	0.065	121620	0.100	0.100
842	0.011	0.011	17880	0.067	0.067	124320	0.102	0.102
846	0.011	0.011	18060	0.067	0.067	125820	0.102	0.102
1034	0.013	0.013	19680	0.069	0.069	131520	0.104	0.104
1051	0.013	0.013	19920	0.069	0.069	133020	0.104	0.104
1055	0.013	0.013	22200	0.072	0.072	141720	0.106	0.106
1060	0.013	0.013	22320	0.072	0.072	144420	0.106	0.106
1066	0.013	0.013	22380	0.074	0.074	146520	0.106	0.106
1071	0.013	0.013	23400	0.076	0.076	149220	0.106	0.106
1079	0.013	0.013	24120	0.076	0.076	150720	0.106	0.106
1269	0.015	0.015	24840	0.074	0.074	15720	0.106	0.106
						158820	0.109	0.109
						161520	0.109	0.109
						162420	0.109	0.109

Essai de récupération
SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

Piézomètre: Pz2

Date: 8-Oct-97

Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)
3	0.131	1077	0.103	8312	0.068	27572	0.043	72096	0.023
6	0.128	1086	0.103	8552	0.067	27752	0.042	74796	0.024
9	0.126	1092	0.103	8912	0.066	28712	0.041	75696	0.023
12	0.124	1245	0.102	9392	0.065	29072	0.041	77496	0.021
18	0.123	1314	0.101	9452	0.064	30152	0.041	81096	0.021
27	0.122	1320	0.101	9632	0.064	30392	0.04	83796	0.02
42	0.121	1332	0.101	10772	0.063	30512	0.04	90996	0.019
48	0.121	1341	0.101	11012	0.062	31232	0.04	93696	0.018
60	0.12	1365	0.101	11192	0.061	31532	0.04	96396	0.018
90	0.119	1371	0.101	12032	0.06	32612	0.039	104496	0.016
96	0.119	1470	0.1	12152	0.06	32852	0.039	107196	0.016
108	0.118	1482	0.1	12212	0.059	33632	0.038	110796	0.016
117	0.118	1539	0.099	12452	0.059	36572	0.037	112596	0.016
135	0.117	1551	0.099	12992	0.059	36812	0.037	120696	0.015
141	0.117	1605	0.099	13532	0.058	36992	0.036	123396	0.015
195	0.116	1623	0.098	14012	0.057	37352	0.036	126996	0.015
216	0.115	1623	0.098	14252	0.057	37532	0.036	128796	0.015
222	0.115	1629	0.098	14612	0.056	38792	0.036	129696	0.014
300	0.114	1772	0.097	14732	0.055	39332	0.035	134196	0.013
324	0.113	1892	0.096	15092	0.055	42572	0.034	138696	0.013
339	0.113	2012	0.095	15152	0.054	42812	0.034	140496	0.013
405	0.112	2132	0.094	15692	0.055	42992	0.034	141396	0.012
411	0.112	2312	0.093	15932	0.054	43232	0.034	144996	0.012
441	0.111	2372	0.092	16112	0.053	43352	0.034	150396	0.012
450	0.111	2612	0.091	16232	0.052	43712	0.034	153096	0.012
495	0.11	2732	0.091	16952	0.053	43832	0.034	155796	0.012
561	0.109	2792	0.09	17372	0.052	44072	0.033	157596	0.011
570	0.109	2912	0.089	17672	0.052	44252	0.033	159396	0.011
600	0.108	3032	0.088	18752	0.051	46532	0.033	162096	0.011
618	0.108	3212	0.087	19052	0.05	46832	0.033	173796	0.01
624	0.108	3512	0.086	19172	0.05	48032	0.032	175596	0.01
702	0.107	3812	0.085	19292	0.05	48452	0.032	177396	0.01
708	0.107	4112	0.084	20432	0.049	48632	0.032	180996	0.01
723	0.107	4172	0.083	21212	0.048	49532	0.032	183696	0.009
741	0.106	4232	0.075	21872	0.048	49832	0.031	185496	0.009
747	0.106	4352	0.08	21992	0.047	49952	0.032	190896	0.009
756	0.106	4592	0.079	23012	0.046	50132	0.032	192696	0.009
789	0.105	4712	0.078	23732	0.046	50252	0.031	197196	0.009
804	0.105	5432	0.077	23852	0.046	50672	0.031	207996	0.008
834	0.105	5492	0.076	23972	0.045	52296	0.029	210696	0.008
873	0.104	5912	0.075	24152	0.045	54096	0.028	212496	0.008
897	0.104	6152	0.074	24812	0.045	55896	0.027	217896	0.007
963	0.104	6332	0.073	25352	0.044	59496	0.026	222396	0.008
981	0.104	6932	0.072	25412	0.043	61296	0.025		
1044	0.103	7352	0.071	26012	0.044	67596	0.024		
1053	0.103	7712	0.07	26372	0.043	68496	0.023		
1065	0.103	7892	0.069	26852	0.042	70296	0.023		

Essai de récupération

SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION ET CONDITIONS DE L'ESSAI

Piézomètre: Pz2 Essai no.: B Date: 8-Oct-97
Coordonnées NAD 83/Zone 7: 215 617 m E, 5 180 490 m N Rayon: 2.54 cm
Type d'essai: Récupération Puits de pompage: Pu1
Durée de l'essai: 60 heures Distance du puits de pompage: 24.94 m

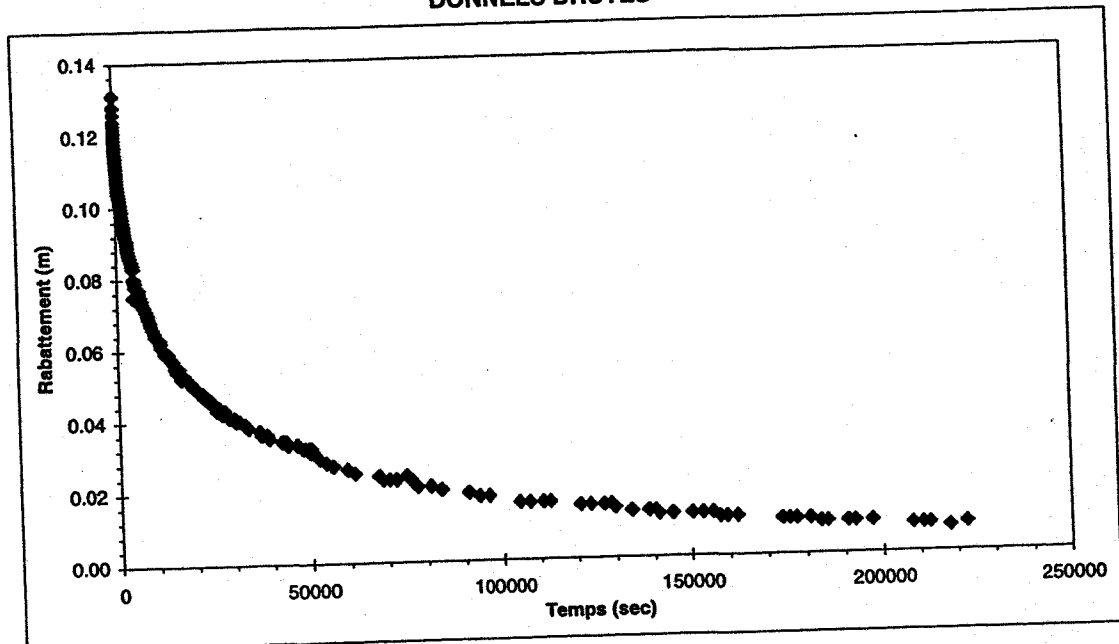
GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

Élévation du sol : 111.7 m
Profondeur de la nappe par rapport au sol : 7.12 m
Profondeur du sommet de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 6.12 m
Profondeur de la base de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 7.35 m
Profondeur de la base de l'aquifère par rapport au niveau initiale de la nappe : 12.30 m

Unité crépinée: Gravier très fin

GRAPHIQUE

DONNÉES BRUTES



Essai de récupération
SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

Piézomètre: Pz1

Date: 8-Oct-97

Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)
1	0.187	861	0.12	6231	0.078	65991	0.02
2	0.185	864	0.12	6831	0.076	67191	0.02
3	0.178	868	0.12	7611	0.074	69591	0.02
4	0.176	886	0.12	8151	0.072	71991	0.018
5	0.172	1000	0.117	8751	0.07	72591	0.018
6	0.17	1007	0.117	9351	0.068	75291	0.018
7	0.165	1014	0.117	10131	0.066	76191	0.018
8	0.163	1021	0.117	11151	0.063	79791	0.016
9	0.161	1025	0.117	12051	0.061	83091	0.016
10	0.159	1027	0.117	13491	0.059	83991	0.016
12	0.157	1172	0.115	14571	0.057	85491	0.016
14	0.154	1180	0.115	15111	0.055	87591	0.016
18	0.152	1182	0.115	15891	0.055	93591	0.014
20	0.152	1184	0.115	16131	0.053	97191	0.014
29	0.15	1190	0.115	16911	0.053	97791	0.014
44	0.148	1193	0.115	18291	0.05	98991	0.014
69	0.146	1198	0.115	18531	0.05	101391	0.014
98	0.144	1200	0.115	20511	0.048	105591	0.011
133	0.142	1352	0.113	21831	0.046	106791	0.011
180	0.139	1354	0.113	22191	0.046	108591	0.011
232	0.137	1358	0.113	23871	0.044	109191	0.011
234	0.137	1371	0.113	25371	0.042	110091	0.011
287	0.135	1497	0.111	26271	0.042	119391	0.009
289	0.135	1505	0.111	27951	0.039	119991	0.009
346	0.133	1509	0.111	28431	0.039	120891	0.009
350	0.133	1514	0.111	28611	0.039	123591	0.011
354	0.133	1639	0.109	30591	0.037	124491	0.009
357	0.133	1653	0.109	31371	0.037	126291	0.009
413	0.131	1658	0.109	31491	0.037	127191	0.009
417	0.131	1663	0.109	34311	0.035	128991	0.009
421	0.131	1667	0.109	34431	0.035	134691	0.007
492	0.128	1671	0.109	38871	0.033	136191	0.007
494	0.128	1911	0.107	41811	0.031	137091	0.007
498	0.128	2091	0.105	41991	0.031	138891	0.007
502	0.128	2331	0.103	42231	0.031	139791	0.007
573	0.126	2631	0.1	44871	0.029	141291	0.007
575	0.126	2871	0.098	44991	0.029	146991	0.005
578	0.126	3051	0.096	46131	0.029	148491	0.005
582	0.126	3471	0.094	46251	0.029	150891	0.005
668	0.124	3891	0.092	47031	0.029	155091	0.005
674	0.124	4191	0.087	50271	0.027	155991	0.005
678	0.124	4431	0.087	52491	0.024	156891	0.005
767	0.122	4731	0.085	53691	0.024	157491	0.005
769	0.122	5211	0.085	56091	0.022	158091	0.005
776	0.122	5331	0.083	57891	0.022	159291	0.005
778	0.122	5511	0.083	59091	0.022	174291	0.003
859	0.12	5751	0.081	65091	0.02	217791	0

Essai de récupération

SITE DES PUIITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

IDENTIFICATION ET CONDITIONS DE L'ESSAI

Piézomètre: Pz1 Essai no.: B Date: 8-Oct-97
Coordonnées NAD 83/Zone 7: 215 596 m E, 5 180 521 m N Rayon: 2.54 cm
Type d'essai: Récupération Puits de pompage: Pu1
Durée de l'essai: 60 heures Distance du puits de pompage: 11.34 m

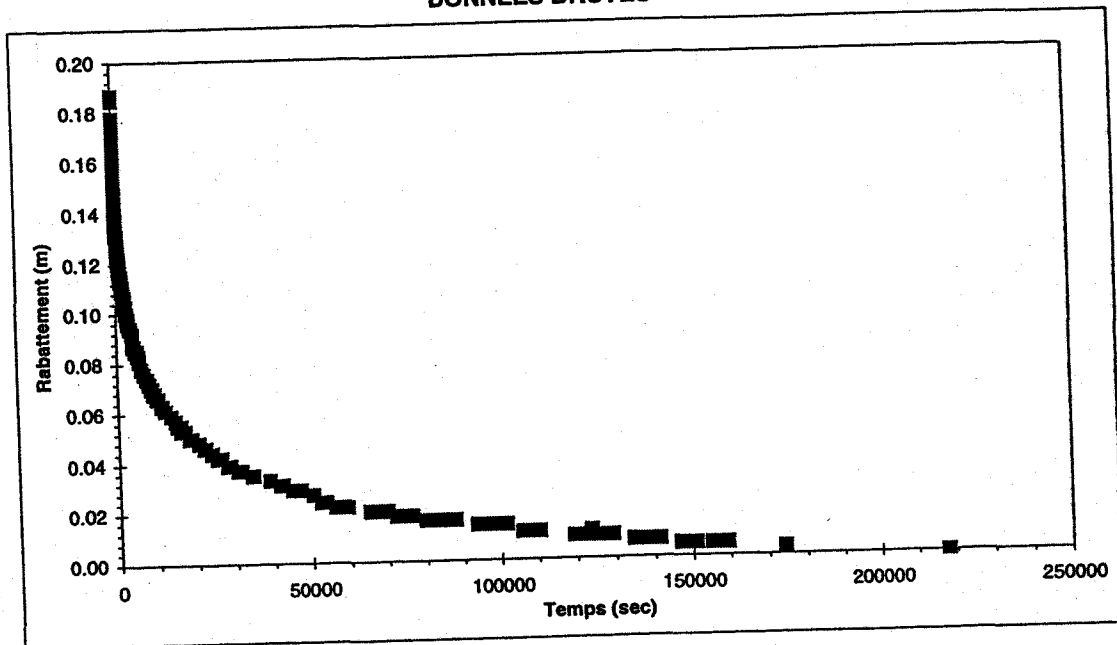
GÉOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE

Élévation du sol : 111.7 m
Profondeur de la nappe par rapport au sol : 6.91 m
Profondeur du sommet de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 6.33 m
Profondeur de la base de la crépine par rapport au niveau initiale de la nappe : 7.56 m
Profondeur de la base de l'aquifère par rapport au niveau initiale de la nappe : 13.86 m

Unité crépinée: Gravier très fin

GRAPHIQUE

DONNÉES BRUTES

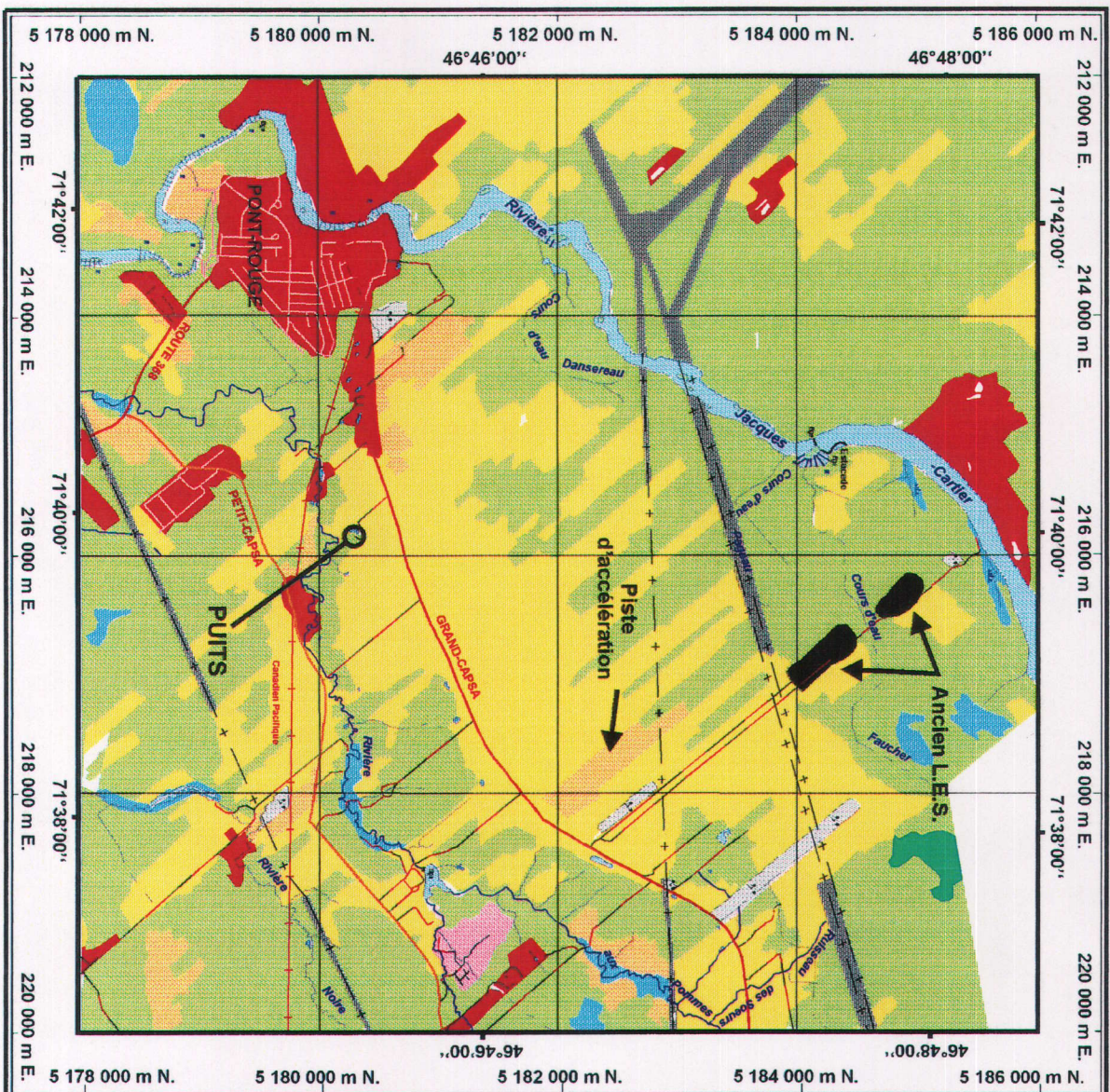


ANNEXE K

Utilisation du sol et sources potentielles de contamination : site des puits municipaux de Pont-Rouge

Sources des données :

Utilisation du sol : MRC de Portneuf



UTILISATION DU SOL

Puits municipaux
de Pont-Rouge

LÉGENDE

- Route principale
- - - Route secondaire
- Rue
- Sentier
- + - Ligne électrique
- + - Chemin de fer
- Urbain
- Forêt
- Agricole
- Friche
- Récréo-touristique
- Marécage/Tourbière
- Sablière
- Érablière
- Ligne de transport électrique



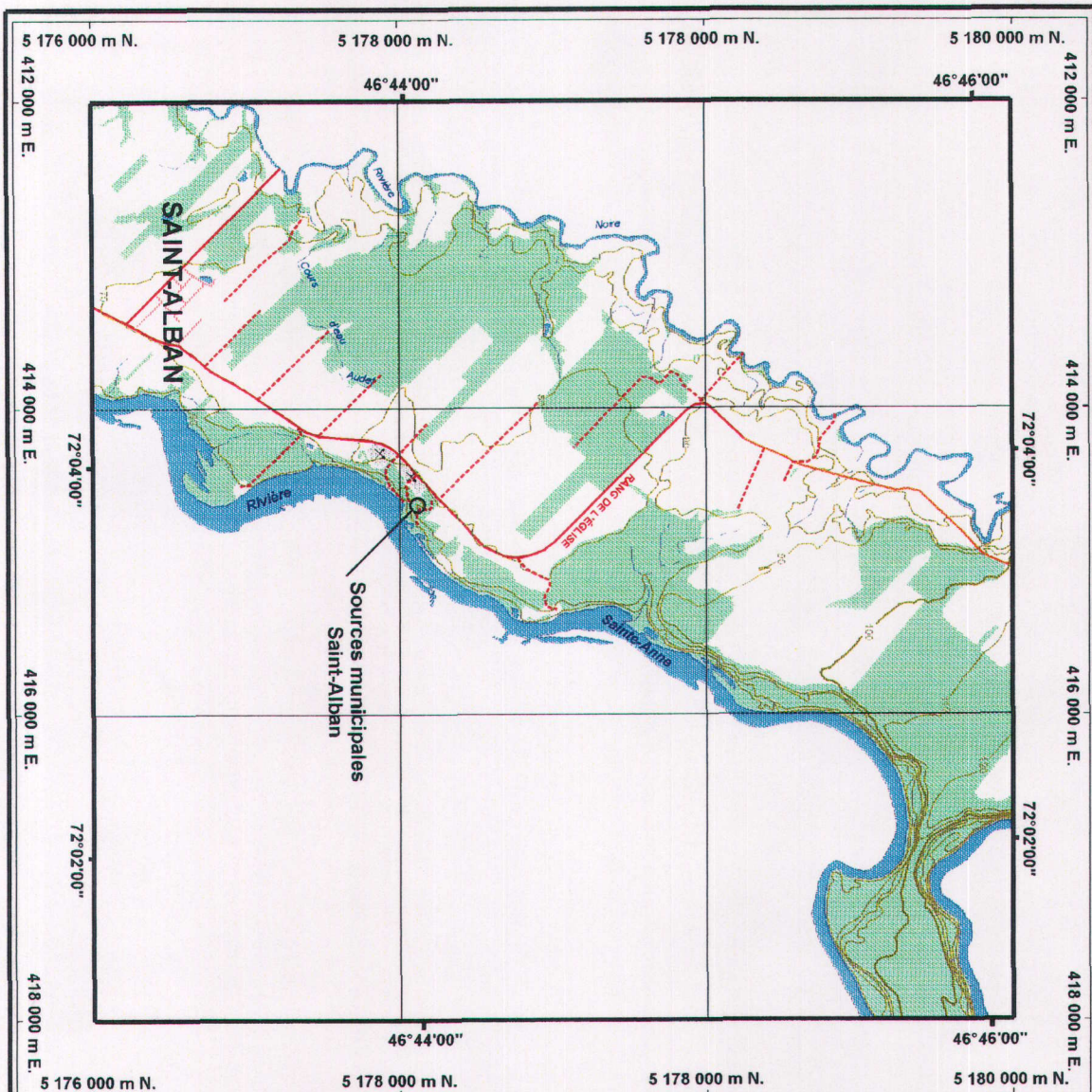
Projection: UTM NAD 83 - Zone 7

ANNEXE L

Topographie : site des sources municipales de Saint-Alban

Sources des données :

Topographie : Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec



TOPOGRAPHIE

Sources municipales de Saint-Alban

LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Sentier
- Sablière
- Courbe de niveau

Équidistance des courbes de niveau: 10 mètres



Projection: UTM NAD 83 - Zone 8

ANNEXE M

Géologie des formations superficielles : site des sources municipales de Saint-Alban

Sources des données :


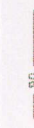






Géologie des formations superficielles : Cloutier *et al.* (1997)

Topographie : Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec

GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Sources municipales de Saint-Alban

LÉGENDE

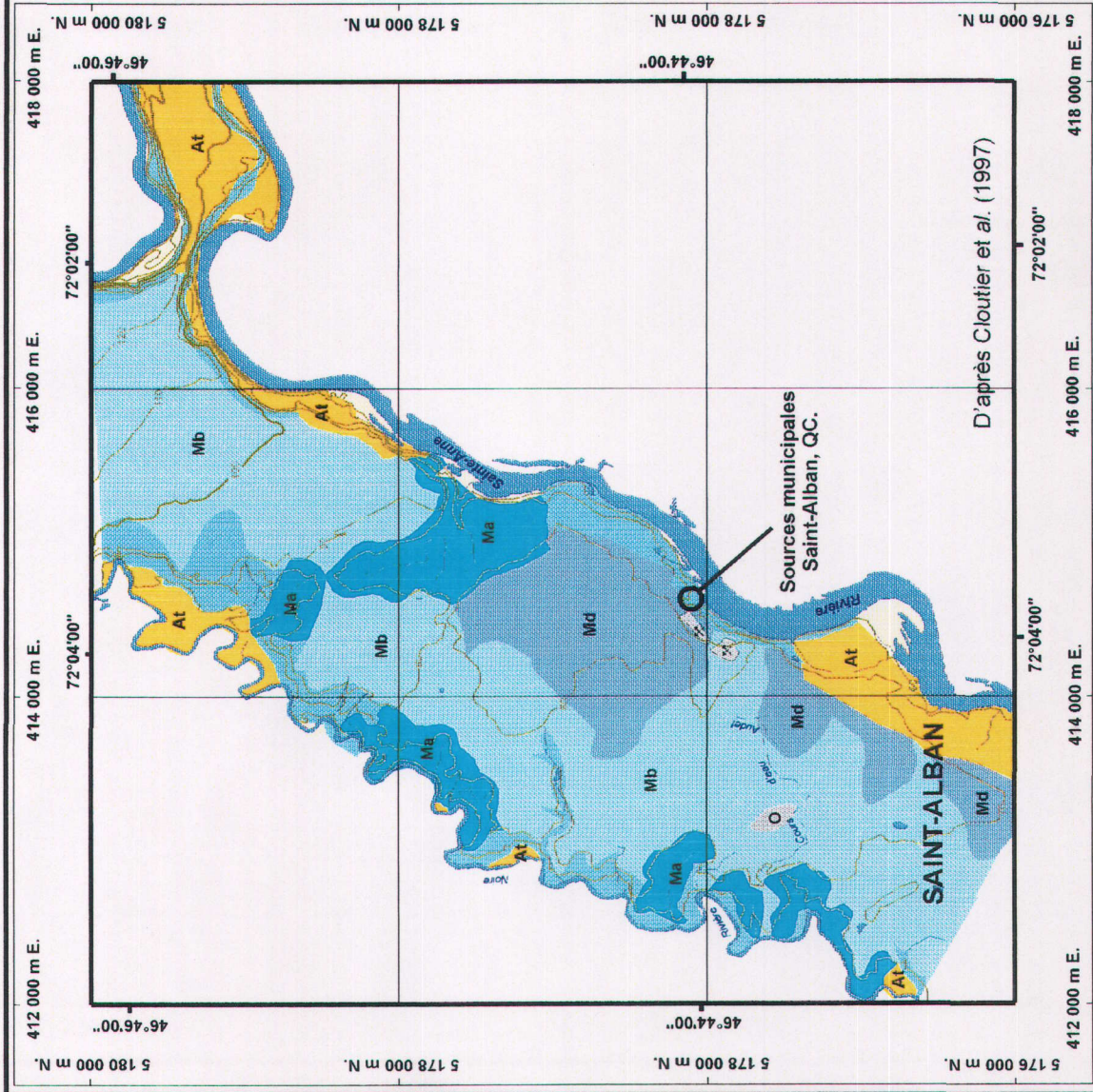
- Sablère 
- Courbe de niveau 
- Dépôts organiques 
- Alluvions actuelles 
- Alluvions des terrasses fluviales 
- Sédiments deltaïques 
- Sédiments littoraux, pré-littoraux et d'exondation 
- Sédiments fins d'eau profonde 

Équidistance des courbes: 10 mètres



Projection: UTM NAD 83 - Zone 8

QUATERNAIRE



ANNEXE N

**Piézométrie : site des sources municipales
de Saint-Alban (Période de mesure : mi-juillet
à mi-août 1997)**

PIEZOMÉTRIE

Sources municipales
de Saint-Alban

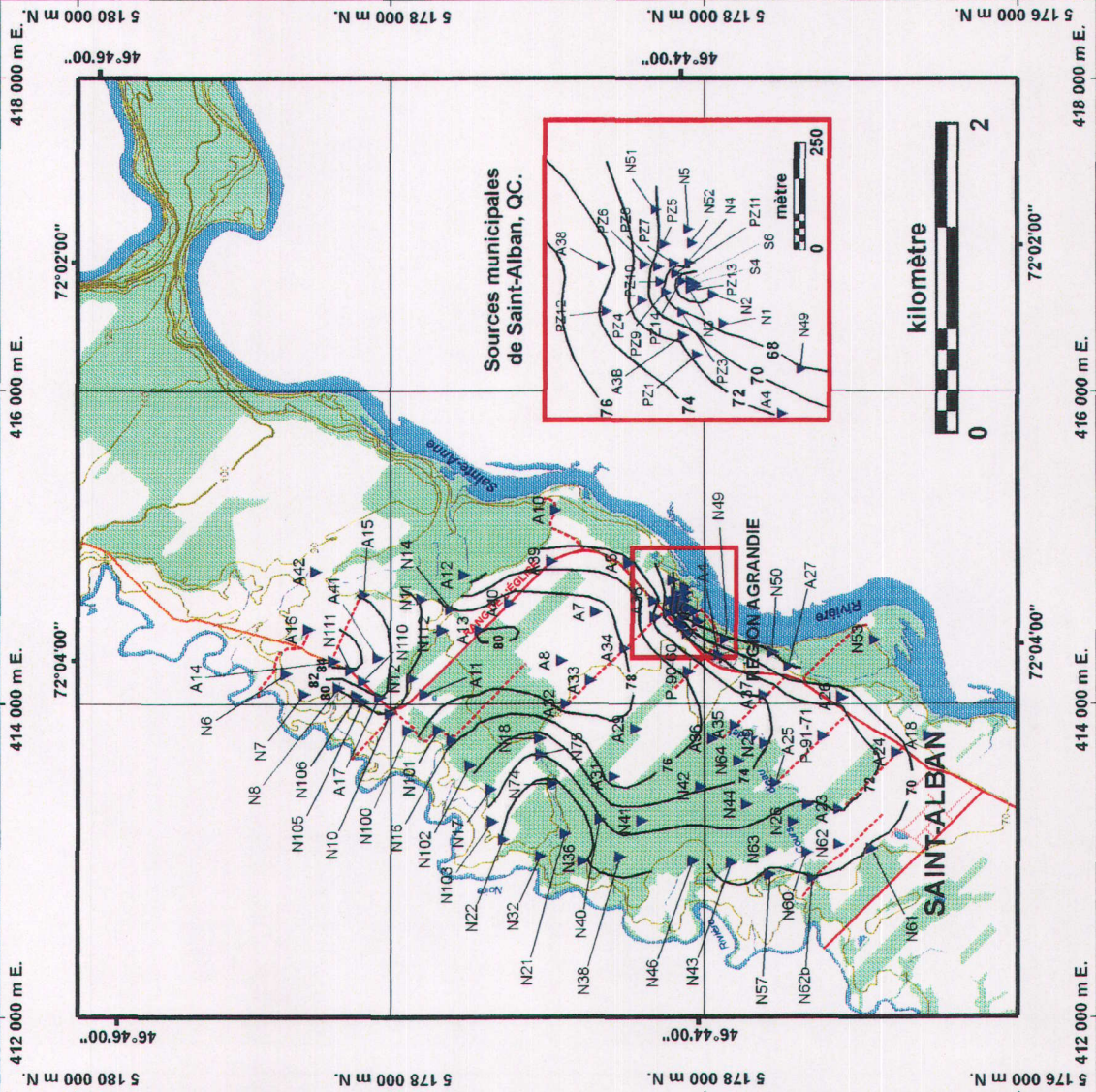
LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Sentier
- Sablère
- Courbe de niveau
- Courbe piézométrique

Équidistance des courbes
de niveau: 10 mètres
Équidistance des courbes
piézométriques: 2 mètres

Période de mesure: mi-juillet à mi-août 1997
Interpolation: Krigage - Variogramme linéaire

Projection: UTM NAD 83 - Zone 8



Sources municipales
de Saint-Alban, QC.

kilomètre



0 250 500

ANNEXE O

Description des points de mesure de niveau d'eau : site des sources municipales de Saint-Alban

Points mesurés

Date	Type de mesure	Numéro	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
12-déc-97	puits surface	S4	1,89	63,4	414613	5178112	61,51	Ouvrage de captage municipal (Source de 4 pouces); mesure par rapport au rebord interne de ciment
12-déc-97	puits surface	S6	1,87	64,13	414617	5178122	62,26	Ouvrage de captage municipal (Source de 6 pouces); mesure par rapport au rebord interne de ciment
21-juil-97	forage	A3B	3,77	75,42	414491	5178140	71,65	MNB97-101
3-juil-97	eau affleurante	A4	0	71,79	414309	5177909	71,79	MNB97-109
9-juil-97	tarrière	A5	0,89	75,35	414895	5178484	74,46	MNB97-110
9-juil-97	tarrière	A7	2,05	80,89	414582	5178695	78,84	MNB97-104
9-juil-97	tarrière	A8	0,8	80,37	414273	5178910	79,57	MNB97-111
21-juil-97	tarrière	A10	1,18	71,96	415265	5178950	70,78	MNB97-112
9-juil-97	puits surface	A11	2,74	81,72	414058	5179786	78,98	Puits surface abandonné
9-juil-97	tarrière	A12	0,69	72,93	414820	5179537	72,24	MNB97-113
23-juil-97	fossé	A13	0	80,18	414468	5179435	80,18	MNB97-114
9-juil-97	tarrière	A14	0,62	84,79	414268	5180370	84,17	MNB97-115; Contact sable/argile
9-juil-97	tarrière	A15	0,2	82	414695	5180174	81,8	Contact sable/argile
24-juil-97	ruisseau	A16	0	83,83	414472	5180530	83,83	Contact sable/argile
9-juil-97	tarrière	A17	0,15	82,63	414040	5180074	82,48	MNB97-116
21-juil-97	tarrière	A18	1,76	68,2	413793	5176569	66,44	MNB97-117
10-juil-97	tarrière	A23	1,2	73,36	413324	5177142	72,16	MNB97-118
10-juil-97	tarrière	A24	2,81	74,34	413687	5176773	71,53	Cours d'eau Audet
21-juil-97	ruisseau	A25	0	73,32	413493	5177548	73,32	MNB97-119
10-juil-97	tarrière	A26	0,98	72,68	414039	5177119	71,7	MNB97-120
21-juil-97	tarrière	A27	1,76	69,62	414238	5177470	67,86	MNB97-121
10-juil-97	tarrière	A29	1,23	78,92	413837	5178440	77,69	MNB97-122
10-juil-97	tarrière	A31	0,92	78,19	413533	5178579	77,27	MNB97-123
10-juil-97	tarrière	A32	0,62	79,67	413998	5178881	79,05	MNB97-124
10-juil-97	tarrière	A33	1,06	79,87	414147	5178724	78,81	MNB97-124
10-juil-97	tarrière	A34	2,75	80,72	414352	5178508	77,97	MNB97-124
22-juil-97	ruisseau	A35	0	74,86	413861	5177804	74,86	MNB97-125
10-juil-97	tarrière	A36	2,1	77,79	413773	5177949	75,69	MNB97-102; MNB97-103
11-juil-97	tarrière	A37	1,51	75,57	414052	5177621	74,06	MNB97-120
23-juil-97	forage	A38	4,71	79,93	414653	5178325	75,22	MNB97-127
21-juil-97	forage	A39	7,3	82,56	414906	5178979	75,26	MNB97-127
22-juil-97	forage	A40	2,6	82,06	414639	5179245	79,46	MNB97-127

Date	Type de mesure	Numéro	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X (m)	UTM Y (m)	Charge (m)	Note
16-jul-97	tarrière	A41	0,77	83,8	414291	5180084	83,03	MNB97-128
16-jul-97	tarrière	A41	0,77	83,8	414291	5180084	83,03	MNB97-128
22-jul-97	forage	A42	3,57	85,17	414840	5180484	81,6	MNB97-129
10-jul-97	piézomètre	P-91-71	2,61	75,67	413791	5177240	73,06	Piezomètre MEF
10-jul-97	piézomètre	P-90-60	4,1	79,82	414200	5178101	75,72	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ1	5,27	76,75	414446	5178107	71,48	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ3	9,99	78,1	414545	5178141	68,11	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ4	10,68	81,86	414574	5178236	71,18	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ5	8,45	78,1	414705	5178183	69,65	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ6	6,67	78,63	414657	5178230	71,96	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ7	8	77,77	414661	5178161	69,77	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ8	7,98	77,86	414651	5178197	69,88	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ9	12,79	81,83	414592	5178179	69,04	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ10	9,28	79,15	414617	5178192	69,87	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ11	2,083	71,33	414636	5178156	69,247	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ12	8	81,36	414547	5178317	73,36	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ13	1,673	66,42	414601	5178122	64,747	Piezomètre CGQ
12-déc-97	piézomètre	PZ14	1,44	67,88	414618	5178142	66,44	Piezomètre CGQ
12-déc-97	escarpement	N1	1,97	69,08	414518	5178047	67,11	Contact sable/argille escarpement
12-déc-97	escarpement	N2	0,76	66,85	414586	5178069	66,09	Contact sable/argille escarpement
12-déc-97	escarpement	N3	0,72	64,41	414606	5178109	63,69	Contact sable/argille escarpement
12-déc-97	escarpement	N4	1,89	71,11	414661	5178124	69,22	Contact sable/argille escarpement
12-déc-97	escarpement	N5	0,35	59,46	414741	5178127	59,11	Contact sable/argille escarpement

Points estimés

Date	Type de mesure	Numéro	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
	ruisseau	N6	0	82	414666	5179807	82	Carte topographique
	ruisseau	N7	0	82	415101	5179591	82	Carte topographique
	ruisseau	N8	0	80	415289	5179597	80	Carte topographique
	ruisseau	N10	0	79,5	414040	5180074	79,5	Carte topographique
	ruisseau	N11	0	80	414665	5179809	80	Carte topographique
	ruisseau	N12	0	79,5	414467	5179675	79,5	Carte topographique
	ruisseau	N14	0	78	413896	5176573	78	Carte topographique
	ruisseau	N16	0	76,2	414516	5180822	76,2	Carte topographique
	ruisseau	N17	0	72,97	414098	5180339	72,97	Carte topographique
	ruisseau	N18	0	73,06	414024	5180176	73,06	Carte topographique
	ruisseau	N21	0	64,84	413164	5178891	64,84	Carte topographique
	ruisseau	N22	0	70	413129	5179284	70	Carte topographique
	ruisseau	N26	0	71,12	412866	5178057	71,12	Carte topographique
	ruisseau	N29	0	74,09	412587	5177700	74,09	Carte topographique
	ruisseau	N32	0	61,82	413023	5179046	61,82	Carte topographique
	ruisseau	N36	0	70	412990	5178775	70	Carte topographique
	ruisseau	N38	0	71	413016	5178538	71	Carte topographique
	ruisseau	N40	0	72,07	413257	5178669	72,07	Carte topographique
	ruisseau	N41	0	72,66	413250	5178403	72,66	Carte topographique
	ruisseau	N42	0	74,16	413467	5178027	74,16	Carte topographique
	ruisseau	N43	0	71,23	412981	5177826	71,23	Carte topographique
	ruisseau	N44	0	73	413354	5177733	73	Carte topographique
	ruisseau	N46	0	70	412991	5178072	70	Carte topographique
	ruisseau	N49	0	68	414413	5177864	68	Carte topographique
	ruisseau	N50	0	68	414325	5177565	68	Carte topographique
	ruisseau	N51	0	68	414785	5178202	68	Carte topographique
	ruisseau	N52	0	68	414707	5178119	68	Carte topographique
	ruisseau	N53	0	60	414408	5176910	60	Carte topographique
	ruisseau	N57	0	70	412906	5177582	70	Carte topographique
	ruisseau	N60	0	70,29	413046	5177345	70,29	Carte topographique
	ruisseau	N61	0	69,75	413071	5176934	69,75	Carte topographique
	ruisseau	N62	0	70,78	413098	5177141	70,78	Carte topographique
	ruisseau	N62b	0	70	412811	5177308	70	Carte topographique

Date	Type de mesure	Numero	Profondeur (m)	Altitude (m)	UTM X NAD 83 (m)	UTM Y NAD 83 (m)	Charge (m)	Note
	eau affleurante	N63	0	70,63	413060	5177580	70,63	Carte topographique
	eau affleurante	N64	0	74,62	413632	5177784	74,62	Carte topographique
	ruisseau	N74	0	69,31	413490	5178970	69,31	Carte topographique
	ruisseau	N75	0	71,88	413675	5179044	71,88	Carte topographique
	eau affleurante	N100	0	78,76	413830	5179894	78,76	Carte topographique
	eau affleurante	N101	0	77,11	413830	5179701	77,11	Carte topographique
	eau affleurante	N102	0	74,38	413605	5179499	74,38	Carte topographique
	eau affleurante	N103	0	71,15	413244	5179357	71,15	Carte topographique
	eau affleurante	N105	0	80	414010	5180180	80	Carte topographique
	eau affleurante	N106	0	80	414044	5180221	80	Carte topographique
	eau affleurante	N110	0	83,39	414140	5180178	83,39	Carte topographique
	eau affleurante	N111	0	84	414212	5180259	84	Carte topographique
	eau affleurante	N113	0	79,25	414467	5179675	79,25	Carte topographique

ANNEXE P

Schémas d'aménagements des piézomètres : instrumentation des sources municipales de Saint-Alban (Automne 1997)

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ1

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 446 m E., 5 178 107 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIÉZOMÈTRE							
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description			
0		Surface du Sol	76.41			Ciment	0.15			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 7.32 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 6.81 m Margelle: 0.34 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur sup.: 5.85 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 5.27 m</p>			
1		Sable Fin à Moyen		MNB97-300		Coulis de Bentonite							
2													
3													
4									Bentonite Granulaire		3.75		
5											4.75	4.93	
6						MNB97-301			Sable en Place				5.85
7			69.09				6.47						
		Fin du Forage											



Date : 27 Novembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ2

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 520 m E., 5 178 164 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIÉZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	78			Ciment	0.15			<p style="text-align: center;">FORAGE</p> <p>Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 7.43 m</p> <p style="text-align: center;">TUBAGE</p> <p>Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 8.13 m Margelle: 0.70 m</p> <p style="text-align: center;">CRÉPINE</p> <p>Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur sup.: 6.81 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p style="text-align: center;">NIVEAU STATIQUE</p> <p>Margelle: nul</p>
1		Sable Fin à Moyen				Coulis de Bentonite				
2										
3										
4										
5										
6										
7			70.57	MNB97-302	~	Bentonite Granulaire	4.25			
7.43		Fin du Forage				Sable en Place	5.26		6.81	



Date : 28 Novembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ3

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 545 m E., 5 178 141 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIÉZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	77.54							
0.20						Ciment	0.20			<p style="text-align: center;">FORAGE</p> <p>Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 11.89 m</p> <p style="text-align: center;">TUBAGE</p> <p>Matériau: PVC Scodule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 12.15 m Margelle: 0.56 m</p> <p style="text-align: center;">CRÉPINE</p> <p>Matériau: PVC Scodule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 10.97 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p style="text-align: center;">NIVEAU STATIQUE</p> <p>Margelle: 9.99 m</p>
1.10						Coulis de Bentonite	1.10			
2										
3										
4										
5						Bentonite Granulaire et vide				
6		Sable Fin à Moyen								
7										
8				MNB97-303						
9										
10										
11						Sable en Place				
11.59			65.65				11.59			
12		Fin du Forage								
13										

cgq centre géocentrique de Québec

1-811-363-3636

Date : 2 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ4

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 574 m E., 5 178 236 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description	
0		Surface du Sol	77.54			Ciment	0.20			<p style="text-align: center;">FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 11.89 m</p> <p style="text-align: center;">TUBAGE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 12.71 m Margelle: 1.19 m</p> <p style="text-align: center;">CRÉPINE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 10.88 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p style="text-align: center;">NIVEAU STATIQUE Margelle: 10.68 m</p>	
1		Sable Fin à Moyen				Coulis de Bentonite					
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11			65.96	MNB97-304			6.90				
12		Argile Sableuse	65.65	MNB97-305					8.80		
13		Fin du Forage						9.49			
								10.88			
								11.52			



Date : 1 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ5

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 705 m E., 5 178 183 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description	
0		Surface du Sol	77.54			Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 11.89 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 9.81 m Margelle: 0.59 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 8.60 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 8.45 m</p>	
1		Sable Moyen à Grossier				Coulis de Bentonite					
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11				MNB97-306							
12		Fin du Forage	65.65								
13											



Date : 2 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ6

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 657 m E., 5 178 230 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	77.74			Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 10.97 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soudure 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 8.11 m Margelle: 0.89 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soudure 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 6.60 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 6.67 m</p>
1		Gravier Très Fin				Coulis de Bentonite				
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10				MNB97-307						
11		Fin du Forage	66.77							
12										



Date : 2 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ7

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 661 m E., 5 178 161 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description	
0		Surface du Sol	77.4								
0.20						Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 11.89 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 9.81 m Margelle: 0.37 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 8.82 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 8.00 m</p>	
3						Coulis de Bentonite					
6.00						Bentonite Granulaire	6.00				
7.50							7.50				
7.63									7.63		
8.82											8.82
9.44						Sable en Place	9.44				
11			66.12	MNB97-308							
12		Argile Sableuse	65.51								
13		Fin du Forage									

CGG centre géoscientifique de Québec

Date : 2 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ8

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 651 m E., 5 178 197 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description	
0		Surface du Sol	77.29			Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 11.89 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 9.81 m Margelle: 0.57 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soudule 40 Diamètre interne: 3.81 m Profondeur: 3.62 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 7.98 m</p>	
1		Sable Grossier									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
11				MNB97-309							
12		Fin du Forage	65.4								
13											



Date : 3 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ9

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 592 m E, 5 178 179 m N.

STRATIGRAPHIE			ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	80.82							
0.20		Sable Moyen avec cailloux	79.91	MNB97-309		Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 14.63 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 14.46 m Margelle: 1.01 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 m Profondeur: 12.83 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 12.79 m</p>
1										
2										
3										
4						Coulis de Bentonite				
5										
6										
7										
8		Sable Fin à Moyen					8.20			
9										
10										
11										
11.78				MNB97-310			10.65		11.78	
12						Sable en Place				
13										
14										
15		Fin du Forage	66.19				13.45		12.83	



Date : 3 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ10

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 617 m E., 5 178 192 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	78.24							
0.20						Ciment	0.20			<p>FORAGE Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 12.80 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 11.34 m Margelle: 0.91 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Scedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Profondeur: 9.81 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 9.28 m</p>
3						Coulis de Bentonite				
6.10		Sable Moyen				Bentonite Granulaire	6.10			
8.00							8.00			
8.37								8.37		
9.81						Sable en Place			9.81	
10.43							10.43			
12			65.782	MNB97-312						
13		Argile Sableuse	65.44							
14		Fin du Forage								



Date : 3 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ11

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 636 m E., 5 178 156 m N.

STRATIGRAPHIE			ÉCHANTILLON		PIÉZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	69.91			Bentonite				FORAGE Type: Tarière manuelle Diamètre: 6.35 cm Longueur: 1.72 m
0.36						Granulaire	0.36			
1		Sable Moyen				Sable en Place			0.66	TUBAGE Matériau: PVC Scodule 40 Diamètre interne: 1.91 cm Longueur totale: 3.14 m Margelle: 1.42 m
1.14									1.14	CRÉPINE Matériau: PVC Scodule 40 Diamètre interne: 1.91 cm Profondeur: 1.14 m Longueur: 0.58 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)
1.72		Fin du Forage	68.19				1.72			NIVEAU STATIQUE Margelle: 2.08 m
2										
3										

CGQ Centre géocentrique de Québec

48

Date : 3 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ12

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 547 m E., 5 178 317 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE					
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description	
0		Surface du Sol	80.71			Ciment	0.20			<p style="text-align: center;">FORAGE</p> <p>Type foreuse: Mobil Drill Type forage: Tarière pleine Diamètre: 7.62 cm Longueur: 9.16 m</p> <p style="text-align: center;">TUBAGE</p> <p>Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 cm Longueur totale: 9.81 m Margelle: 0.65 m</p> <p style="text-align: center;">CRÉPINE</p> <p>Matériau: PVC Soedule 40 Diamètre interne: 3.81 m Profondeur: 8.54 m Longueur: 0.60 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p style="text-align: center;">NIVEAU STATIQUE</p> <p>Margelle: 8.00 m</p>	
1		Sable Fin à Moyen									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
9.16		Fin du Forage									



Date : 4 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

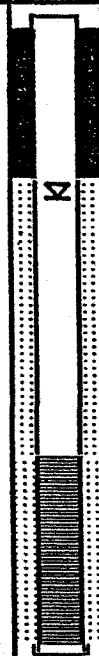
No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ13

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 601 m E., 5 178 122 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	65.25							
0		Sable Moyen				Bentonite Granulaire	0.44		0.50	<p>FORAGE Type: Tarière manuelle Diamètre: 6.35 cm Longueur: 1.81 m</p> <p>TUBAGE Matériau: PVC Schedule 40 Diamètre interne: 1.91 cm Longueur totale: 2.98 m Margelle: 1.17 m</p> <p>CRÉPINE Matériau: PVC Schedule 40 Diamètre interne: 1.91 m Profondeur: 1.24 m Longueur: 0.57 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)</p> <p>NIVEAU STATIQUE Margelle: 1.67 m</p>
1										Sable en Place,
			63.44							
2		Fin du Forage					1.81			
3										

cgq Centre géocentrique de Québec

1-811-353-3535

Date : 4 Décembre 1997

Supervisé par : Daniel Paradis

Feuille : 1

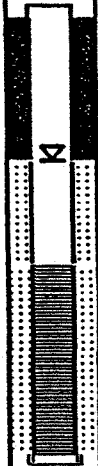
No. Projet : HD960003 - Piémont Laurentien

Schéma d'aménagement : PZ14

Projet : Instrumentation des Sources de St-Alban

Localisation : Prise d'eau municipale de St-Alban, Qc.

Coordonnées (NAD 83/Zone 8) : 414 618 m E., 5 178 142 m N.

STRATIGRAPHIE				ÉCHANTILLON		PIEZOMÈTRE				
Prof. (m)	Symbole	Description	Élévation (m)	Numéro échantillon	Type	Matériau de remplissage	Prof. (m)	Schéma	Prof. (m)	Description
0		Surface du Sol	66.86							
		Sable Moyen		MNB97-314	M	Bentonite Granulaire	0.29			FORAGE Type: Tarière manuelle Diamètre: 6.35 cm Longueur: 1.29 m
1						Sable en Place			0.72	CRÉPINE Matériau: PVC Schedule 40 Diamètre interne: 1.91 cm Profondeur: 0.72 m Longueur: 0.57 m Ouverture: 0.25 mm (no. 10)
		Fin du Forage	65.57				1.29			NIVEAU STATIQUE Margelle: 1.44 m
2										
3										



Date : 4 Décembre 1997
 Supervisé par : Daniel Paradis
 Feuille : 1

LÉGENDE

Lithologie



Gravier



Sable

Composantes des puits



Tubulure et ciment



Tubulure et coulis de bentonite



Tubulure et bentonite



Tubulure et sable filtrant



Crépine et sable filtrant

Types d'échantillonnage



Tarière



Cuillère fendue

ANNEXE Q

Essais de perméabilité *in situ* : site des sources municipales de Saint-Alban

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Piézomètre: Pz1

Essai no.: 999101

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Sable fin gris

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 71.48
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.60
Rayon du tubage (m): 0.01905

	pieds	mètres	
Lecture de la sonde avant l'essai:	4.549	1.387	Pression en hauteur d'eau.

	kPa	mètres	
Pression d'air avant l'essai:	4.5	0.46	Pression en hauteur d'eau

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Épaisseur saturée (m): 3.66

Note:

Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 67.82

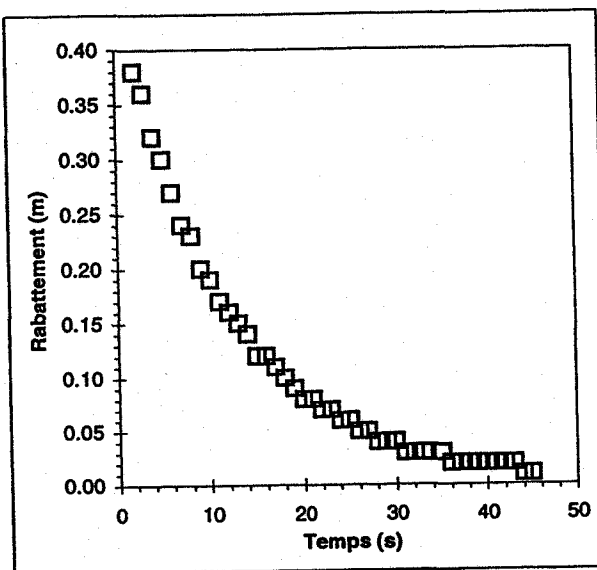
Déplacement initial dans le puits (m): 0.46

Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 2.72

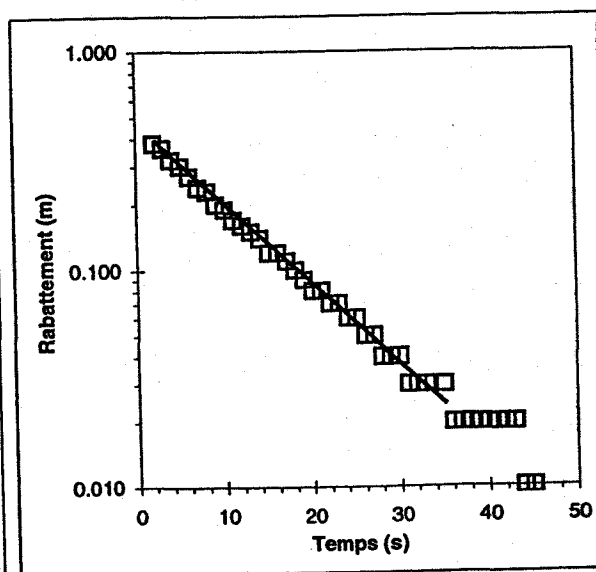
Élévation du fond du puits (m): 68.76

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: 7.63E-05 m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: Pz1

Date: 30-Sep-98

Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)
2	0.38	20	0.08	39	0.02
3	0.36	21	0.08	40	0.02
4	0.32	22	0.07	41	0.02
5	0.3	23	0.07	42	0.02
6	0.27	24	0.06	43	0.02
7	0.24	25	0.06	44	0.01
8	0.23	26	0.05	45	0.01
9	0.2	27	0.05		
10	0.19	28	0.04		
11	0.17	29	0.04		
12	0.16	30	0.04		
13	0.15	31	0.03		
14	0.14	32	0.03		
15	0.12	33	0.03		
16	0.12	35	0.03		
17	0.11	36	0.02		
18	0.1	37	0.02		
19	0.09	38	0.02		

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Piézomètre: Pz4

Essai no.: 999401

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Sable fin à moyen

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 71.18
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.60
Rayon du tubage (m): 0.01905

	pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	4.542	1.384	

	kPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	5.25	0.54	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

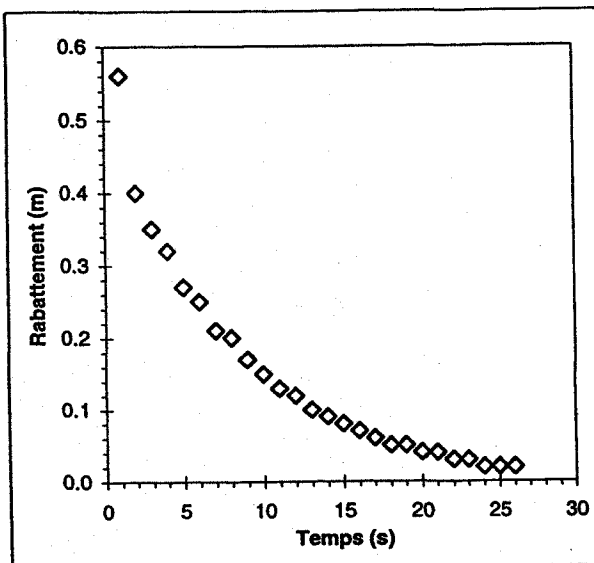
Épaisseur saturée (m): 2.03
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 69.15

Déplacement initial dans le puits (m): 0.54

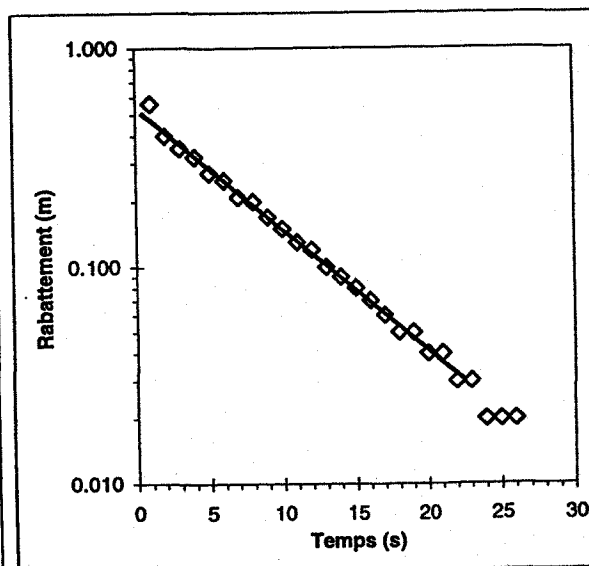
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.56
Élévation du fond du puits (m): 69.62

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $1.51E-04$ m/s

Méthode: *Bowen & Rice*

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: Pz4

Date: 30-Sep-98

Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)
1	0.56	15	0.08
2	0.4	16	0.07
3	0.35	17	0.06
4	0.32	18	0.05
5	0.27	19	0.05
6	0.25	20	0.04
7	0.21	21	0.04
8	0.2	22	0.03
9	0.17	23	0.03
10	0.15	24	0.02
11	0.13	25	0.02
12	0.12	26	0.02
13	0.1		
14	0.09		

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Piézomètre: Pz6

Essai no.: 999601

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Gravier très fin

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 71.96
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.60
Rayon du tubage (m): 0.01905

	pieds	mètres	Pression en hauteur d'eau
Lecture de la sonde avant l'essai:	3.312	1.009	

	kPa	mètres	Pression en hauteur d'eau
Pression d'air avant l'essai:	8.00	0.82	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Épaisseur saturée (m): 5.46

Note:

Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 66.5

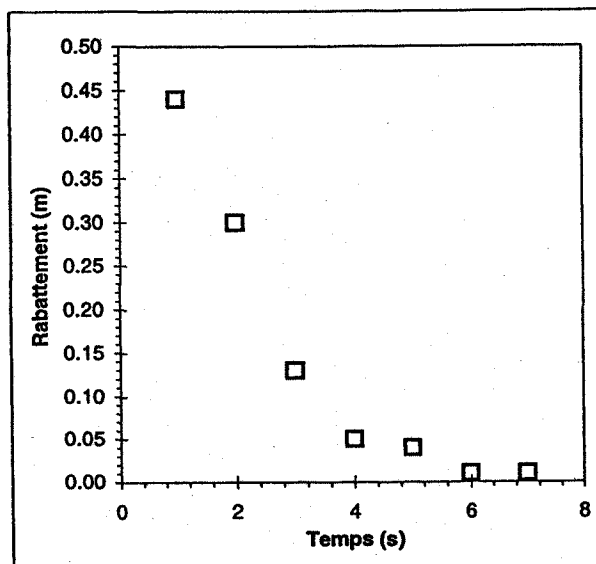
Déplacement initial dans le puits (m): 0.82

Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.44

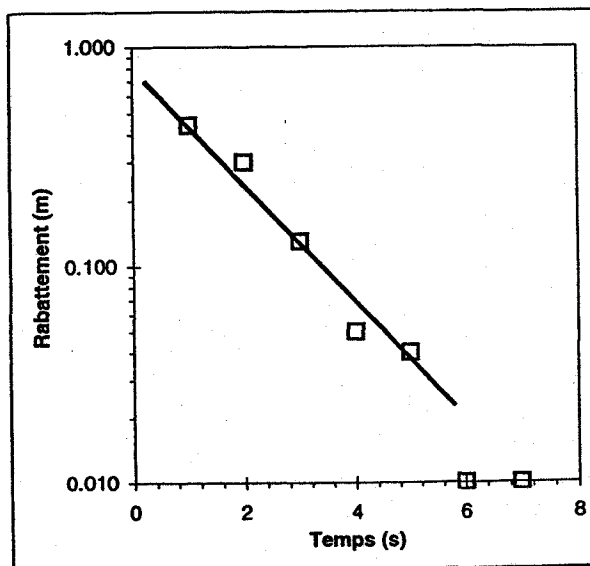
Élévation du fond du puits (m): 70.52

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $6.60E-04$ m/s

Méthode: *Bowen & Rice*

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: Pz6

Date: 30-Sep-98

Temps (sec)	Rabatement (m)
1	0.44
2	0.3
3	0.13
4	0.05
5	0.04
6	0.01
7	0.01

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Pézomètre: Pz12

Essai no.: 991201

Date: 30-Sep-98

Unité crépinée: Sable fin à moyen

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 73.36
Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.61
Rayon du tubage (m): 0.01905

	<i>pieds</i>	<i>mètres</i>		
Lecture de la sonde avant l'essai:	4.041	1.232	Pression en hauteur d'eau	

	<i>kPa</i>	<i>mètres</i>		
Pression d'air avant l'essai:	7.50	0.76	Pression en hauteur d'eau	

PARAMETRES D'INTERPRETATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Épaisseur saturée (m): 4.36

Note:

Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 69.00

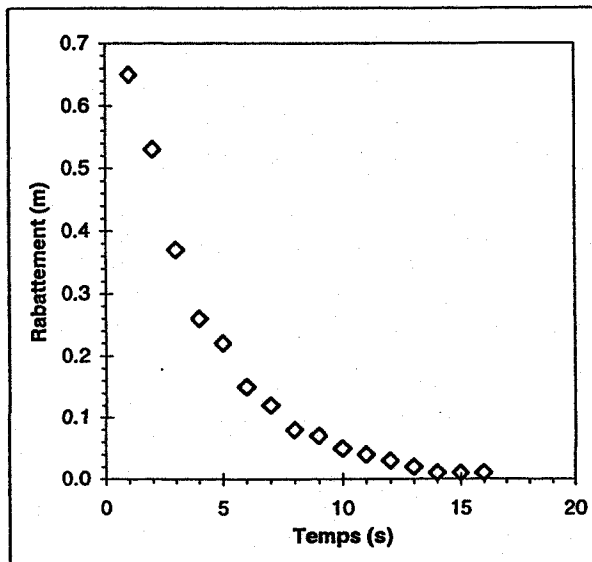
Déplacement initial dans le puits (m): 0.76

Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 1.81

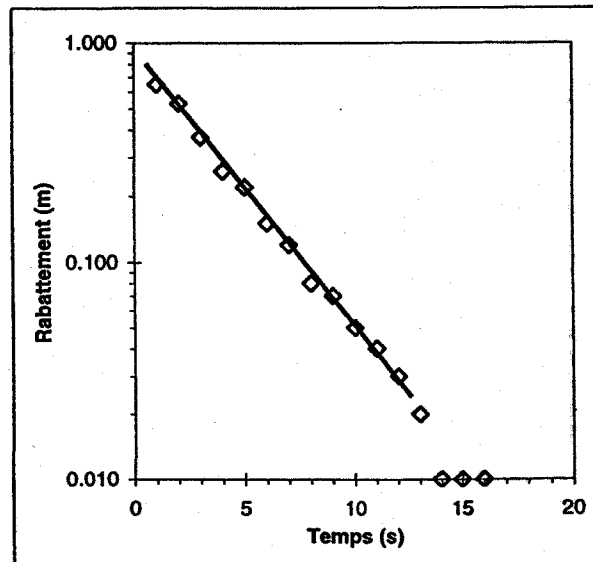
Élévation du fond du puits (m): 71.55

RESULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: 3.25E-04 m/s

Méthode: *Bowmer & Rice*

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: Pz12

Date: 30-Sep-98

Temps (Sec)	Rabâtement (m)
1	0.65
2	0.53
3	0.37
4	0.26
5	0.22
6	0.15
7	0.12
8	0.08
9	0.07
10	0.05
11	0.04
12	0.03
13	0.02
14	0.01
15	0.01
16	0.01

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-90-60 Essai no.: 060

Date: 22-Août-97

Unité crépinée: Sable fin gris

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 75.72

Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.61

Rayon du tubage (m): 0.01905

Lecture de la sonde avant l'essai:

pièdes	mètres
6.850	2.088

 Pression en hauteur d'eau

Pression d'air avant l'essai:

kPa	mètres
16.00	1.63

 Pression en hauteur d'eau

PARAMÈTRES D'INTERPRÉTATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

Épaisseur saturée (m): 2.64

Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 73.08

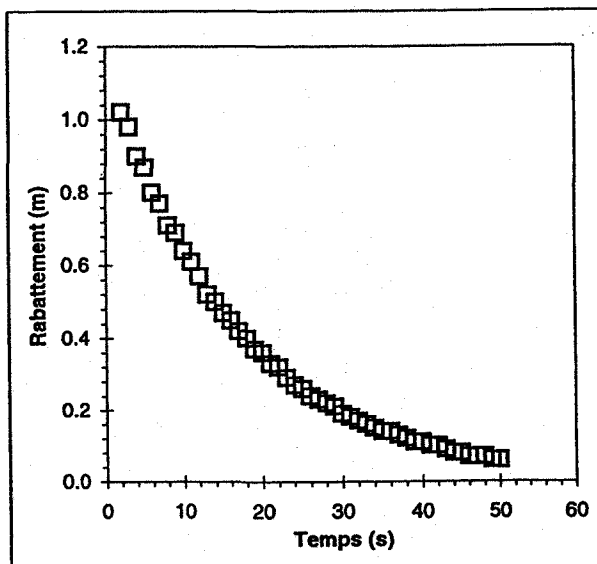
Déplacement initial dans le puits (m): 1.63

Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 2.13

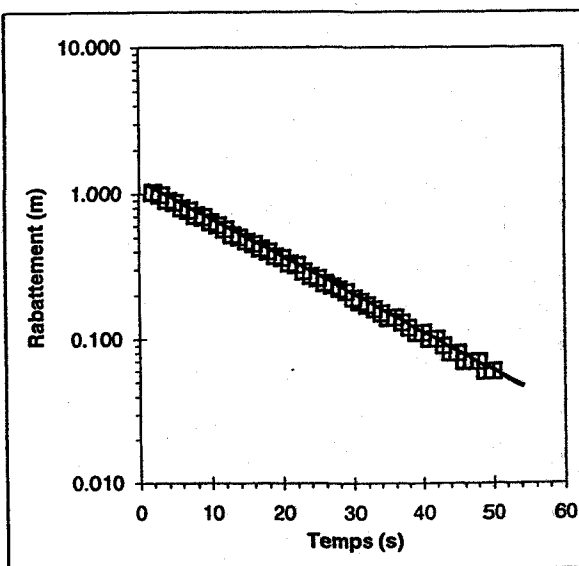
Élévation du fond du puits (m): 73.59

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $7.44E-05$ m/s

Méthode: *Bouwer & Rice*

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: P-90-60

Date: 22-Août-97

Temps (sec)	Rabattement (m)	Temps (sec)	Rabattement (m)
2	1.02	28	0.22
3	0.98	29	0.21
4	0.9	30	0.19
5	0.87	31	0.18
6	0.8	32	0.17
7	0.77	33	0.16
8	0.71	34	0.15
9	0.69	35	0.14
10	0.64	36	0.14
11	0.61	37	0.13
12	0.57	38	0.12
13	0.52	39	0.11
14	0.5	40	0.11
15	0.47	41	0.1
16	0.45	42	0.1
17	0.42	43	0.09
18	0.4	44	0.08
19	0.37	45	0.08
20	0.36	46	0.07
21	0.33	47	0.07
22	0.32	48	0.07
23	0.29	49	0.06
24	0.27	50	0.06
25	0.26		
26	0.24		
27	0.23		

Interprétation des essais de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

IDENTIFICATION

Piézomètre: P-90-71

Essai no.: 064

Date: 22-Août-97

Unité crépinée: Sable moyen à grossier

Type d'essai: Pneumatique - ascendant

CONDITIONS D'ESSAIS

Élévation du niveau d'eau (m): 73.06

Rayon du forage (m): 0.0381

Longueur de la crépine (m): 0.61

Rayon du tubage (m): 0.01905

Lecture de la sonde avant l'essai:

pieds	mètres
6.500	1.981

 Pression en hauteur d'eau

Pression d'air avant l'essai:

kPa	mètres
17.00	1.73

 Pression en hauteur d'eau

PARAMÈTRES D'INTERPRÉTATION

Temps zéro estimé (sec): 0.5

Note:

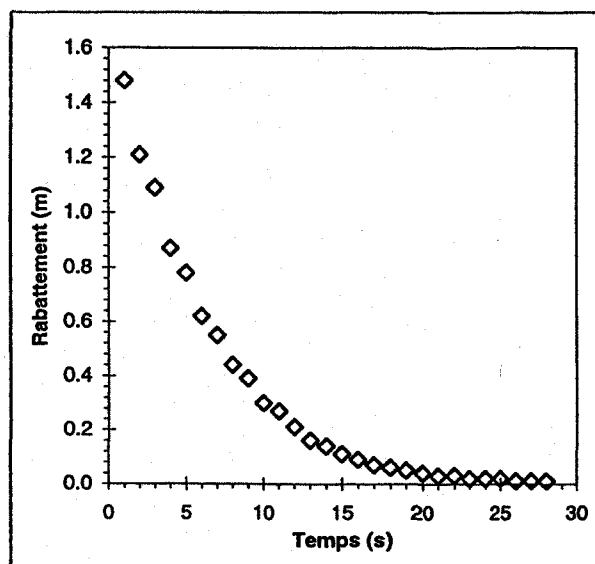
Épaisseur saturée (m): 5.40
Élévation de la base de l'unité crépinée (m): 67.66

Déplacement initial dans le puits (m): 1.73

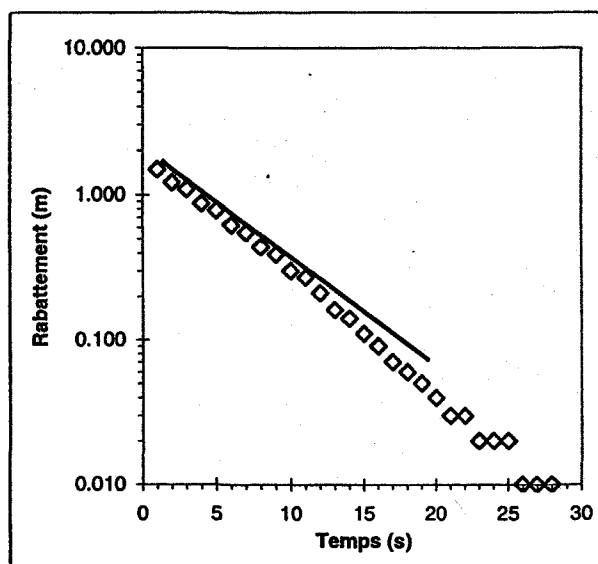
Hauteur statique d'eau dans le puits (m): 2.01
Élévation du fond du puits (m): 71.05

RÉSULTATS

DONNÉES BRUTES



DONNÉES INTERPRÉTÉES



Conductivité hydraulique estimée: $2.12E-04$ m/s

Méthode: Bouwer & Rice

Essai de perméabilité *in situ*

SITE DE SAINT-ALBAN

Piézomètre: P-90-71

Date: 22-Août-97

Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)	Temps (sec)	Rabatement (m)
1	1.48	14	0.14	27	0.01
2	1.21	15	0.11	28	0.01
3	1.09	16	0.09		
4	0.87	17	0.07		
5	0.78	18	0.06		
6	0.62	19	0.05		
7	0.55	20	0.04		
8	0.44	21	0.03		
9	0.39	22	0.03		
10	0.3	23	0.02		
11	0.27	24	0.02		
12	0.21	25	0.02		
13	0.16	26	0.01		

ANNEXE R

**Mesures de niveau d'eau: site des sources
municipales de Saint-Alban (Décembre 1997
à Octobre 1998)**

Nom	Pointide mesure	Coordonnées UTM/NAD83 (8)		Elevation (niveau de eau) (m) Date											
		Est (m)	Nord (m)	12-12-99	29-01-98	12-03-98	9-04-98	23-04-98	7-05-98	21-05-98	18-06-98	30-09-98			
PZ1	Margelle	414446	5178107	71.49	71.37	71.25	71.51	72.04	72.07	71.95	71.76	71.74			
PZ2	Margelle	414520	5178164	NUL	NUL	NUL	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.			
PZ3	Margelle	414545	5178141	68.12	68.02	67.94	67.99	68.21	68.38	68.41	68.29	68.20			
PZ4	Margelle	414574	5178236	71.18	71.07	70.94	71.13	71.5	71.64	71.61	71.45	71.33			
PZ5	Margelle	414705	5178183	69.65	69.57	69.5	69.59	70.02	70.15	70.06	69.89	69.69			
PZ6	Margelle	414657	5178230	71.96	71.82	71.68	72.01	72.48	72.51	72.43	72.29	72.14			
PZ7	Margelle	414661	5178161	69.78	69.7	69.63	69.73	70	70.16	70.1	69.96	69.81			
PZ8	Margelle	414651	5178197	69.88	69.8	69.71	69.82	70.11	70.27	70.22	70.07	69.92			
PZ9	Margelle	414592	5178179	69.04	68.93	68.82	68.91	69.18	69.38	69.38	69.25	69.14			
PZ10	Margelle	414617	5178192	69.87	69.78	69.7	69.8	70.07	70.22	70.18	70.04	69.91			
PZ11	Margelle	414636	5178156	69.25	69.2	69.15	69.22	69.38	69.47	69.44	69.35	69.27			
PZ12	Margelle	414547	5178317	73.36	73.17	73.01	73.38	73.78	73.9	73.86	73.69	73.56			
PZ13	Margelle	414601	5178122	64.75	64.74	64.74	64.74	64.76	64.76	64.76	64.73	64.75			
PZ14	Margelle	414618	5178142	66.44	66.43	66.41	66.42	66.45	66.48	66.48	66.46	66.46			
P-90-60	Margelle	414196	5178100	74.8	74.59	74.41	74.82	75.54	75.57	75.49	75.27	75.15			
N1	Sol	414518	5178047	67.11	67.11	67.11	67.11	67.11	67.11	67.11	67.11	67.11			
N2	Sol	414586	5178069	66.09	66.09	66.09	66.09	66.09	66.09	66.09	66.09	66.09			
N3	Sol	414606	5178109	63.69	63.69	63.69	63.69	63.69	63.69	63.69	63.69	63.69			
N4	Sol	414661	5178124	69.22	69.22	69.22	69.22	69.22	69.22	69.22	69.22	69.22			
N5	Sol	414741	5178127	59.11	59.11	59.11	59.11	59.11	59.11	59.11	59.11	59.11			
S4	Bord ciment	414613	5178112	61.51	61.51	61.51	61.51	61.56	61.56	61.56	61.56	61.56			
S6	Bord ciment	414617	5178122	62.26	62.26	62.26	62.27	62.27	62.27	62.27	62.27	62.27			

ANNEXE S

Utilisation du sol : site des sources municipales de Saint-Alban

Sources des données :

Utilisation du sol : MRC de Portneuf

UTILISATION DU SOL

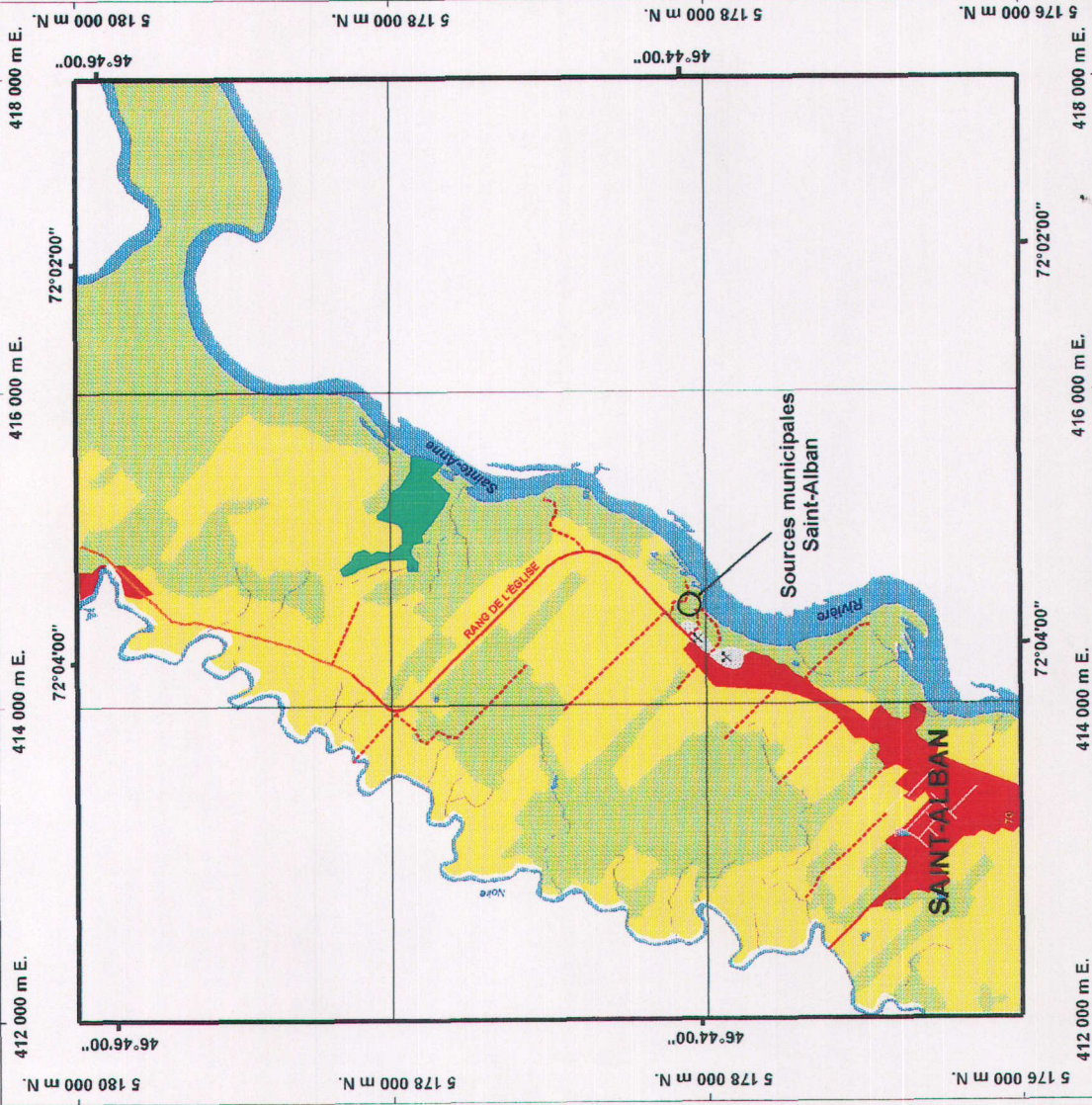
Sources municipales de Saint-Alban

LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Sentier
- Urbain
- Forêt
- Agricole
- Sablière
- Érablière



Projection: UTM NAD 83 - Zone 8












POCHETTE 1



**Carte synthèse : périmètres de protection
éloignés et rapprochés du site des puits
municipaux de Pont-Rouge**

CARTE SYNTHÈSE DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION

PUITS MUNICIPAUX DE PONT-ROUGE

UTILISATION DU SOL

- | | | | | | |
|---|-------------------------------|---|--------------------|---|-----------|
|  | Urbain |  | Marécage/Tourbière |  | Agricole |
|  | Forêt |  | Sablière |  | Friche |
|  | Ligne de transport électrique |  | Récréo-touristique |  | Érabièrre |

-  Direction d'écoulement
-  Puits

PROJECTION: UTM NAD 83 - ZONE 7

5 184 000 m N.

5 182 000 m N.

5 180 000 m N.

218 000 m E.

216 000 m E.

PÉRIMÈTRES DE PROTECTION ÉLOIGNÉS

MÉTHODE 3A2E

ÉCOULEMENT UNIFORME

WhAEM

MODFLOW-MODPATH

CARTOGRAPHIE HYDROGÉOLOGIQUE

ÉQUATION D'INFILTRATION

ZONE AGRANDIE

Kilomètre



218 000 m E.

216 000 m E.

5 184 000 m N.

5 182 000 m N.

5 180 000 m N.

215 500 m E.

5 180 500 m N.

PÉRIMÈTRES DE PROTECTION RAPPROCHÉS

BEAR ET JACOBS (1965)

MODFLOW-MODPATH

MÉTHODE 3A2E

WhAEM

ÉQUATION CYLINDRE

Mètre



215 500 m E.










POCHETTE 2

**Carte synthèse : périmètres de protection
éloignés et rapprochés du site des sources
municipales de Saint-Alban**

CARTE SYNTHÈSE DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION

SOURCES MUNICIPALES DE SAINT-ALBAN

UTILISATION DU SOL

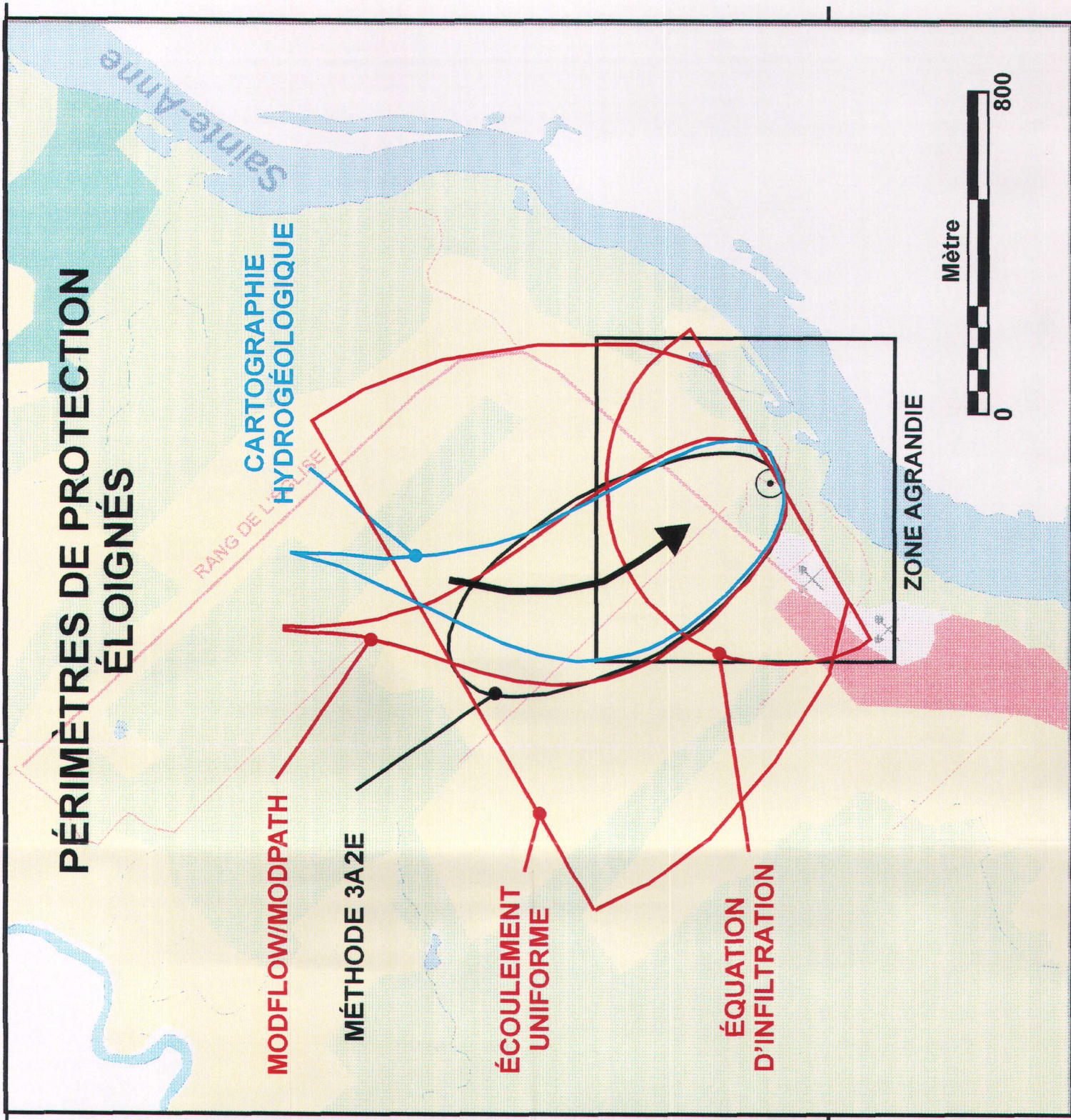
- | | | | | | |
|---|-------------------------------|---|--------------------|---|-----------|
|  | Urbain |  | Marécage/Tourbière |  | Agricole |
|  | Forêt |  | Sablrière |  | Friche |
|  | Ligne de transport électrique |  | Récréo-touristique |  | Érabièrre |

- Direction d'écoulement 
- Sources 

PROJECTION: UTM NAD 83 - ZONE 8

5 180 000 m N.

414 000 m E.



5 180 000 m N.

5 178 000 m N.

414 000 m E.

5 178 000 m N.

414 000 m E.

5 178 000 m N.

