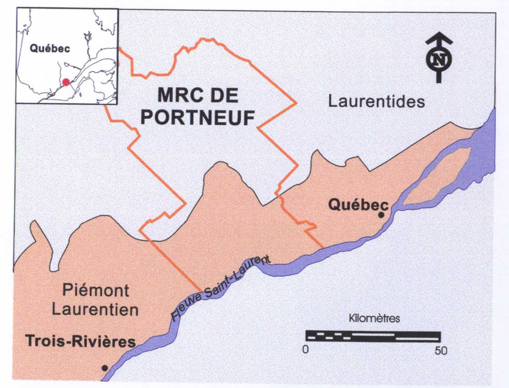
Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : Détermination des périmètres de protection en milieu granulaire.

centre géoscientifique de québec
Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Géoressources
Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada

Paradis, D.[1], Martel, R.[1], Michaud, Y.[2], Lefebvre, R.[1] et Beaudoin, F.[2]
1: INRS-Géoressources 2: CGC-Québec



Gouvernement du Québec
Ministère de l'Environnement
Laboratoire de cartographie numérique et de photogrammétrie
LCNP Centre géoscientifique de Québec
MRC DE PORTNEUF
UNIVERSITÉ LAVAL

Dossier Public
Open File
3664-e
Commission Géologique du Canada
Geological Survey of Canada
11/2000

Où obtenir une publication:
Librairie de la Commission géologique du Canada
601, rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E8
Tél.: (613) 995-4342, fax.: (613) 943-0646
Sans frais (Canada et É.-U.): 1-888-252-4301
Internet: gsc_bookstore@gsc.nrcan.gc.ca

Centre géoscientifique de Québec
880 chemin Sainte-Foy, C.P. 7500
Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7
Téléphone: (418) 654-2677
Télécopie: (418) 654-2615

Notation bibliographique conseillée:
Paradis, D., Martel, R., Michaud, Y., Lefebvre, R. et Beaudoin, F.
2000: Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : Détermination des périmètres de protection en milieu granulaire. Commission géologique du Canada, Dossier public 3664-e.

Canada

INTRODUCTION

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 solution 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, 1987) :

Formation d'un comité. Cette étape inclut la formation d'un comité de protection des ouvrages de captage et la définition des objectifs du programme.

Détermination des PDP. Cette étape inclut l'acquisition de données, la définition du modèle conceptuel, le choix d'une méthode de détermination des PDP et l'analyse d'incertitude.

Évaluation des risques de contamination. Cette étape inclut la cartographie de la vulnérabilité, l'inventaire des sources actuelles et potentielles de contamination et l'évaluation des risques de contamination.

Gestion des sources de contamination. Cette étape inclut toutes les mesures pouvant être prises pour assurer la protection de l'eau souterraine. La complexité de cette étape varie en fonction du contexte socio-économique et politique.

Le contenu de cette publication porte sur la détermination des PDP. Plus particulièrement, les résultats des travaux qui sont présentés apportent des éclaircissements sur le choix d'une méthode de détermination des PDP et sur l'analyse d'incertitude. Deux ouvrages de captage ont été choisis pour faire l'application, la comparaison et la validation des différentes méthodes de détermination des PDP. De plus, l'évaluation de la précision de certaines méthodes a été réalisée par les auteurs.

MÉTHODOLOGIE

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 ainsi qu'une zone de résurgence captée au contact d'un aquifère sableux et d'un aquitard. Ces captages sont parmi les plus importants de la MRC de Portneuf et leur contextes hydrogéologiques constituent de bons exemples de conditions rencontrées dans cette région.

Choix des méthodes

Il existe plusieurs méthodes de détermination des PDP. Ces méthodes varient de simples d'applications 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. Le choix des méthodes a été fait de façon à couvrir toute la gamme des méthodes disponibles :

- *Écoulement uniforme (Todd, 1980);*
- *Temps de transport (Bear et Jacob, 1965);*
- *Temps de transport (Loi de Darcy);*
- *Équation d'infiltration (USEPA, 1987);*
- *Équation du cylindre (USEPA, 1987);*
- *Cartographie hydrogéologique;*
- *Méthode 3A2E (Paradis, 2000);*
- *WhAEM (Haitjema et al., 1994);*
- *MODFLOW / MODPATH (McDonald et Harbaugh, 1988; Pollock, 1994).*

Validation des méthodes

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 le PDP éloigné, l'aire d'alimentation déterminée par cartographie hydrogéologique (piézométrie) a été utilisée comme référence, alors que la comparaison des PDP rapprochés a été faite par un modèle numérique (MODFLOW-MODPATH).

Analyse d'incertitude

Pour évaluer la précision de certaines méthodes, nous présentons une analyse d'incertitude des paramètres hydrogéologiques influençant les dimensions des PDP. La méthode utilisée pour cette analyse est adaptée d'Evers et Lerner (1997). La procédure décrite par ces auteurs utilise une combinaison de paramètres hydrogéologiques incertains pour générer une série de PDP. Ces PDP sont par la suite utilisés pour définir une zone d'incertitude et une zone de confiance. Ces zones sont aussi utilisés pour définir le niveau de confiance de la méthode considérée.

UTILISATION DE LA PLANCHE

Le contenu de cette planche est divisé en quatre sections. La première section est plus générale, nous y présentons le concept de périmètre de protection, les critères permettant de les définir ainsi que la description de la méthode 3A2E, une méthode ayant été adaptée dans le cadre de cette étude.

La deuxième section présente une description des ouvrages de captage de Pont-Rouge et de Saint-Alban ainsi que du contexte hydrogéologique de ces régions . Une coupe hydrostratigraphique est présentée dans le premier cas tandis que des images de l'ouvrage de captage viennent compléter la description du deuxième. Les méthodes de détermination des PDP appliquées pour ces captages sont ensuite comparées dans la troisième section. Cette comparaison permet de faire ressortir quelles méthodes sont les mieux adaptées pour les aquifères granulaires du piémont laurentien.

La quatrième section présente une méthode d'analyse d'incertitude. Cette analyse permet entre autres d'apprécier l'effet de l'incertitude de certains paramètres hydrogéologiques sur les dimensions des PDP.

1 LES MÉTHODES

1. Périmètre de protection

Le périmètre de protection (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. Le tableau 1 présente les caractéristiques des méthodes utilisées dans cette étude.

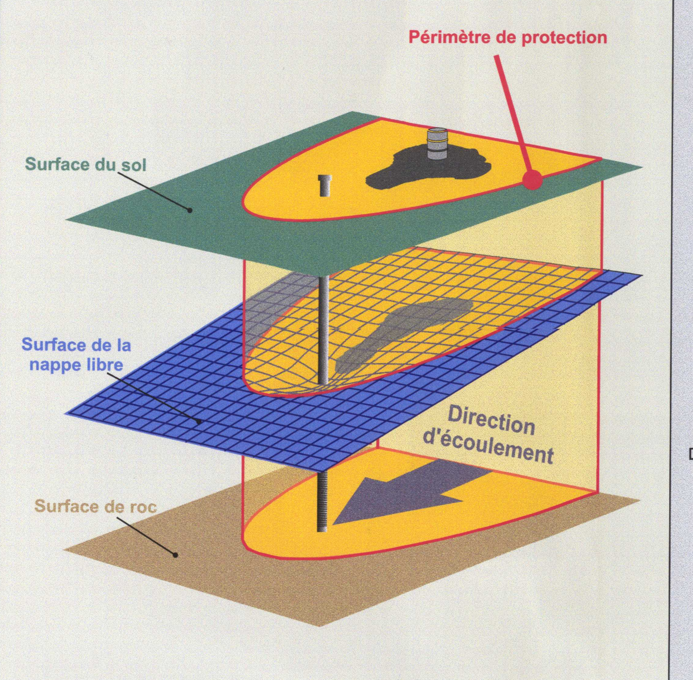


Figure 1 : Représentation tridimensionnelle d'un périmètre de protection pour un puits aménagé dans un aquifère granulaire à nappe libre.

2. Critères de définition des périmètres de protection

Cinq critères peuvent être utilisés pour définir les PDP (US EPA, 1987). Les valeurs attribuées à ces critères représentent des limites minimales ou maximales pour lesquels les PDP cessent de fournir un degré de protection adéquat. Ces critères peuvent être utilisés seuls ou de façon combinée. La définition des PDP utilisés pour cette étude est un temps de transport de 60 jours pour le PDP rapproché et un temps de transport de 20 ans ou la zone de contribution pour le PDP éloigné.

Le 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. 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.

La 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. Ce critère est plutôt arbitraire.

Les 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) d'un ouvrage de captage.

Le 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 d'égales temps de transport appelées isochrones. Les aires formées par les différents isochrones sont appelées zones de transport (ZT).

La 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 une fois qu'il a atteint l'ouvrage de captage. Les phénomènes permettant l'atténuation des contaminants sont la dilution, la dispersion, la sorbtion, la précipitation chimique et la dégradation biologique. Les aires de protection définies par ce critère sont appelées zones d'atténuation (ZA).

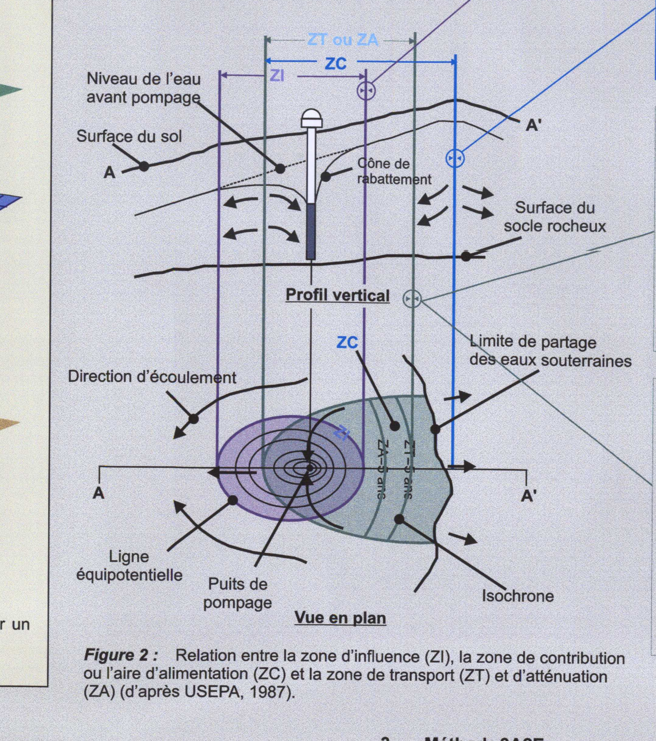


Figure 2 : Relation entre la zone d'influence (ZI), la zone de contribution ou l'aire d'alimentation (ZC) et la zone de transport (ZT) et d'atténuation (ZA) (d'après USEPA, 1987).

Tableau 1: Méthodes utilisées pour définir les périmètres de protection en milieu granulaire

Méthode	Description	Paramètres représentés	Avantages	Inconvénients
Calculs simples: Bilan de masse Équation d'infiltration (USEPA, 1987), Équation du cylindre (USEPA, 1987)	• Implique la résolution d'équations de bilan de masse simples	• Recharge • Temps de transport advectif • Volume d'extraction • Porosité efficace • Épaisseur saturée	• Très peu dispendieuse • Facile et rapide d'implantation avec un minimum d'informations • Connaissances techniques minimales	• Ne tient pas compte de l'écoulement • Sur simplification
Calculs simples: Analytique Écoulement uniforme (Todd, 1980), TDT (Bear et Jacob,1965), TDT (Loi de Darcy)	• Implique la résolution d'équations analytiques simples	• Idem **Bilan de masse** • Aucune recharge • Gradient hydraulique • Conductivité hydraulique	• Idem **Bilan de masse**	• Idem **Bilan de masse**
Semi-analytiques: WhAEM (Haitjeima et al., 1994)	• Implique la résolution de système d'équations analytiques et numériques d'écoulement	• Idem **Analytique** • Limites d'écoulement simples • Variabilité des paramètres limitée	• PDP basés sur représentation idéalisée de l'hydrogéologie locale • Peut représenter système d'écoulement simple • Peut représenter limites d'écoulement simples et recharge uniforme	• Assume des conditions homogènes et isotropes • Assume un aquifère infini • Ne tient pas compte des limites d'écoulement et des effets de recharge complexes
Cartographie hydrogéologique: Piézométrie	• Implique la détermination des caractéristiques géomorphologiques, géologiques et hydrologiques.	• Limites physiques et hydrauliques du système	• Économique et très précise pour aquifères granulaires peu profonds • Souvent seule méthode applicable en milieu karstique et fracturé	• Doit être combinée avec d'autres méthodes • Non quantitative • Ne peut représenter le temps de transport • Dispendieuse pour aquifères complexes
Méthodes combinées: 3A2E (Paradis, 2000)	• Utilise de façon complémentaire les méthodes de cartographie hydrogéologiques et de calculs simples	• Idem **Calculs simples** • Limites physiques et hydrauliques du système	• Peu dispendieuse • Facile et rapide d'implantation pour aquifères simples • Bonne précision pour aquifères granulaires	• Imite la forme des PDP en milieux granulaires
Modélisation numérique: MODFLOW/MOPATH (McDonald et Harbaugh, 1988)	• Implique la résolution de système d'équations numériques d'écoulement	• Tous les paramètres hydrogéologiques • Limites physiques et hydrauliques complexes • Variabilité des paramètres	• Peut représenter la plupart des contextes hydrogéologiques • Permet de faire des projections dans le temps	• Requiert un bon modèle conceptuel • Nécéssite beaucoup de données et d'expertise • Faible résolution dans zones de fort gradient • Dispendieuse

3. Méthode 3A2E

La détermination des PDP par la méthode 3A2E est composée de cinq étapes (Figure 3) :

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 Jacob (1965), de temps de transport avec la loi de Darcy ou la cartographie hydrogéologique peuvent être utilisées.

Étape 3. Implique le calcul de la superficie totale 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 régionale à l'aide d'une carte piézométrique ou d'au moins une mesure de niveau 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 orientés dans le sens de l'écoulement régional déterminé à l'étape 4 et correspondent aux limites aval (étape 1) et amont (étape 2).

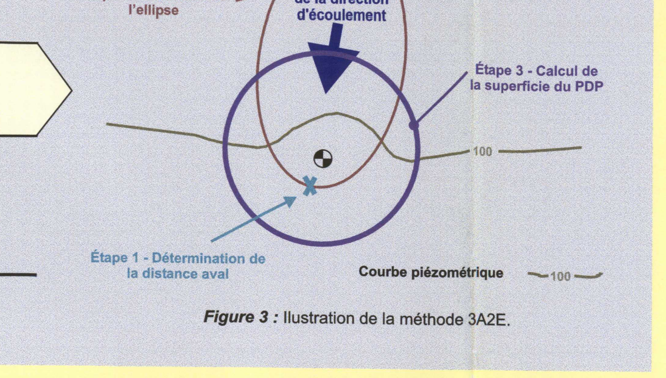
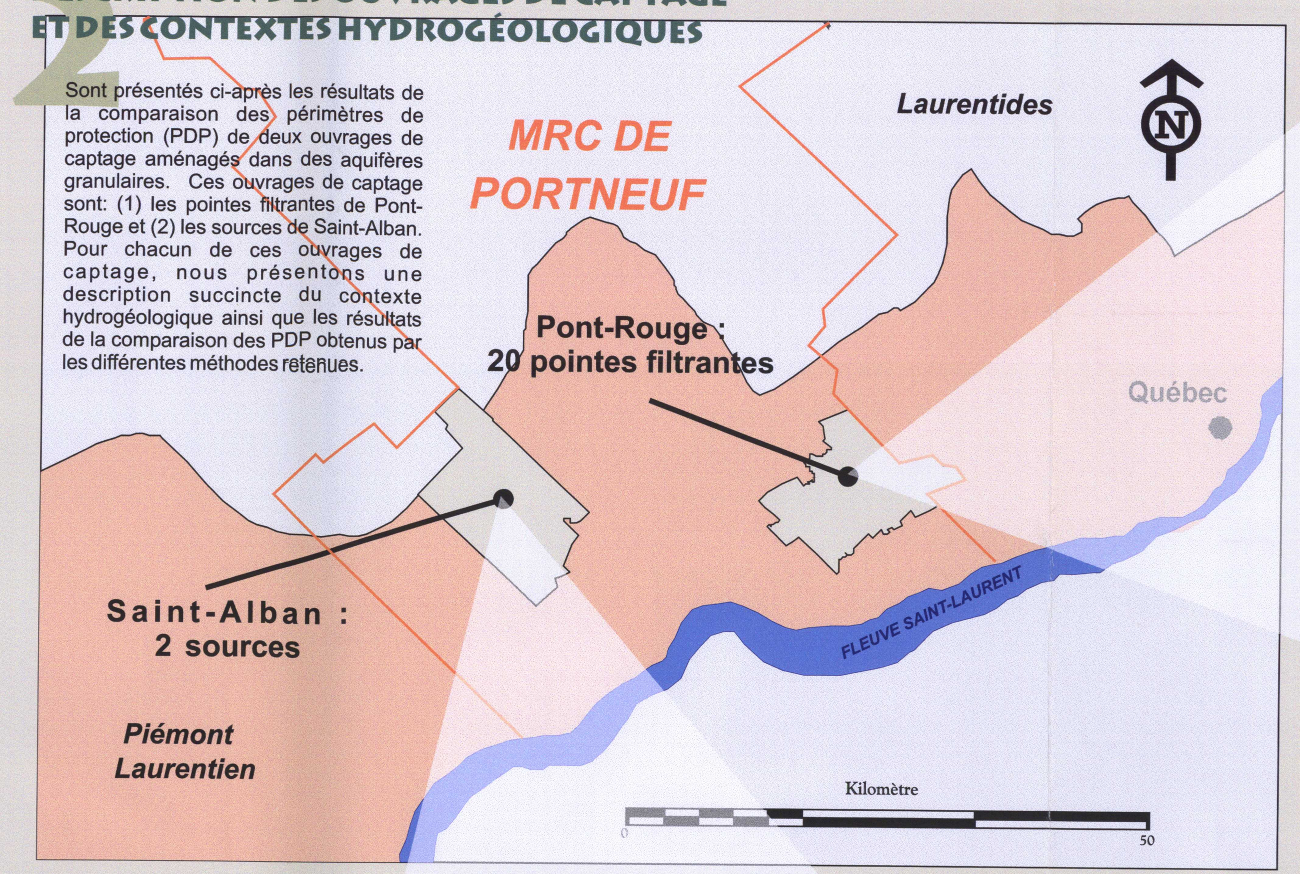
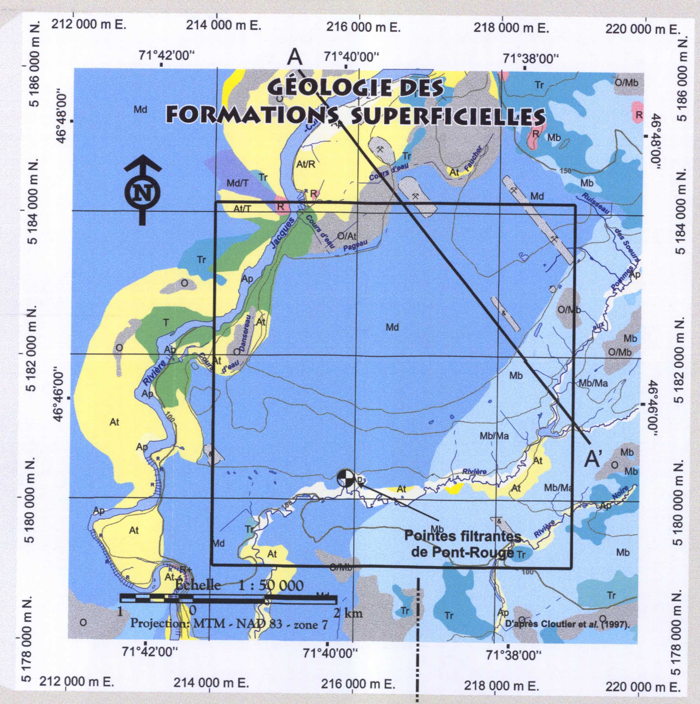


Figure 3 : Illustration de la méthode 3A2E.

2 DESCRIPTION DES OUVRAGES DE CAPTAGE ET DES CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES

Sont présentés ci-après les résultats de la comparaison des périmètres de protection (PDP) de deux ouvrages de captage aménagés dans des aquifères granulaires. Ces ouvrages de captage sont: (1) les pointes filtrantes de Pont-Rouge et (2) les sources de Saint-Alban. Pour chacun de ces ouvrages de captage, nous présentons une description succincte du contexte hydrogéologique ainsi que les résultats de la comparaison des PDP obtenus par les différentes méthodes retenues.



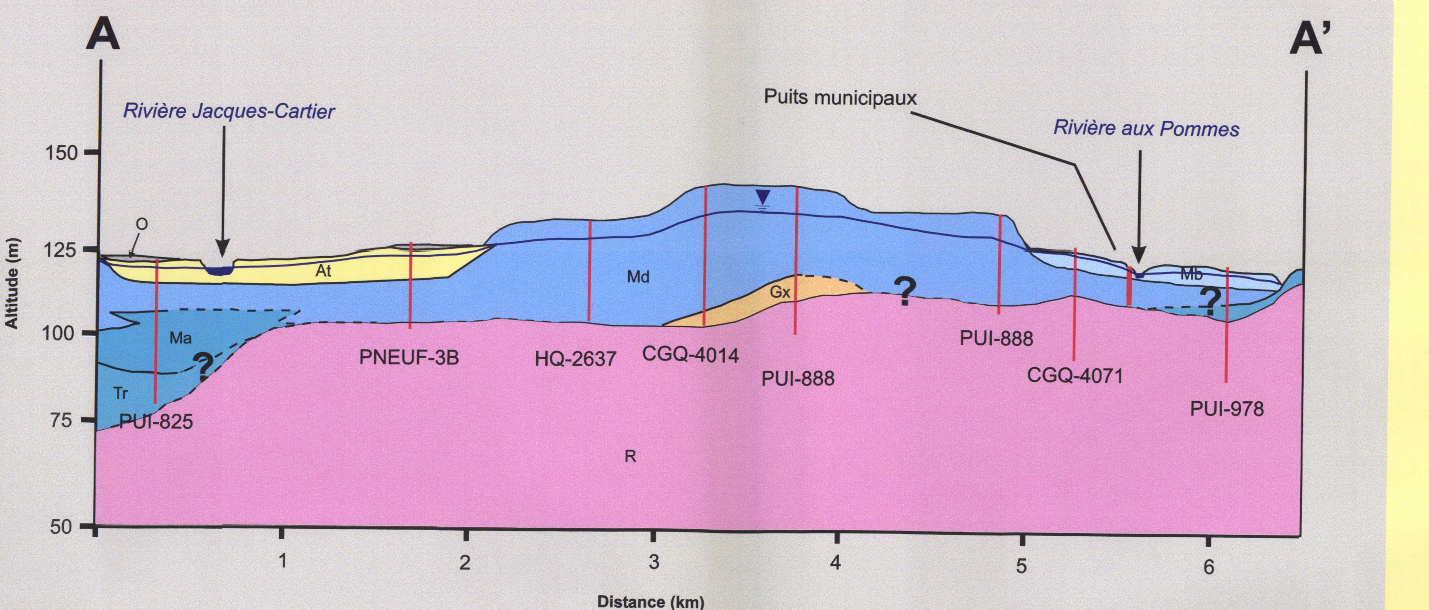


LES POINTES FILTRANTES DE PONT-ROUGE

L'ouvrage de captage d'eau souterraine des municipalités de Pont-Rouge et de Sainte-Jeanne-de-Pont-Rouge est est constitué de 20 pointes filtrantes aménagées dans une faible épaisseur de dépôts meubles (environ 6 mètres) (Figure 6). Ce captage dessert 67% de la population de ces deux municipalités, soit plus de 4000 personnes. Le débit moyen annuel du captage est de 2603 m³/jour. L'aquifère entourant les pointes filtrantes couvre une superficie d'environ 36 km². Ce site est bordé à l'ouest par la rivière Jacques-Cartier, à l'est et au sud par la rivière aux Pommes et au nord par la longitude 46°48' (carte ci-contre).

Les dépôts meubles dans le secteur des pointes filtrantes sont composés de sédiments deltaïques et littoraux associés au retrait de la Mer de Champlain. Ces dépôts sont généralement composés en surface de sable et de gravier. À la base de ces dépôts, on retrouve par endroit un sable argileux. Le roc sous-jacent aux dépôts meubles est un calcaire cristallin appartenant au groupe de Trenton de l'Ordovicien moyen et un gneiss de la province de Grenville. La base imperméable de l'aquifère est constituée de calcaire cristallin, de gneiss et de sable argileux. L'épaisseur saturée est très variable sur l'ensemble de l'aquifère et est estimée en moyenne à 9 m. Cette estimation a été faite à l'aide de forages stratigraphiques et de levés géoradar. La conductivité hydraulique des matériaux composant l'aquifère a été évaluée par des essais de perméabilité *in situ* et par un essai de pompage. Les sables composants l'aquifère sont relativement homogènes et la conductivité hydraulique moyenne sur l'ensemble de l'aquifère est estimée à 7,6x10⁻⁴ m/s. La température moyenne annuelle mesurée sur la période de 1964 à 1990 est de 3,6°C. Les précipitations totales sont de l'ordre de 1271 mm/an dont 991 mm (78%) sous forme de pluie et 279 mm (22%) sous forme de neige. L'infiltration efficace sur l'ensemble du site est estimée à 224 mm/an. Cette estimation a été évaluée par la séparation d'hydrogrammes de puits.

Figure 6 : Coupe hydrostratigraphique représentative de l'aquifère de Pont-Rouge, Qc. La localisation de la coupe A-A' est identifiée sur la carte de la géologie des formations superficielles ci-contre .



LES SOURCES DE SAINT-ALBAN

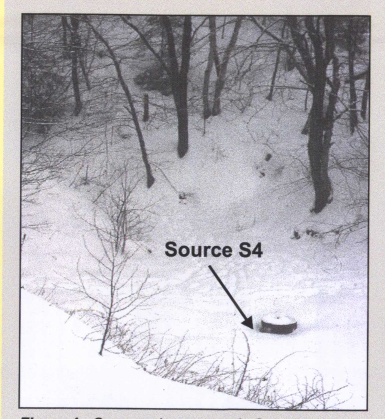


Figure 4 : Ouvrage de captage de Saint-Alban.

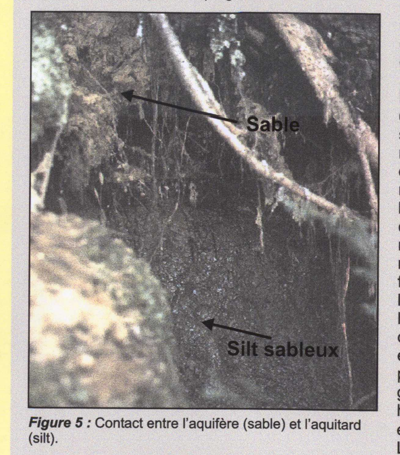
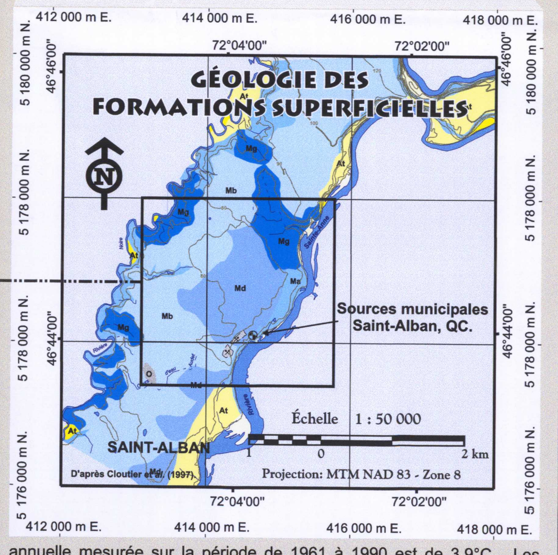


Figure 5 : Contact entre l'aquifère (sable) et l'aquitard (silt).

Le site de Saint-Alban est situé dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent. Cette région est caractérisée par un relief ondulé où les dépôts meubles 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. Les dépôts meubles dans le secteur des sources sont composés de sédiments deltaïques et littoraux associés au retrait de la Mer de Champlain. Ces dépôts sont généralement composés de sable et de gravier. À la base de ces dépôts on retrouve par endroit un silt sableux constituant la base imperméable de l'aquifère. Le roc sous-jacent aux dépôts meubles est principalement un orthogneiss d'âge Précambrien.

L'épaisseur saturée de l'aquifère est très variable sur l'ensemble du site. L'épaisseur saturée moyenne de l'aquifère à proximité des sources est estimée à 5 mètres tandis qu'à l'échelle de l'aire d'alimentation des sources, cette épaisseur est estimée à 3 mètres. Ces estimations ont été réalisées à l'aide de quelques forages stratigraphiques et de levés géoradar. La conductivité hydraulique des matériaux composant l'aquifère a été évaluée par des essais de perméabilité *in situ*. La moyenne géométrique de la conductivité hydraulique calculée par ces essais est évaluée à 1,8x10⁻⁴ m/s. La température moyenne annuelle mesurée sur la période de 1961 à 1990 est de 3,9°C. Les précipitations totales sont de l'ordre de 1079 mm/an dont 852 mm (79%) sous forme de pluie et 227 mm (21%) sous forme de neige. L'infiltration efficace sur l'ensemble du site est estimée à 264 mm/an. Cette estimation a été réalisée par la séparation d'hydrogrammes de puits et par la séparation d'hydrogramme de source.



L'ouvrage de captage d'eau souterraine de la municipalité de Saint-Alban est situé aux abords de la rivière Sainte-Anne dans les limites de la municipalité (Figure 4). L'ouvrage de captage est constitué de deux bassins imperméables captant par gravité l'eau souterraine au contact d'un aquifère sableux et d'un aquitard silto-sableux (Figure 5). Ce captage dessert 50% de la population, soit plus de 580 personnes. Le débit moyen annuel du captage est de 598 m³/jour, soit 113 m³/jour (19%) pour la source S4 et 485 m³/jour (81%) pour la source S6. Le site entourant les sources 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 (carte ci-contre).

LÉGENDE

Sablière
Courbe de niveau
Équidistance des courbes: 10 mètres

QUATERNAIRE

- O — Dépôts organiques
- Ap — Alluvions actuelles
- At — Alluvions des terrasses fluviales
- Md — Sédiments deltaïques
- Mb — Sédiments littoraux, prélittoraux et d'exondation
- Ma — Sédiments fins d'eau profonde
- Gx — Sédiments juxtaglaciaires
- Tr — Till remanié
- T — Till en couverture continue
- Mg — Sédiments remaniés par des glissements de terrain

PRÉ-QUATERNAIRE

- R+ — Roche sédimentaires paléozoïques
- R — Roche ignées et métamorphiques précambriennes

3 COMPARAISON DES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION

L'approche utilisée pour la validation des méthodes de détermination des PDP consiste à comparer le PDP obtenu par la méthode avec le périmètre d'une méthode offrant un bon niveau de précision. Pour la comparaison des PDP éloignés, le périmètre obtenu par cartographie hydrogéologique (piézométrie) a été utilisé comme référence. Cette méthode est précise car le périmètre est obtenu à partir d'une carte piézométrique détaillée.

Pour la comparaison des PDP rapprochés, la zone de transport de 60 jours obtenue par modélisation numérique (MODFLOW et MODPATH) a été utilisée comme base de comparaison. Cette méthode est précise pour déterminer le périmètre rapproché car elle intègre bien l'ensemble des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère en plus d'être calibrée avec plusieurs points de contrôle.

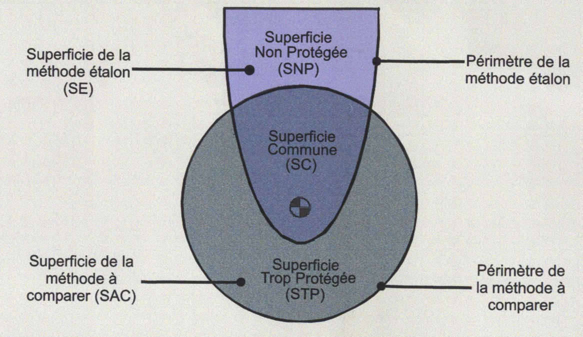


Figure 6 : Paramètres de comparaison des PDP.

Pour permettre de quantifier la précision des différentes méthodes, la comparaison des PDP est faite à l'aide de trois paramètres géométriques (Figure 6) :

Rapport d'aire commune : Défini par le rapport de la superficie commune entre le PDP étalon et le PDP à comparer, sur la superficie du PDP de référence (Équation 1). Ce rapport varie de 0 à 100%. Plus ce rapport est élevé, plus le périmètre de la méthode à comparer est semblable au périmètre de référence.

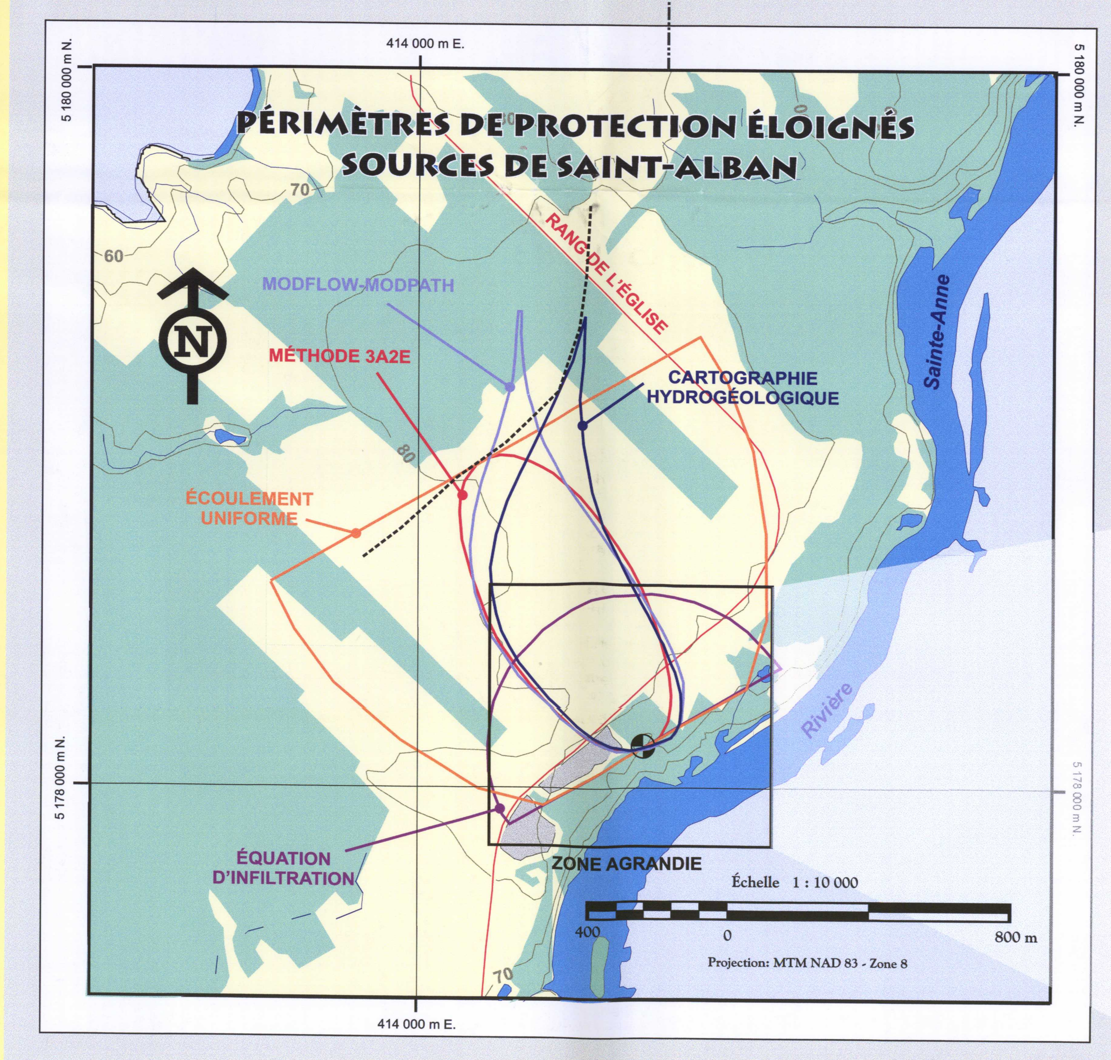
$$RAC = \frac{SC}{SE} \times 100 \qquad \text{Équation [1]}$$

Rapport d'aire non protégée : Défini par le rapport de la superficie non couverte par la méthode à comparer, sur la superficie du PDP de référence (Équation 2). Ce rapport varie de 0 à 100% et est inversement proportionnel au RAC. Plus ce rapport est élevé, moins la méthode à comparer protège adéquatement l'ouvrage de captage.

$$RANP = \frac{SNP}{SE} \times 100 \qquad \text{Équation [2]}$$

Rapport d'aire trop protégée : Défini par le rapport de la superficie trop couverte par la méthode à comparer, sur la superficie du PDP de la méthode à comparer (Équation 3). 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.

$$RATP = \frac{STP}{SAC} \times 100 \qquad \text{Équation [3]}$$



Les tableaux 2 et 3 résument les valeurs des paramètres géométriques de comparaison obtenues pour les PDP éloignés et rapprochés des sources de Saint-Alban . Les tableaux 4 et 5 présentent le même type d'information pour les pointes filtrantes de Pont-Rouge.

Notons que les résultats obtenus par les différentes méthodes apparaissent par ordre décroissant de précision dans les tableaux respectifs.

Tableau 2 : Paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des sources de Saint-Alban.

Méthode	Superficie (m²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
Cartographie hydrogéologique	288 300	100	0	0
Méthode 3A2E	288 084	85	15	15
MODFLOW-MODPATH	319 900	88	12	21
Écoulement uniforme	1 051 000	96	4	74
Équation infiltration	288 084	45	55	55

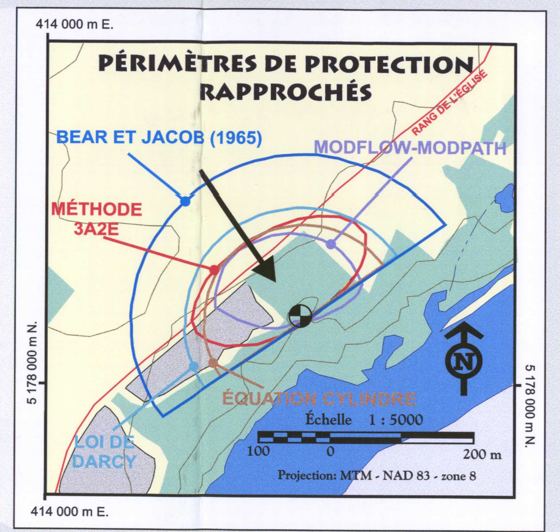


Tableau 3 : Paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des sources de Saint-Alban.

Méthode	Superficie (m²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
MODFLOW-MODPATH	27 990	100	0	0
Équation cylindre	35 816	95	5	26
Méthode 3A2E	35 816	92	8	28
Loi de Darcy	56 706	95	5	53
Bear et Jacob, 1965	124 916	95	5	79

Tableau 4 : Paramètres géométriques de comparaison des PDP éloignés des pointes filtrantes de Pont-Rouge.

Méthode	Superficie (km²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
Cartographie hydrogéologique	3,06	100	0	0
Méthode 3A2E	3,74	95	5	22
MODFLOW-MODPATH	2,85	82	18	15
WhAEM	1,09	34	66	5
Écoulement uniforme	0,58	18	82	5
Équation infiltration	3,74	36	64	71

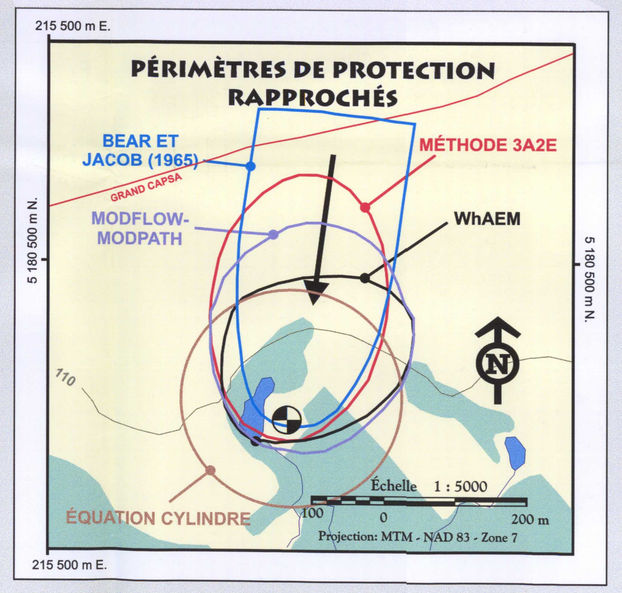
Tableau 5 : Paramètres géométriques de comparaison des PDP rapprochés des pointes filtrantes de Pont-Rouge.

Méthode	Superficie (m²)	Rapport d'aire commune (%)	Rapport d'aire non protégée (%)	Rapport d'aire trop protégée (%)
MODFLOW-MODPATH	71 540	100	0	0
WhAEM	50 700	71	29	0
Méthode 3A2E	73 496	82	18	20
Équation cylindre	73 496	65	35	37
Bear et Jacob, 1965	89 950	68	32	44

LÉGENDE

- Route principale
- Route secondaire
- Rue
- Sentier
- Ligne électrique
- Chemin de fer
- Sablière
- Courbe de niveau
- Direction d'écoulement :
- Limite de partage des eaux souterraines:
- Pointes filtrantes ou sources:

Équidistance des courbes: 10 mètres



Discussion générale

Il ressort que le choix d'une méthode de détermination des PDP devrait se faire selon les critères suivants :

1. La quantité de données disponibles;
2. La complexité du contexte hydrogéologique;
3. Les risques de contamination de l'eau souterraine;
4. Le degré de protection souhaité;

De plus, pour toute méthode de détermination des PDP utilisée, une analyse d'incertitude devrait être conduite et la gestion des PDP devrait inclure les zones d'incertitude et de confiance. Lorsque la méthode se raffine la superficie de la zone d'incertitude diminue et le niveau de confiance augmente.

A partir des résultats présentés précédement, nous pouvons ajouter que les méthodes avec calculs simple et le programme WhAEM ne représentent pas toujours adéquatement les PDP. Ceci s'explique par le fait que les hypothèses de ces modèles ne s'accordent pas avec les caractéristiques des aquifères.

Nous obtenons que dans tous les cas étudiés, la méthode 3A2E représente de façon réaliste les PDP rapprochés et éloignés. Cette méthode doit toujours être utilisée avec précaution parce qu'elle ne tient pas compte directement de l'écoulement, mais imite plutôt la forme des PDP en milieu granulaire.

De plus, la modélisation numérique avec MODFLOW et MODPATH donne une bonne définition des PDP, cependant l'utilisation de ce type de modèle est complexe et nécéssite généralement beaucoup d'information et d'expertise pour la mise en oeuvre.

Même si la cartographie hydrogéologique a été utilisée seulement comme méthode de référence, cette méthode est généralement très précise lorsque plusieurs points de mesure piézométriques et géologiques sont disponibles. Cependant, la cartographie hydrogéologique n'est utile que pour déterminer les PDP éloignés et celle-ci doit être utilisée de façon complémentaire avec d'autres méthodes pour définir les PDP rapprochés.

4 ANALYSE D'INCERTITUDE

Pour illustrer l'analyse d'incertitude, deux méthodes sont retenues : (1) l'équation du temps de transport de Bear et Jacob et (2) la modélisation numérique par différences finies avec MODFLOW et MODPATH. Cette analyse est faite pour les PDP rapprochés des pointes filtrantes de Pont-Rouge.

La procédure utilisée pour caractériser l'incertitude reliée à la détermination des PDP est adaptée de celle d'Evers et Lerner (1997). Cette procédure utilise l'incertitude relative aux différents paramètres hydrogéologiques pour générer une série de PDP. 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 de valeurs est déterminé par une analyse de sensibilité des paramètres considérés par rapport au modèle d'écoulement, calibré par essais et erreurs. L'intervalle de valeurs de chacun des paramètres hydrogéologiques est défini par ses valeurs minimale, médiane et maximale. Pour chacun des paramètres hydrogéologiques considérés, ces valeurs sont permutées et utilisées pour générer différents PDP.

Ces différents PDP sont par la suite superposés pour définir une zone de confiance et une zone d'incertitude (Figure 7). Ces zones sont aussi utilisées pour délimiter le niveau de confiance de la méthode. Le niveau de confiance étant le rapport de la zone de confiance sur la superficie totale couverte par le zone de confiance et la zone d'incertitude.

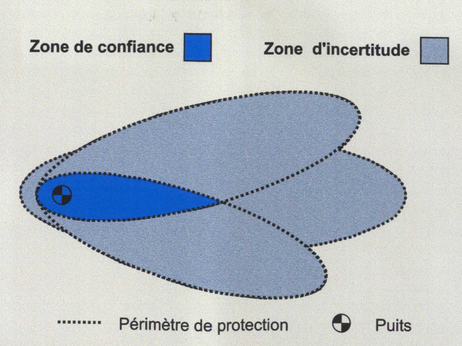


Figure 7 : Zone de confiance et zone d'incertitude.

Équation du temps de transport de Bear et Jacob (1965)

L'analyse d'incertitudes de l'équation du temps de transport de Bear et Jacob (1965) est faite de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme. Les paramètres hydrogéologiques analysés sont la conductivité hydraulique et la porosité efficace. Le niveau de confiance obtenu par la superposition des différents PDP est de 12% (Figure 8).

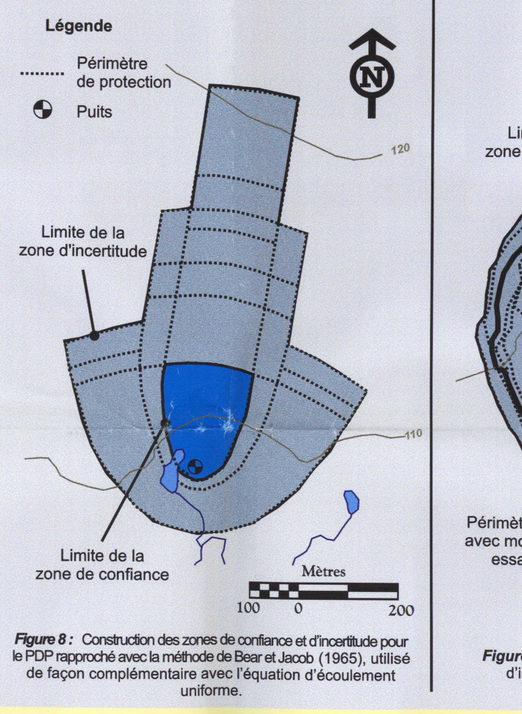


Figure 8 : Construction des zones de confiance et d'incertitude pour le PDP rapproché avec la méthode de Bear et Jacob (1965), utilisé de façon complémentaire avec l'équation d'écoulement uniforme.

MODFLOW et MODPATH

Les paramètres retenus pour l'analyse d'incertitudes avec la modélisation numérique sont la conductance du lit de l'étang situé à proximité des puits municipaux, la conductivité hydraulique et la porosité efficace. Le niveau de confiance obtenu par la superposition des différents PDP est de 32% (Figure 9).

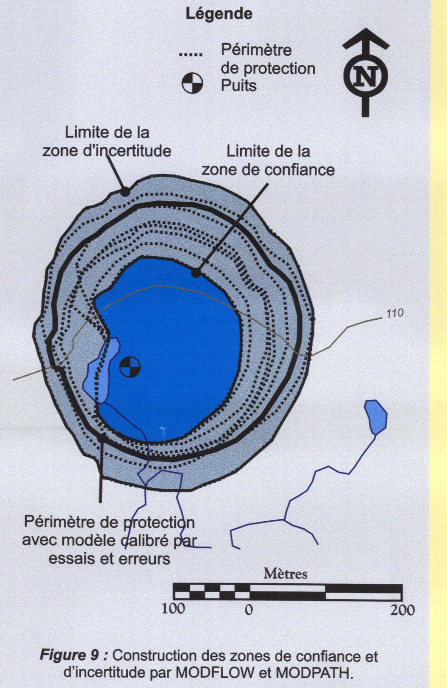


Figure 9 : Construction des zones de confiance et d'incertitude par MODFLOW et MODPATH.

BIBLIOGRAPHIE

Bear, J. et M. Jacob. 1965. *On the movement of water bodies injected into aquifers.* Journal of Hydrology, vol. 3, p. 37-57.

Cloutier, M., M. Parent et A.M. Bolduc. 1997. Géologie des formations superficielles, région de Saint-Marc-des-Carrières, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public 3544, échelle 1:100 000.

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.

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.

McDonald, M.G. et A. W. Harbaugh. 1988. *A modular three-dimensionnal finite-difference ground-water flow model.* Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS, 576 p.

Paradis, D. 2000. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise. INRS-Géoressources, 185 p.

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.

Todd, D. K. 1980. Groundwater Hydrology. Second Edition : États-Unis.

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.

REMERCIEMENTS

Cette contribution a été financée par le programme d'hydrogéologie de la Commission géologique du Canada et a été réalisée conjointement avec l'INRS-Géoressources, le ministère de l'Environnement (MENV), la MRC de Portneuf et l'Université Laval.

Les auteurs aimeraient remercier Nathalie Fagnan pour ses travaux de cartographie hydrogéologique des aquifères du piémont laurentien, Alfonso Rivera pour sa lecture critique, ainsi que la population et les intervenants des municipalités de la MRC de Portneuf pour leur collaboration et l'intérêt qu'ils ont manifesté pour cette étude.

This map has been produced from a scanned version of the original map
Reproduction par numérisation d'une carte sur papier