

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

MICHAEL VERREAULT

B.ING.

ETUDE METHODOLOGIQUE POUR L'ESTIMATION DE L'AIRE
D'ALIMENTATION DE CAPTAGE D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU
COMPLEXE

FEVRIER 2003



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RESUMÉ

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage. On retrouve, entre autres, les relations analytiques, la cartographie piézométrique et la modélisation numérique.

L'objectif de ce projet de recherche consiste en l'élaboration de méthodes permettant d'estimer le plus exactement possible l'aire d'alimentation d'un puits de pompage en milieu anisotrope et hétérogène. Deux volets majeurs ont été développés : les travaux d'investigation sur le terrain et une méthode d'implantation optimale de piézomètres (IOP). Les essais ont été réalisés à Saint-Félicien et plus particulièrement dans l'aire d'alimentation présumée du puits de pompage PE-3, situé en bordure de la rivière à l'Ours.

Les travaux d'investigation sur le terrain ont comporté des essais de traçage en eau souterraine et des levés de sismique réfraction. Trois essais de traçage ont été exécutés dans les environs du puits PE-3 de Saint-Félicien. Ces essais, de type convergent se sont déroulés pendant que le puits PE-3 alimentait la municipalité en eau potable. Le maintien d'une eau potable de qualité au puits a introduit des contraintes supplémentaires à la réalisation des essais, concernant notamment la sélection du traceur et l'estimation préalable des concentrations attendues dans l'eau pompée. Les résultats des essais de traçage démontrent le lien hydraulique direct entre le puits de pompage PE-3 et l'eau qui s'infiltré sur la rive opposée de la rivière à l'Ours.

Quant aux levés de sismique réfraction, ils ont permis d'estimer l'épaisseur de la section de l'aquifère normale à la direction de l'écoulement souterrain. Suivant la loi de Darcy, la surface de cette section est transposée en surface et correspond à la largeur de l'aire d'alimentation.

L'estimation de l'aire d'alimentation à partir de la méthode d'IOP permet d'estimer l'aire d'alimentation par cartographie piézométrique. La disposition des puits d'observation est critique pour la justesse de l'estimation. Cette méthode est appropriée en aquifère d'extension sub-horizontale et constitué d'un milieu poreux mais elle est inefficace en milieu fracturé si les fractures sont verticales.

La méthode d'IOP ainsi que le traçage de l'eau souterraine constituent des outils supplémentaires prometteurs pour l'estimation de l'aire d'alimentation et du temps de transfert de l'eau souterraine s'écoulant vers un puits.

REMERCIEMENTS

D'abord, je remercie mon directeur, M. Alain Rouleau pour ses judicieux conseils, sa rigueur et le support qu'il m'a offert tout au long de ce travail de recherche. Aussi, je remercie M. Henrik Rassmussen, étudiant au doctorat avec lequel j'ai eu une multitude de discussions constructives sur le développement des méthodes présentées dans ce mémoire et pour son aide au cours des travaux d'investigation sur le terrain. De plus, je remercie M. Malcolm Field du U.S.E.P.A. pour ses précieux conseils sur les essais de traçage en eau souterraine, M. Reynald Duberger pour son aide lors des levés de sismique réfraction et leur interprétation, M. Alexandre Aubin pour son aide lors des essais de traçage, ainsi que les membres de mon comité de recherche, messieurs Réal Daigneault et Denis W. Roy, pour leur aide et leur jugement face aux idées présentées dans ce mémoire. Je remercie Ville de Saint-Félicien pour nous avoir donné accès aux données hydrogéologiques, ainsi qu'aux puits de pompage et d'observation de leur système d'alimentation en eau potable; la MRC du Domaine du Roy pour nous avoir accordé leur support ainsi que les fichiers géomatiques nécessaires. Je remercie Environnement Canada pour le prêt de leur fluoromètre portable; le département de sciences fondamentales de l'Université du Québec à Chicoutimi pour l'utilisation de leur fluoromètre, Récupère-Sol et la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi pour les bourses d'étude qu'ils m'ont accordées. Finalement, je remercie mon épouse, Isabelle Racine pour son aide dans l'édition de ce manuscrit.

Ces travaux sur l'estimation de l'aire d'alimentation de puits de captage en eau souterraine ont été financés par le Ministère de l'Environnement du Québec, dans le cadre du programme d'aide à la recherche et au développement en environnement (PARDE), de même que par la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi (FUQAC).

TABLE DES MATIÈRES

RESUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DE MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	iv
1. INTRODUCTION.....	1
2. PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
2.1 Rayon fixe ou calculé.....	3
2.2 Relations analytiques.....	4
2.3 Cartographie piézométrique.....	9
2.4 Modélisation numérique.....	11
2.5 Autres méthodes.....	11
2.6 Principaux facteurs d'écart.....	12
2.6.1 Milieux poreux, anisotropes et hétérogènes.....	13
2.6.2 Aquifères en milieux rocheux fracturés.....	13
2.6.3 Interaction entre un plan d'eau et un aquifère.....	15
2.6.4 Un puits dont la crépine est sur une partie seulement de l'épaisseur de l'aquifère.....	17
2.7 Objectifs.....	20
3. DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE.....	21
3.1 Variabilité de l'estimation de l'aire d'alimentation.....	28

4. TRAVAUX D'INVESTIGATION SUR LE TERRAIN.....	33
4.1 Essais de traçage en eau souterraine.....	33
4.1.1 Principes de base des essais de traçage.....	34
4.1.2 Sélection du traceur.....	40
4.1.3 Estimation de la quantité de traceur à l'injection.....	43
4.1.4 Résultats des essais de traçage.....	48
4.2 Sismique réfraction.....	54
4.2.1 Principe de la méthode.....	54
4.2.1 Les levés effectués et les résultats.....	55
4.3 Discussion sur les méthodes d'investigation.....	63
4.3.1 Les essais de traçage.....	63
4.3.2 La sismique réfraction.....	67
5. IMPLANTATION OPTIMALE DE PIÉZOMÈTRES.....	69
5.1 Description des scénarios virtuels.....	70
5.1.1 Scénario représentant un ancien delta.....	71
5.1.2 Scénario représentant une vallée fossile.....	73
5.1.3 Scénario représentant un milieu rocheux fracturé.....	75
5.2 Élaboration de la méthode.....	79
5.2.1 Concepts fondamentaux.....	82
5.2.2 Développement de la méthode.....	83
5.2.2.1 Agencement proximal.....	85
5.2.2.2 Agencement distal.....	90
5.2.2.3 Méthode de chevauchement des portions interpolées	90

5.2.2.4 Augmentation de la dimension des triangles	92
5.3 Exemple et résultats	93
5.3.1 Exemple.....	94
5.3.2 Résultats.....	99
5.4 Discussion de l'IOP.....	103
6. CONCLUSION.....	108
7. RÉFÉRENCES.....	113
ANNEXE I Méthodes, d'injection, d'échantillonnage et d'analyse des traceurs.....	120
ANNEXE II Levés de sismique réfraction.....	128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Tableau de la variabilité de l'estimation de l'aire d'alimentation.....	31
Tableau 4.1 : Résumé des résultats des essais de traçage.....	53
Tableau 5.1 : Résumé de la démarche de l'IOP.....	90
Tableau 5.2 : Sommaire des résultats obtenus.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 :	Illustration schématique de la section normale à l'écoulement.....	5
Figure 2.2 :	Vue en plan et en coupe de l'aire d'alimentation.....	6
Figure 2.3 :	Section illustrant les principes de la méthode de Banton (1998).....	10
Figure 2.4 :	Section montrant l'importance de l'infiltration verticale.....	10
Figure 2.5 :	Structure d'un delta de rivière.....	14
Figure 2.6 :	Effet de la fracturation sur l'estimation de l'aire d'alimentation.....	16
Figure 2.7 :	Écoulement en direction d'une rivière à vallée symétrique.....	18
Figure 2.8 :	Section avec un puits de pompage pénétrant partiellement un aquifère...	19
Figure 3.1 :	Vue en plan de la topographie du secteur à l'étude.....	22
Figure 3.2 :	Section schématique du site à l'étude.....	24
Figure 3.3 :	Carte géologique du Lac St-Jean.....	25
Figure 3.4 :	Rapport de forage du piézomètre UQAC-1.....	26
Figure 3.5 :	Carte piézométrique du secteur à l'étude.....	29
Figure 3.6 :	Variation de l'estimation de la dimension de l'aire d'alimentation.....	29
Figure 3.7 :	Variation de l'estimation de l'orientation de l'aire d'alimentation.....	30
Figure 4.1 :	Schéma de la dispersion et de l'adsorption	37
Figure 4.2 :	Schéma d'une courbe de restitution typique.....	37
Figure 4.3 :	Concept d'analyse présenté par Field (1999).....	39
Figure 4.4 :	Graphique de l'intensité de la fluorescence de l'uranine par rapport à sa concentration.....	39
Figure 4.5 :	Graphique de l'intensité de la fluorescence de l'uranine	

en fonction du pH.....	47
Figure 4.6 : Plan de localisation des puits d'injection de l'uranine.....	47
Figure 4.7 : Section schématique des injections no 1 et 2 du traceur.....	49
Figure 4.8 : Section schématique de l'injection no 3 du traceur.....	49
Figure 4.9 : Courbe de restitution pour l'essai de traçage no.1.....	51
Figure 4.10 : Courbe de restitution pour l'essai de traçage no.2.....	51
Figure 4.11 : Courbe de restitution pour l'essai de traçage no.3.....	53
Figure 4.12 : Section normale à l'axe de l'écoulement souterrain.....	53
Figure 4.13 : Vue en plan de la localisation des lignes de sismique réfraction.....	57
Figure 4.14 : Section résultant du levé de sismique no.1.....	57
Figure 4.15 : Graphique du temps des arrivées pour la ligne de sismique no.1.....	58
Figure 4.16 : Graphique de la vitesse de propagation des ondes pour la ligne no.1.....	58
Figure 4.17 : Section résultant du levé de sismique no.2.....	60
Figure 4.18 : Graphique de la vitesse de propagation des ondes pour la ligne no.1.....	60
Figure 4.19 : Graphique du temps des arrivées pour la ligne de sismique no.3.....	61
Figure 4.20 : Section résultant du levé de sismique no.3.....	61
Figure 4.21 : Section résultant du levé de sismique no.4.....	62
Figure 4.22 : Orientation estimée de l'aire d'alimentation basée sur les résultats des essais de traçage.....	65
Figure 5.1 : Vue en coupe du site représentant un ancien delta.....	72
Figure 5.2 : Vue en 3D du site représentant un ancien delta.....	72
Figure 5.3 : Aire d'alimentation du site représentant un ancien delta.....	74
Figure 5.4 : Vue en 3D du site représentant une ancienne rivière	74

Figure 5.5 :	Aire d'alimentation du site représentant une ancienne rivière.....	76
Figure 5.6 :	Vue en 3D du site représentant un massif rocheux fracturé.....	76
Figure 5.7 :	Aire d'alimentation du site représentant un massif rocheux fracturé.....	78
Figure 5.8 :	Effet d'une fracture sur l'écoulement souterrain.....	78
Figure 5.9 :	Méthode d'interpolation des voisins naturels.....	81
Figure 5.10 :	Méthode d'interpolation de la triangulation.....	81
Figure 5.11 :	Méthode de la cartographie piézométrique.....	84
Figure 5.12 :	Vue en plan du concept de l'IOP.....	84
Figure 5.13 :	Agencement d'implantation proximal de piézomètres.....	86
Figure 5.14 :	Polygones de Thiessen générés par la disposition des points du patron proximal.....	86
Figure 5.15 :	Lignes isopièzes circulaires.....	88
Figure 5.16 :	Lignes isopièzes isotropes.....	88
Figure 5.17 :	Incertitude de l'interpolation de la limite aval de l'aire d'alimentation...	91
Figure 5.18 :	Vue en plan du patron d'implantation distal de piézomètres.....	91
Figure 5.19 :	Disposition des piézomètres de sortie.....	95
Figure 5.20 :	Exemple ; première étape de l'estimation.....	95
Figure 5.21 :	Exemple ; seconde étape de l'estimation.....	96
Figure 5.22 :	Exemple ; troisième étape de l'estimation.....	96
Figure 5.23 :	Exemple ; quatrième étape de l'estimation.....	97
Figure 5.24 :	Exemple ; cinquième étape de l'estimation.....	97
Figure 5.25 :	Exemple ; sixième étape de l'estimation.....	98

Figure 5.26 : Résultats; site virtuel de l'ancienne rivière.....	101
Figure 5.27 : Résultats; site virtuel de l'ancien delta.....	101
Figure 5.28 : Résultats; site virtuel du massif rocheux fracturé.....	102
Figure 5.29 : Implication d'un mauvais emplacement de piézomètres.....	102
Figure 5.30 : Éléments de stratégie de l'IOP.....	106
Figure A.1 : Schéma de fonctionnement d'une bouteille de Mariotte.....	124
Figure A.2 : Schéma du tube à l'intérieur du piézomètre.....	124
Figure A.3 : Photo illustrant le système de connexion rapide utilisé.....	125
Figure A.4 : Relevé de sismique de mauvaise qualité.....	130
Figure A.5 : Relevé de sismique de bonne qualité.....	130

INTRODUCTION

Au Québec environ 1 500 000 personnes s'abreuvent d'eau provenant de sources souterraines. Ce chiffre représente un peu plus de 20 % de toute la population de la province de Québec (MENVIQ, 1995). Il est primordial de protéger la ressource et, pour cette raison, le Ministère de l'Environnement du Québec a produit un guide (MENVIQ, 1995) pour la délimitation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau souterraine. Les auteurs de ce guide distinguent trois types de périmètres de protection; les périmètres immédiat, rapproché et éloigné. Le périmètre immédiat consiste en une zone clôturée d'un rayon de 30 m autour du puits. Le périmètre rapproché s'établit en prenant compte du temps de transfert de l'eau souterraine. Les temps utilisés pour établir les distances du périmètre de protection rapproché correspondent aux temps de survie des bactéries et des virus, estimés à 200 et 550 jours respectivement. Le périmètre éloigné correspond à l'aire d'alimentation du puits, c'est à dire cette portion du territoire sur laquelle toute l'eau qui s'infiltré aboutira tôt ou tard au puits.

Divers pays utilisent les mêmes approches que celles proposées par le MENVIQ, mais avec des critères légèrement différents. Essentiellement, pour estimer le périmètre de protection rapprochée, la plupart de ces pays recommandent les relations analytiques,

tandis que pour estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage, ils réfèrent au guide édité par le United State Environmental Protection Agency (USEPA, 1987).

Comme la ressource en eau souterraine devient de plus en plus importante, l'estimation de l'aire d'alimentation de puits de captage d'eau souterraine nécessitera des efforts considérables dans les années à venir. Il y a donc lieu de développer des méthodes qui permettent d'estimer l'aire d'alimentation avec davantage d'exactitude.

Le texte qui suit suggère des méthodes pour améliorer l'estimation de l'aire d'alimentation de puits de pompage. Celui-ci est séparé en sept chapitres, soit la problématique ainsi qu'une revue des principales méthodes existantes, une description du site à l'étude, les méthodes d'investigation sur le terrain, la présentation d'une méthode d'implantation optimale de piézomètres, une discussion et une conclusion.

Le site utilisé pour les travaux de terrains est celui du puits PE-3 de Saint-Félicien. Celui-ci a été sélectionné pour la complexité de son aquifère (milieu rocheux fracturé) et à cause de l'existence de nombreuses données disponibles.

PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LITTÉRATURE

Plusieurs méthodes ont déjà été mises en œuvre, particulièrement en Europe et aux États-Unis, pour estimer l'aire d'alimentation de puits de pompage. Parmi celles-ci, on retrouve notamment la détermination d'un rayon fixe ou calculé, les relations analytiques, la cartographie piézométrique, la modélisation numérique et d'autres méthodes sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Plusieurs auteurs ont effectué des revues et des analyses critiques de ces méthodes d'estimation de l'aire d'alimentation (USEPA, 1987; Bradbury, 1991; Paradis, 2000).

Une catégorie importante de méthodes d'estimation de l'aire d'alimentation est basée sur l'utilisation de solutions analytiques d'équations différentielles décrivant l'écoulement de l'eau souterraine. Généralement, ces solutions analytiques sont développées pour des milieux isotropes et homogènes, négligent l'infiltration verticale et supposent que le puits pénètre complètement l'aquifère pompé (Bear et Jacobs, 1965; Grubb, 1993).

2.1 Rayon fixe ou calculé

La méthode du rayon fixe consiste à établir un périmètre de protection circulaire de rayon arbitraire autour d'un puits de pompage. Le rayon calculé est un cercle dont la

surface correspond à la recharge permettant d'alimenter un puits de pompage. Ces méthodes ne sont aucunement basées sur les propriétés hydrogéologiques du milieu.

2.2 Relations analytiques

La méthode basée sur les relations analytiques proposées par Bear et Jacobs (1965) et reprises par Todd (1980) consiste à évaluer, dans un aquifère confiné, les dimensions d'une section normale à l'écoulement de l'eau souterraine et satisfaisant la loi de Darcy (1856).

$$Q = KiA \quad (1)$$

Où:

- $A = L \times b$ [L^2]
- Q : débit d'eau souterraine traversant une section A [L^3T^{-1}]
- K : conductivité hydraulique [LT^{-1}]
- i : gradient hydraulique naturel horizontal []
- A : section normale à la direction de l'écoulement souterrain [L^2]
- L : largeur de la section A [L]
- b : épaisseur saturée de l'aquifère [L]

Par extension souvent paradoxale du concept, la largeur de cette section est transposée en surface pour estimer la largeur de l'aire d'alimentation à différents endroits (Figures 2.1 et 2.2). Les équations de Bear et Jacobs (1965) superposent l'écoulement régional et l'effet du pompage : la superposition d'un écoulement rectiligne parallèle et d'un écoulement convergent résulte notamment en la présence d'une limite aval de l'aire d'alimentation.

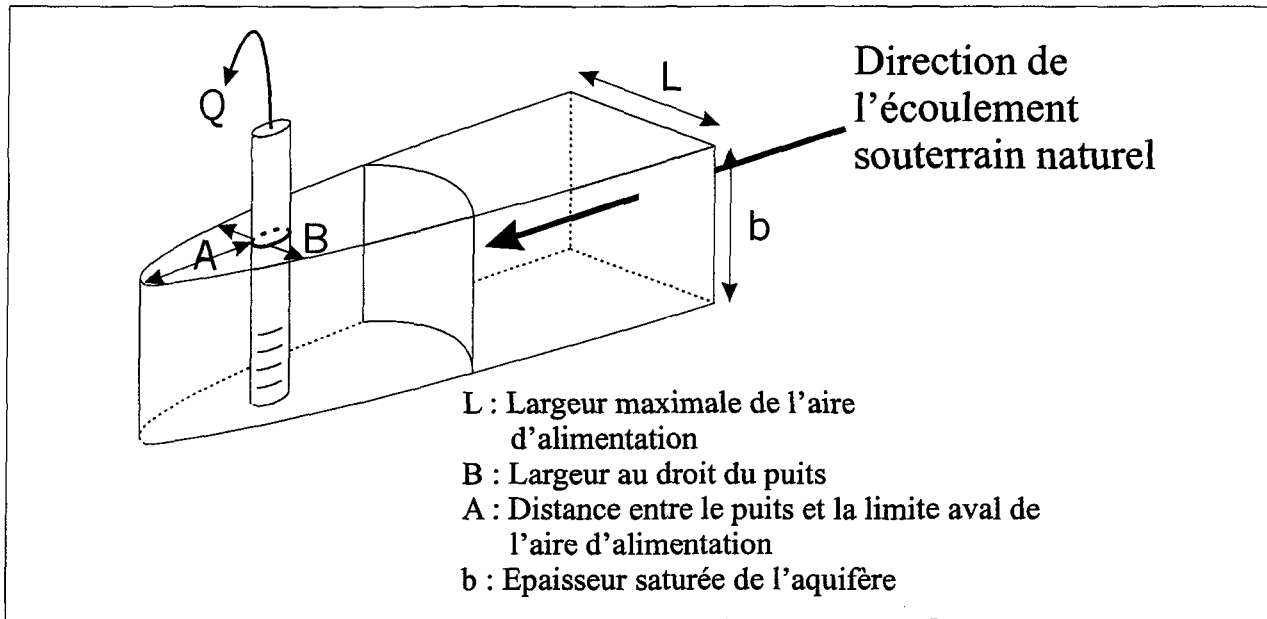


Figure 2.1: Illustration schématique de la surface normale à l'écoulement souterrain calculée avec les relations proposées par Bear et Jacobs (1965). Lorsque la largeur maximale de l'aire d'alimentation est atteinte, on peut appliquer simplement la loi de Darcy (1856) afin de déterminer la largeur "L" en supposant une épaisseur "b".

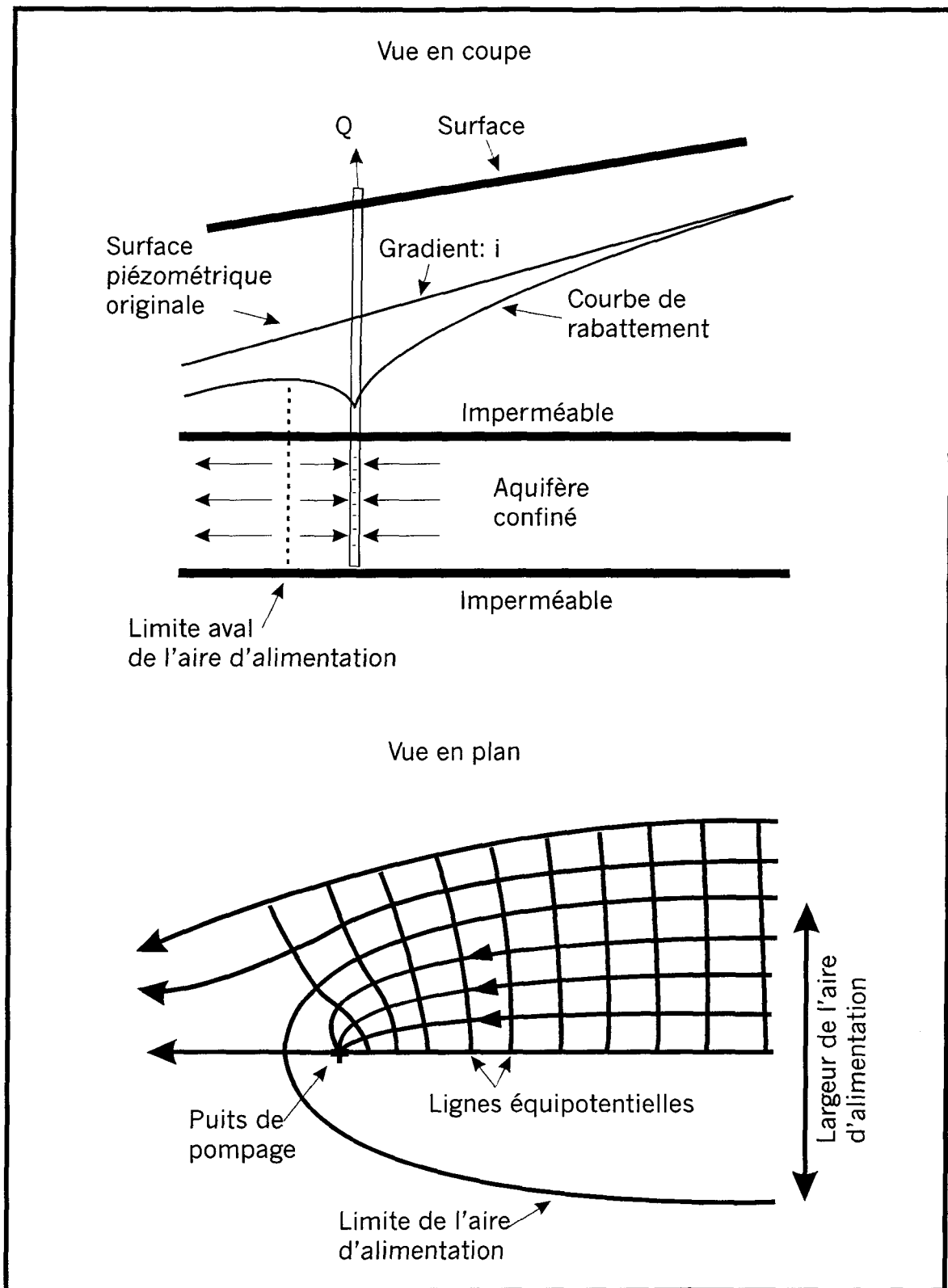


Figure 2.2: Vue en coupe et en plan de l'aire d'alimentation estimée dans un milieu isotrope, homogène et d'épaisseur constante.

Une variante de cette méthode, proposée par Grubb (1993), s'applique à un aquifère à nappe libre en utilisant les hypothèses de Dupuit (1863); cette variante est basée essentiellement sur les mêmes principes que celle de Bear et Jacobs (1965) et elle néglige aussi l'infiltration verticale.

Les trois paramètres présentés ci-dessous doivent être calculés afin d'estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage avec les relations proposées par Bear et Jacobs (1965). Les schémas des figures 2.1 et 2.2 illustrent la forme quasi-parabolique de l'aire d'alimentation estimée à l'aide de cette méthode ainsi que les paramètres associés, lesquelles sont définis ici.

A : distance entre le puits de pompage et la limite aval de l'aire d'alimentation.

$$A = \frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (2)$$

L : largeur maximale de l'aire d'alimentation en amont hydraulique.

$$L = \frac{Q}{Kbi} \quad (3)$$

B : largeur de la zone de captage au droit du puits.

$$B = \frac{L}{2} \quad (4)$$

L'estimation des paramètres A, B et L selon la méthode développée par Grubb (1993) s'effectue à l'aide des relations mathématiques suivantes :

$$A = \frac{Q\partial l}{\pi K(h_1^2 - h_2^2)} \quad (5)$$

$$L = \frac{2Q\partial l}{K(h_1^2 - h_2^2)} \quad (6)$$

$$B = \frac{L}{2} \quad (7)$$

Où:

∂l : distance entre 2 points de mesure de charge hydraulique [L].

h_1 : hauteur de la charge hydraulique par rapport à la base de l'aquifère au premier point de mesure [L].

h_2 : hauteur de la charge hydraulique par rapport à la base de l'aquifère au deuxième point de mesure [L].

Banton (1998) a développé une approche pour considérer l'effet de l'infiltration verticale sur l'estimation de l'aire d'alimentation en nappe libre. Les relations mathématiques proposées par Banton (1998) supposent une composante verticale homogène de l'écoulement souterrain qui permet de déterminer une limite amont de l'aire d'alimentation (Figure 2.3). Ayant estimé cette limite amont, on peut évaluer une largeur de l'aire d'alimentation produisant une surface nécessaire à l'alimentation du puits de pompage en supposant une valeur de l'infiltration annuelle. Ce modèle néglige l'emplacement de la crépine du puits de pompage et considère que l'écoulement vertical n'est pas modifié à proximité du puits de pompage.

D'autres équations, développées afin d'estimer des valeurs de temps de parcours de l'eau souterraine, peuvent être utilisées pour estimer les périmètres de protection rapprochés. Une équation analytique développée par Bear et Jacobs (1965) est la suivante :

$$t = \frac{nd}{Ki} \frac{Qn}{2\pi K^2 bi^2} \times \ln \left(1 + \frac{2\pi Kbid}{Q} \right) \quad (8)$$

Où :

n : porosité efficace []

d : distance recherchée en amont du puits [L]

t : temps de transfert [T]

Cette relation mathématique considère uniquement l'écoulement horizontal; elle néglige par exemple, le temps nécessaire à l'infiltration verticale. À cause de cette simplification, cette relation surestime nécessairement les dimensions du périmètre de protection rapprochée. Dans des aquifères captifs, les bactéries et les virus qui doivent d'abord traverser l'aquitard, pourraient devenir inoffensifs avant même d'atteindre l'aquifère (Figure 2.4).

2.3 Cartographie piézométrique

La cartographie piézométrique peut servir à estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage en tenant compte des lignes équipotentiellles en condition de pompage. En supposant que les lignes d'écoulement souterrain sont normales aux équipotentiellles, il est simple de tracer les limites de l'aire d'alimentation. Cette méthode est efficace car elle tient compte implicitement de l'hétérogénéité du milieu. En effet, la piézométrie est le reflet de la géologie et un changement latéral de lithologie engendre une variation de la direction de l'écoulement souterrain. Cependant, pour être efficace, cette méthode exige l'implantation de nombreux piézomètres et à des localisations sélectionnées.

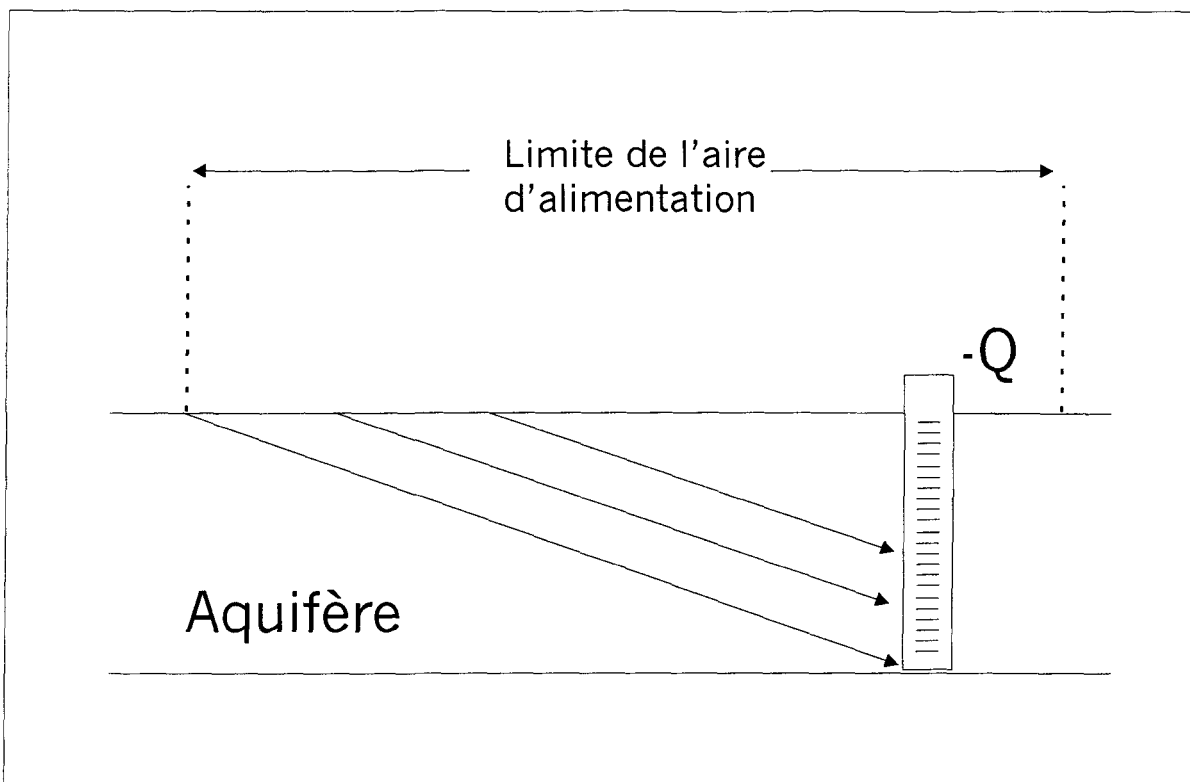


Figure 2.3: Section illustrant la géométrie du système supposé par la méthode de Banton (1998) applicable dans un aquifère à nappe libre. Cette méthode suppose que le puits de pompage n'influe pas sur la direction de l'écoulement souterrain.

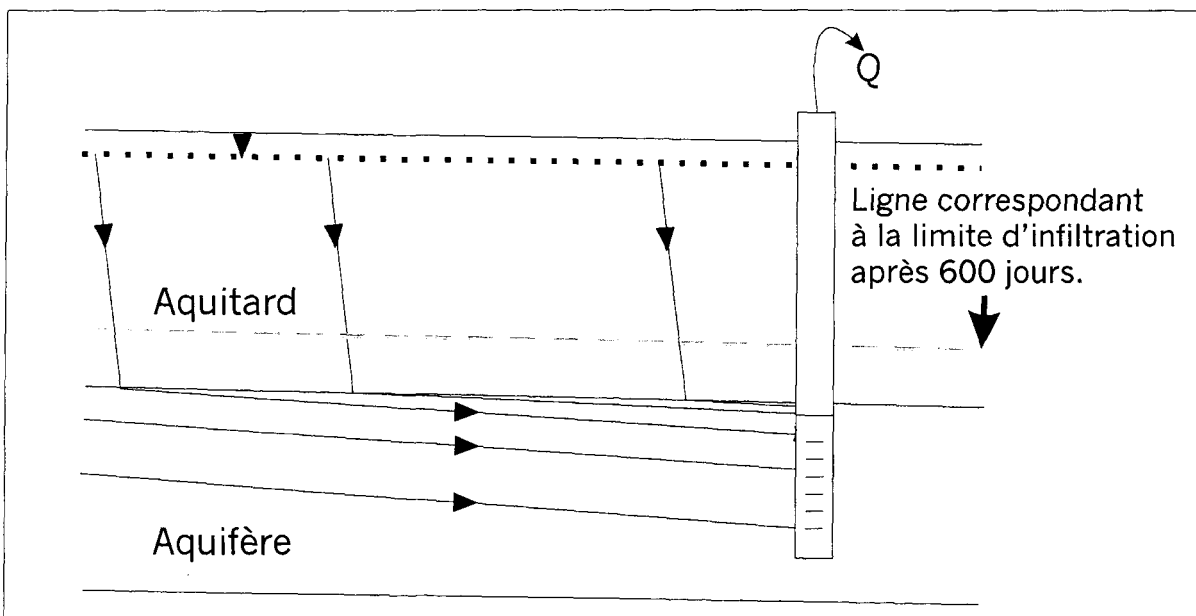


Figure 2.4 : Section montrant un aquifère à nappe confinée. L'épaisseur de l'aquitard est suffisante pour que le temps d'infiltration de l'eau souterraine et des contaminants potentiels soit supérieur à 500 jours (temps de survie des virus). Dans ce cas, le périmètre de protection rapprochée pourrait être nul.

2.4 Modélisation numérique

Plusieurs travaux ont été effectués sur la détermination de l'aire d'alimentation à l'aide de modèles numériques (Bradbury et Muldoon, 1994; Earle et Middleman, 1993; Scalzo, 1998; Vieux et al., 1998). Les deux méthodes de calcul les plus utilisées sont la méthode par différence finie et celle par éléments finis. Elles sont toutes deux basées sur les équations différentielles de l'écoulement et sur des principes de conservation de masse. La méthode par éléments finis permet un maillage triangulaire qui simplifie la connexion entre les couches, tandis que la méthode par différence finie nécessite un maillage rectangulaire.

Les simulations numériques dépendent en grande partie de la qualité du modèle conceptuel utilisé. Ce modèle doit contenir l'information nécessaire et posséder les simplifications requises. Aussi, la calibration doit être optimale afin de minimiser l'erreur d'estimation de l'aire d'alimentation. Les conditions aux limites imposées doivent être relativement loin du ou des puits de captage afin de ne pas limiter l'influence de ceux-ci sur l'écoulement souterrain.

2.5 Autres méthodes

Plusieurs autres méthodes moins fréquemment utilisées ont été développées. Parmi celles-ci, on peut nommer les éléments analytiques, (Haitjeima et al., 1994) et la méthode de 3A2E (Aval, Amont, Aire, Écoulement. Ellipse) développée par USEPA (1987) et modifiée par Paradis (2000). Les éléments analytiques utilisent entre autres,

des algorithmes numériques pour approximer spatialement et temporellement les relations analytiques. Cependant, afin de réaliser un traçage de particules, ces logiciels utilisent uniquement des algorithmes numériques. La méthode 3A2E est une méthode combinée utilisant les relations analytiques et la cartographie hydrogéologique. Il en résulte une ellipse dont la superficie se calcule soit par l'infiltration verticale ou par bilan de masse.. Ces autres méthodes sont décrites par Paradis (2000).

2.6 Principaux facteurs d'écart

Un certain nombre de facteurs entraînent des écarts souvent importants entre l'aire d'alimentation réelle et l'aire d'alimentation estimée et ce, peu importe la méthode d'analyse. Ces facteurs rendent complexe l'estimation de l'aire d'alimentation. Ils sont reliés à l'architecture interne des aquifères. Mentionnons entre autres les facteurs suivants :

- Un aquifère constitué d'un milieu poreux, anisotrope, hétérogène et à géométrie interne complexe;
- Un aquifère dont les limites sont irrégulières, tant latéralement qu'à son sommet et à sa base;
- Un aquifère constitué d'une formation de roche fracturée;
- Un aquifère dans lequel il y a des interactions et des échanges entre les eaux souterraines et un cours d'eau de surface;
- Un puits qui capte l'eau d'une portion seulement de l'épaisseur de l'aquifère.

2.6.1 Milieux poreux, anisotropes et hétérogènes

Dans la grande majorité des cas, un aquifère est constitué de plus d'une lithologie ou a une épaisseur variable. Les différentes couches faisant partie de l'aquifère entraînent des variations de la direction de l'écoulement souterrain et la formation de chenaux d'écoulement préférentiel. Par exemple un paléo-delta peut être composé de plusieurs couches de matériel plus ou moins perméables (figure 2.5). Dans un tel cas, un horizon plus graveleux et par conséquent plus perméable, peut constituer un conduit majeur pour l'eau souterraine.

Si un aquifère est d'épaisseur variable, la largeur de la section normale à l'écoulement souterrain nécessaire à l'alimentation d'un puits de pompage sera aussi variable. Même en supposant un aquifère homogène, dans un tel cas la largeur de l'aire d'alimentation sera variable.

2.6.2 Aquifère en milieu rocheux fracturé

Les aquifères fracturés sont souvent les plus difficiles à analyser. En effet, les réseaux de fractures, leur densité et leur orientation sont souvent imprévisibles et difficiles à conceptualiser. Plusieurs chercheurs ont tenté de définir des méthodes et des approches pour évaluer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage dans un aquifère fracturé. Notamment, Bradbury (1991), Bradbury et Muldoon (1994) et Risser et Barton (1995). Bradbury et Muldoon (1994) ont démontré, à l'aide de l'analyse numérique, que la fracturation du socle rocheux a un impact important sur la forme de l'aire

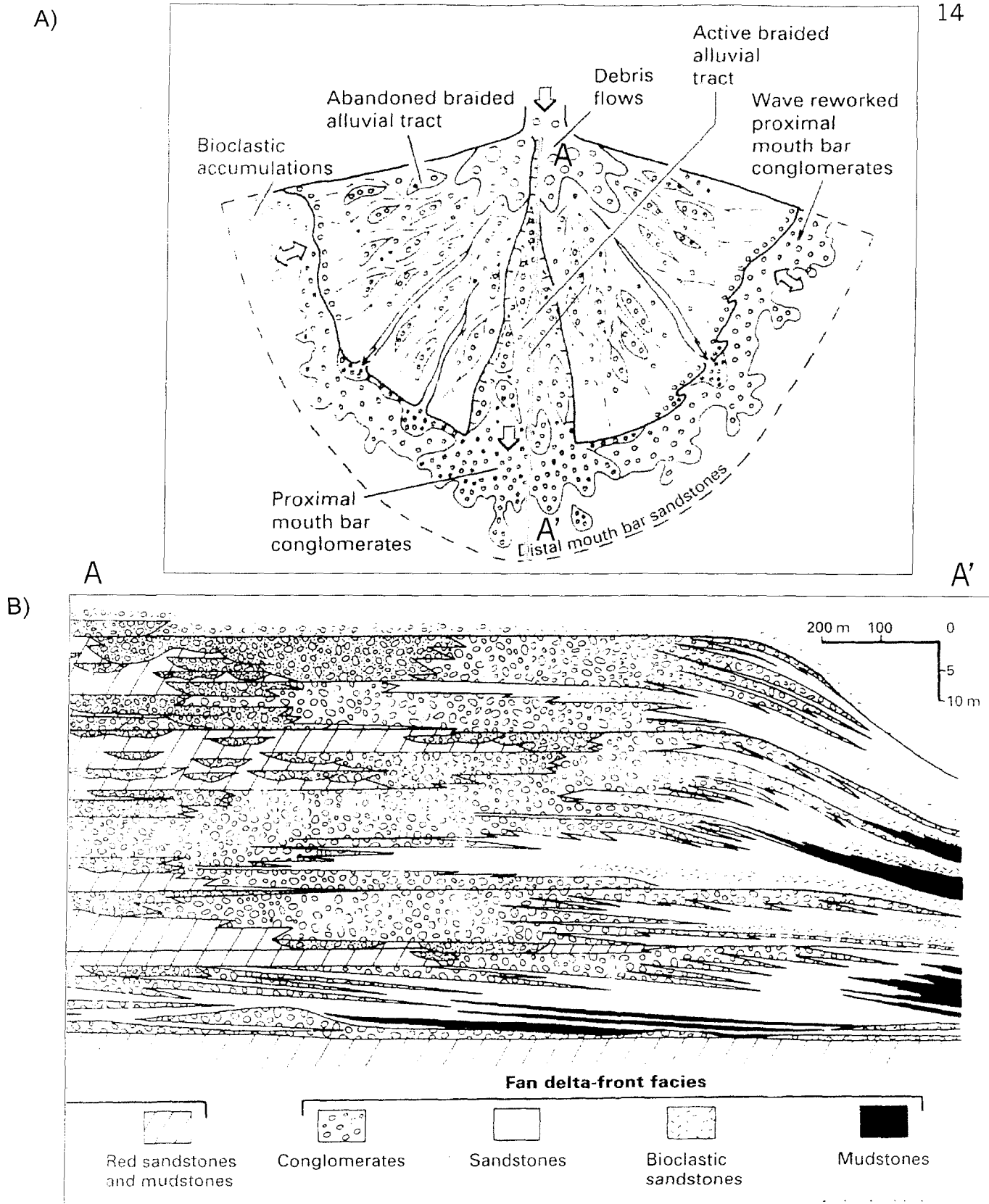


Figure 2.5 : Structure d'un delta de riviere montrant plusieurs strates; A) vue en plan; B) vue en coupe (Marzo et Anadon, 1988).

d'alimentation (figure 2.6). Dans la majorité des cas, on traite les milieux fracturés comme les milieux poreux et on définit des critères permettant de définir un degré de fracturation pour lequel cette simplification est raisonnable. Plus le degré de fracturation est élevé, plus la circulation de l'eau souterraine dans l'aquifère se comporte comme la circulation dans un milieu poreux. Il est certain que les méthodes analytiques ne sont pas bien adaptées à l'estimation de l'aire d'alimentation en milieu fracturé.

2.6.3 Interaction entre un plan d'eau et un aquifère

L'interaction entre un plan d'eau et un aquifère a un impact important sur la forme de l'aire d'alimentation. On considère souvent qu'une rivière constitue une limite de symétrie à l'écoulement souterrain, en ce sens que l'eau souterraine y converge de part et d'autre de la rivière.

Parfois, comme avec l'utilisation de relations analytiques, on néglige totalement cette interaction. Cependant, l'emplacement des rivières et les directions d'écoulement peuvent révéler beaucoup sur l'écoulement souterrain. Par exemple, en aquifère à nappe libre, deux principaux types d'écoulement souterrain sont envisageables : écoulement souterrain localement divergent lorsque le niveau de l'eau de la rivière est plus haut que celui de l'aquifère et écoulement souterrain convergent dans une situation inverse (Winter et al., 1998).

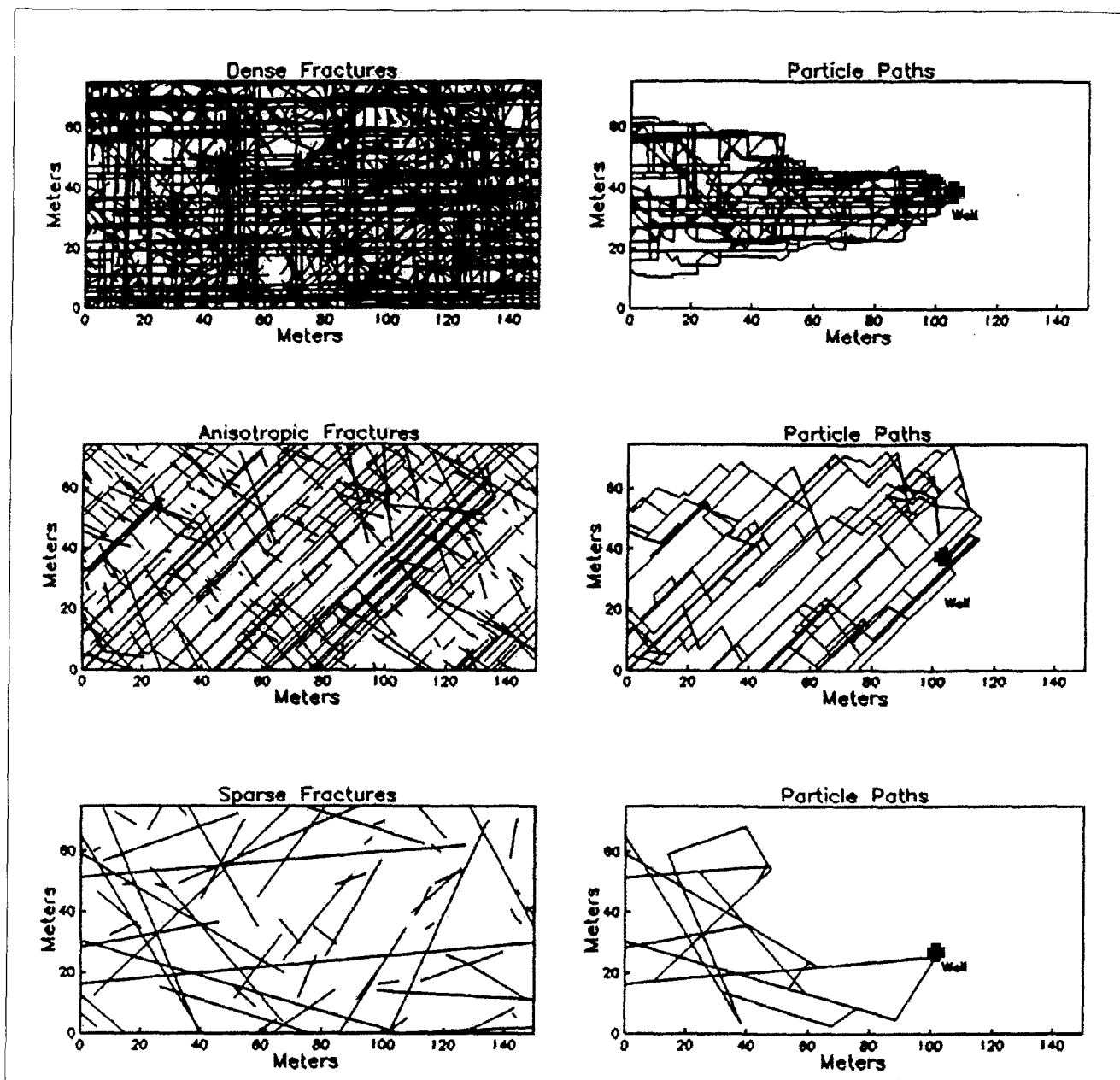


Figure 2.6 : Effet de la fracturation sur l'estimation de l'aire d'alimentation d'un puits de pompage (Bradbury et Muldoon, 1994). Colonne de gauche: trois exemples de réseau de fracture variant par leur densité et leur degré d'anisotropie. Colonne de droite: un puits de pompage capte l'eau d'un aquifère dans lequel l'écoulement est vers la droite; seules les fractures contribuant à l'alimentation du puits sont représentées.

Si l'aquifère alimente la rivière, celle-ci constitue, sous certaines conditions, une limite à l'écoulement souterrain. Par contre, dans ce dernier cas, il est possible qu'un puits de pompage modifie ces conditions et capte de l'eau provenant des deux côtés d'une rivière (figure 2.7).

2.6.4 Un puits dont la crépine est sur une partie seulement de l'épaisseur de l'aquifère

Les relations analytiques couramment utilisées pour estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage considèrent que le puits capte l'eau souterraine sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Bair et Lahm (1996) ont cependant démontré, à l'aide de modélisations numériques, que la tranche de l'aquifère qui alimente le puits ne correspond pas nécessairement à l'épaisseur totale de l'aquifère. Un puits de pompage dont la crépine est située sur une partie seulement de l'épaisseur de l'aquifère, peut ne pas capter l'eau circulant au-dessus et en dessous de la crépine. Les puits pénétrant partiellement un aquifère peuvent ainsi résulter en une largeur de l'aire d'alimentation plus grande que celle estimée en supposant une pénétration complète; ils peuvent aussi résulter en une limite amont plus rapprochée du puits, et même en une zone à proximité du puits qui ne fait pas partie de l'aire d'alimentation (Figure 2.8).

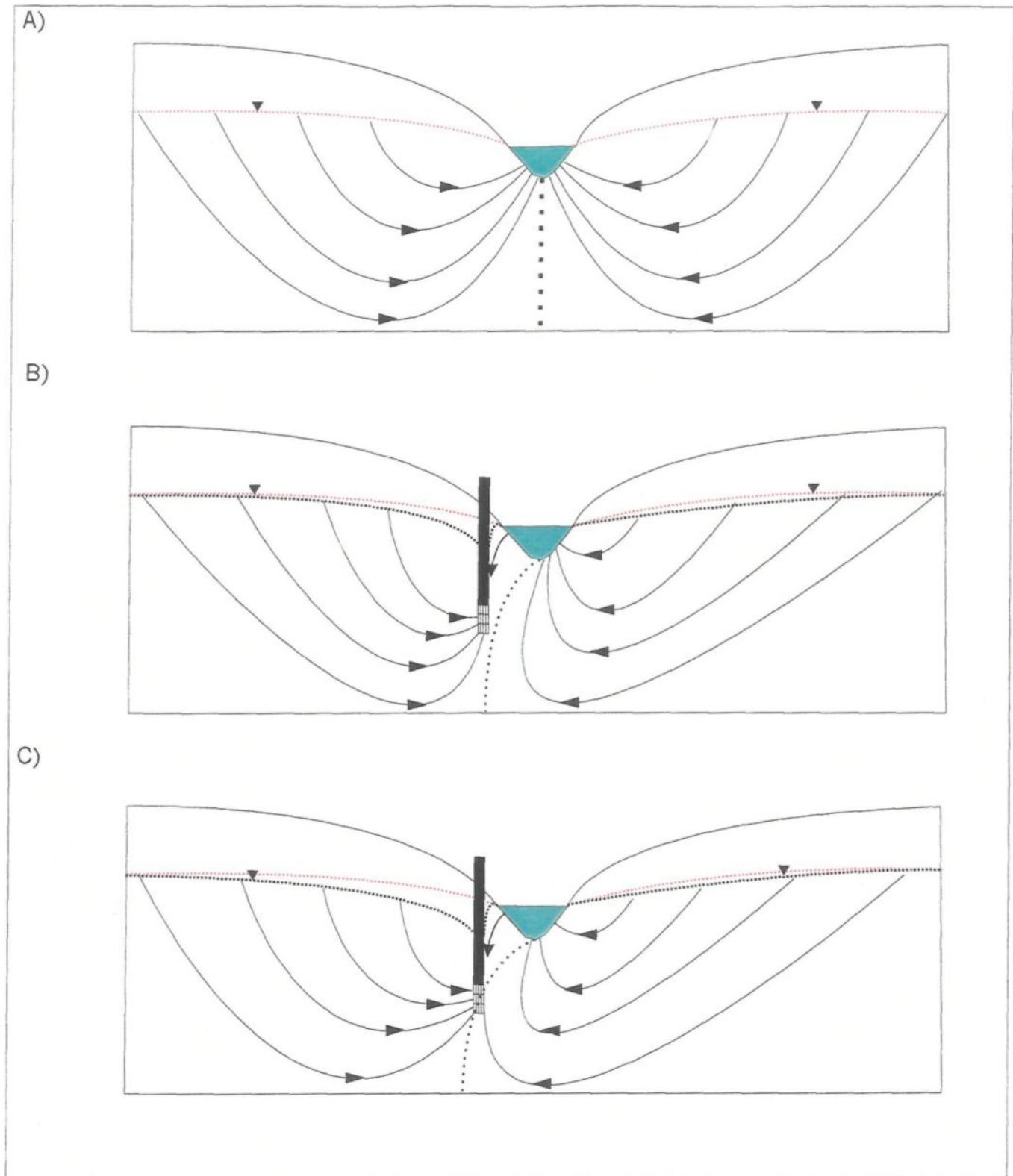


Figure 2.7: Sections montrant schématiquement l'écoulement souterrain dans un aquifère homogène en direction d'une rivière à vallée symétrique: a) sans exploitation par pompage; b) avec pompage dans le puits à proximité de la rivière, mais sans appel de l'eau souterraine provenant de l'autre côté de la rivière; c) avec pompage à un débit plus élevé et un appel en profondeur de l'eau souterraine provenant de l'autre côté de la rivière.

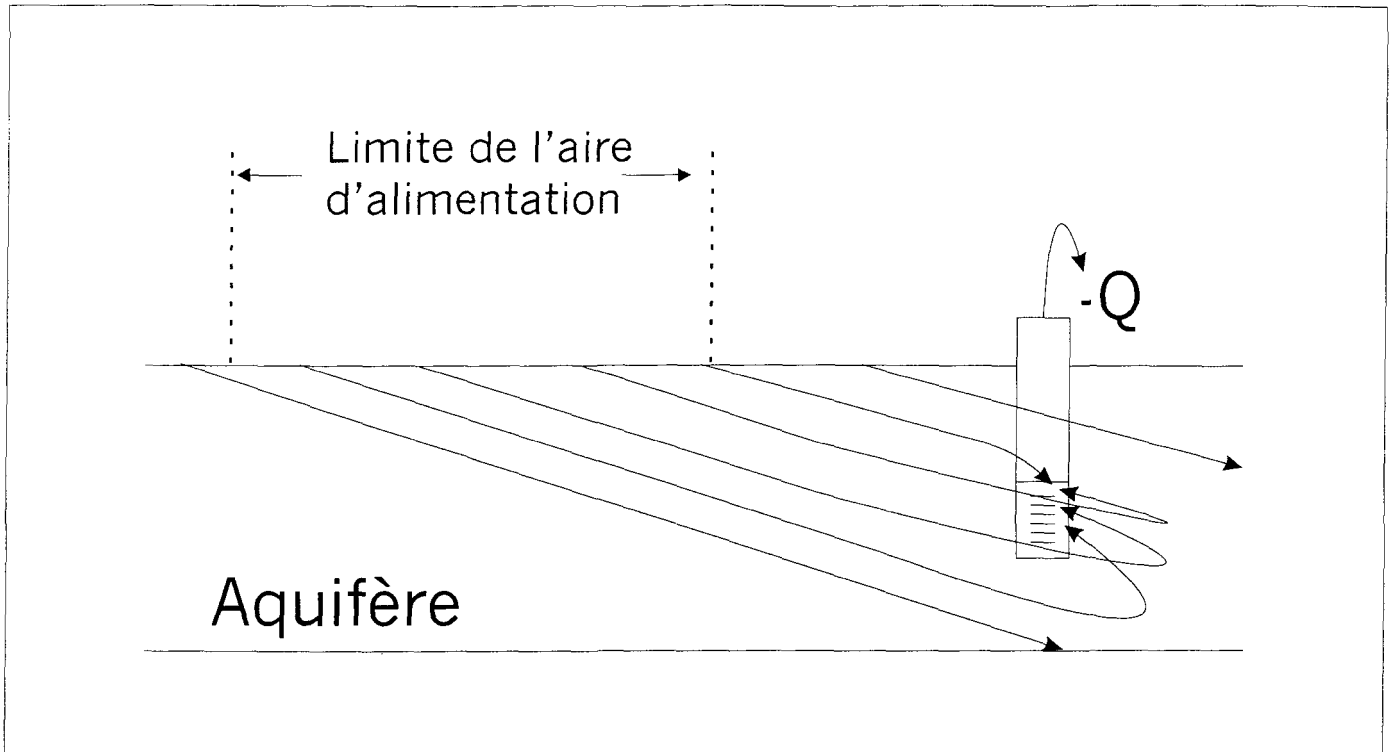


Figure 2.8 : Section montrant une possibilité d'aire d'alimentation d'un puits de pompage pénétrant partiellement un aquifère à nappe libre.

2.7 Objectifs

Étant donné tous ces facteurs d'écart et les difficultés reliées à l'estimation de l'aire d'alimentation de puits de pompage, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes qui aideront à estimer plus exactement l'aire d'alimentation.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons testé et élaboré diverses méthodes permettant de définir plus exactement l'aire d'alimentation. Celles-ci incluent des essais de traçage en eau souterraine, des levés de sismique réfraction et une méthode d'implantation optimale de piézomètres permettant d'estimer l'aire d'alimentation avec la méthode de la cartographie piézométrique. Pour les deux premières techniques, nous avons utilisé les installations de pompage du puits PE-3 de la municipalité de Saint-Félicien afin de réaliser les essais sur le terrain.

DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE

Les travaux de terrain reliés à ce projet ont été réalisés sur le territoire de Saint-Félicien. Cette municipalité d'environ 13 000 habitants est située à l'ouest du Lac Saint-Jean et son réseau de distribution d'eau potable est alimenté à partir de l'eau souterraine. Quatre puits de pompage importants sont en exploitation à l'intérieur des limites de la municipalité (figure 3.1).

Au sud-ouest de la ville, on retrouve une chaîne montagneuse qui fait partie des Laurentides. La topographie au pied de cette chaîne de montagnes est abrupte et présente de nombreux linéaments (figure 3.1). En allant vers le nord-est, la topographie devient plus plane mais la pente demeure orientée vers le Lac Saint-Jean. Le réseau hydrographique de surface est relativement dense et les cours d'eau d'importance sont la rivière à l'Ours et la rivière Ashuapmushuan. Le lac Saint-Jean et la rivière Ashuapmushuan semblent avoir une grande influence sur l'écoulement souterrain tandis que la rivière à l'Ours a une influence plus locale.

Les dépôts meubles sur le site sont majoritairement constitués de sable, de gravier et d'argile. Au sud-ouest, le sable est affleurant tandis qu'au nord-est, l'aquifère devient captif sous une couche d'argile d'épaisseur variable. Sous-jacent aux dépôts sableux, on

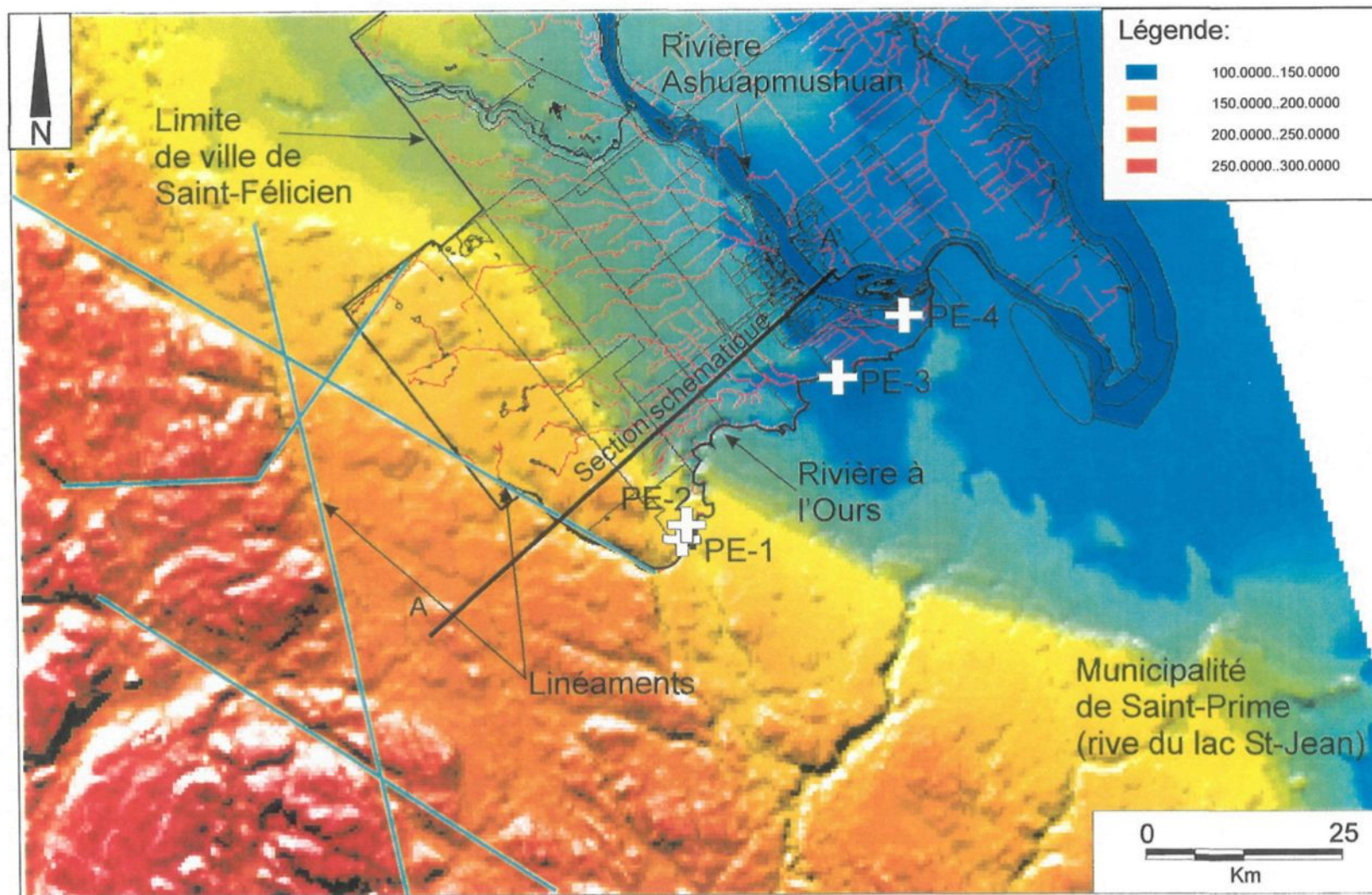


Figure 3.1: Vue en plan de la topographie du secteur entourant la ville de Saint-Félicien. Au sud, on peut remarquer la portion montagneuse sur laquelle plusieurs linéaments sont identifiables. Le Lac Saint-Jean est situé immédiatement au nord est. Les quatre puits de pompage (PE-1 à PE-4) sont tous situés le long de la rivière à l'Ours. Cette dernière sépare les municipalités de Saint-Félicien et de Saint-Prime.

retrouve à quelques endroits un dépôt plutôt graveleux d'origine morainique (figure 3.2). Ce dépôt perméable constitue une partie de l'aquifère. Sous ces dépôts granulaires, on note la présence d'un socle de calcaire fracturé (figure 3.3) datant de l'Ordovicien (Desbiens et Lespérance, 1988). Deux horizons identifiés par Desbiens et Lespérance (1988) sont présents dans ce massif ordovicien, soit les horizons Tremblay à la base et Simard au dessus. Le premier consiste en un grès assez grossier et peu fracturé en contact direct sur le socle cristallin précambrien. Le second est constitué d'un calcaire fracturé et représente l'aquifère principal alimentant les puits PE-3 et PE-4 situés au nord-est du secteur. L'horizon Simard, de composition relativement homogène, présente une fracturation très variable avec la profondeur. Un forage carotté réalisé à 58 m au sud du puits PE-3 (figure 3.4), a permis d'identifier une tranche d'environ 3 mètres très fracturée située près du sommet de cette unité stratigraphique. Laboratoire Géo-Construction (1994) a effectué un relevé de fracture sur un secteur dégagé de dépôts meubles à proximité du puits PE-3. Trois orientations préférentielles de fractures ressortent de l'analyse, soit 80°, 135° et 170°. Les linéaments sont plutôt orientés 135° à 170° (figure 3.1).

Plusieurs piézomètres et puits privés sont présents sur le territoire considéré. Malheureusement, l'horizon capté par les puits privés n'est pas connu, ce qui rend impossible leur utilisation pour fin d'analyse piézométrique. Quant aux piézomètres, ils sont généralement géoréférencés et décrits dans des rapports de forage (Laboratoire Géoconstruction, 1994). Ces piézomètres ont permis de réaliser une carte piézométrique et de définir les gradients hydrauliques horizontaux (1,6 % au sud et 0.6 % au nord)

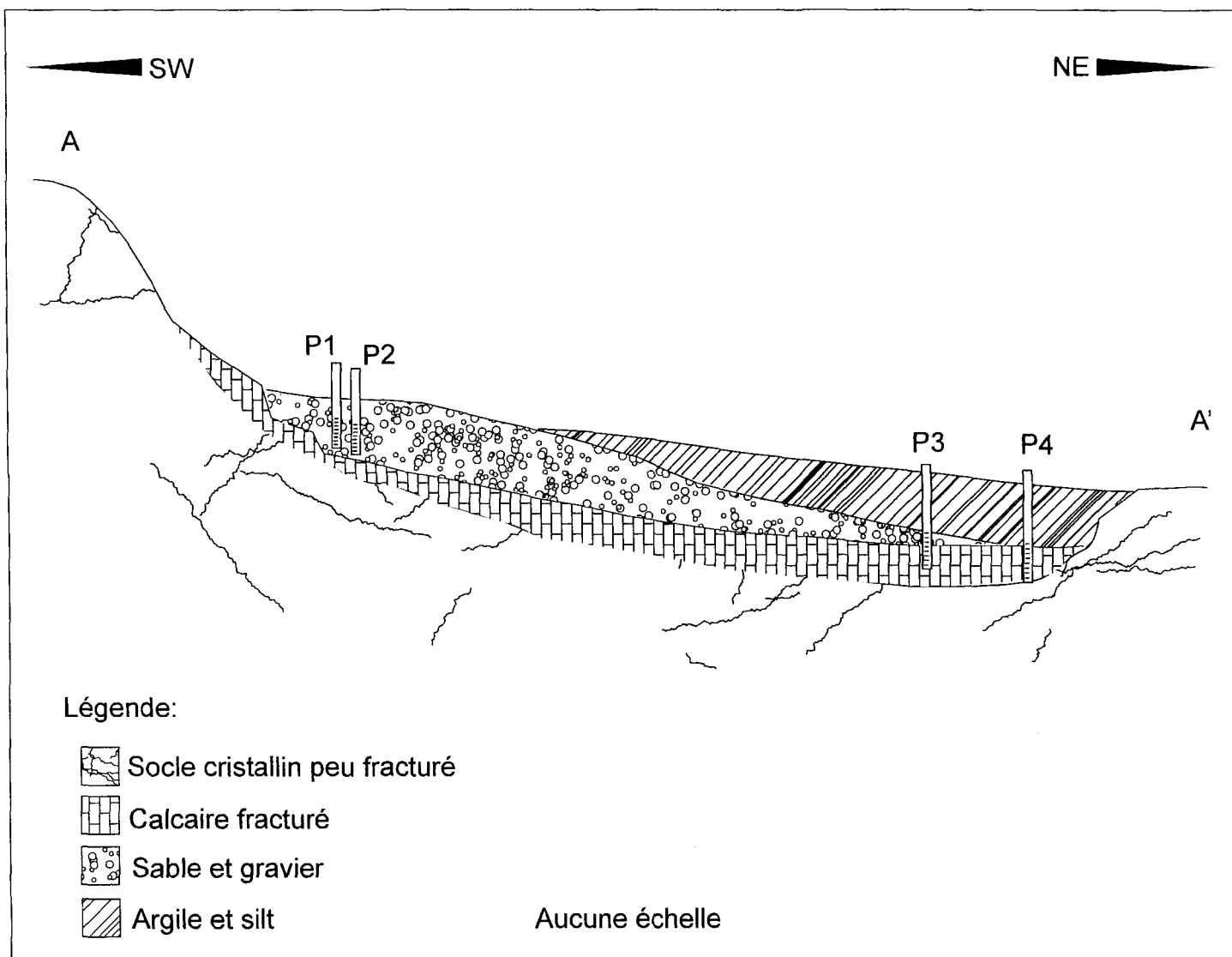


Figure 3.2: Section schématique des différentes unités stratigraphiques sur le site à l'étude.

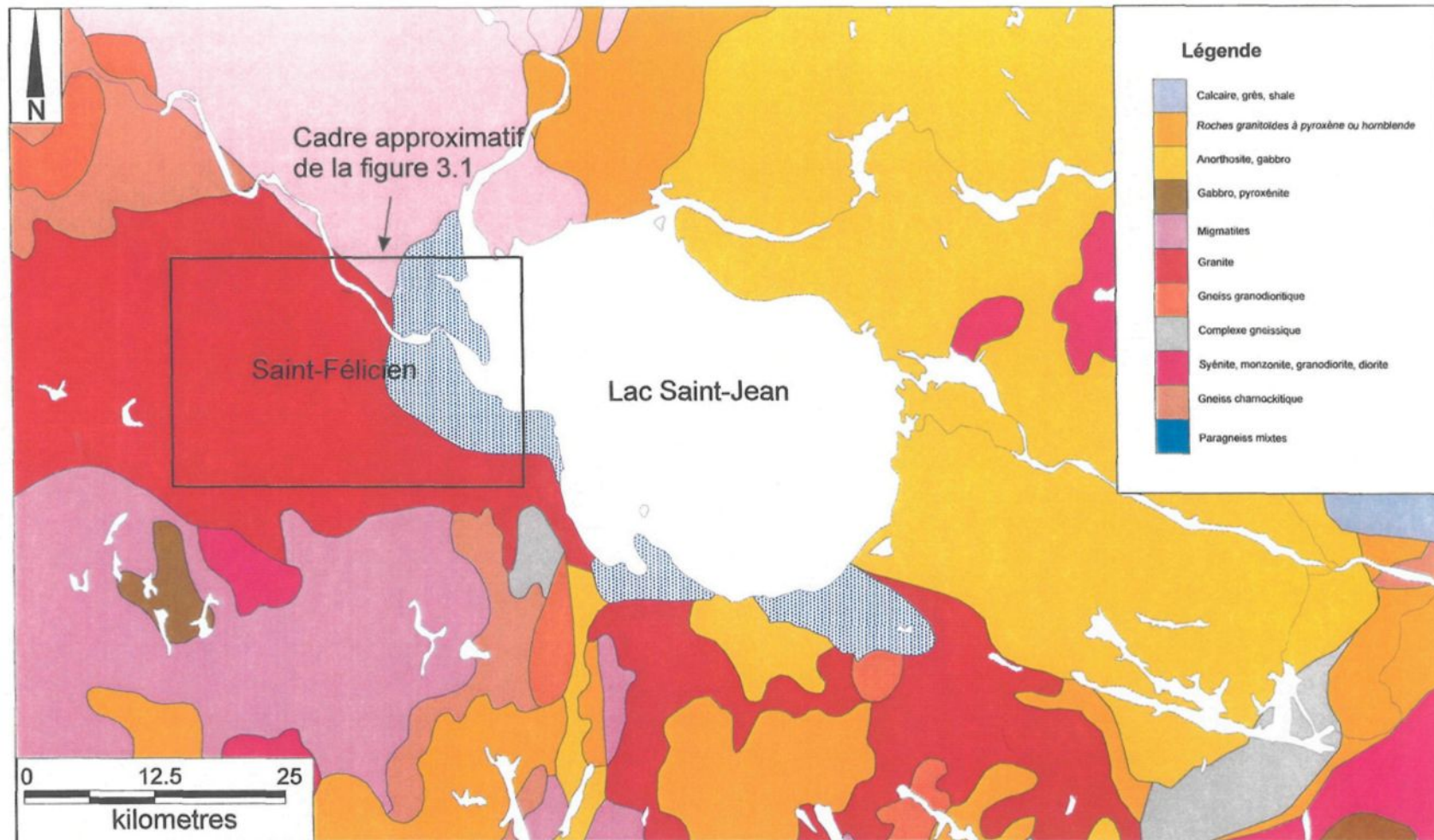


Figure 3.3: Carte géologique du socle rocheux du Lac Saint-Jean (Avramchev, 1993).






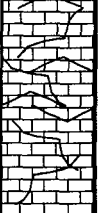
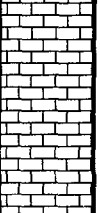

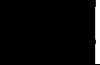
 UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI PROJET: Estimation de l'aire d'alimentation d'un puits de pompage; essais de traçage en eau souterraine.		Sondage no.: UQAC-1 Localisation: X: 689 628 y: 5 388 672 UTM NAD 27, ZONE 18 Feuille 1 de 1			
Profondeur (m)	Élévation (m)	Description	Stratigraphie	Commentaires	Piezomètre
8.8 m		Argile		Aucun prélèvement	
9.9 m		Sable		Aucun prélèvement	
10.8 m	10	Sable et gravier (moraine probable)		Aucun prélèvement	
11.4 m		Calcaire fracturé		Formation Simard	
14.8 m		Calcaire très fracturé; perte d'eau			
17.9 m		Calcaire peu fracturé			
18.4 m		Grès (roc sain)		Form. Tremblay	
19.4 m		Socle cristallin felsique et peu fracturé			
20		Fin du forage			

Figure 3.4: Diagraphie du forage UQAC-1 réalisé à 58 m au sud du puits de pompage PE-3.

(figure 3.5). L'eau souterraine s'écoule principalement vers le nord-est en direction de la rivière Ashuapmushuan; elle est possiblement légèrement influencée localement par la rivière à l'Ours. Les montagnes et la portion affleurante de sable constituent vraisemblablement la zone de recharge principale de l'aquifère.

Parmi les quatre puits de pompage présents sur le site, deux (PE-1 et PE-2) sont localisés dans la partie libre de l'aquifère (au pied des montagnes). Le puits PE-1 est un puits par drains horizontaux tandis que les trois autres puits ont une crépine verticale. Le puits PE-4 situé plus au nord-est alimente principalement une pisciculture. Le puits PE-3 pompe dans la partie confinée de l'aquifère. Sa crépine est ouverte dans la portion de sable et gravier ainsi que dans la portion fracturée de l'aquifère. Le puits PE-3 est celui qui a été utilisé pour les essais sur le terrain étant donné le contexte géologique local constitué d'un milieu complexe (aquifère rocheux fracturé). De plus, l'existence de plusieurs études hydrogéologiques visant entre autres sa protection étaient disponibles (Hydrogéosol inc.,1997). Les quatre puits sont actuellement pompés aux débits moyens suivants :

PE-1 : 4000 l/min	PE-2 : Non disponible
PE-3 : 1900 l/min	PE-4 : 2000 l/min

Une première estimation de l'aire d'alimentation (figure 3.6) a été obtenue par Hydrogéosol inc. (1997) à l'aide de la méthode développée par Bear et Jacobs (1965).

Cette première estimation néglige, entre autres, le réseau hydrographique de surface ainsi que l'influence des autres puits de pompage.

3.1 Variabilité de l'estimation de l'aire d'alimentation

Quoique fort simple, le modèle décrit par Bear et Jacobs (1965) comprend plusieurs paramètres (voir section 2.2), lesquels peuvent prendre diverses valeurs. Les données disponibles permettent souvent d'obtenir plusieurs valeurs pour chacun de ces paramètres et ainsi de déterminer des aires d'alimentation différentes les unes des autres par leur dimension, leur forme et leur orientation (figures 3.6 et 3.7). D'autres auteurs ont déjà effectué des études de sensibilité d'estimation d'aire d'alimentation avec ces paramètres (Bhatt, 1993; Jacobson et al., 1995). Sur la figure 3.6, la variabilité de la dimension de l'aire d'alimentation est due à l'utilisation de diverses valeurs par les paramètres hydrogéologiques (k , b , i) obtenues à partir de données disponibles sur le territoire considéré (Tableau 1). Le tableau 1 donne les résultats de plusieurs estimations du paramètre A de la relation (2) mentionnée à la section 2.2. Les données utilisées sont celles compilées par Laboratoires Géo-Construction (1994). Les combinaisons de ces valeurs démontrent la grande variation des estimations possibles de l'aire d'alimentation.

La variabilité de l'orientation de l'aire d'alimentation estimée peut être évaluée en déterminant la direction de l'écoulement souterrain naturel à partir de différentes combinaisons de piézomètres sélectionnés sur l'ensemble du secteur. La figure 3.7 illustre un cas où la direction de l'écoulement naturel varie d'environ 20° , selon les données utilisées pour estimer cette direction. Ce paramètre fait varier d'autant l'orientation de l'aire

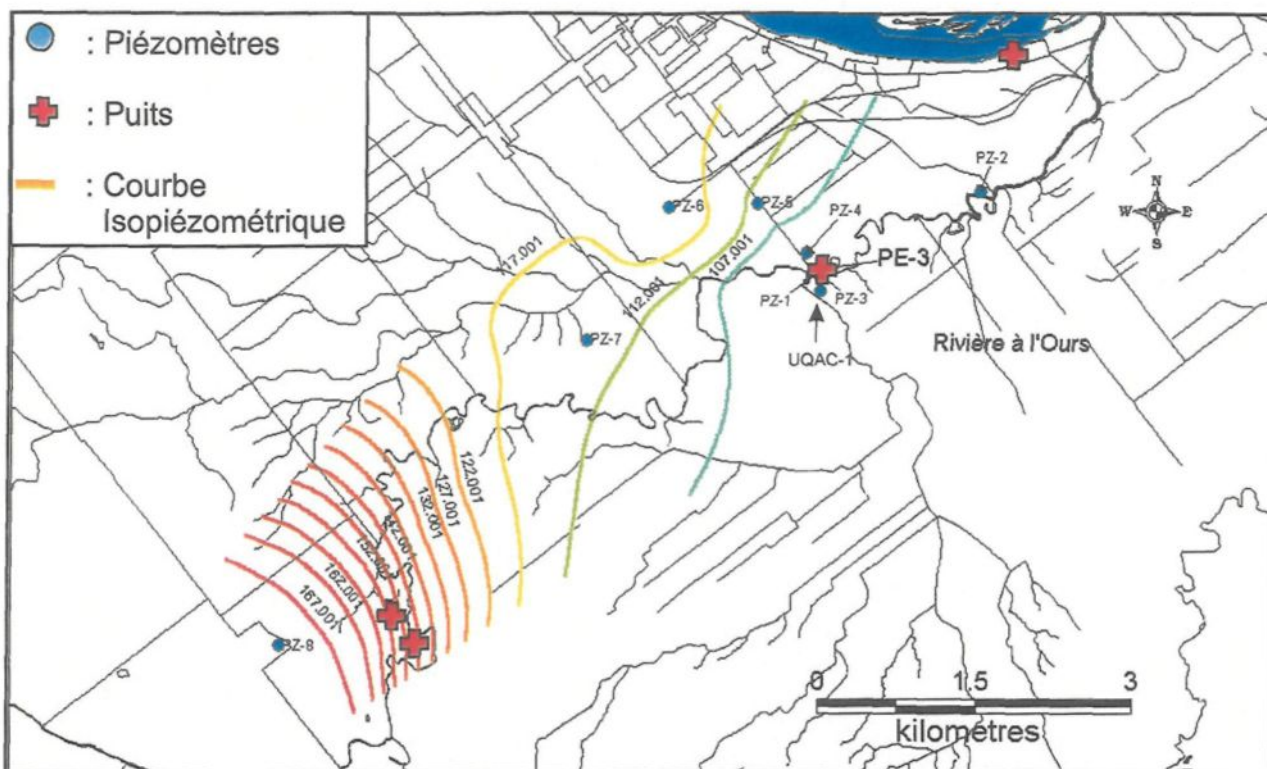


Figure 3.5 : Carte piézométrique du secteur de Saint-Félicien en condition d'exploitation du puits PE-3 (1900 l/min). Le rabattement généré par les autres puits de pompage n'affecte pas les piézomètres considérés.

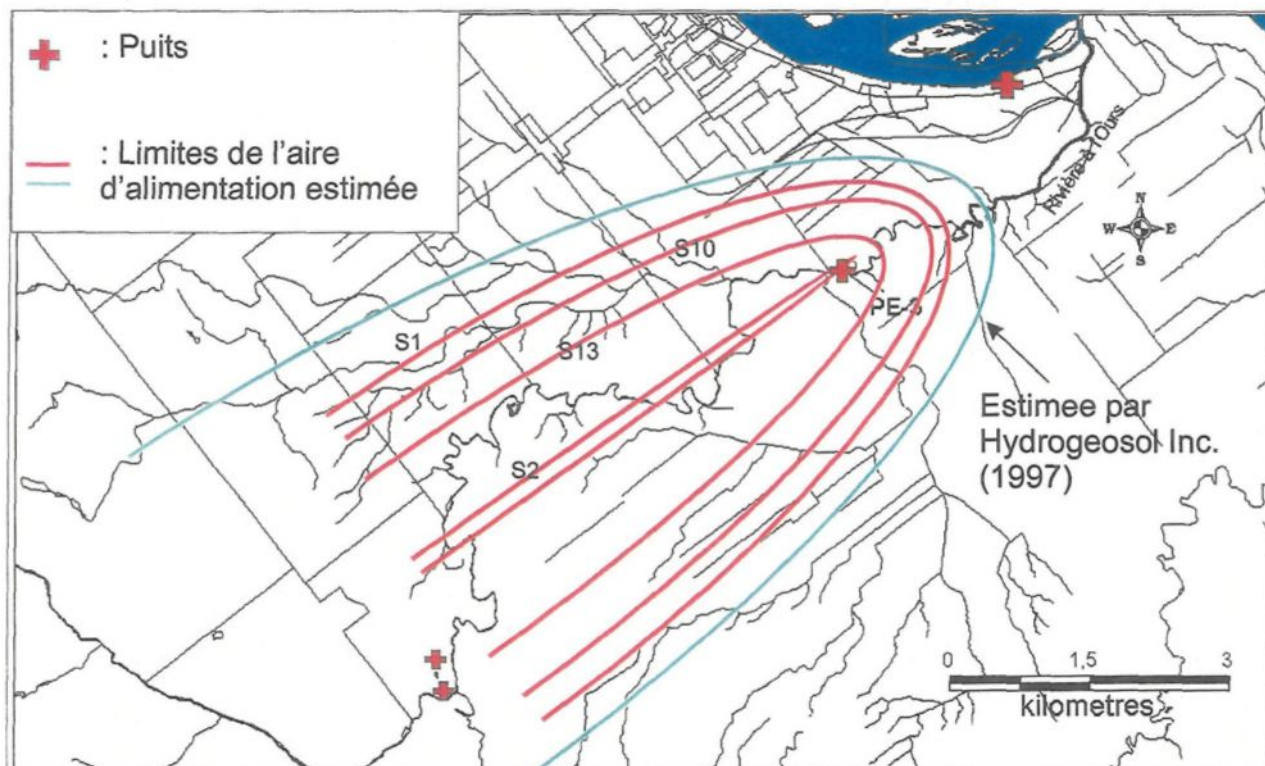


Figure 3.6: Variation de la dimension de l'aire d'alimentation estimée pour le puits PE-3; ces variations sont provoquées par l'utilisation de différentes valeurs de paramètres hydrogéologiques.

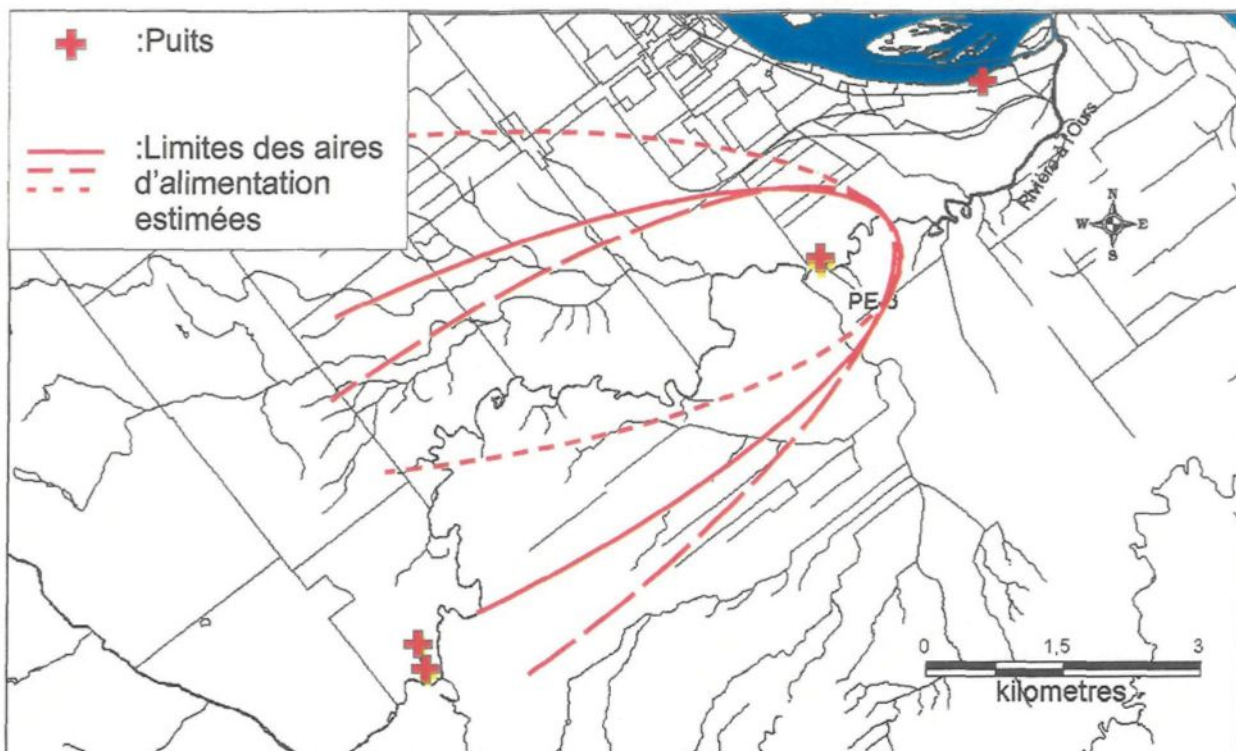


Figure 3.7 : Variations de l'orientation de l'aire d'alimentation estimée pour le puits PE-3 ; ces variations sont provoquées par l'utilisation de différents piézomètres pour estimer la direction de l'écoulement naturel.

d'alimentation estimée, ce qui entraîne des variations de la position de l'aire d'alimentation qui deviennent de plus en plus importantes vers l'amont.

Tableau 3.1 : Tableau de calcul du paramètre A de l'équation proposée par Bear et Jacobs (1965). Les scénarios en gras sont représentés graphiquement sur la figure 3.6.

Scénarios	K ; i ; b	T ; i	A
S1	1*10⁻³ ; 0.0038 ; 1.8		735 m
S2	5.8*10⁻⁴ ; 0.014 ; 8		77 m
S3	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0074 ; 8		147 m
S4		4.8*10 ⁻³ ; 0.0038	275 m
S5	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0048 ; 8		226 m
S6	3.3*10 ⁻³ ; 0.014 ; 8		14 m
S7	3.3*10 ⁻³ ; 0.014 ; 1.8		60 m
S8	1.6*10 ⁻³ ; 0.0038 ; 1.8		459 m
S9	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0074 ; 1.8		653 m
S10	5.8*10⁻⁴ ; 0.0048 ; 3		602 m
S11	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0048 ; 2.28		792 m
S12	3.3*10 ⁻³ ; 0.0038 ; 1.8		222 m
S13	5.8*10⁻⁴ ; 0.014 ; 1.8		342 m
S14	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0038 ; 8		284 m
S15	5.8*10 ⁻⁴ ; 0.0038 ; 1.8		1267 m

Les autres paramètres (B et L) découlent directement de l'évaluation du paramètre A des relations mathématiques 2, 3 et 4 décrites à la section 2.2. En combinant l'épaisseur de dépôts granulaires à l'épaisseur de calcaire fracturé (8m) et en utilisant la valeur moyenne de la conductivité hydraulique (3.3×10^{-3} m/s), la distance aval de l'aire d'alimentation (paramètre A) du puits de pompage est estimée à 14m (scénario S6). À un autre extrême, lorsqu'on utilise le gradient minimal estimé (0,0038), la plus faible valeur de la conductivité hydraulique ($5,8 \times 10^{-4}$ m/s) et en considérant que l'épaisseur de calcaire fracturé constitue la

totalité de l'épaisseur de l'aquifère (1,8 m), on obtient une valeur du paramètre A égale à 1267m (scénario S15). Le scénario S6 donne une estimation de la distance entre le puits de pompage et la limite aval de l'aire d'alimentation (paramètre A) égale à environ 1 % de celle du scénario S15. À cette très grande variabilité, s'ajoute l'incertitude associée à la justesse des paramètres hydrogéologiques.

Comme les relations analytiques sont difficilement applicables en milieux anisotropes et hétérogènes, il y a lieu de tester et de développer des méthodes qui donnent une estimation plus exacte de l'aire d'alimentation.

TRAVAUX D'INVESTIGATION SUR LE TERRAIN

Les méthodes d'investigations utilisées sur le terrain sont cruciales lorsqu'il s'agit de déterminer le plus exactement possible l'aire d'alimentation d'un puits de captage. Dans ce projet de recherche, deux méthodes d'investigation ont été appliquées, soit des essais de traçage en eau souterraine et des levés de sismique réfraction.

4.1 Essais de traçage en eau souterraine

Parmi les principaux objectifs des essais de traçage en eau souterraine mentionnons la détermination de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, l'évaluation de propriétés dispersives du milieu et la vérification des liens hydrauliques entre des points d'un milieu aquifère.

Trois essais de traçage ont été réalisés dans l'aquifère alimentant le puits d'eau potable PE-3 de ville de Saint-Félicien. Ces essais ont été effectués dans un contexte d'écoulement convergent, un traceur étant introduit dans un piézomètre à proximité du puits, et ensuite capté par le puits de pompage. Les objectifs de ces essais étaient de vérifier la faisabilité de cette méthode alors que le puits utilisé pour l'essai est en opération pour l'alimentation en eau potable; d'estimer la vitesse d'écoulement de l'eau

souterraine ; et de vérifier la possibilité que l'alimentation du puits provienne en partie du côté opposé de la rivière.

Tel que mentionné au chapitre 2, il est possible qu'un puits de pompage capte de l'eau provenant des deux côtés d'une rivière. Différentes conditions telles qu'un débit de pompage élevé, un puits situé près d'une rivière ou encore un puits dont la crépine est localisée à la base de l'aquifère, tendent à favoriser cette situation (figure 2.7). Ainsi, l'eau provenant du côté opposé d'une rivière et qui aboutit à un puits a probablement circulé à une profondeur relativement importante ou près de la base de l'aquifère. Le puits PE-3 de ville de Saint-Félicien est situé à proximité de la rivière à l'Ours, sur sa rive nord et pourrait capter de l'eau provenant de la rive sud de cette rivière (figure 3.2).

Afin de bien comprendre l'utilité des essais de traçage et les résultats associés, la présente section est divisée en quatre parties, soit : les principes élémentaires des essais de traçage, le choix du traceur, l'estimation de la quantité de traceur à injecter et les résultats obtenus des essais réalisés à Saint-Félicien. Les méthodologies pour l'injection du traceur, pour l'échantillonnage ainsi que pour l'analyse sont présentées à l'annexe I.

4.1.1 Principes de base des essais de traçage

Les essais de traçage peuvent être mis en œuvre selon diverses configurations. Mentionnons entre autres les essais par gradient naturel, les essais convergents, les essais par recirculation et les essais divergents.

Les essais par gradient naturel consistent en une injection d'un faible volume de traceur et au suivi analytique en aval dans divers puits d'observation; le faible volume injecté d'eau tracée permet de ne pas perturber l'écoulement souterrain. Les essais convergents consistent en une injection en un point de l'aquifère d'un faible volume d'eau tracée dans le but de capter le traceur à un puits de pompage. Les essais par recirculation consistent en une injection à débit constant accompagnée d'une récupération par pompage, les débits d'injection et de pompage étant comparable. Finalement, les essais divergents consistent en l'injection d'un traceur à débit élevé, de manière à créer un écoulement divergent à partir du puits d'injection, et au suivi analytique en périphérie à l'aide de plusieurs piézomètres. Comme les essais de traçage réalisés à Saint-Félicien sont de type convergent, les méthodes de calcul et les éléments théoriques présentés plus bas s'appliquent surtout à ce type d'essai.

Divers phénomènes physico-chimiques tels la dispersion, l'adsorption et l'absorption affectent les essais de traçage en eau souterraine. La dispersion est le résultat de l'étalement d'un traceur dans l'espace (figure 4.1). En général, la dispersion latérale est environ 10 % de la dispersion longitudinale (Davis et al., 1985). L'adsorption se produit lorsque le traceur reste attaché aux parois d'une particule solide (figure 4.1). Celle-ci est plus forte lorsque le traceur est un cation tel le sodium, car de façon générale les particules solides sont chargées négativement. L'absorption consiste au transfert du traceur à l'intérieur des particules solides. Ce phénomène est beaucoup moins important que l'adsorption et se produit lorsque le temps de résidence du traceur est long. Comme l'adsorption et l'absorption se produisent souvent simultanément et que les deux

phénomènes sont difficiles à distinguer, on utilise plutôt le terme « sorption », soit la sommation des deux phénomènes, dans l'analyse d'un essai de traçage.

Différents degrés de quantification peuvent être appliqués dans l'analyse selon les résultats obtenus. Un essai à faible degré de quantification peut consister, par exemple, en la détection du traceur au point d'échantillonnage sans avoir comme objectif de mesurer précisément sa concentration dans le temps. Ces essais se réalisent souvent à l'aide de l'uranine comme traceur et du charbon activé comme détecteur. Le charbon activé multiplie la fluorescence de l'uranine jusqu'à 400 fois (Aley, 1999). Cependant, quelques études portant sur l'efficacité des essais à faible degré de quantification ont démontré que le charbon activé était peu fiable (Gunn et Lowe, 2000; Lutz et Parriaux, 1988; Smart et al. 1986). De plus, ce type d'essai donne surtout de l'information sur l'interconnexion hydraulique. Les essais de traçage quantitatifs ou à plus haut degré de quantification consistent par exemple, en l'analyse précise de la substance utilisée comme traceur aux points d'échantillonnage. L'analyse quantitative s'effectue notamment à l'aide d'un graphique de la concentration du traceur en fonction du temps suivant l'injection, ce qui forme une courbe appelée « courbe de restitution » (figure 4.2).

La courbe de restitution permet notamment de calculer le pourcentage de la masse du traceur récupéré au puits de pompage, d'évaluer la dispersivité et de calculer le temps de transfert du traceur dans l'eau souterraine. Pour un essai convergent, le calcul de la récupération de la masse du traceur consiste en la multiplication de l'aire sous la courbe

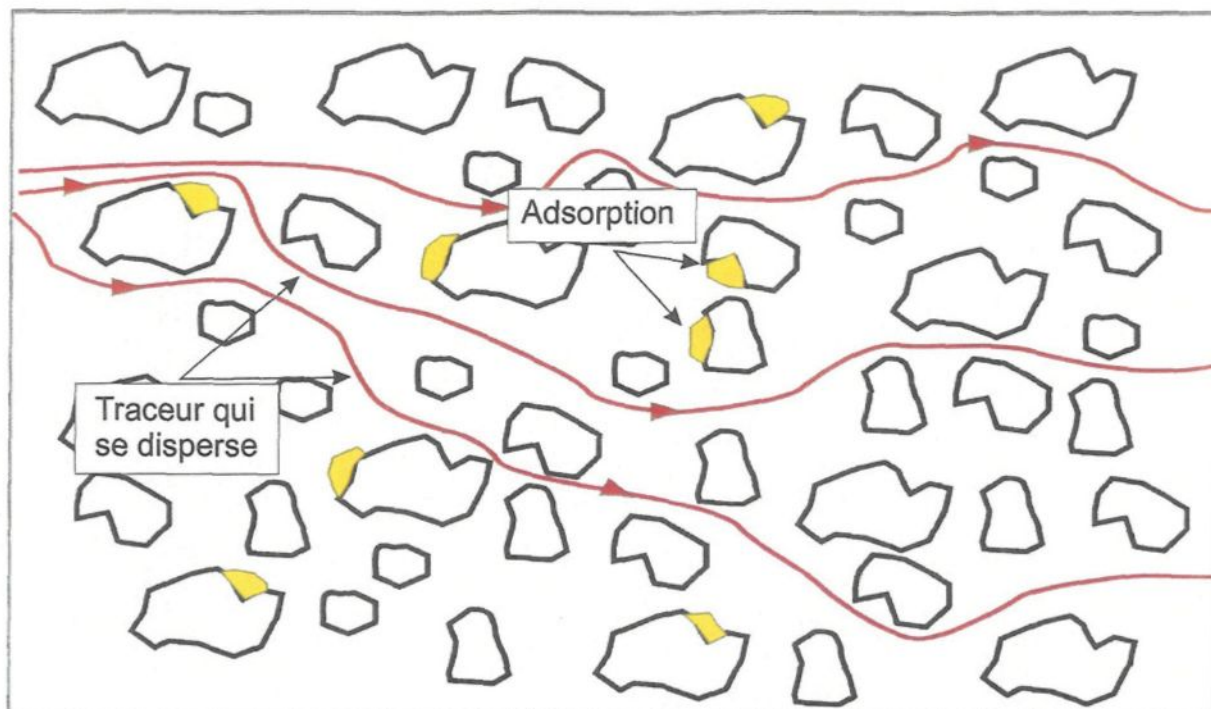


Figure 4.1: Schéma montrant le phénomène de la dispersion et de l'adsorption.

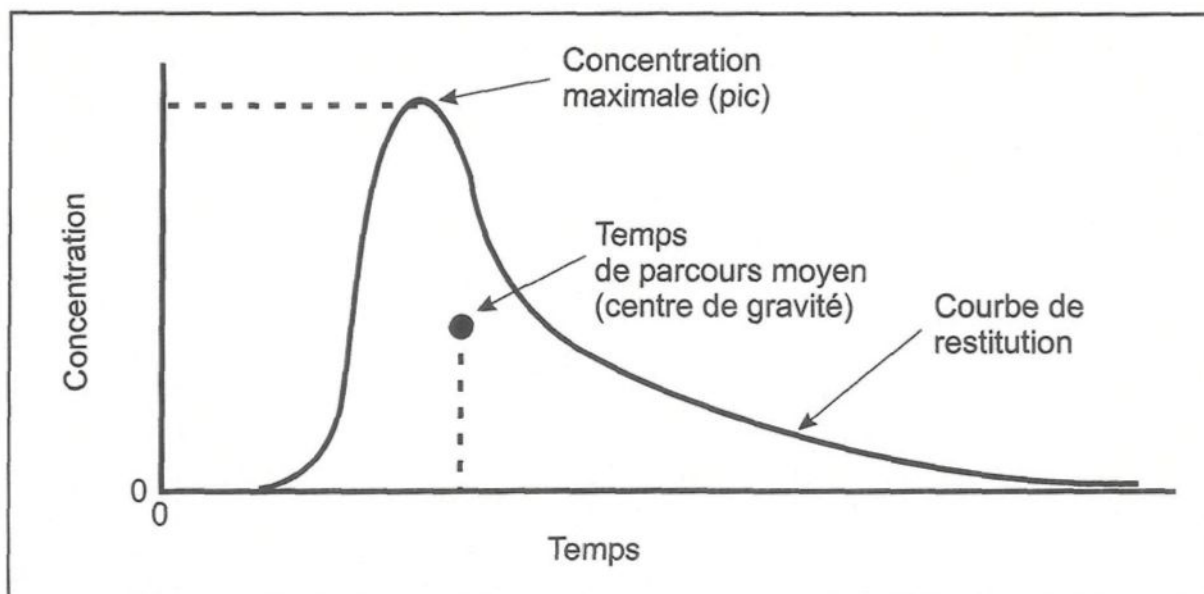


Figure 4.2: Schéma d'une courbe de restitution obtenue suite à un essai de traçage quantitatif. Le centre de gravité de la courbe de restitution correspond au temps de parcours moyen du traceur dans l'eau souterraine.

par le débit de pompage. Comme l'aire sous la courbe s'obtient par l'intégrale de la fonction et que la courbe de restitution est une fonction dont l'équation est inconnue, il faut intégrer numériquement la fonction découlant des points du graphique. La méthode utilisée dans ce projet est celle appelée la méthode de Simpson 1/3 (Fortin, 1995)

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x) dx \approx \frac{h}{3} (f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)) \quad (9)$$

où h [L] est l'intervalle entre les points de la courbe, lequel doit demeurer constant. Pour que ce calcul soit valable, le débit de pompage doit être constant tout au long de l'essai. Une méthode est présentée par Field (1999) afin d'évaluer la quantité de traceur récupérée lorsque le débit est variable. Cette méthode, légèrement moins précise, consiste en la multiplication du débit de pompage par la concentration du traceur dans l'eau et ce, par intervalles de temps fini. Dans un intervalle temporel, la concentration du traceur varie mais c'est la concentration moyenne qui est prise en considération (figure 4.3). L'imprécision est plus grande dans les zones de fortes pentes, comme en début de courbe, tel qu'illustré sur la figure 4.3.

Afin d'évaluer le temps de transfert, il faut estimer le centre de gravité de la courbe de restitution. Celui-ci correspond au temps où la moitié de la quantité totale de traceur recueillie est récupérée.

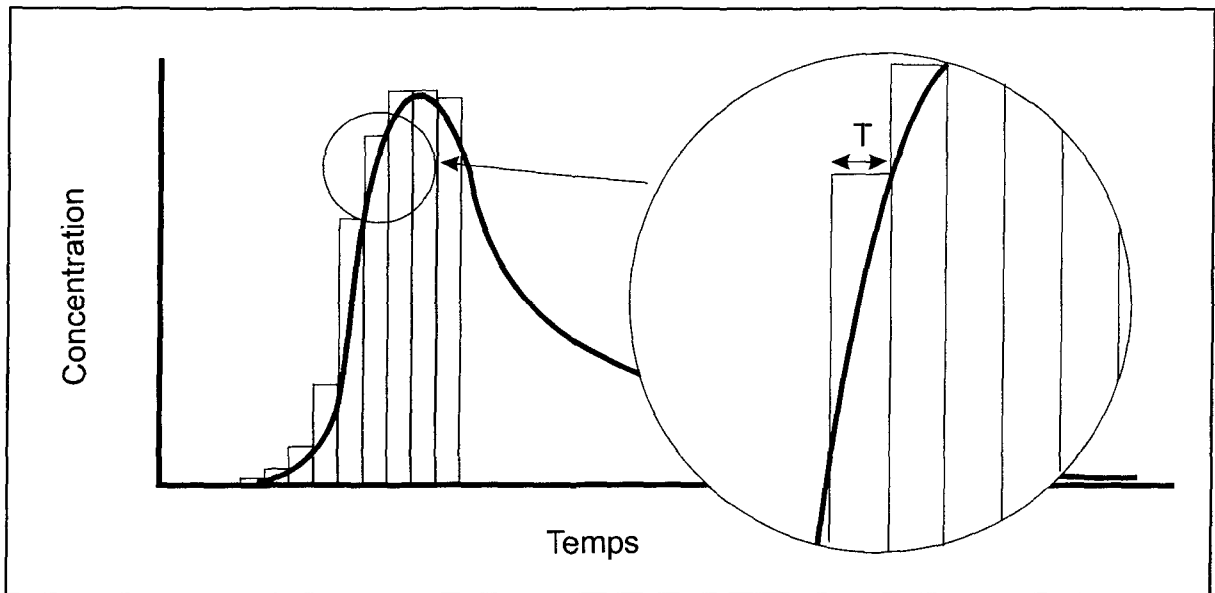


Figure 4.3: Figure montrant le concept d'analyse d'un essai de traçage présenté par Field (1999) pour un puits pompant à débit variable. L'imprécision associée aux intervalles de temps est supérieure dans les zones de forte pente comme le début de la courbe représentée ici.

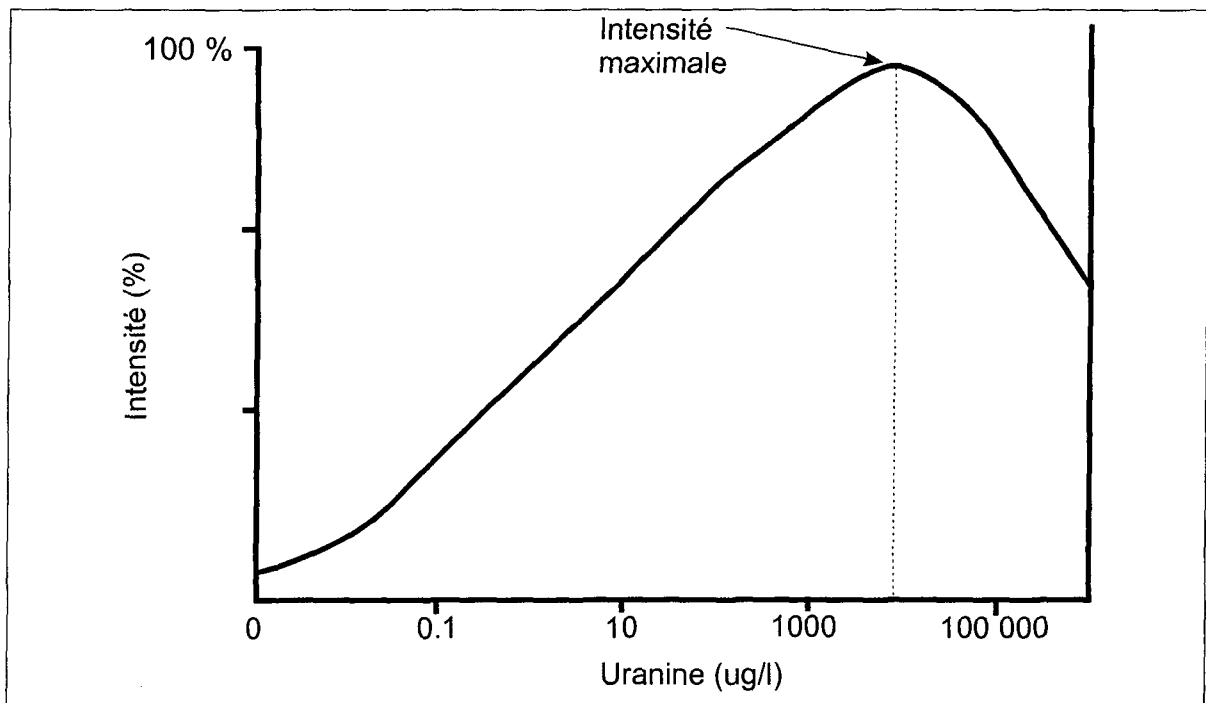


Figure 4.4: Graphique illustrant l'intensité de la fluorescence de l'uranine en fonction de sa concentration dans l'eau. L'intensité est maximale à environ 10 mg/l (Kass, 1998).

4.1.2 Sélection du traceur

Plusieurs substances physiques ou chimiques peuvent être utilisées à titre de traceur. Parmi celles-ci on peut nommer les particules solides, les substances ioniques, les isotopes stables et radioactifs, les colorants fluorescents, des gaz, les fluorocarbones et la température (Davis et al, 1985). Les traceurs les plus utilisés sont les substances ioniques tels le chlore, l'iode et le calcium; les isotopes stables comme le deutérium; et les colorants fluorescents tels les xanthènes, les rhodamines ou les stilbènes.

Chaque traceur possède ses caractéristiques propres; le choix du traceur dépend notamment du type d'aquifère, des propriétés physico-chimiques de l'eau et des objectifs de l'essai. De façon générale, un traceur doit satisfaire les conditions suivantes : 1) absent ou présent en très faible quantité dans l'eau souterraine naturelle; 2) facilement détectable pour des fins d'analyses quantitatives; 3) inoffensif pour l'humain, la faune et la flore; 4) fortement soluble et faiblement dispersif; 5) résistant aux attaques biochimiques; 6) non réactif avec les sels ou autres composés chimiques présent dans l'eau; 6) et peu coûteux lors de l'achat et des analyses (Käss, 1998). La liste des traceurs considérés initialement pour ce projet inclue le chlore, le sodium, la fluorescéine de sodium et la riboflavine.

Le chlore et le sodium sont deux ions utilisés fréquemment pour le traçage des eaux souterraines. Ils peuvent être injectés simultanément sous forme de sel de table (NaCl). Les deux ions sont déjà présents dans l'eau, ce qui rend plus difficile la discrimination des traceurs. Ceux-ci ont le désavantage de ne pas voyager à la même

vitesse que l'eau étant donnée leur charge électrique (Käss, 1998). Les particules chargées négativement ont pour effet de repousser l'anion Cl^- et génèrent une vitesse de déplacement de l'anion plus rapide que l'eau. Par contre, le cation Na^+ est attiré par les particules, ce qui augmente son taux de sorption et diminue sa vitesse apparente d'écoulement. Les limites maximales de potabilité pour les deux ions sont de 250 mg/l pour le chlore et de 200 mg/l pour le sodium (CCME, 1999).

Ces deux ions ont été considérés à cause de leur faible coût à l'achat et aussi à cause de l'existence d'information sur leurs effets sur la santé humaine. D'autres ions tels l'iode ou le fluor sont de bons traceurs mais ils ne sont pas inclus dans la liste des critères de potabilité des divers organismes environnementaux.

La fluorescéine de sodium, communément appelée uranine et faisant partie de la famille des xanthènes, est un traceur fluorescent souvent utilisé dans les eaux souterraines. Sa limite de détection très basse, sa solubilité et son faible degré de sorption en font un bon traceur (Field et al., 1995). Selon plusieurs travaux antérieurs dont USEPA (1979), Davis et al. (1985), Field et al. (1995) et Käss (1998), l'uranine est inoffensive pour l'environnement et les humains lorsque la concentration dans l'eau n'excède pas 1 mg/l pendant 24 heures. La limite de détection très faible sur la plupart des appareils (0.0001 mg/l) permet une utilisation sécuritaire puisqu'une concentration maximale de 0.1 mg/l est suffisante pour réaliser des essais quantitatifs utiles. L'absence d'uranine dans l'eau à l'état naturel constitue aussi une des raisons motivant son utilisation fréquente. L'uranine étant analysée par rapport à sa fluorescence et non par

rapport à sa concentration, d'autres composés fluorescents présents dans l'eau peuvent fausser les résultats lors des analyses. Aussi, le pH et certains sels en solution font varier l'intensité de la fluorescence de l'uranine dans l'eau (Käss, 1998). Par exemple, l'eau souterraine alimentant le puits PE-3 de Ville St-Félicien montre une fluorescence en présence de fluorescéine qui est 2,5 fois plus importante que l'eau distillée. Les standards d'analyse doivent donc être produits avec l'eau du site à l'étude.

D'autres colorants fluorescents tel la rhodamine WT, la lissamine ou la pyranine sont fréquemment utilisés pour effectuer des essais de traçage en eau souterraine. Cependant, ces traceurs possèdent une fluorescence moins élevée et un taux de sorption supérieur à l'uranine. Selon Field et al. (1995), tous ces traceurs peuvent être utilisés sous les mêmes conditions que l'uranine sans être dommageables pour la santé. Il serait cependant inapproprié de les utiliser en eau potable étant donné leur limite de détection plus élevée qui nécessite l'augmentation des concentrations au puits d'échantillonnage.

La riboflavine, généralement appelée vitamine B2, est une vitamine hydrosoluble qui est fluorescente lorsque dissoute dans l'eau (comme la fluorescéine de sodium). Sa solubilité étant faible, il faut la mélanger au préalable avec une petite quantité d'acide acétique (vinaigre). À notre connaissance, la riboflavine n'a jamais été utilisée comme traceur dans l'eau souterraine. Des expérimentations en laboratoire et sur le terrain devraient être effectuées afin de mieux connaître ses caractéristiques physico-chimiques. Sa toxicité étant pratiquement nulle, les risques associés sont presque absents.

De tous les traceurs mentionnés ci-haut, l'uranine semble être le meilleur choix et c'est le seul traceur effectivement utilisé dans le cadre de ce projet. L'uranine possède les caractéristiques suivantes :

Formule chimique : $C_{20}H_{10}Na_2O_5$

Poids moléculaire : 376.28

Longueur d'onde d'extinction : 491 nm (principale), 322 (secondaire)

Fluorescence maximale à 512 nm

Solubilité dans l'eau : 600 g/l

Constante de diffusion : $1,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

L'uranine possède une fluorescence variable en fonction de sa concentration dans l'eau (figure 4.4). La concentration qui procure la valeur maximale de fluorescence est approximativement 10 mg/l (Käss, 1998). Le pH à partir duquel la fluorescence de l'uranine est maximale est approximativement de 8,5 et plus ; dans les milieux acides ce traceur est donc déconseillé (figure 4.5). Son utilisation est aussi déconseillée dans les cours d'eau de surface car le traceur se photo-dégrade rapidement lors de l'exposition à des rayons ultraviolets.

4.1.3 Estimation de la quantité de traceur à l'injection

En plus du choix judicieux du traceur, il faut être en mesure de prévoir la concentration du traceur au puits de captage afin de conserver une eau de bonne qualité. Plusieurs chercheurs ont développé des relations mathématiques afin de prévoir la concentration maximale au point d'échantillonnage (Bendel, 1948 ; Leibundgut, 1974; Gaspar, 1987; Käss, 1998). La majorité des équations développées par ces auteurs sont

empiriques et se basent presque uniquement sur le débit de pompage du puits d'exploitation (Field, 2002). Aussi, la modélisation numérique peut être utilisée pour estimer la quantité de traceur à injecter. Cependant, l'estimation du coefficient de dispersivité rend souvent inexacte la simulation numérique. Un logiciel informatique développé par Field (2002) à partir de solutions analytiques, *Efficient Hydrogeologic Tracer-Test Design (EHTD)* a été utilisé pour planifier les essais de traçage réalisés dans l'aquifère alimentant le puits PE-3 de Saint-Félicien. Ce logiciel tient compte de la dispersion hydrodynamique, du débit de pompage, de la porosité effective de l'aquifère et de la distance entre le puits de pompage et le puits d'injection. Il néglige cependant le gradient régional et suppose un milieu poreux, homogène et d'épaisseur constante. La qualité des estimations des paramètres considérés est évidemment très importante pour le succès d'un essai de traçage positif.

Le logiciel EHTD utilise l'équation d'advection-dispersion à une dimension :

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \mu C \quad (10)$$

où R_d [] correspond au facteur de retard, μ [T^{-1}] est la dégradation du traceur, C [ML^{-3}] est la concentration du traceur, D [L^2T^{-1}] est la dispersion, v est la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine [LT^{-1}] et z [L] est la distance dans la direction de l'écoulement.

Le facteur de retard en milieu fracturé peut s'exprimer de la façon suivante :

$$R_d = 1 + \frac{2K_a}{b} \quad (11)$$

où K_a [L] correspond au coefficient de distribution des fractures (dense à dispersée) et b [L] est la demi-ouverture des fractures. Le coefficient de dégradation du traceur s'exprime comme suit:

$$\mu = \mu_l + \frac{2K_a \mu_s}{b} \quad (12)$$

où μ_l [T] est la portion dégradée dans l'eau tandis que μ_s [T] correspond à la portion dégradée de la phase sorbée. Les paramètres géométriques applicables, tels la vitesse de l'écoulement souterrain, le volume d'eau traversant l'aquifère et la porosité effective s'intègrent au modèle à l'aide des équations suivantes:

$$V = \pi L \left(\frac{H}{2} \right)^2 \quad (13)$$

Où V [L³] correspond au volume d'eau tracé, L [L] est la distance entre les points d'injection et le point d'échantillonnage, et H [L] est l'épaisseur prévue du panache du traceur ; en première approximation, la valeur de H peut être considérée comme étant 10 % supérieure à la longueur de la crépine. La vitesse de l'écoulement souterrain s'estime par la relation :

$$v = \frac{Q}{\pi L H n_e} \quad (14)$$

où v [LT^{-1}] correspond à la vitesse de l'écoulement souterrain, Q [L^3T^{-1}] est le débit de pompage et n_e est la porosité effective. Afin d'évaluer le temps de la première arrivée du traceur, le logiciel EHTD utilise la formule suivante:

$$t = \frac{L}{v} \quad (15)$$

où t [T] correspond au temps. Pour ce qui est de l'estimation de la durée totale de l'essai (t_d), l'équation suivante est utilisée :

$$t_d = \frac{n_m L}{v} \quad (16)$$

où n_m prend une valeur entre 2 et 3, dépendant du type de traceur utilisé ; il constitue un facteur multiplicatif empirique et tient compte notamment du degré de sorption du traceur.

A l'aide de ce logiciel, il est possible d'obtenir des prévisions du temps de la première arrivée du traceur, du temps de résidence du traceur en fonction de la durée de l'injection et de la concentration maximale attendue au puits. Évidemment, ces estimations sont valides si le modèle conceptuel et la valeur des paramètres d'entrée sont corrects. Pour cette raison, il est suggéré d'effectuer quelques essais de traçage de courte durée afin de calibrer les paramètres d'entrée, avant de réaliser un essai de traçage qui peut s'échelonner sur plusieurs semaines.

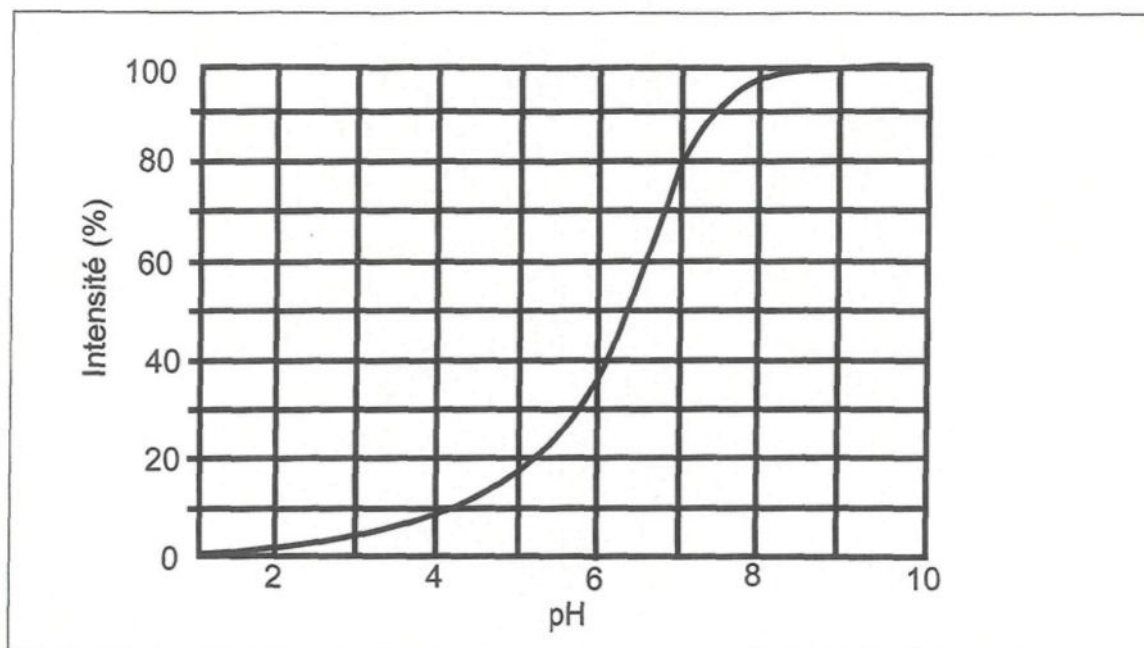


Figure 4.5: graphique illustrant l'augmentation de l'intensité de la fluorescence de l'uranine en fonction du pH de l'eau souterraine. L'intensité optimale est atteinte lorsque le pH dépasse 8.5 (Kass, 1998).

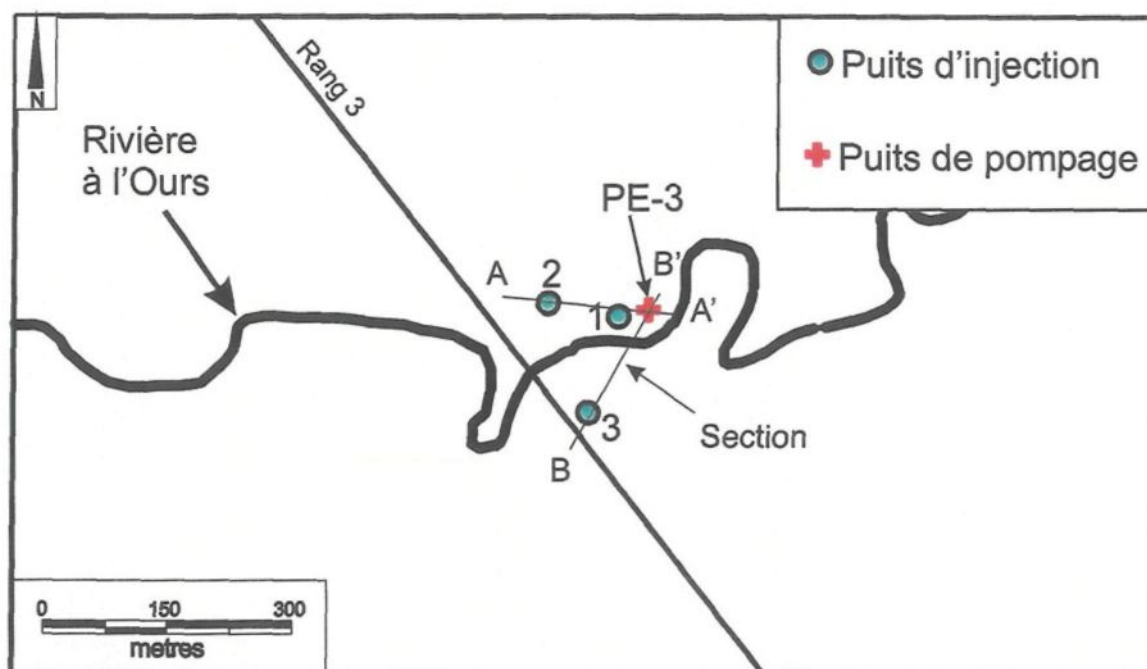


Figure 4.6: Plan de localisation du puits PE-3 et des trois piézomètres qui ont servi à l'injection de l'uranine. Les municipalités de Saint-Félicien et de Saint-Prime sont séparées par la rivière à l'Ours.

4.1.4 Résultat des essais de traçage

Trois essais de traçage en eau souterraine ont été effectués en convergence vers le puits PE-3 de Saint-Félicien. Les trois essais correspondent dans l'ordre d'application aux numéros des puits d'injection illustrés sur les figures 4.6, 4.7 et 4.8. Les deux premiers essais avaient comme objectifs d'évaluer le temps de transfert de l'eau souterraine ainsi que d'estimer certains paramètres hydrogéologiques importants tel que la porosité effective et la dispersivité. Le troisième essai de traçage a été réalisé du côté opposé de la rivière à l'Ours et avait comme objectif principal de vérifier l'hypothèse que le puits PE-3 capte l'eau souterraine provenant du côté sud de la rivière.

Durant les trois essais de traçage, le puits PE-3 était pompé à un débit d'exploitation constant de $114 \text{ m}^3/\text{jour}$. La distance entre le puits de pompage et chacun des puits d'injection est de 5 mètres pour le premier essai, de 42 mètres pour le second et de 58 mètres pour le troisième. La concentration maximale prévue au point d'échantillonnage était de 0.1 mg/l . À cette concentration, le traceur n'est pas toxique et sa visibilité dans l'eau est négligeable. Le débit d'injection pour chacun des essais était de 50 l/heure et d'une durée d'une heure.

Pour l'essai de traçage numéro 1, la masse injectée dans le piézomètre no 1 a été de 11.5 grammes . La durée d'injection d'une heure et la courte distance de parcours ont généré un plateau sur la courbe de restitution (figure 4.9). Lorsque la distance est courte, la dispersion est minime et afin d'obtenir une estimation représentative du temps de

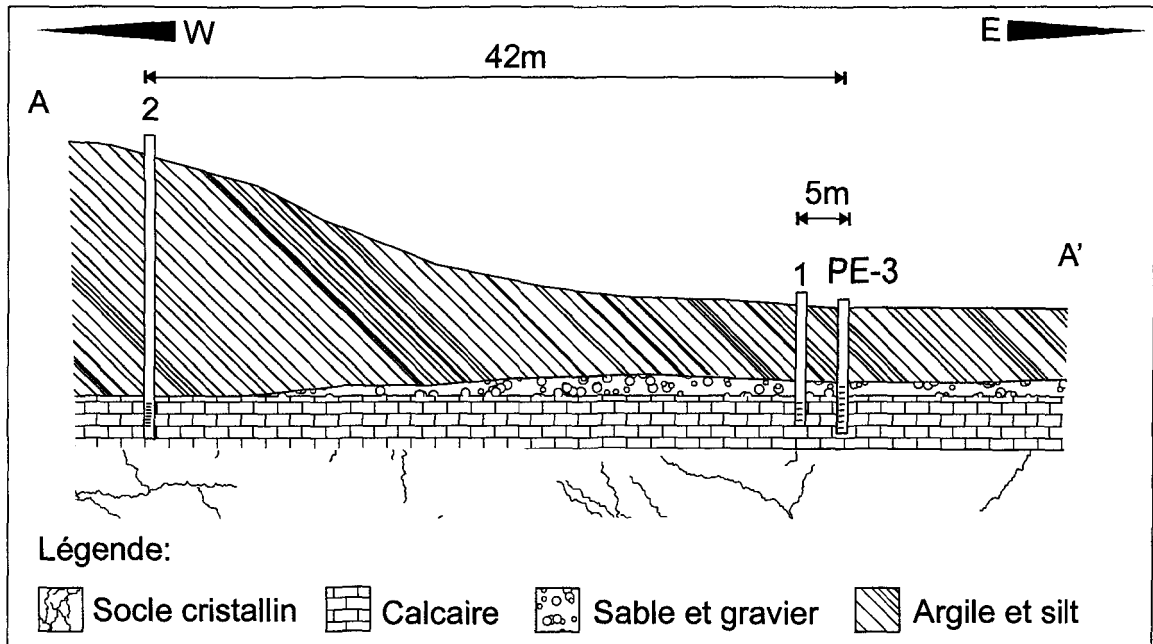


Figure 4.7: Section schématique illustrant la configuration des injections no. 1 et 2 du traceur dans l'eau souterraine.

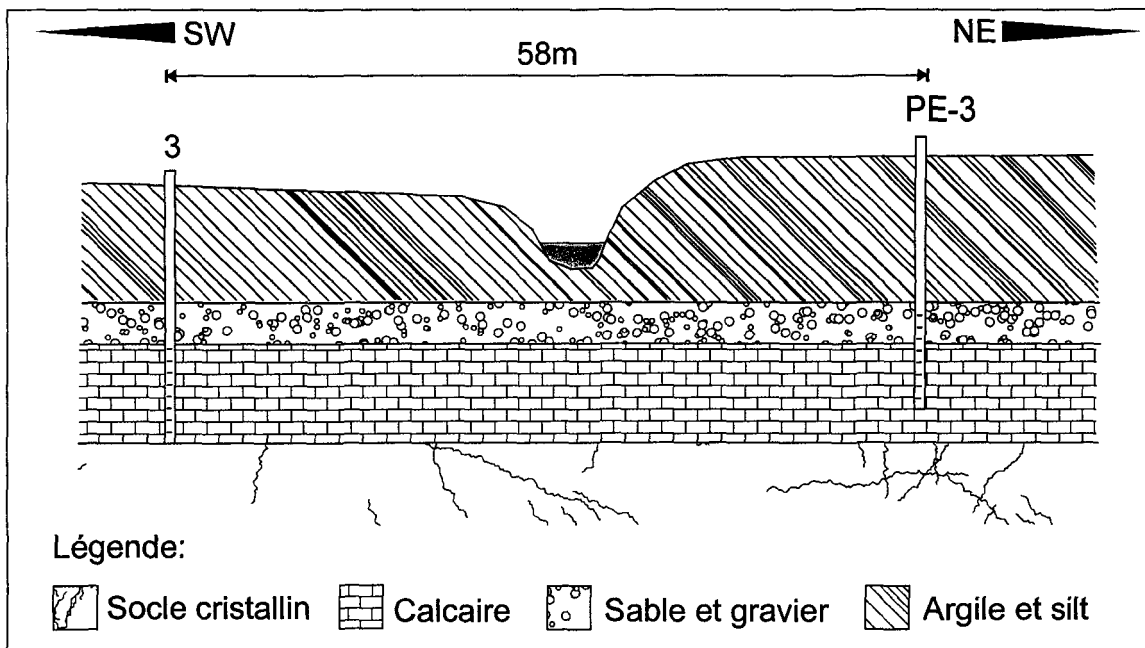


Figure 4.8: Section schématique illustrant la configuration de l'injection no. 3 du traceur dans l'eau souterraine.

transfert, l'injection doit être ponctuelle. La récupération au cours de cet essai a été rapide : 100 % de la masse a été récupérée à l'intérieur d'une durée de 2 heures et la concentration maximale au point d'échantillonnage était approximativement de 0,2 mg/l. La première arrivée a eu lieu environ trois minutes après le début de l'injection et le petit pic au début de la courbe de restitution a été causé par un débit d'injection plus rapide au début de la période d'injection. Le plateau sur la courbe de restitution rend difficile l'évaluation du temps de transfert du traceur dans l'eau souterraine. Par exemple, deux injections effectuées au même endroit mais de durées différentes engendreraient deux évaluations différentes du centre de gravité de la courbe de restitution, donc deux estimations différentes du temps de transfert moyen. En utilisant les résultats de cet essai de traçage et en utilisant le logiciel EHTD développé par Field (2002), la porosité effective de la formation aquifère fracturée a été estimée à environ 3 %.

Pour le second essai de traçage, la masse injectée a été de 50 grammes. La distance séparant le piézomètre d'injection no 2, du puits d'échantillonnage est plus élevée pour l'essai no 2 que pour l'essai no 1 ce qui a généré une plus grande dispersion (figure 4.10). La première arrivée au puits de pompage a été détectée environ 4 heures après le début de l'injection et la concentration la plus élevée mesurée a été atteinte après environ 28 heures. La concentration maximale a été approximativement de 0,008 mg/l, ce qui est plus d'un ordre de grandeur inférieur à la concentration recherchée (0.1 mg/l). Le temps de transfert moyen calculé a été estimé à 32 heures et approximativement 57% de la masse de traceur injectée a été récupérée après 120 heures. La porosité effective

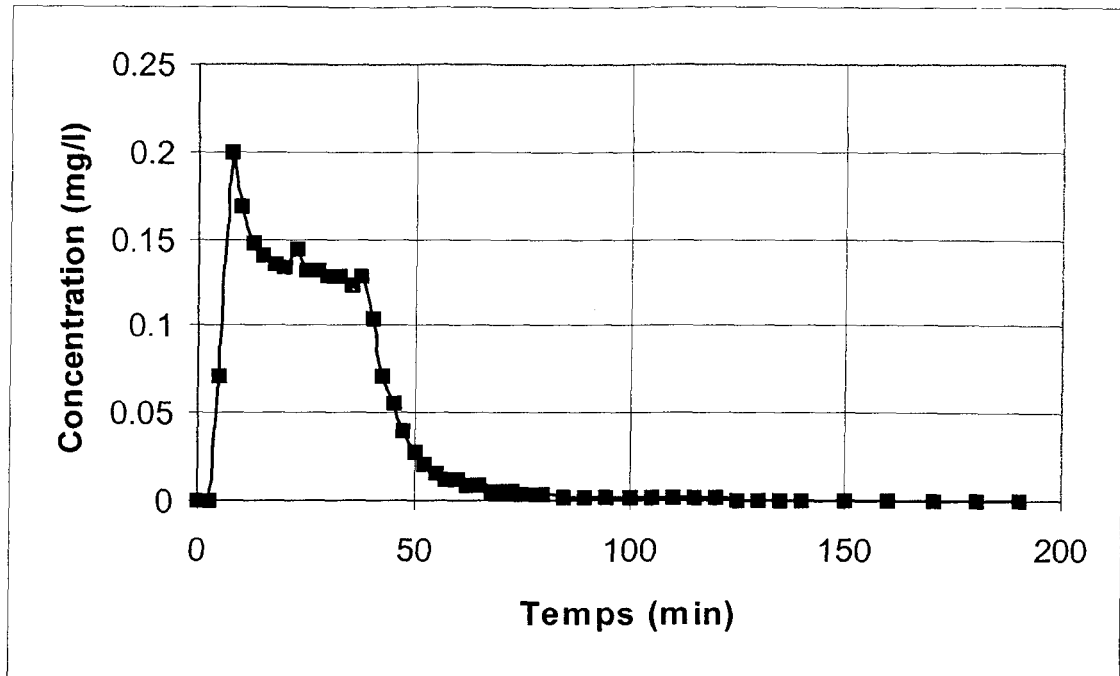


Figure 4.9: Courbe de restitution pour l'essai de traçage numéro 1. La distance entre le point d'injection (piézomètre no 1) et le point d'échantillonnage (puits PE-3) est d'environ de 5 mètres.

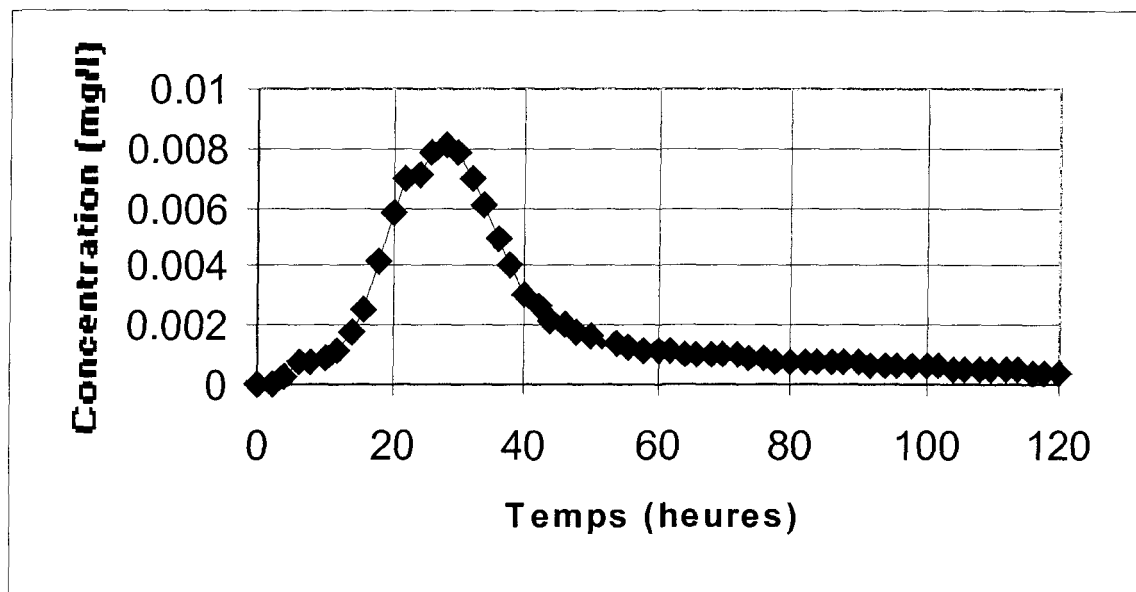


Figure 4.10: Courbe de restitution pour l'essai de traçage numéro 2. La distance entre le point d'injection (piézomètre no 2) et le point d'échantillonnage (puits PE-3) est d'environ de 42 mètres.

évaluée à partir des résultats de ce second essai est de 10%, soit une valeur significativement supérieure à celle estimée au premier essai (3%).

À cause d'une distance plus grande entre les points d'injection et d'échantillonnage (58 m) lors du troisième essai, une dispersion plus grande que pour l'essai no.2 a été envisagée. Aussi, suite au faible taux de récupération du traceur lors de l'essai précédent, la masse injectée au troisième essai de traçage a été établie à 360 grammes d'uranine. La première arrivée de traceur a été très rapide, soit environ une heure après le début de l'injection du traceur (figure 4.11). La concentration maximale durant cet essai a été mesurée 18 heures après le début de l'injection ; elle était d'environ 0,085 mg/l, soit très près de la valeur attendue (0.1 mg/l). Le temps nécessaire pour atteindre la valeur la plus élevée (pic) d'uranine dans l'eau durant l'essai no.3 a été environ de 10 heures inférieur au temps nécessaire pour atteindre le pic lors de l'essai no 2. La masse récupérée est environ 98 % de la masse injectée et le temps de transfert moyen est estimé à 21,5 heures. Le tableau 4.1 présente une synthèse des résultats obtenus lors des trois essais de traçage.

Tableau 4.1 : Résumé des résultats des essais de traçage.

Test No.	distance directe : Injection-échantillonnage (m)	Temps de la première arrivée (heure)	Temps du pic (heure)	TDT moyen (heure)	Masse de traceur injectée (g)	Azimut entre le point d'injection et d'échantillonnage	Récupération du traceur (%)
1	5	0.05	-----	-----	11.5	80°	100
2	42	4	28	32	50	100°	57
3	58	1	18	21	360	35°	98

TDT : Temps de transfert

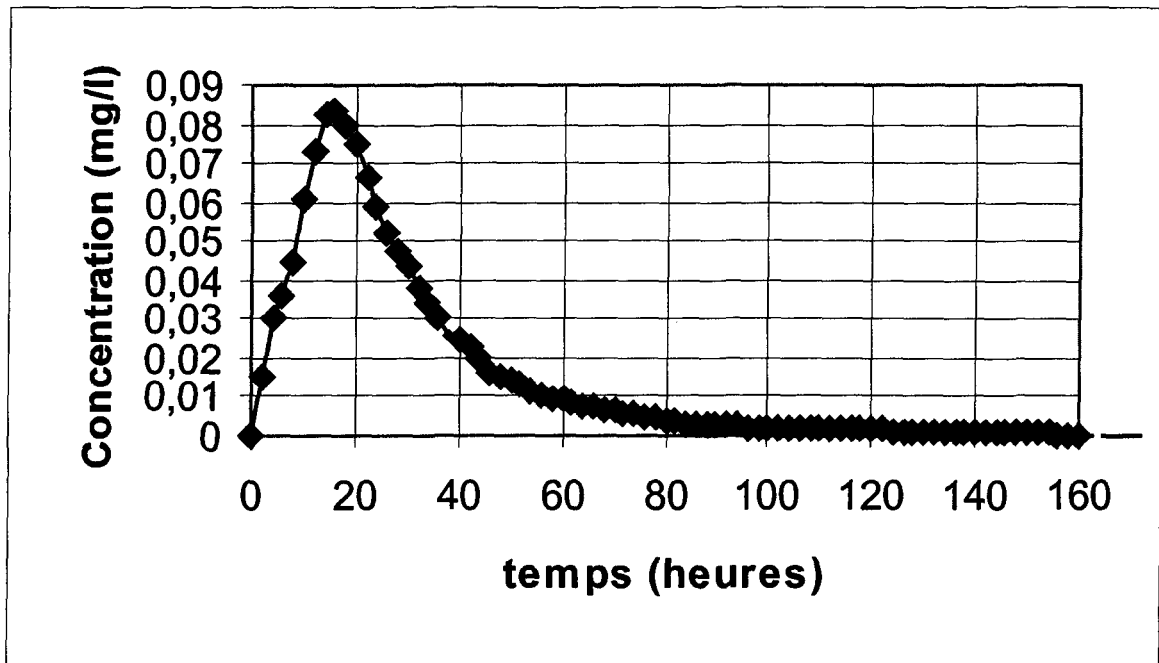


Figure 4.11: Courbe de restitution pour l'essai de traçage numéro 3. La distance entre le point d'injection (piézomètre no 3) et le point d'échantillonnage (puits PE-3) est environ de 58 mètres.

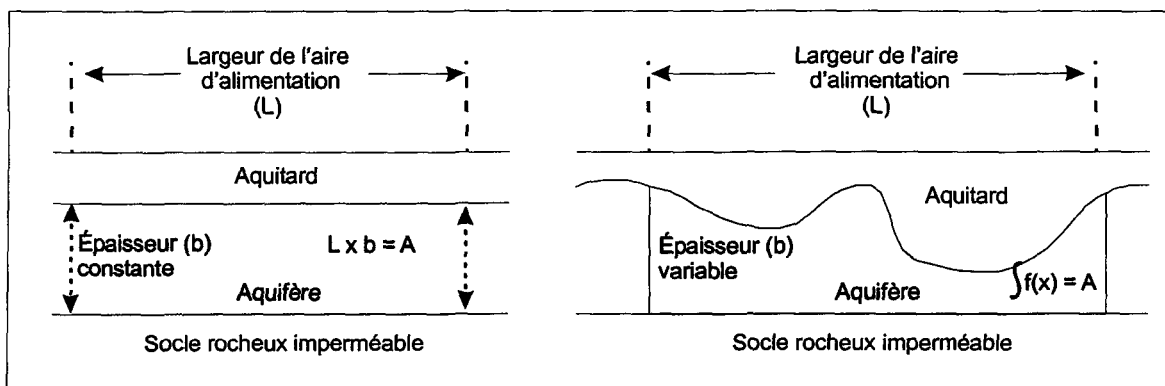


Figure 4.12: Section normale à l'axe de l'écoulement souterrain en aquifère confiné a) dans un aquifère homogène et d'épaisseur constante; b) dans un aquifère d'épaisseur variable.

4.2 Sismique réfraction

La sismique réfraction est une méthode géophysique souvent utilisée pour évaluer la profondeur et le profil du socle rocheux. Dans le cadre de l'estimation de l'aire d'alimentation d'un puits de pompage, cette méthode permet notamment d'évaluer les dimensions de la section normale à la direction de l'écoulement souterrain (figure 4.12).

4.2.1 Les principes de la méthode

La sismique réfraction consiste en la mesure du temps des premières arrivées de l'énergie sismique à partir de récepteurs appelés géophones (Gilbert et al., 1999). L'énergie est transmise dans le sol par une source telle la dynamite, des fusils spéciaux, une charge tombante, etc. Aux interfaces stratigraphiques, où il y a un changement de vitesse de propagation des ondes, l'énergie est réfractée suivant la loi de Snell :

$$\sin i_1 / V_1 = \sin i_2 / V_2 \quad (17)$$

où i_1 [°] est l'angle entre la normale du contact et l'onde générée qui voyage à une vitesse V_1 [LT⁻¹] dans la couche 1 et i_2 [°] est l'angle entre la normale du contact et l'onde générée voyage à une vitesse V_2 [LT⁻¹] dans la couche 2. La méthode utilisée pour interpréter les résultats de la sismique réfraction obtenus à Saint-Félicien est la méthode réciproque généralisée développée par Palmer (1981).

De façon générale, la sismique réfraction est utile lorsque le socle cristallin est à moins de 50 mètres de profondeur (Gilbert et al. 1999). La longueur des lignes doit être idéalement de 3 à 5 fois supérieure à la profondeur de l'horizon recherché. Ce type de méthode suppose que la vitesse de propagation des ondes augmente avec la profondeur. Par exemple, si la stratigraphie en place est argile sur gravier sur argile, il est peu probable, voir impossible de détecter la couche d'argile la plus profonde car sa vitesse est inférieure à celle de sa couche sus-jacente. Aussi, ce type de levé ne permet généralement pas l'estimation de la profondeur du toit de la nappe d'eau souterraine, car le contraste de vitesse des ondes qui se propagent dans un milieu saturé ou non saturé est minime.

4.2.2 Les levés effectués et les résultats

À Saint-Félicien, quatre lignes de sismique (identifiées 1 à 4) ont été réalisées de façon à suivre approximativement une isochrone de temps de parcours de l'eau souterraine en direction du puits PE-3 (figure 4.13). La position de ces isochrones a été déterminée à partir de l'estimation de l'aire d'alimentation faite par Hydrogéosol Inc. (1997) (figure 3.5).

L'interprétation des lignes de sismique réfraction a été appuyée par les sondages stratigraphiques présents dans les environs. Rappelons que la stratigraphie environnante est du sommet jusqu'à sa base composée d'argile, de sable et gravier, de calcaire fracturé et d'un socle cristallin relativement sein. Les vitesses de propagation des ondes associées à ces dépôts sont approximativement de 1000 m/s pour l'argile, 2000 à 2500 m/s pour le

sable et gravier, 3000 m/s pour le calcaire fracturé et de 5000 m/s pour le socle cristallin (Gilbert et al., 1999; Duberger, communication personnelle). Le faible contraste de vitesse entre le sable et gravier et le calcaire fracturé peut rendre difficile la discrimination du contact entre ces deux milieux.

Le socle rocheux étant environ à 15 m de profondeur, la distance entre les géophones devait être relativement courte (3 mètres). Cependant, afin de minimiser les coûts associés aux relevés, celle-ci a été fixée à 10 m pour les deux premières lignes effectuées. Une ligne contient 24 géophones donc 23 intervalles ; ce qui génère une ligne d'une longueur de 230 mètres pour chacun des deux premiers relevés. Huit tirs de dynamite ont été effectués pour chacune de ces deux lignes. En considérant le géophone no.1, situé en bout de ligne, comme étant le point de référence zéro, les tirs étaient disposés comme ceci : -70, -40, -10, 75, 155, 240, 270 et 300 m.

À cause de la grande distance entre les géophones, nous avons seulement déterminé le contact entre le socle rocheux cristallin et le calcaire fracturé (figure 4.14). Le graphique des temps en fonction de la distance (figure 4.15) illustre bien les deux familles de pente correspondant aux deux milieux détectés, soit les dépôts meubles (arrivées directes) et le socle rocheux (arrivées réfractées). Le graphique de la vitesse en fonction de la distance (figure 4.16) indique de quel type de milieu il s'agit, soit l'argile (1000 m/s) et le socle cristallin (5000 m/s). Les résultats obtenus pour la ligne numéro 2 sont similaires à ceux obtenus pour la première ligne et seulement le profil stratigraphique est présenté (figure 4.17).

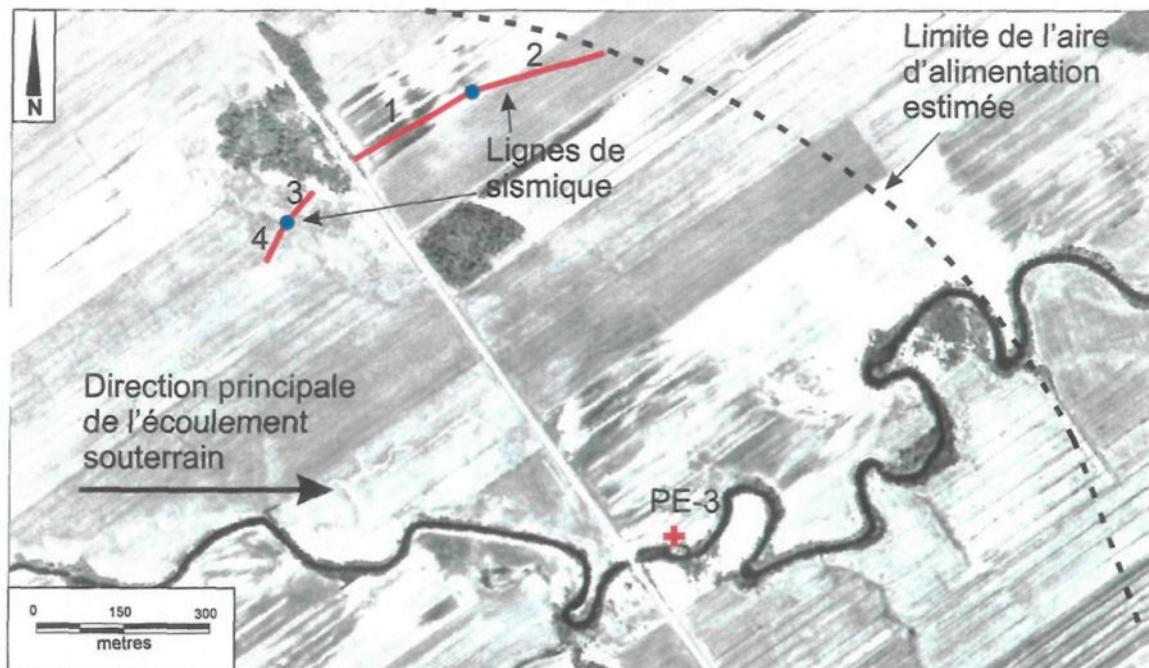


Figure 4.13: Vue en plan de la localisation des quatre lignes de sismique réfraction réalisées à Saint-Félicien. Les lignes de sismique correspondent approximativement à une isochrone de temps de parcours de l'eau en direction du puits.

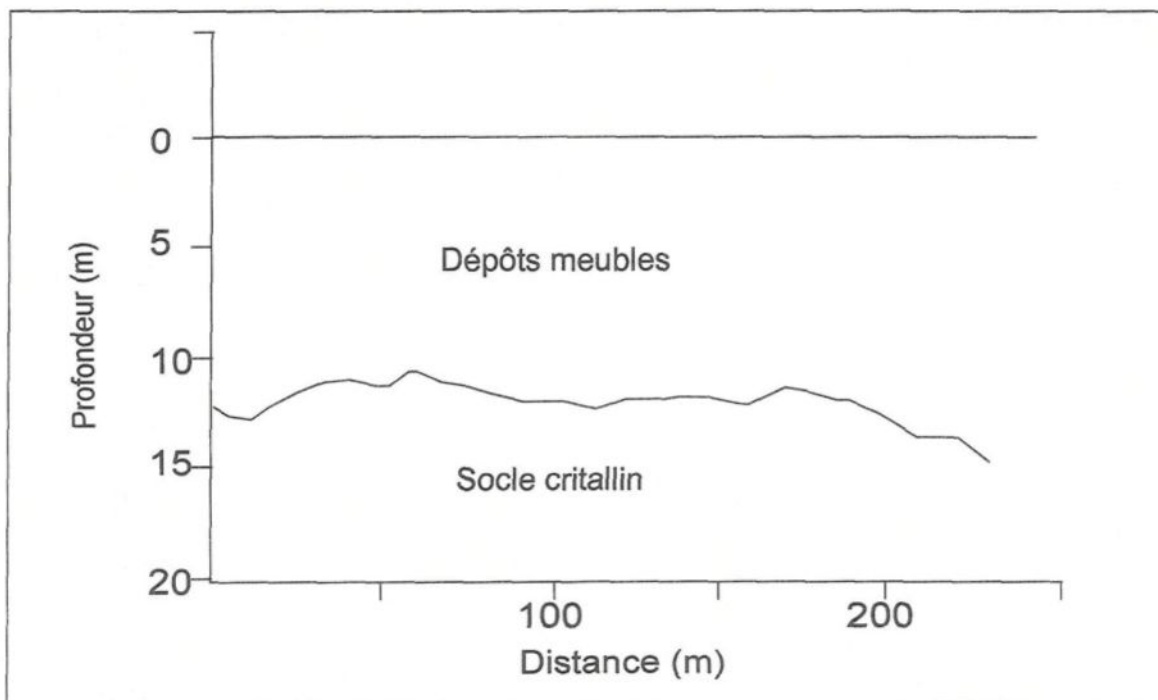


Figure 4.14: Section résultant du levé de sismique réfraction numéro 1. La grande distance entre chaque géophone a permis uniquement la distinction du contact du socle cristallin.

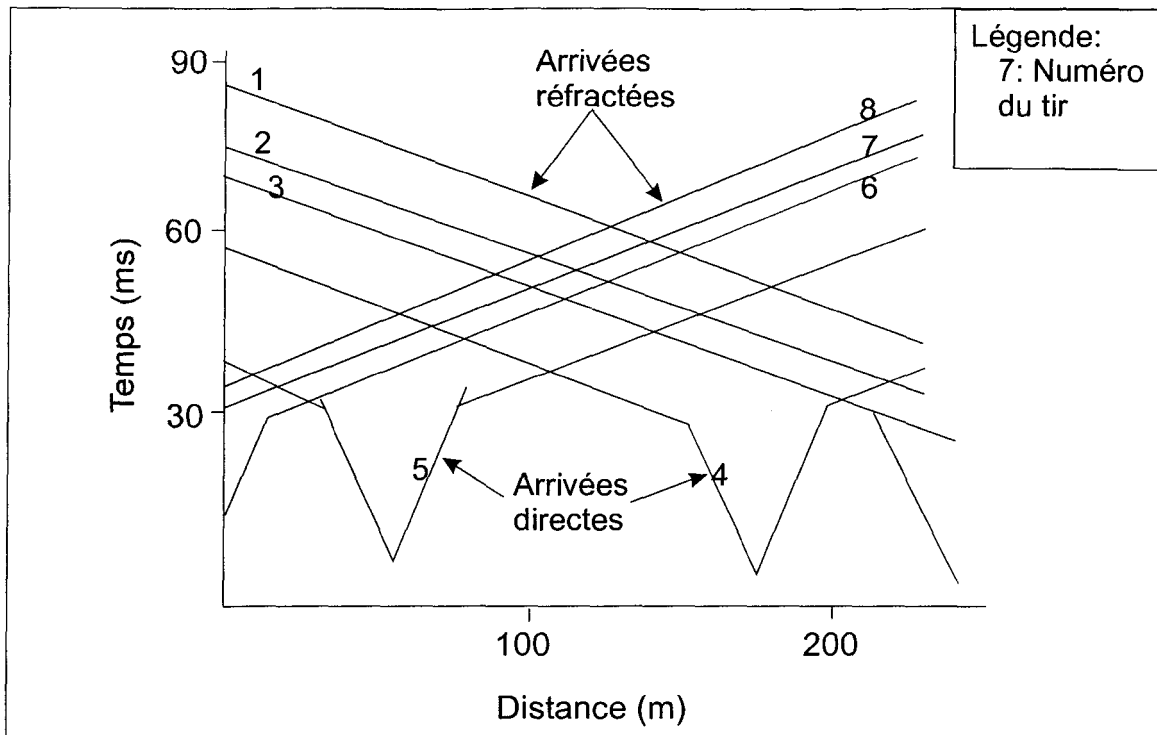


Figure 4.15: Graphique du temps des arrivées en fonction de la distance pour la ligne sismique numéro 1. Seulement deux familles de pente sont visibles et correspondent aux arrivées directes et réfractées d'un des milieux.

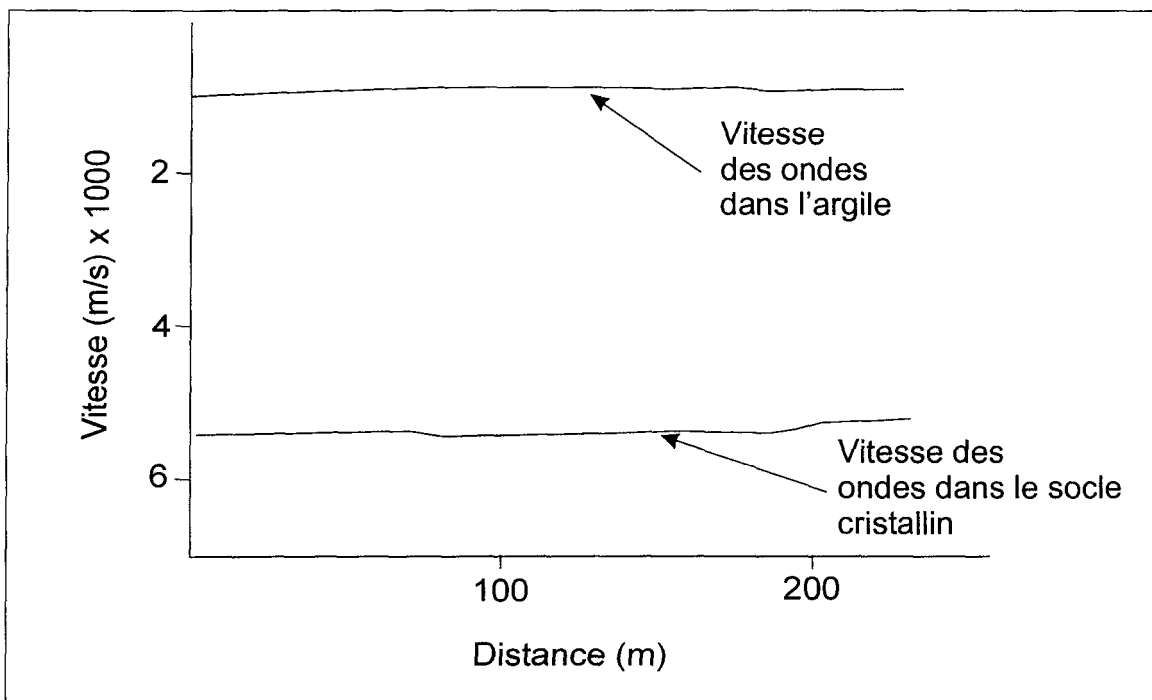


Figure 4.16: Graphique de la vitesse de propagation des ondes en fonction de la distance pour la ligne 1. Deux lignes de vitesse sont visibles: la vitesse dans l'argile (1000 m/s) et la vitesse dans le socle cristallin.

Pour les lignes sismiques numéro 3 et 4, la distance entre les géophones a été réduite à 3 mètres au lieu de 10 mètres, dans le but d'obtenir une meilleure précision. La distance couverte pour chacune de ces lignes a donc été de 69 m. Pour ces deux lignes, seulement 6 tirs par ligne ont été réalisés soit à : -40, -10, 16.5, 52.5, 79 et 109 m, toujours en supposant que le géophone numéro 1 est le point de référence zéro.

Les résultats ont été beaucoup plus faciles à interpréter pour les essais no.3 et 4 que pour les deux premiers essais, et trois couches (deux contacts) ont été discriminées (figures 4.18 à 4.21). Le graphique des temps en fonction de la distance (figure 4.19) illustre les trois pentes détectables lors de l'analyse des résultats obtenus pour la troisième ligne. Les vitesses attribuables à chacune des couches suggèrent que les milieux rencontrés sont de l'argile, du sable et gravier et le socle cristallin (figure 4.18). Le calcaire fracturé n'a pas été détecté à cause du faible contraste de vitesse de propagation des ondes entre celui-ci et le niveau de sable et gravier.

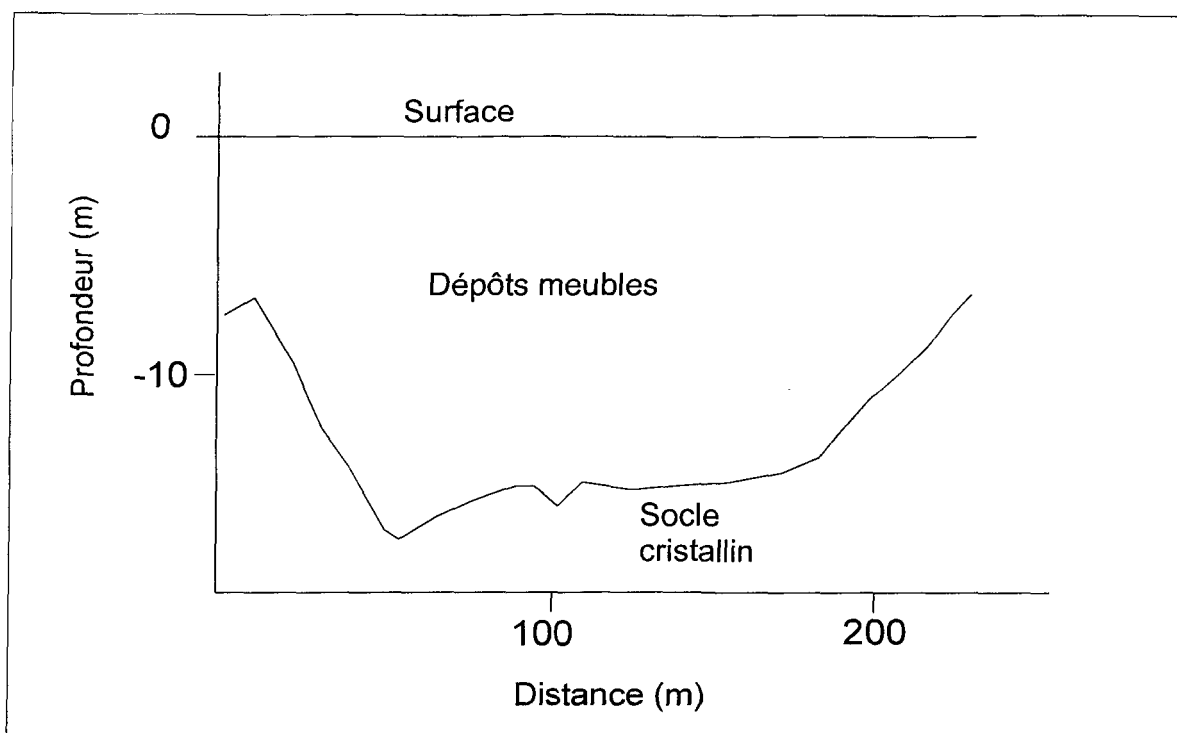


Figure 4.17: Section résultant du levé de sismique réfraction numéro 2. S eulement le contact du socle cristallin a été décelé.

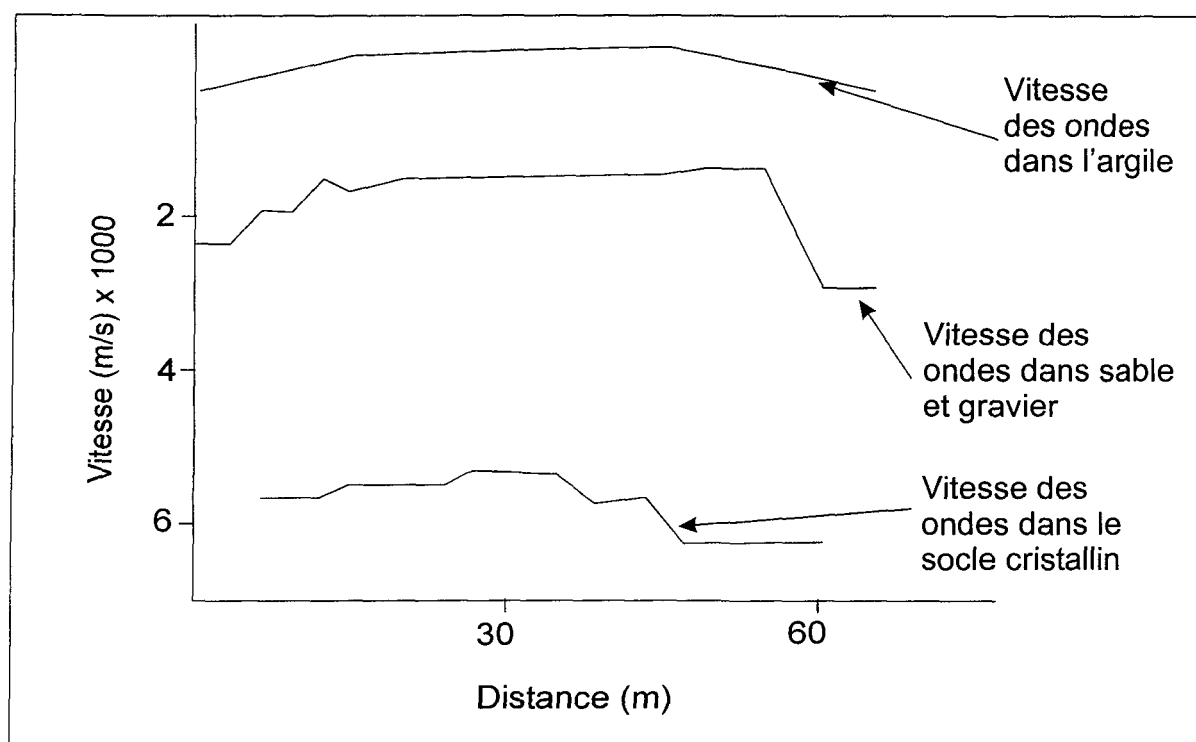


Figure 4.18: Graphique de la vitesse en fonction de la distance pour la ligne no 3. Trois vitesses de propagation des ondes sont visibles : argile (1000 m/s), sable gravier (2000 à 2500 m/s) et le socle cristallin (5000 m/s).

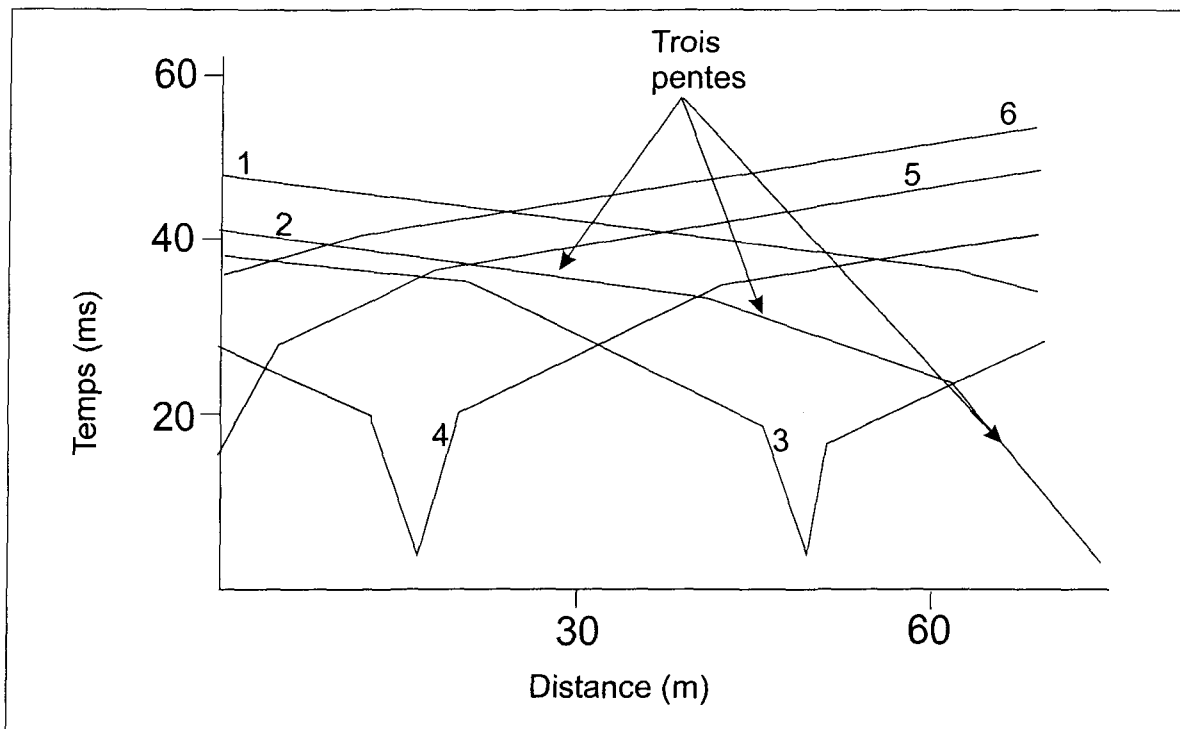


Figure 4.19: Graphique du temps en fonction de la distance des résultats obtenus à partir de la ligne numéro 3. On peut remarquer trois pentes sur la plupart des lignes du graphique. Les tirs 1 et 6 ne montrent que deux pentes correspondant aux contacts entre l'argile et le sable et entre le calcaire et le socle cristallin.

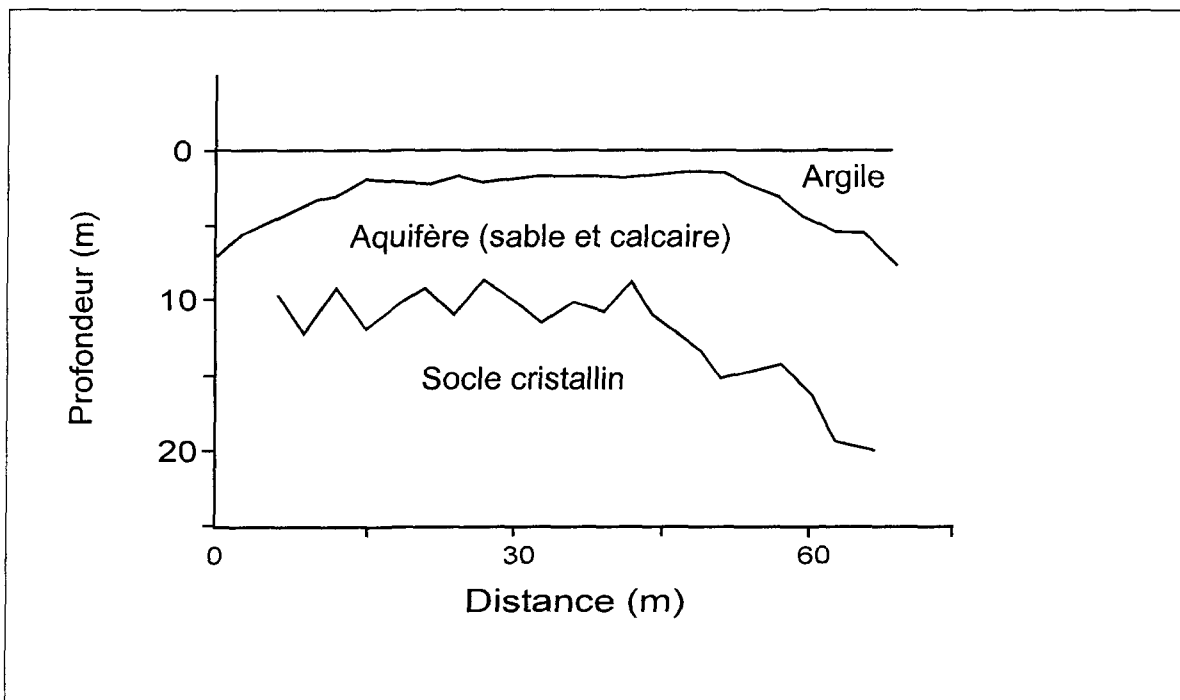


Figure 4.20: Section résultant du levé de sismique réfraction numéro 3. Deux contacts sont identifiés, soit : argile/sable et socle cristallin.

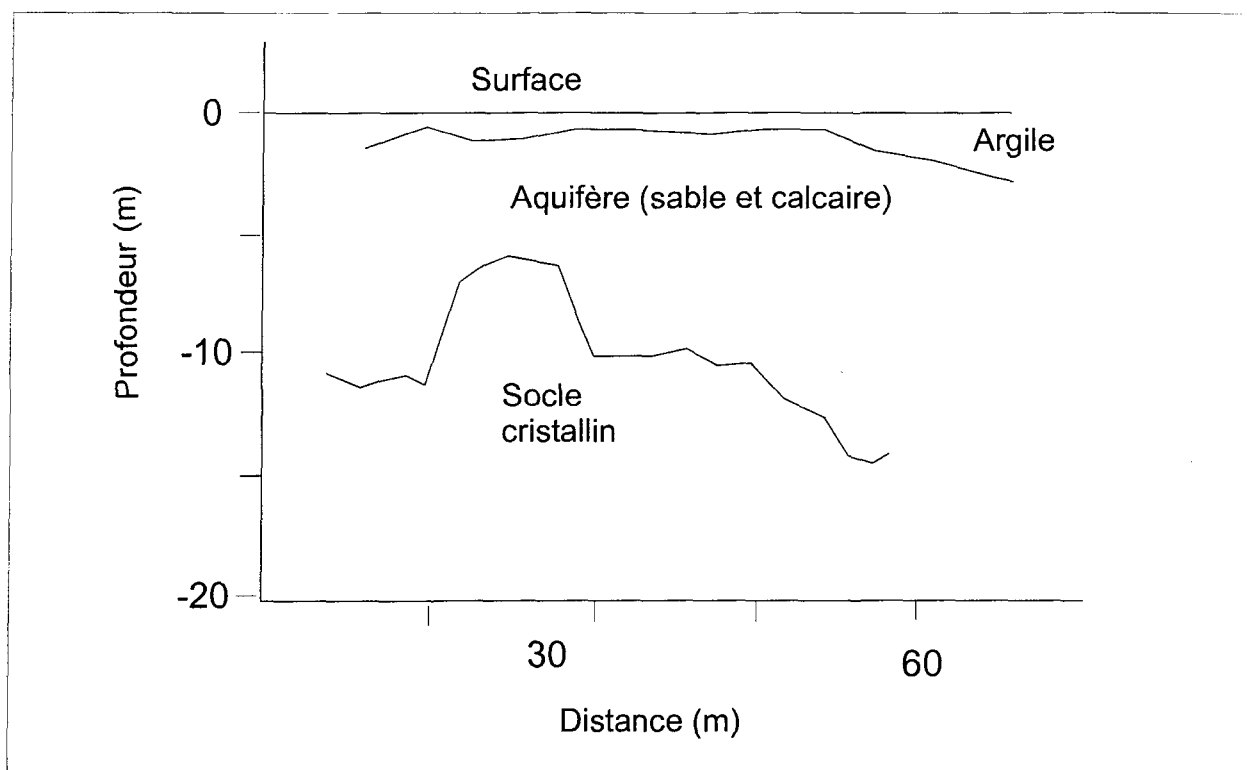


Figure 4.21: Section générée par les résultats obtenus suite à la réalisation de la ligne sismique numéro 4. Deux contacts sont identifiés soit: argile/sable et socle cristallin.

4.3 Discussion sur les travaux d'investigation

4.3.1 Les essais de traçage

Les résultats obtenus à l'aide des essais de traçage démontrent que le puits de pompage PE-3 de ville Saint-Félicien capte de l'eau souterraine provenant de la rive sud-est de la rivière à l'Ours. Comme il y a un couvert argileux à proximité du puits de pompage, il est probable que la majorité de l'eau souterraine captée par le puits PE-3 provienne de secteurs où les dépôts perméables affleurent en surface plutôt qu'au droit du puits. La rivière à l'Ours ne semble pas avoir d'influence sur la forme de l'aire d'alimentation du puits PE-3 à proximité du puits.

Le temps de transfert (TDT) estimé à l'aide des essais de traçage démontre une grande hétérogénéité. Lors du deuxième essai, le TDT a été d'environ 32 heures pour une distance de 42 mètres ; tandis que lors du troisième essai de traçage, le TDT a été de l'ordre de 21 heures pour une distance de 58 mètres. Les TDT estimés à l'aide de la relation analytique (équation 8) développée par Bear et Jacobs (1965) sont plus grand que ceux mesurés par traçage souterrain et ce, même en utilisant les valeurs de la porosité effective estimée à l'aide des essais de traçage, soit : 80 heures pour le second essai de traçage et 121 heures pour le troisième essai. Ces temps calculés sont respectivement 1,9 et 5,8 fois supérieurs à ceux mesurés par traçage souterrain et ce malgré qu'ils aient été calculé pour une trajectoire directe. Cette différence implique une sous-estimation considérable des périmètres de protection rapprochée en utilisant la relation analytique

développée par Bear et Jacobs (1965) et illustre l'importance des incertitudes rattachées à l'utilisation de relations analytiques développées pour des milieux isotropes et homogènes.

La continuité des courbes de restitution obtenues pour les essais de traçage numéros 2 et 3 suggère que le réseau de fracture dans le calcaire fracturé est dense et bien interconnecté. Le TDT obtenu pour le second essai de traçage est supérieur à celui obtenu pour le troisième essai et ce, même si la distance séparant le piézomètre numéro 2 du puits de pompage PE-3 est inférieure à celle séparant le piézomètre numéro 3 de ce puits. Ceci suggère que l'eau provenant du piézomètre numéro 2 suit une trajectoire moins directe pour atteindre le puits de pompage que celle provenant du piézomètre numéro 3. Cette plus longue trajectoire suggère que le piézomètre numéro 2 est situé en bordure de l'aire d'alimentation du puits PE-3 (figure 4.22). Cette interprétation (schéma approximatif sur la figure 4.22) est supportée par la faible récupération de l'uranine lors du second essai de traçage (57 %) en comparaison avec le troisième essai (98 %) ; une proportion significative du traceur a été perdue dans l'aquifère lors de l'essai de traçage numéro 2. L'orientation de l'aire d'alimentation basée sur les essais de traçage est donc sensiblement différente de celle estimée à l'aide de la piézométrie par Hydrogéosol Inc. (1997) et considérée sur la figure 3.5.

Divers éléments structuraux peuvent expliquer la cause des différents TDT et de la récupération de la masse obtenus. Ainsi, on doit se questionner sur les éléments

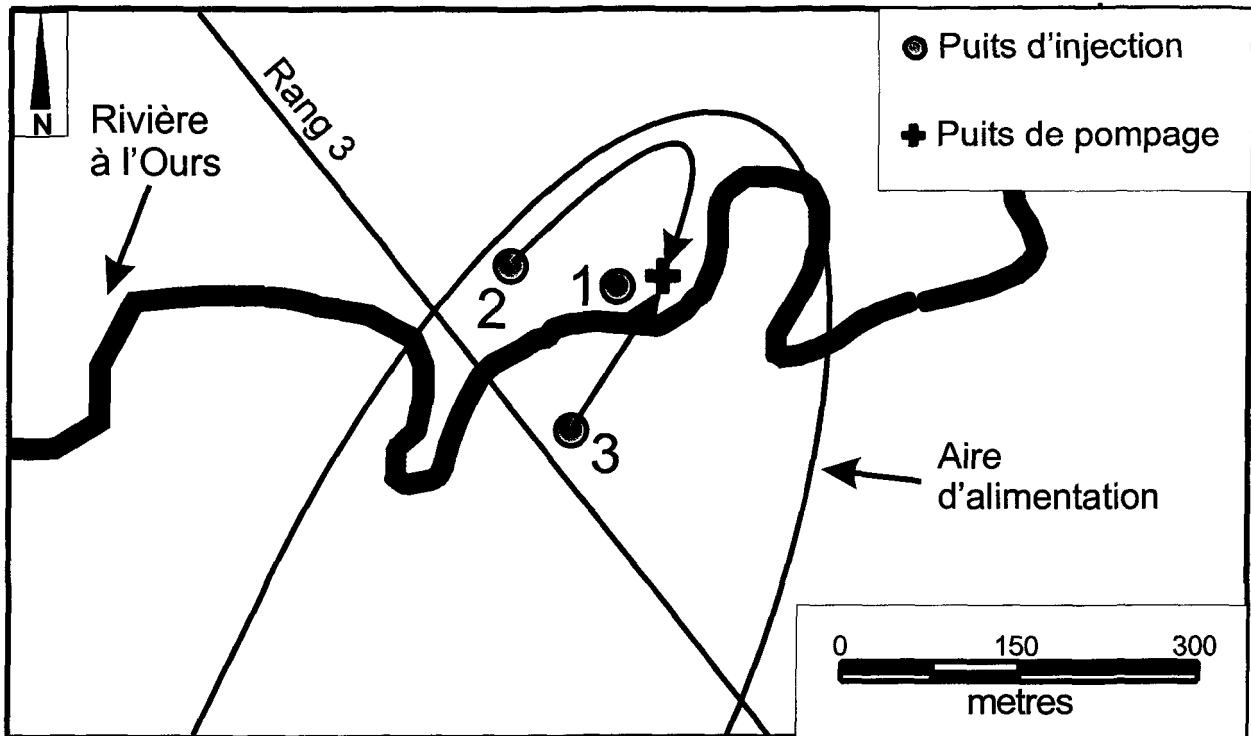


Figure 4.22: Orientation estimée de l'aire d'alimentation basée sur les résultats des essais de traçage.

suivants : 1) la récupération et le TDT plus faible de l'essai no 2 par rapport à l'essai no 3 suggèrent-elles une anisotropie dans l'aquifère en milieu fracturé ; 2) Les grandes vitesses d'écoulement indiquent-elles un effet karstique ; et 3) Les azimuts des deux derniers essais concordent-ils à des éléments importants de la fracturation ?

A ces questions, il est probable que la fracturation des calcaires influe sur l'écoulement souterrain. Les levés de fractures compilés par Laboratoire Géo-Construction (1994) indiquent des orientations préférentielles peu évidentes de la fracturation, soit : 80° , 135° et 170° ; la plus importante étant 135° . Ces orientations ne coïncident pas assez avec les azimuts des essais de traçage (80° pour l'essai 1, 100° pour l'essai 2 et 35° pour l'essai 3) pour en tirer des conclusions fermes. Cependant, la fracturation au sommet des calcaires semble différente de celle plus en profondeur. En effet, le forage effectué (figure 3.4) dans ce projet montre un horizon avec une fracturation beaucoup plus dense. La présence de diaclase ou de karst à une certaine profondeur est donc plausible. Le système de fracture régional est peut-être une explication aux résultats obtenus. St-Félicien est situé sur un corridor de fracturation nord-sud d'échelle continentale qui commence à New-York, qui suit l'axe de la rivière Hudson, du lac Champlain, du Richelieu, du St-Maurice (entre Shawinigan et La Tuque), et de la rivière Mistassini. De plus, le mur sud-ouest du graben du Saguenay est principalement orienté 110° à 170° dans ce secteur (figure 3.1).

4.3.2 La sismique réfraction

La sismique réfraction a permis une estimation de l'épaisseur de l'aquifère dans une section normale à la direction présumée de l'écoulement souterrain. Une estimation plus exacte de l'épaisseur de l'aquifère permet une meilleure estimation de la largeur de l'aire d'alimentation par l'application de la loi de Darcy.

À Saint-Félicien, la sismique réfraction a permis d'estimer l'épaisseur totale de l'unité de calcaire et du dépôt de sable et gravier. L'unité de calcaire est fortement fracturée sur une portion seulement de son épaisseur (figure 3.3 ; Laboratoire Géo-Construction, 1994), ce qui limite l'efficacité des levés de sismique réfraction.

Aussi, en utilisant les dimensions de la section normale à l'écoulement souterrain afin d'estimer l'aire d'alimentation d'un puits de captage, on considère que l'eau de l'aquifère est captée sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Par contre, lorsque la crépine du puits n'est pas installée sur toute l'épaisseur de l'aquifère, il est possible que le puits ne capte pas l'eau provenant de toute son épaisseur. En ignorant cette possibilité, on sous-estime la largeur de l'aire d'alimentation, car la section normale à l'écoulement souterrain aura une hauteur optimale et donc, une largeur minimale

Il en revient donc que les levés de sismique réfraction sont difficile à appliquer lorsqu'il s'agit d'estimer les dimensions de la section normale à l'écoulement souterrain. Entre autres, il est complexe de localiser latéralement le centre de l'aire d'alimentation le

long des lignes sans d'autres estimations de l'aire d'alimentation provenant de différentes méthodes. La sismique réfraction s'applique plus facilement pour comprendre la géologie de l'aquifère ou encore pour créer un bon modèle conceptuel lors d'une modélisation numérique. Cette méthode d'investigation, doit donc être accompagnée d'une méthode d'analyse appropriée.

IMPLANTATION OPTIMALE DE PIÉZOMÈTRES

Parmi les méthodes d'analyse d'estimation de l'aire d'alimentation d'un puits de captage d'eau souterraine, la plupart sont basées sur des relations analytiques de conservation de masse. La cartographie piézométrique est une des méthodes d'estimation : cependant, celle-ci s'applique sans équation analytique et est basée sur des concepts géométriques. Les variations stratigraphiques influent sur la piézométrie qui s'ajuste implicitement à l'hétérogénéité du milieu. Ainsi, on estime l'aire d'alimentation grâce à l'élévation de la table d'eau disponible dans différents puits d'observation. La méthode d'interpolation, le nombre et l'emplacement de puits d'observation ont un impact direct sur la justesse de l'estimation de l'aire d'alimentation.

Dans ce projet de recherche, une approche d'implantation de piézomètres est proposée afin d'optimiser la détermination de l'aire d'alimentation par la méthode de cartographie piézométrique. Cette méthode d'implantation optimale de piézomètres (IOP) a été élaborée à l'aide de différentes méthodes d'interpolation, telles la triangulation et l'analyse des voisins naturels, et en utilisant le système d'information à référence spatiale *MAPINFO*. Des approches d'implantation de piézomètres ont surtout été développées dans le but d'estimer l'étendue d'un panache de contamination (French et al., 2000; Hudak, 2000). Cependant, nous n'avons pas identifié à ce jour de travaux sur une telle

approche appliquée à l'estimation d'aire d'alimentation de puits de captage d'eau souterraine.

Afin de mener à bien ce volet du projet, plusieurs scénarios de terrain virtuel ont été créés à l'aide du logiciel de simulation numérique *Visual MODFLOW*. Les simulations ont permis de générer l'aire d'alimentation pour chacun des scénarios par traçage inverse de particules à l'aide du programme *MODPATH*. L'aire d'alimentation obtenue par cette démarche pour chaque scénario est considérée comme étant l'aire d'alimentation exacte et elle a été utilisée pour développer la méthode d'IOP ainsi que pour comparer les résultats obtenus. Si on utilisait un cas réel de terrain, la comparaison avec l'aire d'alimentation exacte nécessiterait des efforts extrêmement importants incluant notamment l'implantation d'un très grand nombre de piézomètres. De plus, sur le terrain, la forme de l'aire d'alimentation n'est jamais réellement connue mais estimée avec une certaine incertitude.

5.1 Description des scénarios virtuels

Trois terrains virtuels ont été générés. Ces terrains sont basés sur des environnements de dépôts meubles ou encore sur des milieux rocheux fracturés. Il est important de mentionner que ce sont les perturbations hydrauliques qui découlent de la géologie qui sont importantes dans cette analyse, car seulement la piézométrie est considérée afin d'estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage par la méthode d'IOP.

5.1.1 Scénario représentant un ancien delta

Un terrain virtuel représentant un ancien delta de rivière a été élaboré (figure 5.1 et 5.2). Plusieurs strates majeures de sédiments détritiques présente une inclinaison vers le sud d'environ 5° . Le socle rocheux est considéré comme un massif moyennement perméable ayant une conductivité hydraulique de 1×10^{-5} m/s. Au dessus du dépôt deltaïque, se trouve un dépôt d'argile imperméable qui confine l'aquifère. Les dépôts du delta sont composés, de gauche à droite, de sable ($K = 5 \times 10^{-2}$ m/s), de silt ($K = 1 \times 10^{-6}$ m/s), de sable et gravier ($K = 5 \times 10^{-2}$ m/s) et de sable avec trace de silt ($K = 1 \times 10^{-3}$ m/s). La couche de silt (gris pâle) présente deux ouvertures qui laissent circuler une grande quantité d'eau (figures 5.1 et 5.2).

Deux limites à charge constante sont imposées, soit au nord (44 m de hauteur) et au sud (28 m de hauteur), générant un écoulement de l'eau souterraine vers le sud; le gradient hydraulique horizontal moyen dans les dépôts perméables est de 0.001 en condition d'écoulement naturel. La recharge verticale est négligée dans ce modèle ainsi que dans les deux autres modèles virtuels présentés dans ce mémoire.

Un puits de pompage exploitant à un débit de $40\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$ est implanté dans l'horizon de sable et gravier (vert); la crépine du puits est localisée à une profondeur de 21.7 à 27.2 mètres.

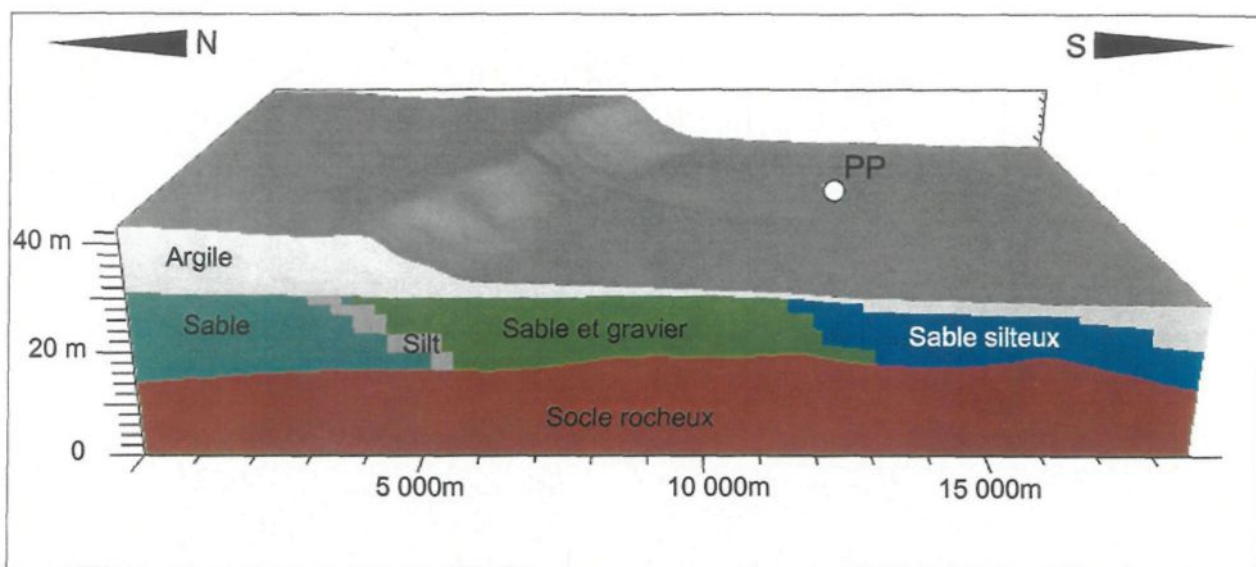


Figure 5.1: Vue en coupe du terrain virtuel représentant un ancien delta. Celui-ci est composé de sable, de silt, de sable et gravier et de sable silteux. Le dépôt d'argile ainsi que le socle rocheux sont considérés comme peu perméables. Éxagération verticale : 1 00 x.

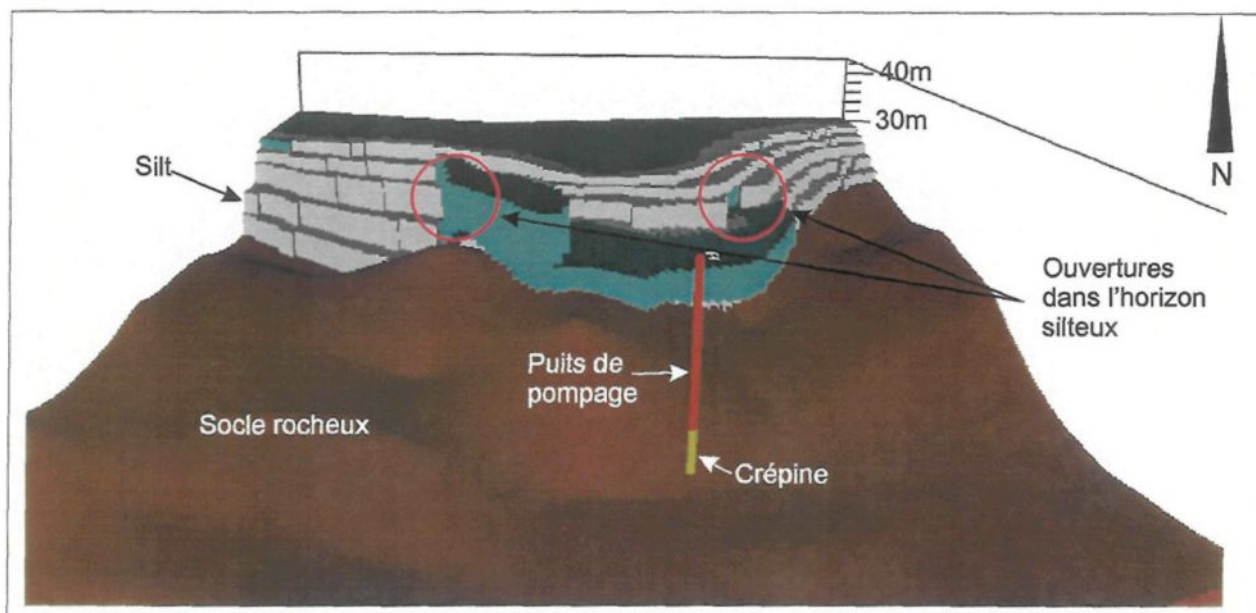


Figure 5.2: Vue en 3 dimensions sur laquelle une partie du dépôt a été enlevé et qui montre les deux ouvertures dans la couche de silt laissant passer une quantité d'eau importante par rapport au reste de la couche. Éxagération verticale : 1 00 X.

L'aire d'alimentation générée par cette configuration géologique et les conditions d'exploitation considérée est ouverte vers le nord et montre une perturbation majeure causée par les deux discontinuités de la couche silteuse décrites plus haut (figure 5.3). Près du puits de pompage, l'aire d'alimentation est de forme quasi-parabolique, à cause de l'homogénéité du milieu à proximité du puits de pompage.

5.1.2 Scénario représentant une ancienne vallée fossile

Un terrain représentant une ancienne vallée fossile a été élaboré (figure 5.4). Nous avons émis l'hypothèse que les dépôts meubles de la rivière ont été déposés à haute énergie et ils sont donc de granulométrie relativement grossière. La conductivité hydraulique associée à ce dépôt sableux est de 1×10^{-3} m/s. Sous ce dépôt perméable se trouve du matériel argileux imperméable ($K = 1 \times 10^{-8}$ m/s) et un dépôt sablo-silteux peu perméable ($K = 1 \times 10^{-4}$ m/s) sus-jacent au socle rocheux lui aussi peu perméable ($K = 1 \times 10^{-7}$ m/s).

Deux limites à charge constante sont imposées. L'une au nord (27 m d'élévation) et une au sud (39 m d'élévation) générant un écoulement de l'eau souterraine vers le nord; le gradient hydraulique horizontal moyen dans les dépôts perméables est de 0.0011 en condition d'écoulement naturel.

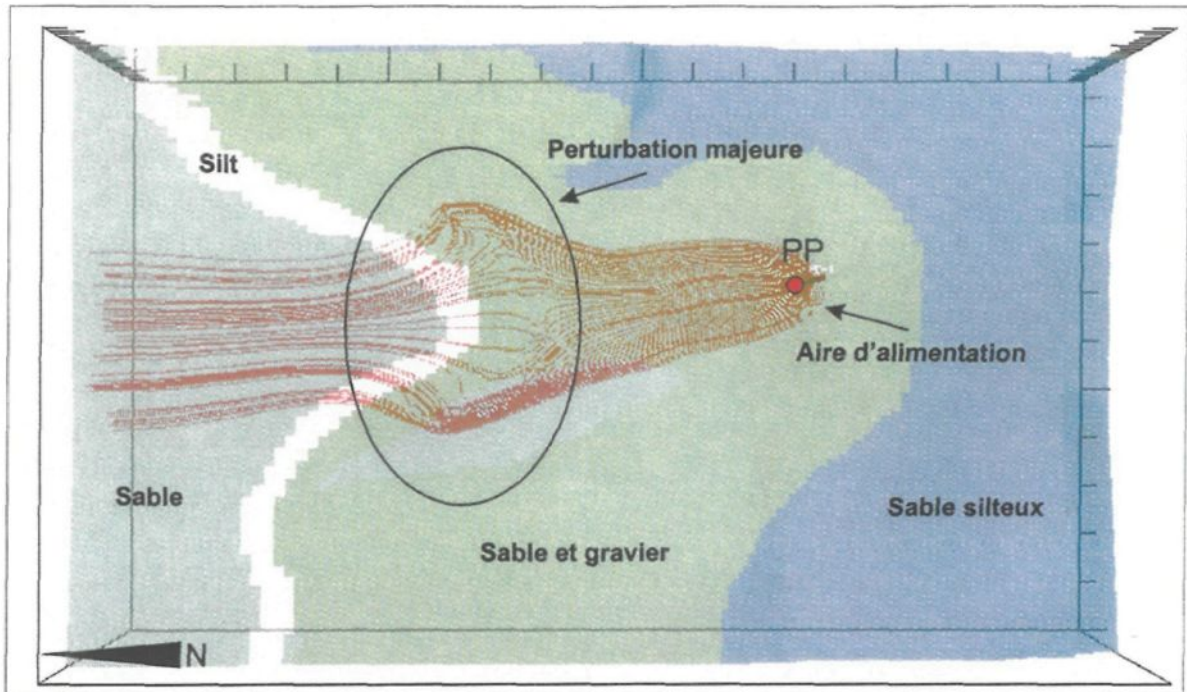


Figure 5.3: Vue en plan de l'aire d'alimentation générée par traçage inverse de particules à l'aide du programme MODPATH de Visual MODFLOW. Une perturbation majeure est présente à cause de la configuration du dépôts ilteux montré à la figure précédente. L'argile a été enlevée pour faciliter la visualisation

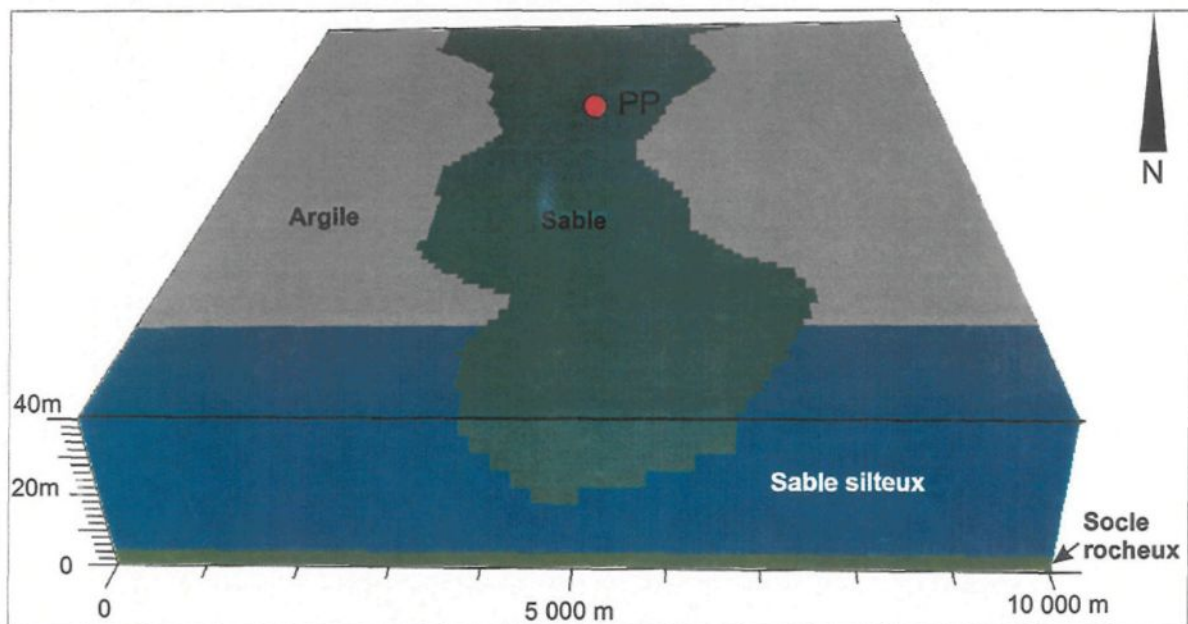


Figure 5.4: Vue en 3 dimensions montrant le terrain virtuel de la vallée fossile. L'ancien lit est situé sur un dépôt argileux et sablo-silteux de faible perméabilité. Exagération verticale: 50 X.

Un puits de pompage exploitant à un débit de 2 000 m³/jour a été implanté dans la partie nord du terrain, dans l'horizon sableux (turquoise). La crépine de ce puits est installée à une profondeur de 12.5 à 17.5 mètres et atteint presque la base de l'aquifère.

L'aire d'alimentation générée par cette configuration géologique et les conditions d'exploitation considérées est ouverte vers le sud et est très évasive à cause des lignes d'écoulement généralement convergentes vers la vallée fossile (figure 5.5). À un débit légèrement inférieur au débit simulé pour obtenir l'aire d'alimentation présentée à la figure 5.5, l'aire d'alimentation est beaucoup plus petite et est restreinte à la vallée fossile plus perméable. Dans le cas étudié, le débit d'exploitation simulé est légèrement supérieur à ce que la portion aquifère est capable de fournir et le puits doit en conséquence capter l'eau aussi de la partie moins perméable, quoiqu'en petite quantité.

5.1.3 Scénario représentant un milieu rocheux fracturé

Un terrain représentant un milieu rocheux fracturé a été élaboré (figure 5.6). Les fractures introduites dans le modèle sont toutes verticales et d'extension variable, verticalement et horizontalement. Le logiciel *Visual MODFLOW* n'est pas conçu pour modéliser des milieux fracturés. Cependant, dans ce modèle, le maillage a été fortement raffiné au droit des fractures afin de générer des fractures d'épaisseur réaliste. La matrice rocheuse possède une conductivité hydraulique 1×10^{-4} m/s tandis que les fractures sont constituées de matériel ayant une conductivité hydraulique allant de 1×10^{-2} m/s à 1×10^{-3} m/s. Une couche d'argile imperméable est sus-jacente au milieu rocheux fracturé.

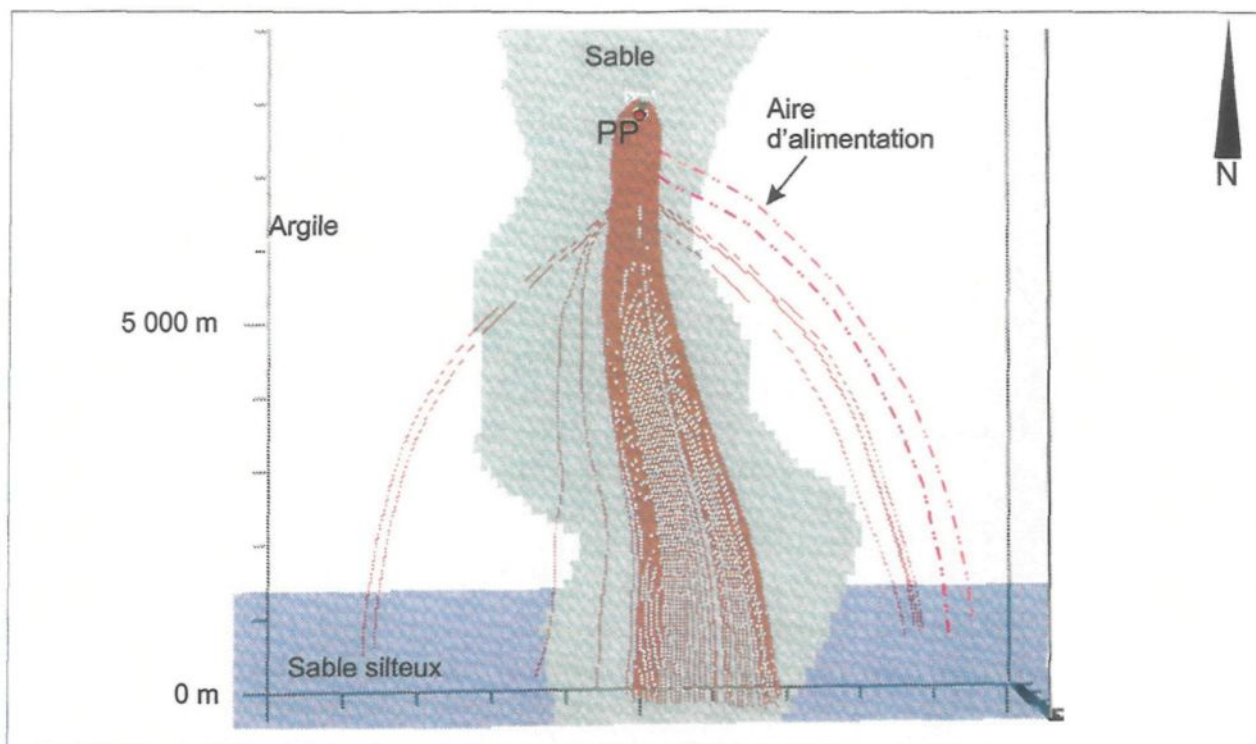


Figure 5.5: Vue en plan de l'aire d'alimentation générée par traçage inverse de particules à l'aide du programme MODPATH. L'aire d'alimentation est de forme évasive. On peut remarquer que la grande majorité des particules qui aboutissent au puits proviennent de l'horizon sableux.

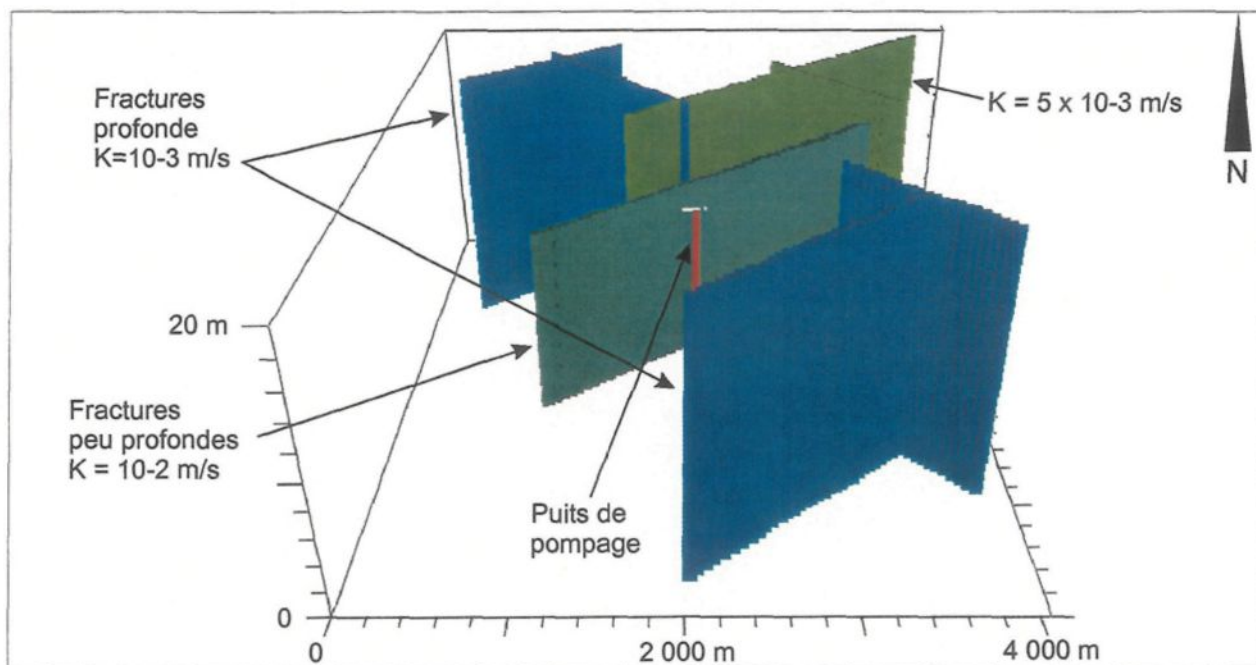


Figure 5.6: Vue en 3 dimensions du réseau de fractures principales contrôlant la forme de l'aire d'alimentation. Les fractures sont toutes verticales. Exagération verticale: 100X.

Une limite à charge générale (*General Head Boundary*) est imposée au nord du terrain (26 m d'élévation) tandis qu'une limite à charge constante est imposée au sud du terrain (16.5 m d'élévation), générant un écoulement de l'eau souterraine vers le sud; le gradient hydraulique horizontal moyen est de 0.002 en condition d'écoulement naturel. De petites perturbations hydrauliques sont générées par le modèle dans l'axe des fractures.

Un puits de pompage exploitant à un débit de 500 m³/jour a été implanté au sud du terrain dans la matrice rocheuse; sa crépine est localisée à une profondeur de 10 à 18 mètres.

L'aire d'alimentation générée par cette configuration géologique et les conditions d'exploitation est ouverte vers le nord (figure 5.7). Elle a un aspect discontinu car les fractures ont un impact majeur sur la forme de l'aire d'alimentation, et ce malgré le fait que les perturbations causées par ces dernières soient très locales. Les fractures correspondent à des conduits d'écoulement préférentiel dus au contraste de perméabilité entre celles-ci et la matrice (figure 5.8). En effet, pour un même débit d'écoulement naturel, les dimensions de la section normale à l'écoulement seront plus petites dans la fracture que dans la matrice.

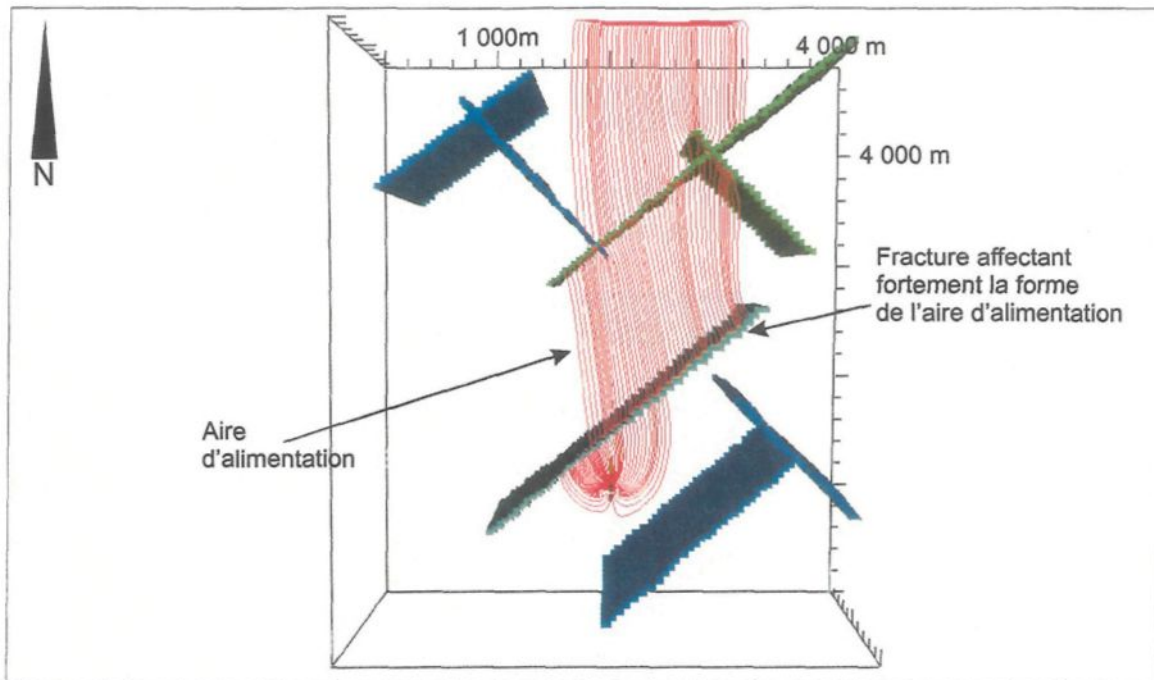


Figure 5.7: Vue en plan de l'aire d'alimentation générée par traçage inverse de particules à l'aide du programme *MODPATH* pour le terrain virtuel représentant un milieu rocheux fracturé. Une perturbation majeure de la forme de l'aire d'alimentation est causée par une fracture très perméable.

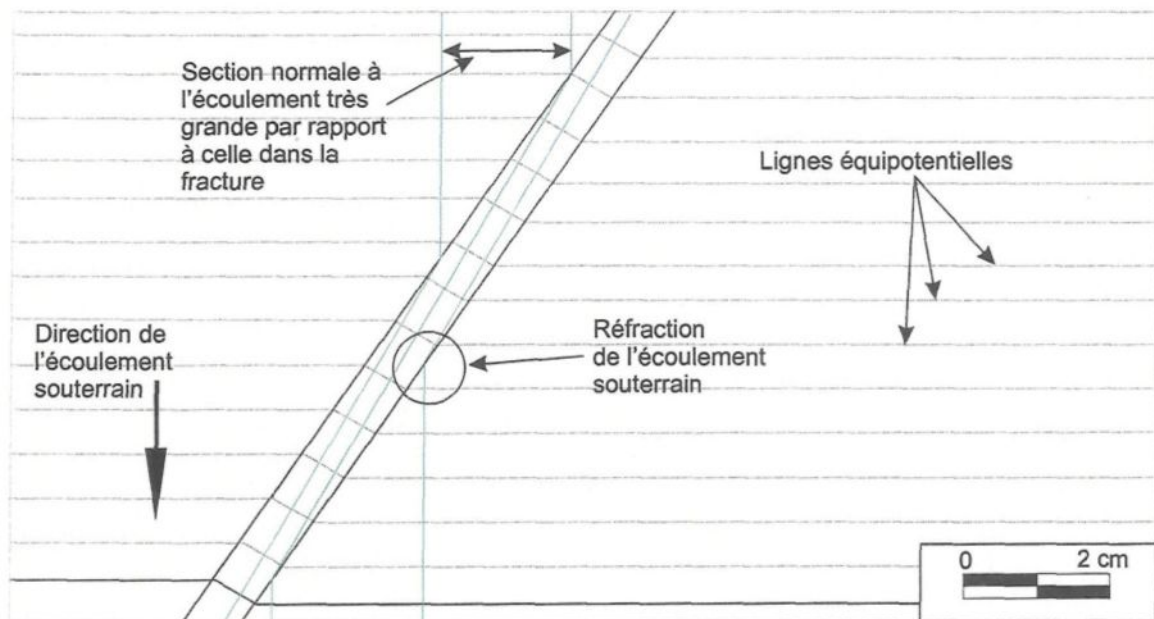


Figure 5.8: Vue en plan de l'effet que peut avoir une fracture sur l'écoulement souterrain. La perturbation est locale mais l'effet sur la forme de l'aire d'alimentation est majeur.

5.2 Élaboration de la méthode

La méthode d'IOP a été développée à l'aide d'un système d'information à référence spatiale (*MAPINFO*). Les méthodes d'interpolation disponibles avec l'utilitaire *Vertical MAPPER* sont : la triangulation, l'inverse de la distance, l'analyse des voisins naturels, la rectangulation et le krigeage. Les méthodes d'interpolation choisies doivent respecter les critères suivants : 1) les résultats doivent honorer les valeurs de chaque point connu, 2) elles doivent répondre le mieux possible à l'anisotropie dans la distribution spatiale des points et 3) elles doivent générer des surfaces dont le maximum et le minimum ne correspondent pas nécessairement aux valeurs extrêmes des points disponibles (*Vertical MAPPER*, 2000). Parmi ces méthodes, seulement la triangulation et l'analyse des voisins naturels respectent ces critères.

La méthode d'interpolation par voisins naturels est une méthode géométrique dans laquelle chaque point et sa position respective influent sur le résultat de l'interpolation. D'abord, il y a la création des *polygones de Thiessen (PDT)*. Ces polygones sont générés en localisant les lignes des polygones à mi-distance entre chaque points et d'orientation normale à l'axe entre ces points (figure 5.9). L'ensemble de ces polygones forme un *diagramme de Voronoi* qui permet l'interpolation. Ensuite, des polygones de Thiessen sont attribués temporairement (*PDTT*) à chaque pixel de la maille interpolée : l'élévation calculée pour chaque pixel correspond à la moyenne des élévations de chaque PDT inclus dans le PDTT multiplié par son pourcentage surfacique. Donc, les PDT qui possèdent une

plus grande surface à l'intérieur du PDTT ont une plus grande influence sur la valeur d'élévation calculée au pixel.

La triangulation est une méthode mathématique d'interpolation linéaire. Les trois points qui forment le triangle sont nécessairement situés dans un plan (figure 5.10). Sur l'axe reliant deux points, il est simple d'évaluer l'élévation en tout point sur cet axe en interpolant linéairement. De façon mathématique, la fonction qui régie cette interpolation est la suivante (équation 18) (Fortin, 1995):

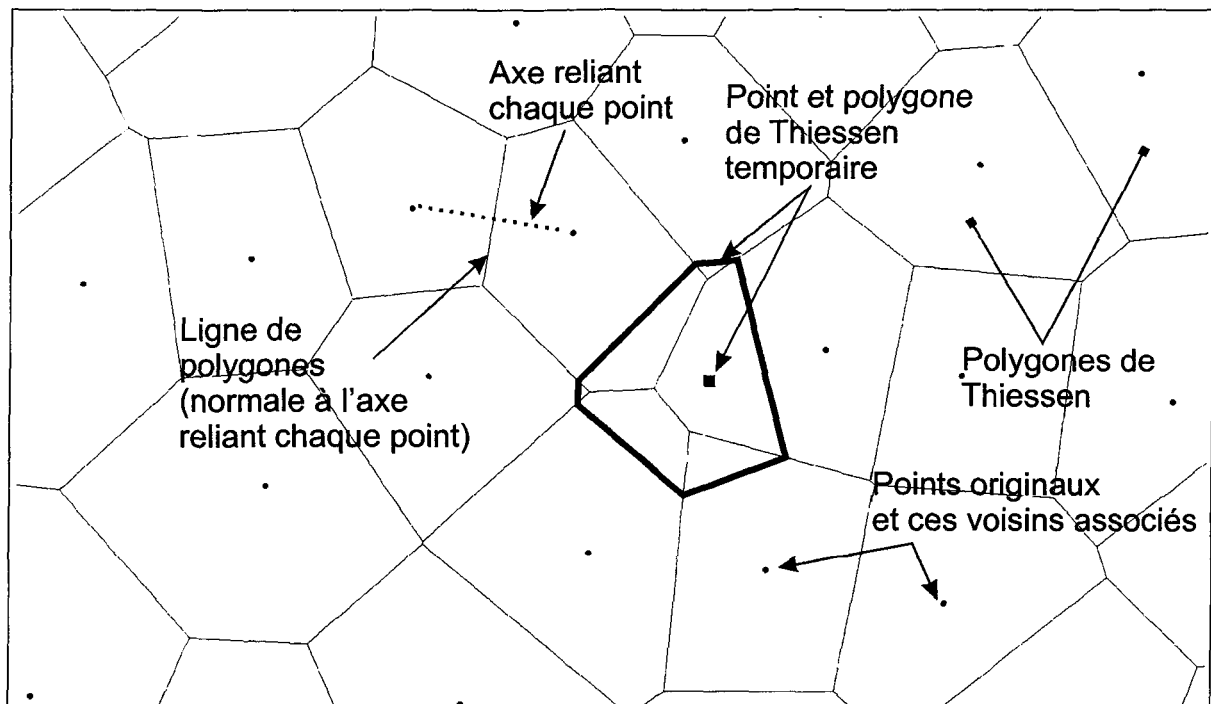
$$f_0(u) = e_0 + u(e_1 - e_0) \quad (18)$$

où f est la fonction, u est le paramètre qui varie le long de la droite sur l'abscisse et e est l'élévation aux points 0 et 1. Afin d'interpoler ailleurs dans le plan, mais à l'intérieur du triangle, il s'agit d'utiliser la combinaison de deux vecteurs. Ces vecteurs correspondent à deux axes reliant chaque point. La fonction qui régie le second vecteur peut s'écrire ainsi (équation 19) :

$$f_1(u) = e_0 + u(e_2 - e_0) \quad (19)$$

où e est l'élévation des points 0 et 2. Afin d'interpoler l'élévation d'un point dans le triangle, il s'agit de combiner les deux vecteurs (équation 20) :

$$e(u, v) = f_0(u) + v(f_1(u) - f_0(u)) \quad (20)$$



5.9: Schéma illustrant la méthode des voisins naturels (modifié de *Vertical MAPPER*, 2000).

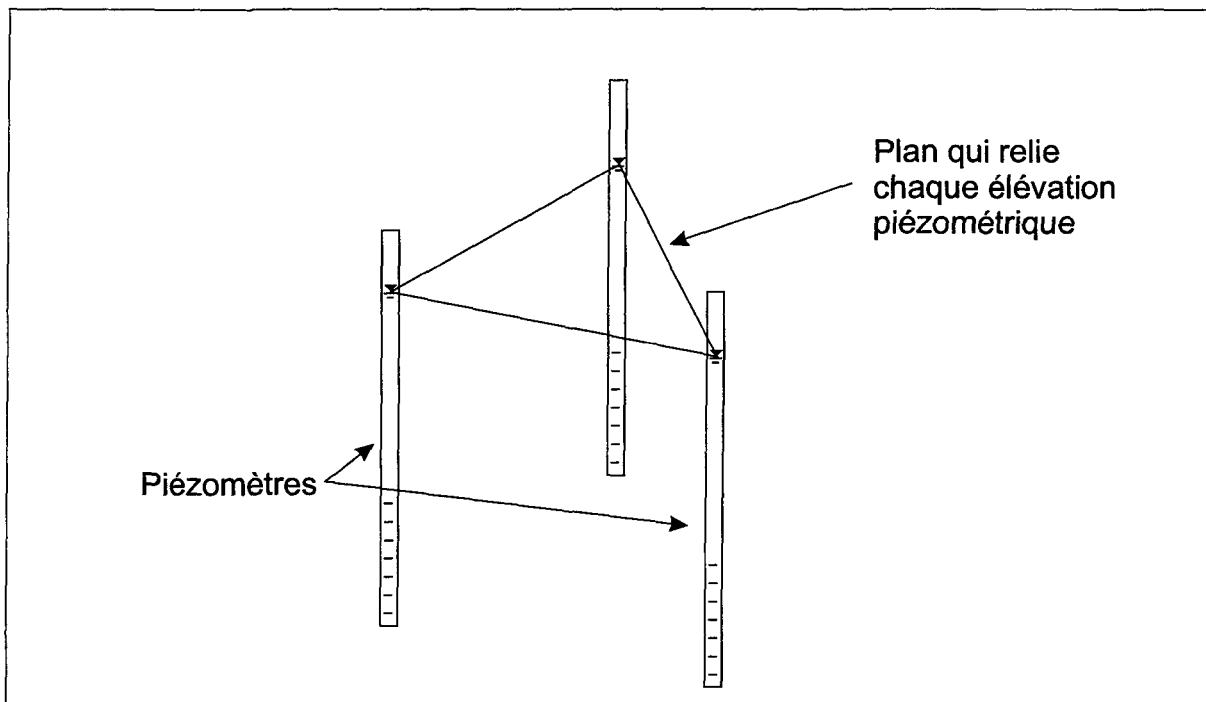


Figure 10: Illustration du plan qui relie chaque élévation piézométrique pour la méthode d'interpolation par triangulation.

où u est le paramètre sur un des deux vecteurs reliant chaque point et v est le paramètre latéral à l'intérieur du triangle. Ici, une variante de cette méthode, soit l'adoucissement, a été utilisée. Cet adoucissement dans l'interpolation élimine les bordures franches entre les lignes équipotentiellles qui recourent l'axe des triangles. L'adoucissement s'effectue en tenant compte de la localisation du centre de gravité des triangles, de l'aire des triangles, de l'angle des triangles versus la pente générale et de la pente statistiquement dérivée du vertex du triangle. Avec ces critères, un poids est attribué à chaque triangle afin d'adoucir l'interpolation.

5.2.1 Concepts fondamentaux

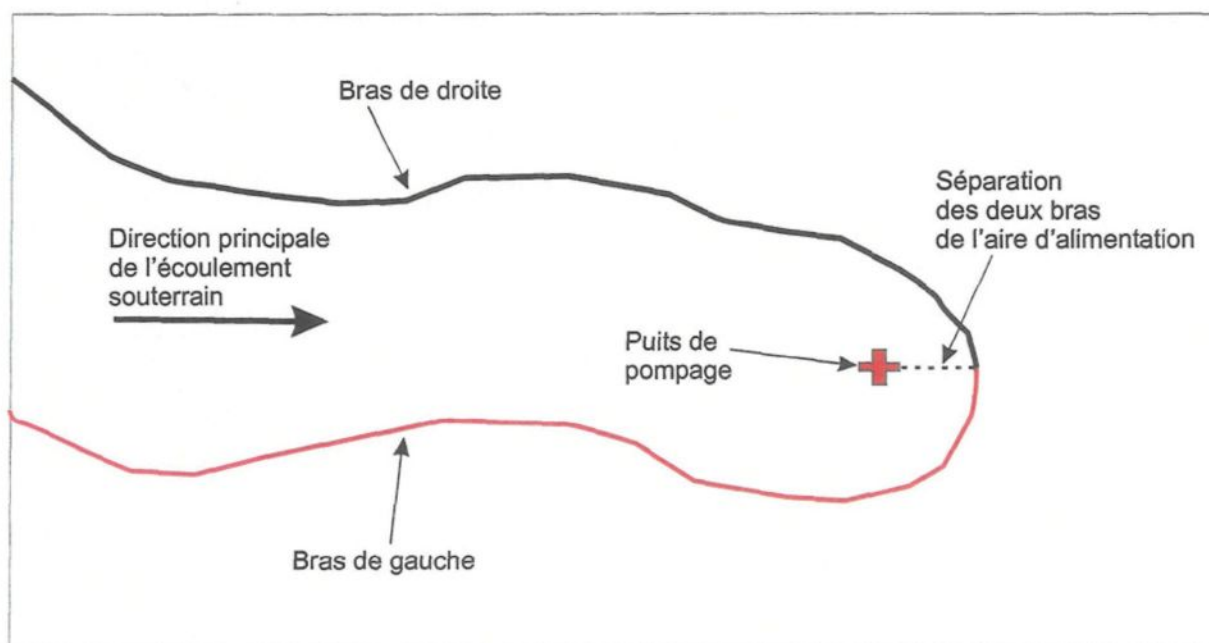
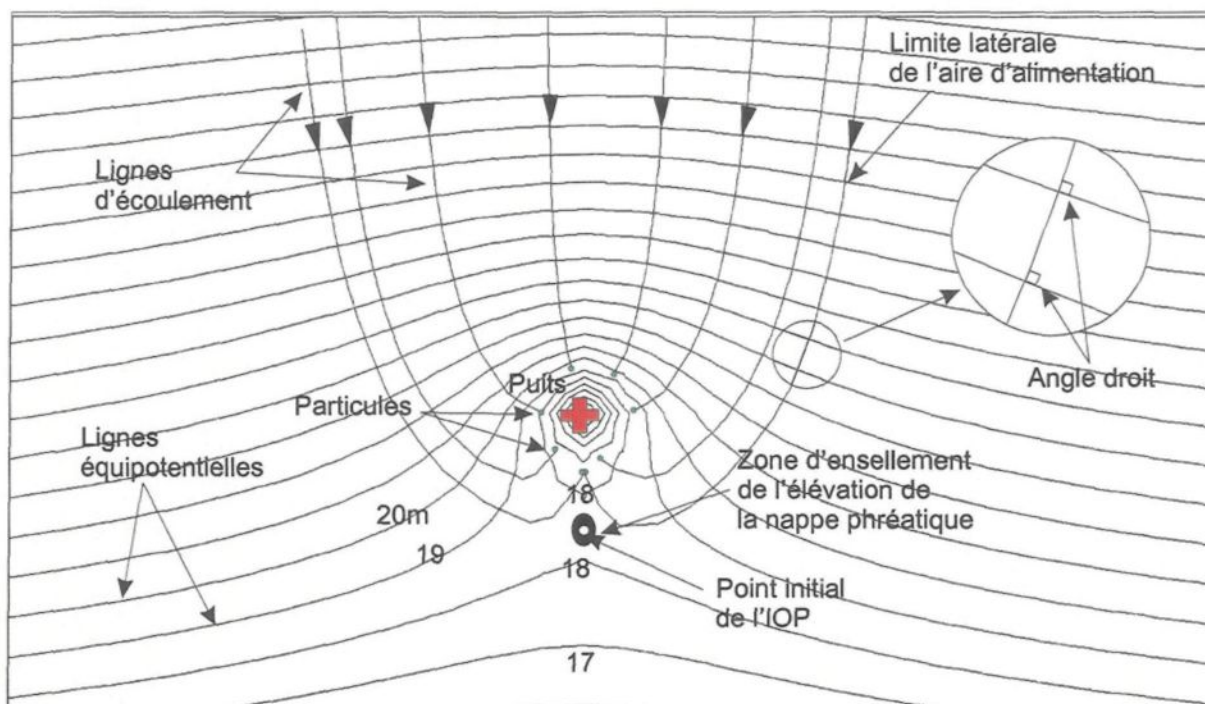
De façon générale, la méthode d'IOP est basée sur le fait que la bordure de l'aire d'alimentation aboutit à une singularité géométrique à son extrémité aval où une goutte d'eau peut mourir d'incertitude, ne sachant si elle doit aller vers le puits ou s'en éloigner. Deux particules jumelles, l'une à droite et l'une à gauche, se rencontrent à ce point d'incertitude (*point initial*) après avoir parcouru chacune leur bras respectif. Elles doivent maintenant faire le parcours inverse, en traversant toujours perpendiculairement, les lignes équipotentiellles (figure 5.11). Le traçage inverse de particules correspond donc au chemin à reculons que suivrait l'eau dans un aquifère et est perpendiculaire aux lignes équipotentiellles lorsque le milieu est isotrope. Seulement les particules correspondantes aux limites latérales sont considérées, puisque celles à l'intérieur de l'aire d'alimentation offrent peu d'intérêt. Étant donnée que seulement les lignes équipotentiellles sont prises en compte dans cette analyse, la vitesse de l'écoulement souterrain est négligée.

Comme seulement le tracé correspondant aux limites latérales de l'aire d'alimentation est considérée avec l'IOP. La limite de l'aire d'alimentation doit donc être divisée en deux bras, soit le bras de gauche et le bras de droite (figure 5.12), lorsque l'on regarde l'aire d'alimentation vers l'amont. La ligne séparant la droite de la gauche constitue la direction estimée de l'écoulement souterrain en aval du puits de pompage en condition d'écoulement naturel. Idéalement, cette ligne est estimée en aval du puits de pompage et dans l'aire d'alimentation.

5.2.2 Développement de la méthode

Plusieurs agencements de piézomètres permettent d'estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage. L'agencement développé dans ce projet vise à minimiser le nombre de points d'observation pour obtenir la justesse souhaitée dans l'estimation de l'aire d'alimentation. Un « *agencement proximal* » s'applique à proximité du puits de pompage alors qu'un « *agencement distal* » s'applique plus loin en amont.

Étant donné que l'estimation de l'aire d'alimentation s'effectue selon un traçage inverse de particules, il est primordial de bien évaluer la limite aval de l'aire d'alimentation. En effet, avec la méthode de l'IOP, les deux particules tracées (une pour le bras de droite et l'autre pour le bras de gauche) ont comme point départ l'ensellement de la table d'eau situé en aval du puits de pompage (figure 5.11). Cet ensellement, sur lequel toute l'eau souterraine diverge est nommé le *point initial*; il correspond aussi à la



limite aval de l'aire d'alimentation. Si le point initial est estimé incorrectement, la justesse de l'aire d'alimentation estimée par l'IOP sera considérablement diminuée.

5.2.2.1 Agencement proximal

L'agencement proximal des piézomètres est présenté à la figure 5.13. Les distances séparant les piézomètres sont proportionnels à la distance entre le puits de pompage et la limite aval de l'aire d'alimentation. Lorsque cette distance est connue, toutes les autres le deviennent également. Dans ce projet, l'utilisation de système d'information à référence spatiale (SIRS) tel *MAPINFO* a été utile pour conserver les proportions de distance entre les points de l'agencement proximal. Aussi, avec cette correspondance entre les distances, aucune évaluation préalable d'un domaine d'étude n'est nécessaire.

Les lignes équipotentiels qui découlent de l'agencement proximal de l'IOP sont interpolées avec la méthode des voisins naturels; soit la méthode avec laquelle l'IOP a été développée. Le diagramme de Voronoï généré par la méthode des voisins naturels montre des polygones de Thiessen de formes et de dimensions semblables (figure 5.14). Les autres méthodes d'interpolation réagissent mal aux différences importantes de charge hydraulique qu'on retrouve à proximité d'un puits de pompage. En effet, beaucoup plus de points d'observation sont nécessaires pour estimer l'aire d'alimentation à l'intérieur de la zone proximale avec la méthode de la triangulation.

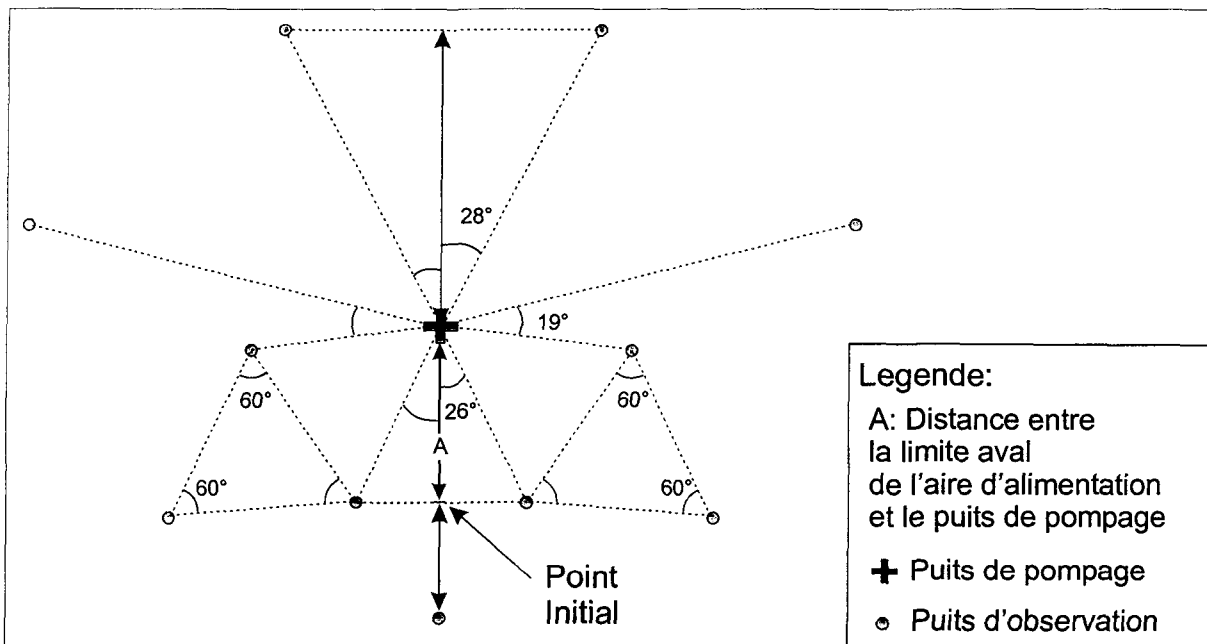


Figure 5.13: Vue en plan de la disposition des piézomètres dans la portion proximale du puits de pompage. L'emplacement de tous les points d'observation dépend de la distance entre le puits de pompage et la limite aval de l'aire d'alimentation, et de l'orientation de la direction de l'écoulement souterrain à proximité du puits de pompage.

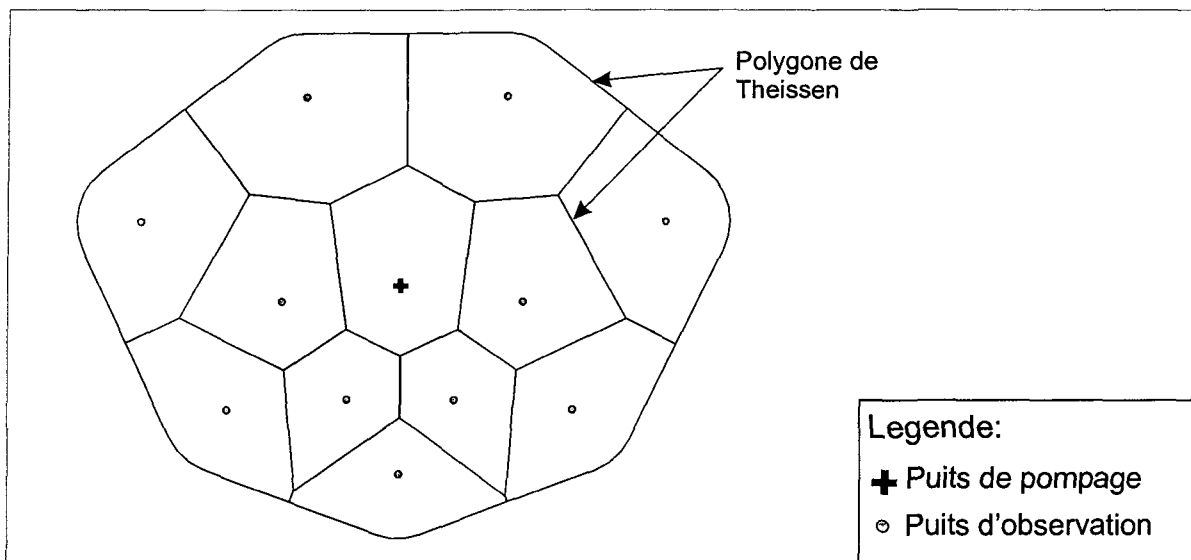


Figure 5.14: Vue en plan des polygones de Thiessen servant à la méthode des voisins naturels. Les piézomètres sont disposés de façon à générer des polygones de dimensions semblables: l'anisotropie dans la disposition des points est à éviter.

A prime abord, on pourrait croire qu'une distribution parfaitement symétrique par rapport à un axe est-ouest et à un axe nord-sud traversant le puits de pompage donnerait une interpolation des lignes équipotentiels optimale. Cependant, une certaine anisotropie est observable sur les lignes équipotentiels représentant un cône de rabattement et ce, même en milieu simple. D'ailleurs, dans ce type de milieu, cette anisotropie se présente sous forme d'un cône plutôt allongé suivant l'axe de l'écoulement souterrain. L'effet recherché dans l'interpolation doit être directement relié au résultat attendu ainsi qu'à la distribution des points. Ainsi, pour un cône de rabattement qui est parfaitement circulaire, une distribution anisotrope des points d'observation génère un cône allongé dans le sens inverse de l'anisotropie de la distribution des points (figure 5.15). Le même phénomène est observable dans le cas contraire e.g. que si la distribution des points est isotrope et que les lignes équipotentiels sont anisotropes, le résultat de l'interpolation ne correspondra pas au résultat attendu (figure 5.16). Comme les lignes équipotentiels n'ont pas une distribution isotrope, l'agencement des points dans la zone proximale ne peut pas être isotrope si on recherche une solution optimale.

L'agencement de piézomètres présenté à la figure 5.13 tient compte de l'anisotropie observable dans la forme des lignes équipotentiels à proximité d'un puits de pompage. Les points sont distribués de façon symétrique par rapport à l'axe d'écoulement souterrain principal. Ceux-ci sont légèrement plus rapprochés en aval du puits : c'est dans ce secteur qu'on retrouve l'ensellement de la table d'eau. Aussi, l'emplacement des points inclut un domaine d'interpolation nécessaire à l'obtention d'une estimation proximale de l'aire d'alimentation. Cet agencement a été comparé à

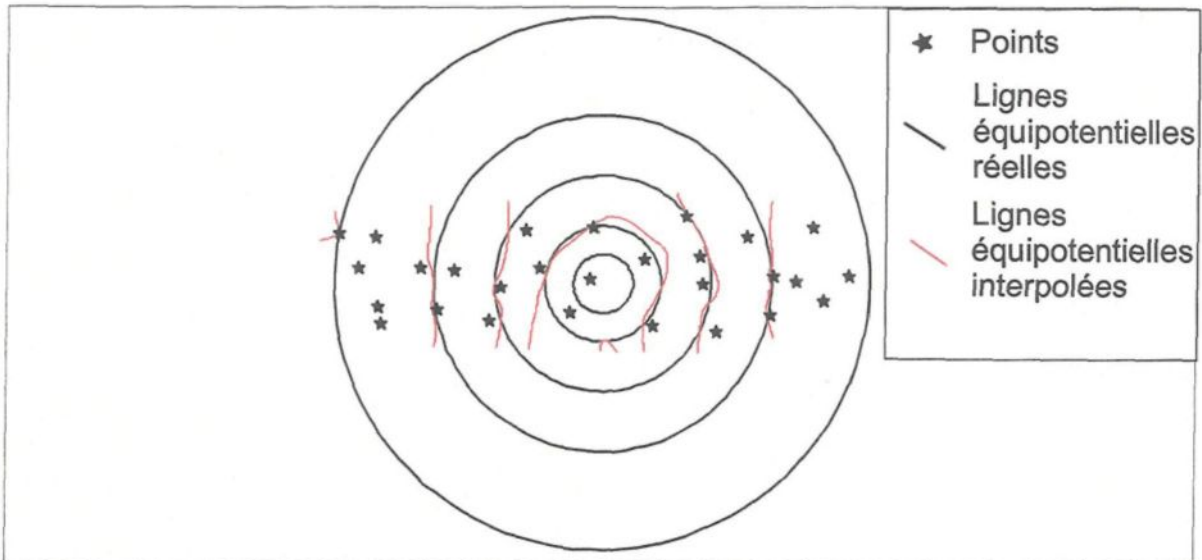


Figure 5.15: Cône de rabattement isotrope et circulaire. Les points qui servent à l'interpolation sont disposés de façon anisotrope. L'interpolation suggère plutôt des lignes équipotentiellelles allongées nord-sud.

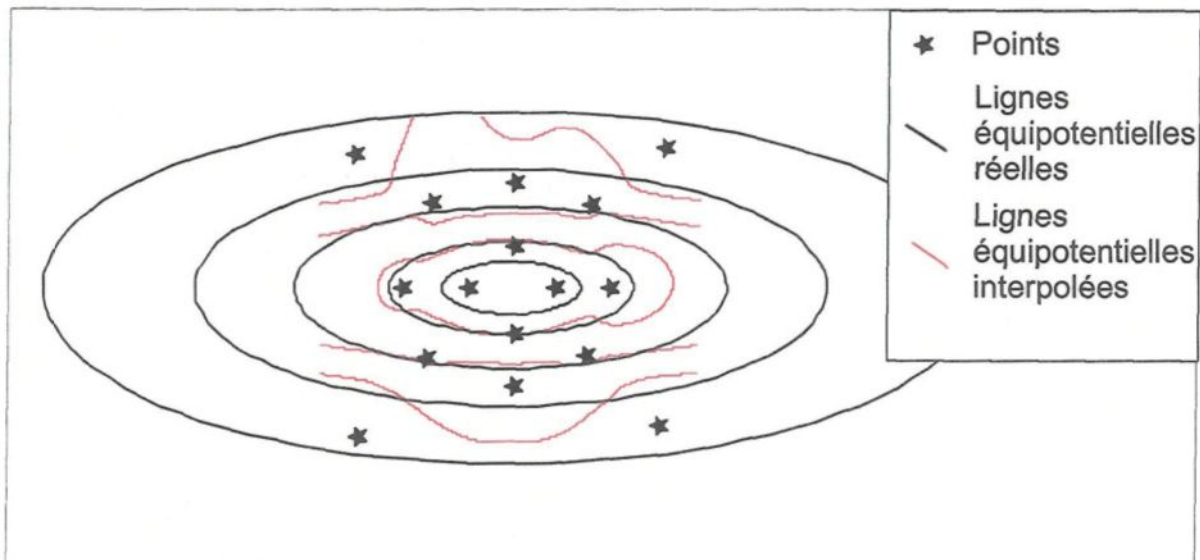


Figure 5.16: Cône de rabattement avec des lignes équipotentiellelles anisotropes. Les points qui servent à l'interpolation sont disposés de façon isotrope. Le résultat de l'interpolation est de mauvaise qualité.

plusieurs autres agencements de piézomètres. Les résultats obtenus avec celui-ci témoignent bien de la forme de l'aire d'alimentation en milieu complexe pour un nombre de points raisonnable.

Suite à l'implantation proximale des piézomètres, une première estimation de l'aire d'alimentation peut être effectuée. Cette première estimation se limite approximativement au domaine interpolé, cependant une légère prolongation de l'estimation de chaque bras de l'aire d'alimentation doit être réalisée afin de déterminer l'emplacement des futurs points.

Afin d'estimer l'emplacement du point initial, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, telles les solutions analytiques de Grubb (1983) et de Bear et Jacobs (1965) ou l'implantation de piézomètres en ligne. Un minimum de trois points est requis afin de générer une interpolation de second degré mais l'implantation de quatre ou cinq piézomètres donnera un résultat plus précis. Les piézomètres doivent être implantés dans un ordre particulier pour éviter d'insérer un piézomètre inutilement. En effet, parmi les trois piézomètres requis, un doit être situé à l'extérieur de l'aire d'alimentation afin de cibler plus facilement la limite aval de celle-ci. En fonction de l'emplacement du troisième piézomètre, plusieurs interpolations peuvent être effectuées (figure 5.17). L'implantation de quelques autres piézomètres dans le secteur de la limite aval de l'aire d'alimentation permet de préciser d'avantage la limite aval de l'aire d'alimentation.

5.2.2.2 Agencement distal

Afin d'estimer l'aire d'alimentation distale, la méthode d'interpolation par triangulation a été sélectionnée notamment à cause de la forme des lignes générées aux limites de l'interpolation et à cause du respect des valeurs de base dans l'interpolation : les lignes équipotentielles générées sont droites et forment un plan lorsqu'il n'y a que trois points.

L'implantation dans la portion distale de l'aire d'alimentation consiste en une séquence de triangles qui chevauchent autant que possible chaque bras de l'aire d'alimentation. Idéalement, les limites de l'aire d'alimentation devraient passer par le centre des triangles de la séquence (figure 5.18). Les deux bras formant les limites de l'aire d'alimentation, doivent être estimés indépendamment l'un de l'autre, sauf dans des cas particuliers. Suite à l'ajout de chaque point, la localisation du bras correspondant doit être estimée à nouveau. Généralement, trois ou quatre points permettent de poursuivre l'estimation de l'aire d'alimentation distale de façon adéquate. Les points implantés pour l'estimation proximale seront donc ignorés à mesure que l'on avance vers l'amont dans l'estimation de l'aire d'alimentation.

5.2.2.3 Méthode de chevauchement des portions interpolées

Afin de corréler les deux méthodes d'interpolation utilisées, soit les voisins naturels et la triangulation, des points nommés «points artificiels» doivent être introduits

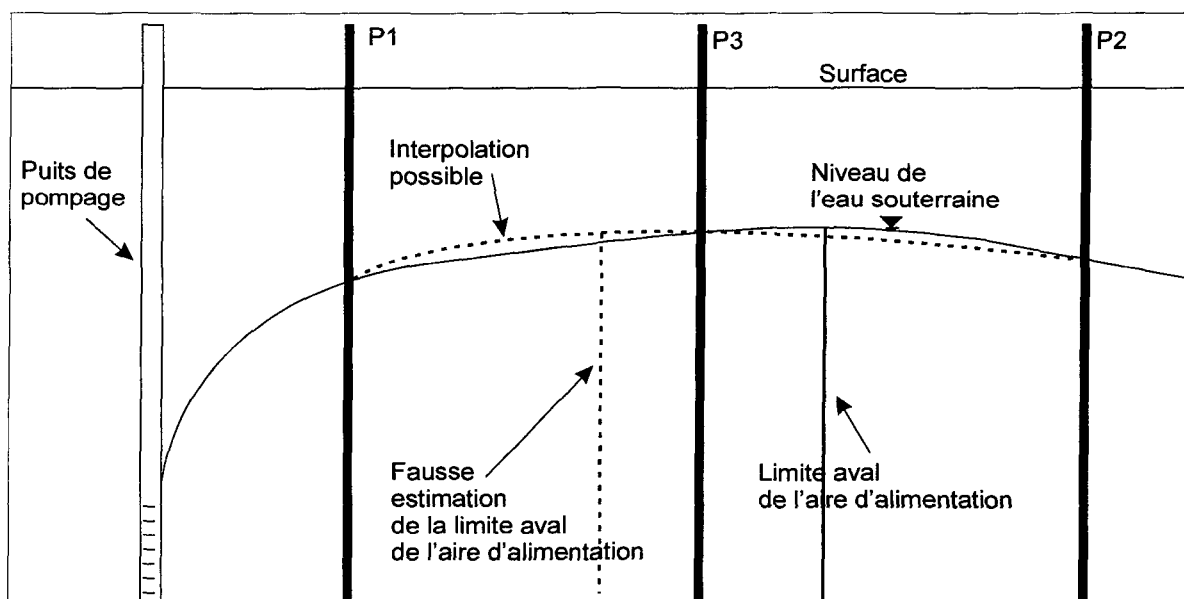


Figure 5.17: Section montrant l'élévation de l'eau souterraine du côté aval du puits de pompage. La section montre aussi une possibilité d'interpolation avec trois points d'observation seulement (P1, P2 et P3). Cette interpolation possible cause une mauvaise estimation de la limite aval de l'aire d'alimentation et risque de provoquer une interprétation biaisée de l'ensemble de l'aire d'alimentation.

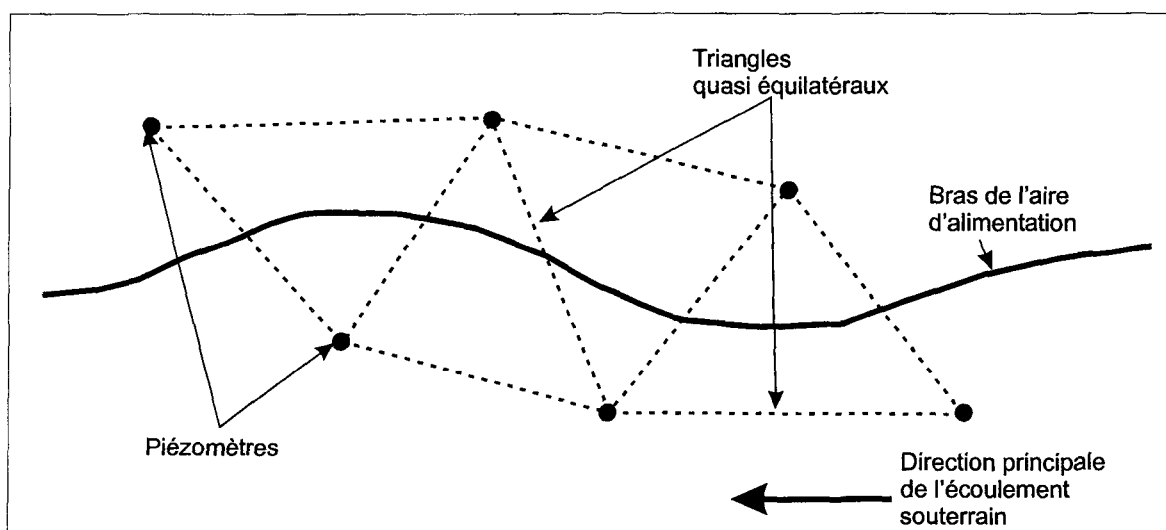


Figure 5.18: Vue en plan de l'agencement d'implantation de piézomètres dans la portion distale de l'aire d'alimentation. La disposition forme des triangles quasi équilatéraux qui chevauchent le bras de l'aire d'alimentation.

dans la zone proximale. Ces points ne sont pas réellement introduits sur le terrain et possèdent les valeurs d'élévation du toit de la nappe obtenues par la méthode des voisins naturels (figure 5.18). Ces points artificiels ne fournissent donc pas de nouvelles valeurs de l'élévation du niveau d'eau. La distribution de ces points est aléatoire. Cependant, leur nombre doit être grand. Un exemple d'agencement de points artificiel est illustré à la figure 5.18.

Lorsque l'interpolation proximale est effectuée, deux autres points (D0 et G0) doivent être ajoutés à l'extérieur de la zone d'interpolation proximale que l'on nommera points de sortie (figure 5.19). Chaque point de sortie doit former un triangle quasi-équilatéral avec deux points de l'agencement d'implantation proximal; la dimension du triangle dépend donc de la distance entre les points de l'agencement proximal. Les points de sortie et les points de l'agencement proximal doivent être inclus lors de l'interpolation afin d'obtenir de meilleurs résultats; cette interpolation s'effectue à l'aide de la triangulation et une seconde aire d'alimentation peut alors être estimée. Après chaque estimation de la localisation d'un bras de l'aire d'alimentation, ce bras doit être prolongé afin de déterminer l'emplacement des futurs points.

5.2.2.4 Augmentation de la dimension des triangles

Lorsque l'aire d'alimentation est petite au droit du puits, la distance séparant chaque point dans l'estimation distale sera petite. Si cette distance est petite par rapport au domaine d'estimation désiré, elle peut être progressivement augmentée. Cependant, la

distance entre les points d'observation est inversement proportionnelle à la précision de l'estimation de l'aire d'alimentation.

Si l'augmentation de la dimension des triangles est trop brutale, ceux-ci ne ressembleront plus à des triangles équilatéraux et l'interpolation dans l'espace de transition sera moins précise. Ainsi, l'ajout de triangles pour estimer les limites de l'aire d'alimentation peut se faire jusqu'à l'emplacement désiré ou encore jusqu'à la limite amont de l'aire d'alimentation. Le tableau 5.1 résume la démarche de la méthode.

Tableau 5.1 : résumé de la démarche de la méthode d'IOP

Étape de la démarche	Démarche	Étape d'estimation de l'aire d'alimentation
1	Évaluation de l'emplacement du point initial	
2	Implantation des piézomètres de l'agencement proximal	1 ^{er} étape de l'estimation
3	Insertion des points artificiels et des deux points de sortie	2 ^{ème} étape de l'estimation
4	Implantation des points selon l'agencement distal	Étapes subséquentes de l'estimation

5.3 Exemple et résultats

Un exemple d'application de la méthode d'IOP est donné pour un des scénarios présentés à la section 5.1, soit celui de la vallée fossile. Seulement l'estimation du bras de

gauche est décrite en détail. De plus, les résultats obtenus pour les deux autres scénarios sont illustrés.

5.3.1 Exemple

La limite aval de l'aire d'alimentation est d'abord estimée par une implantation en ligne de piézomètres. Suite à cette estimation, l'agencement proximal est appliqué et une première étape de l'estimation de l'aire d'alimentation est obtenue (figure 5.20). Une fois l'interpolation de l'agencement proximal effectuée, les points artificiels sont insérés afin d'effectuer le passage de la méthode d'interpolation par voisins naturels à la triangulation (figure 5.21). Par la suite, les deux piézomètres (G0 et D1) de sortie sont disposés en triangle avec des points situés en bordures de l'agencement d'implantation proximal; ces piézomètres permettent d'effectuer la seconde étape de l'estimation de l'aire d'alimentation à l'aide de la triangulation (figure 5.21).

L'agencement distal est créé par étapes en relation avec chaque estimation successive de l'aire d'alimentation (figures 5.22 à 5.25). D'abord, deux nouveaux points (G1 et G2) sont insérés pour former un triangle quasi-équilatéral avec le point de sortie précédemment inséré (figure 5.22). Aussi, un seul point aurait pu être ajouté au nord-est du point de sortie mais l'ajout de deux points en amont diminue le nombre total de points nécessaires à l'estimation de l'aire d'alimentation; par contre, la précision est moins grande. Par la suite, un point additionnel (G3) est implanté de façon à poursuivre l'estimation du bras de gauche (figure 5.21). Sa position génère un triangle isocèle qui

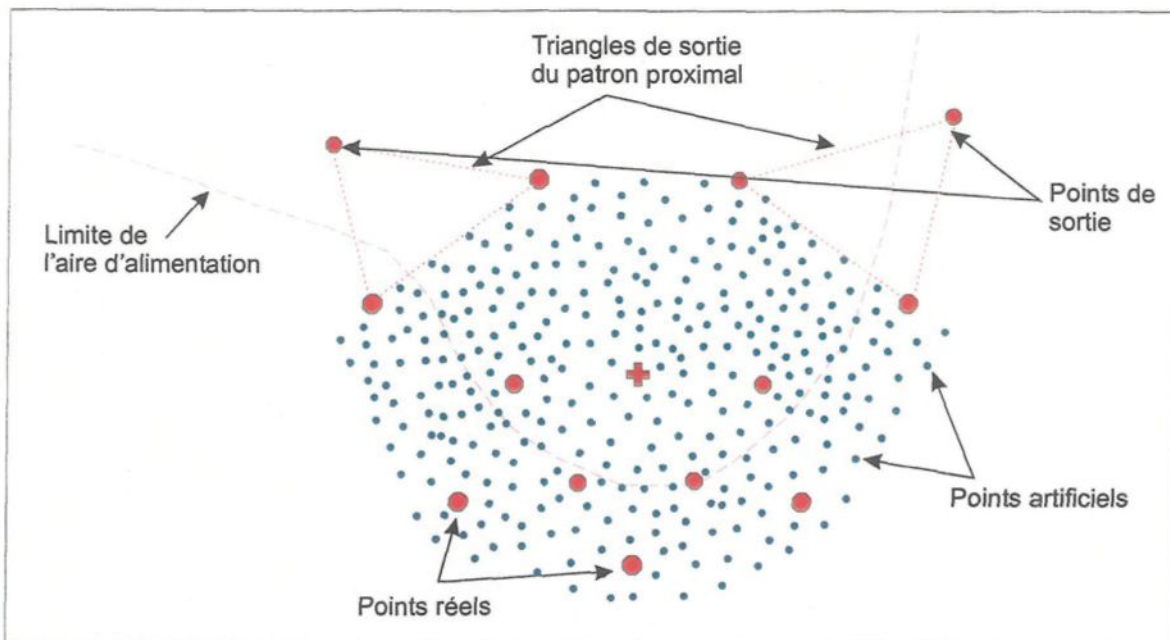


Figure 5.19: Vue en plan de la disposition des piézomètres de sortie et des points artificiels de transition du secteur proximal au secteur distal.

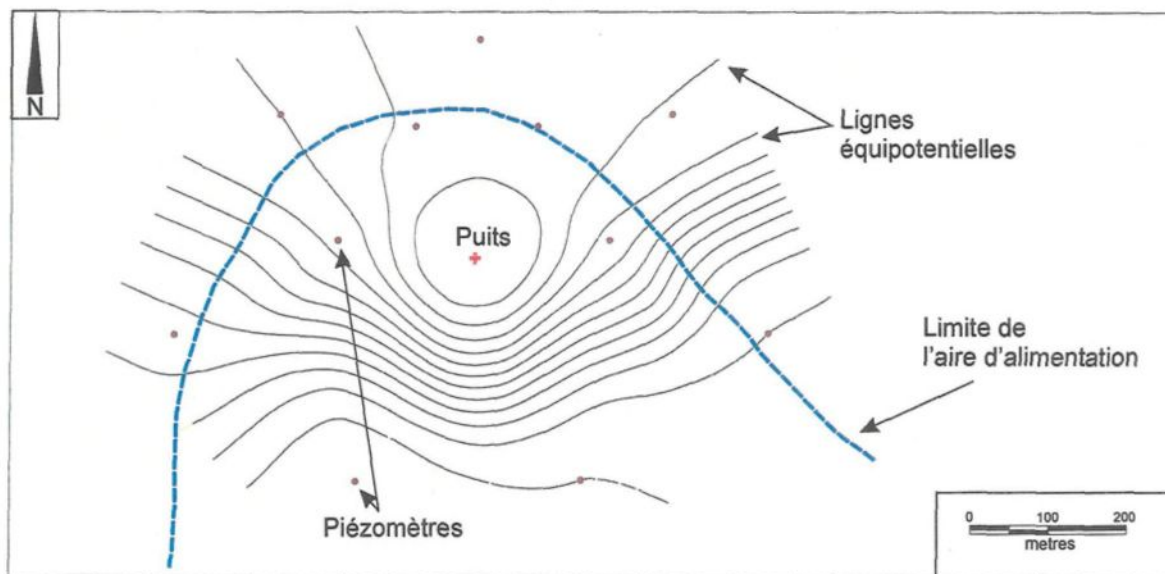


Figure 5.20: Vue en plan de la première étape de l'estimation de l'aire d'alimentation du puits de pompage pour le terrain virtuel d'une vallée fossile. Seul l'agencement proximal a servi à cette première approximation.

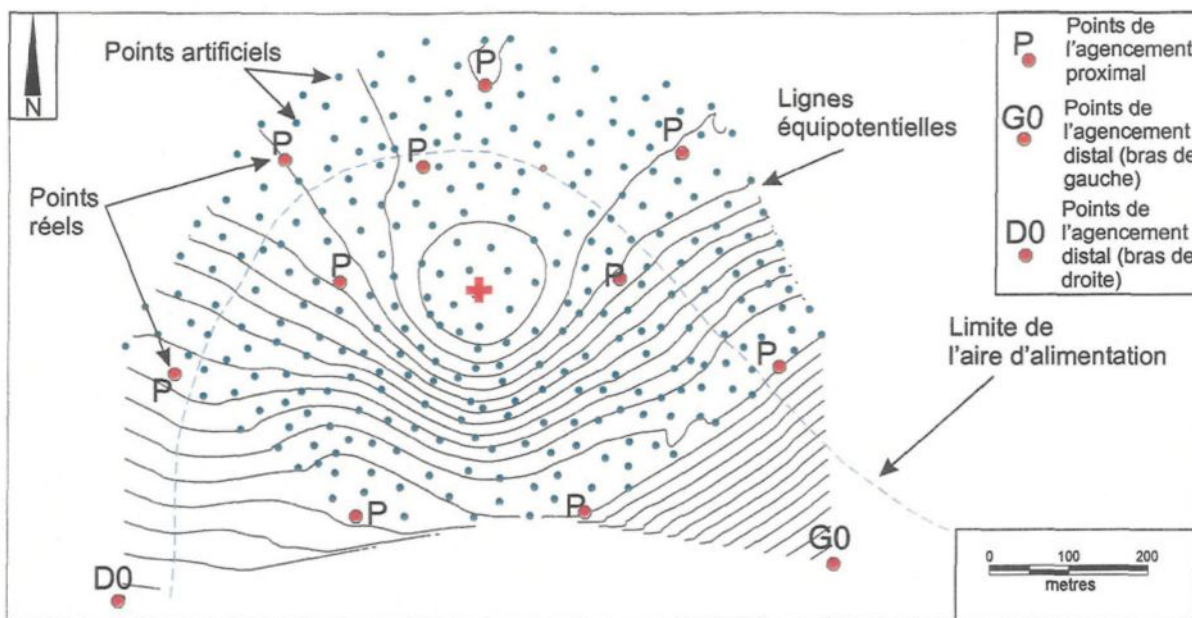


Figure 5.21: Vue en plan de la seconde étape de l'estimation de l'aire d'alimentation pour le terrain virtuel d'une vallée fossile. Un seul point a été implanté à la sortie de l'agencement proximal pour chaque bras. Cette interpolation est la dernière qui tient compte de cet agencement.

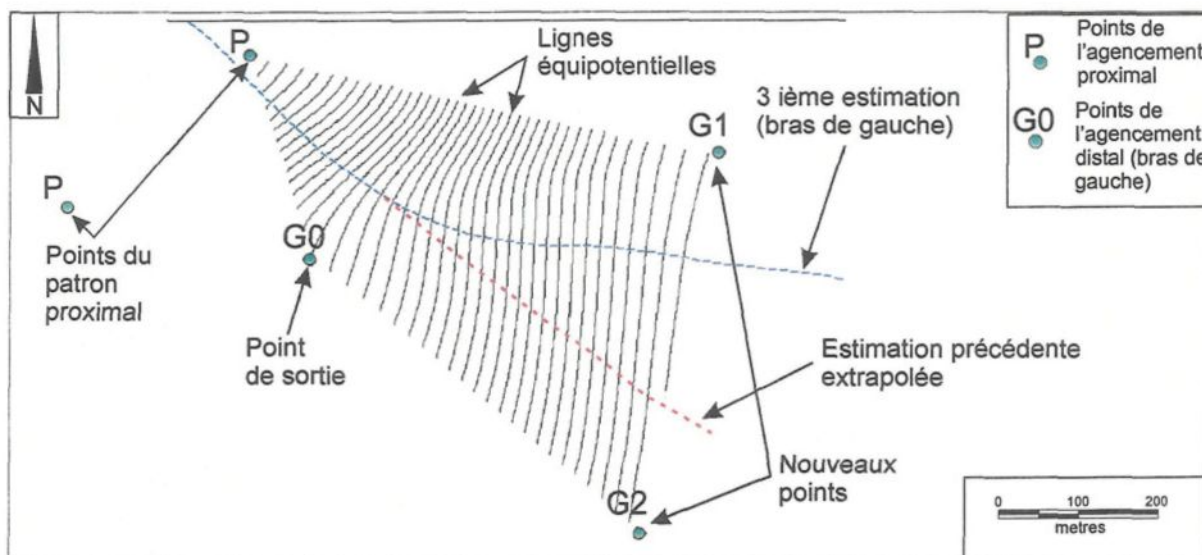


Figure 5.22: Vue en plan de la troisième étape de l'estimation de l'aire d'alimentation du puits de pompage pour le terrain virtuel d'une ancienne rivière. Le point de sortie, un des points de l'agencement proximal et deux nouveaux points ont servi à l'interpolation par triangulation ainsi qu'à l'estimation de l'aire d'alimentation. Notez que les deux nouveaux points ont été positionnés en fonction de l'estimation précédente et que la dimension du triangle qu'ils forment est légèrement supérieure à la dimension du triangle précédent.

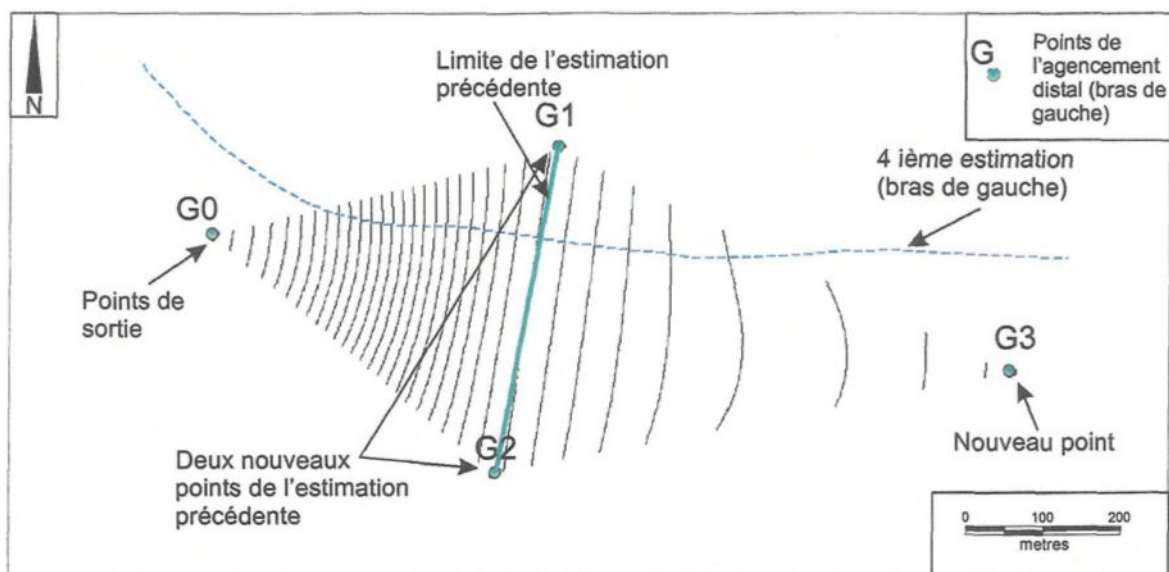


Figure 5.23: Vue en plan de la quatrième étape de l'estimation de l'aire d'alimentation pour le terrain virtuel d'une vallée fossile. Un seul point a été implanté dû à la déviation du bras de gauche lors de l'estimation précédente. Le nouveau point forme un triangle plutôt isocèle car on désire augmenter la distance entre les points. L'étape présente de l'estimation doit débiter à la limite de l'estimation précédente.

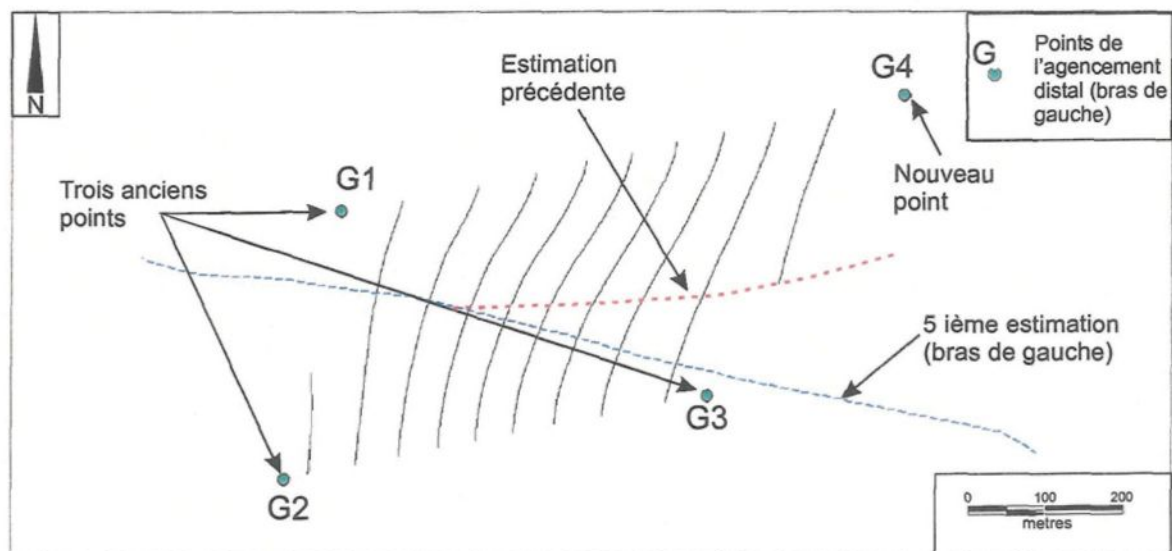


Figure 5.24: Vue en plan de la cinquième étape de l'estimation de l'aire d'alimentation du puits de pompage pour le terrain virtuel d'une vallée fossile. Un seul nouveau point a été ajouté. La nouvelle estimation tient compte du nouveau point et corrige légèrement l'estimation précédente. La correction est relativement importante, car l'estimation précédente était en bordure de l'interpolation précédente.

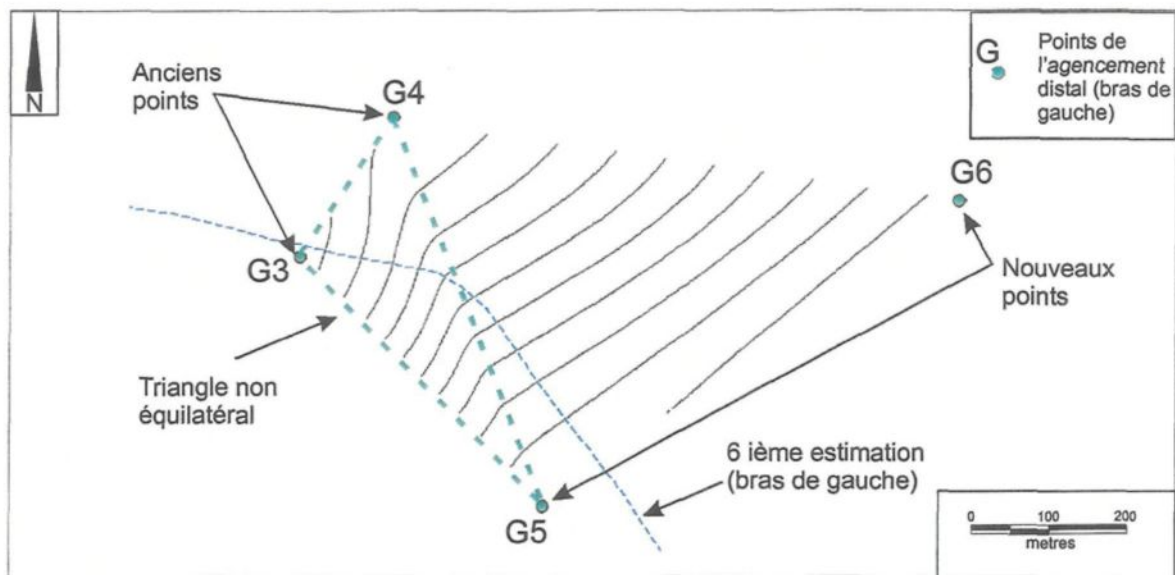


Figure 5.25: Vue en plan de la sixième étape de l'estimation de l'aire d'alimentation pour le terrain virtuel d'une vallée fossile. Deux nouveaux points ont été implantés. Le triangle formé est dessiné en bleu; il n'est pas équilatéral afin d'augmenter la distance entre les points. Cependant, la précision est améliorée.

diminue la précision de l'estimation. Un autre point est ajouté; l'interpolation précédente était très différente de celle générée par l'ajout de ce point (figure 5.22). Finalement, deux derniers points (G4 et G5) sont ajoutés et leur distance crée des non équilatéraux; l'augmentation de la distance génère dans cet exemple une diminution importante de la précision de l'estimation.

5.3.2 Résultats

La figure 5.26 illustre l'aire d'alimentation «réelle» du scénario de la vallée fossile, de celle estimée à l'aide de la méthode d'IOP ainsi que celle estimée à l'aide de la méthode développée par Grubb (1993). La superficie respective de chacune des aires d'alimentation est de 41,540,000 m² pour l'aire réelle, de 39,040,000 m² pour l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de 8,054,000 m² pour celle estimée avec la méthode développée par Grubb (1993). La norme, i.e. la distance moyenne entre l'aire estimée et l'aire réelle est de 193 m pour l'aire estimée avec l'IOP et de 2172 m pour celle estimée à l'aide de la méthode développée par Grubb (1993). Dans ce cas, l'estimation effectuée à l'aide de l'IOP donne un meilleur résultat que celle estimées à l'aide de la méthode développée par Grubb (1993).

L'analyse par modélisation numérique n'aurait pas nécessairement donné une estimation plus précise de l'aire d'alimentation que celle obtenue des relations analytiques développées par Grubb (1993). En effet, les dimensions de la section normale à l'écoulement souterrain doit être bien connue afin de bien estimer la quantité d'eau

provenant de la portion aquifère; une légère surestimation du flux circulant dans la formation granulaire amincirait considérablement la largeur estimée de l'aire d'alimentation et donnerait un résultat semblable à celui obtenu à l'aide de la méthode de Grubb (1993).

Les résultats pour les deux autres scénarios sont présentés aux figures 5.27 et 5.28. Le résultat obtenu pour le scénario correspondant à un ancien delta est relativement précis. On remarque par contre qu'il diffère peu de l'estimation de l'aire d'alimentation obtenue à l'aide d'équations analytiques car l'hétérogénéité du milieu a un impact plus faible sur la forme de l'estimation de l'aire d'alimentation. L'aire des trois estimations sont de $11\,101\text{ m}^2$ pour la réelle, de $11\,182\text{ m}^2$ pour l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de $12\,872\text{ m}^2$ pour celle estimée à l'aide de la méthode développée par Bear et Jacobs (1965). Les normes sont de 1 m pour l'aire estimée à l'aide l'IOP et de 3.7 m pour celle estimée à l'aide de la méthode développée par Bear et Jacobs (1965), soit 3.7 fois plus grande.

L'estimation de l'aire d'alimentation obtenue pour le terrain en milieux rocheux fracturé est différente de la réalité. L'aire des trois estimations sont de $3,788,000\text{ m}^2$ pour l'aire réelle, de $3,221,000\text{ m}^2$ pour l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de $5,017,000\text{ m}^2$ pour celle estimée analytiquement à l'aide des relations développées par Bear et Jacobs (1965). Les normes sont de 390 m pour l'aire estimée à l'aide l'IOP et de 350 m pour celle estimée analytiquement. Le tableau 5.2 résume les résultats obtenus.

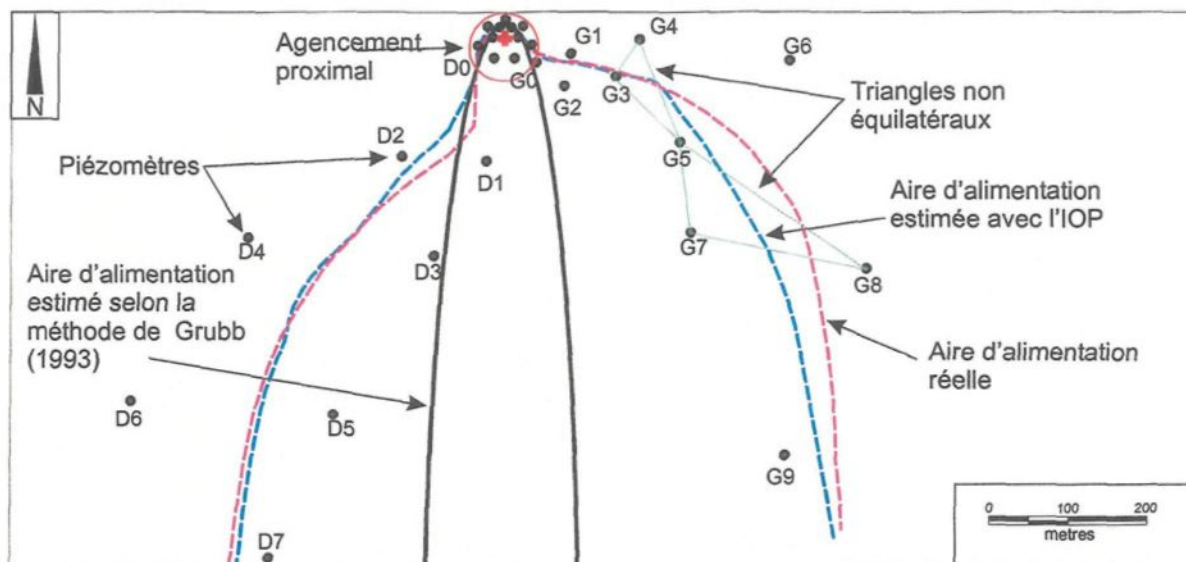


Figure 5.26: Vue en plan de l'aire d'alimentation réelle du scénario de la vallée fossile, de l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de celle estimée à l'aide de la méthode développée par Grubb (1993). L'estimation obtenue à l'aide de l'IOP est semblable à l'aire d'alimentation réelle car la piézométrie reflète la configuration des dépôts meubles. Les deux triangles en bleu ne sont pas équilatéraux et génèrent une légère erreur dans l'estimation. Dans le cas présent, l'erreur est négligeable mais elle aurait pu être beaucoup plus importante.

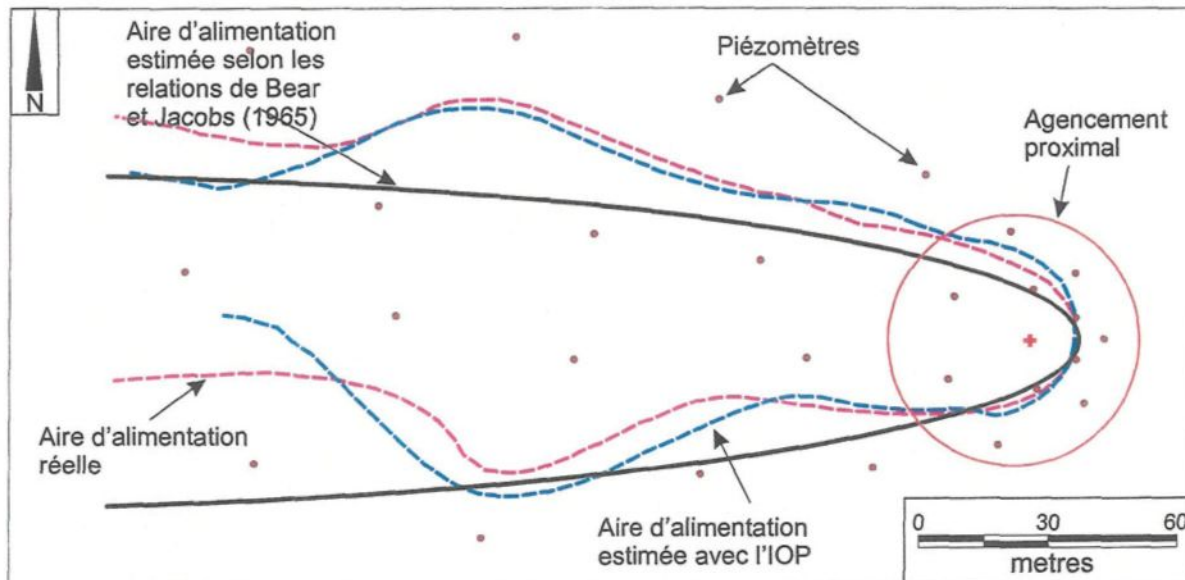


Figure 5.27: Vue en plan de l'aire d'alimentation réelle, de l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de celle estimée à l'aide des relations développées par Bear et Jacobs (1965) pour le scénario de l'ancien delta. La différence observée entre les trois aires d'alimentation estimées est moins importante que la différence entre celles estimées pour le site de la vallée fossile. On remarque tout de même que l'aire d'alimentation estimée avec la méthode de Bear et Jacobs (1965) est moins exacte.

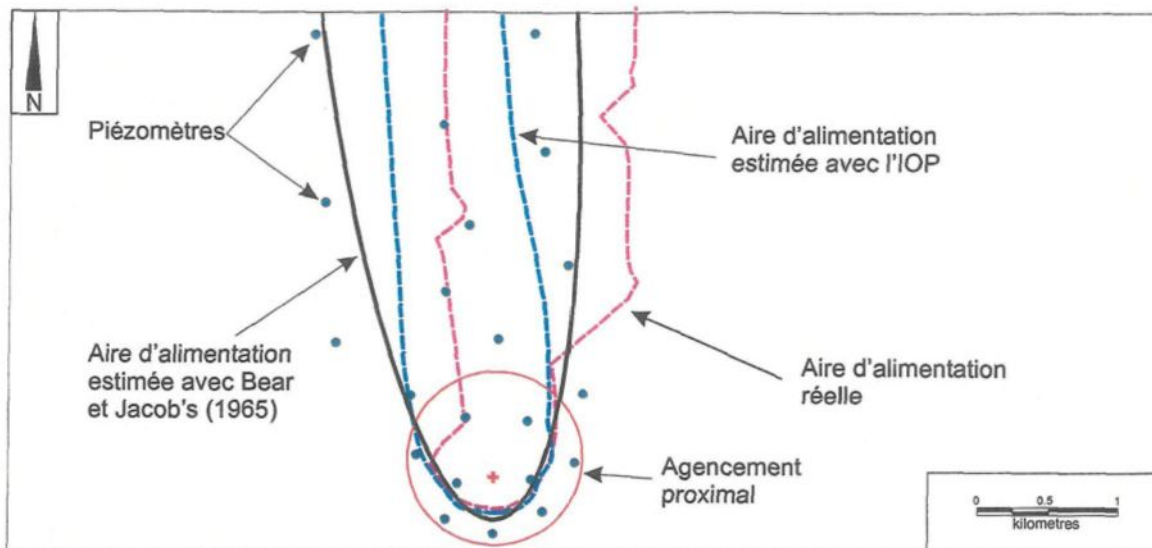


Figure 5.28: Vue en plan de l'aire d'alimentation réelle, de l'aire estimée à l'aide de l'IOP et de celle estimée à l'aide de la méthode développée par Bear et Jacobs (1965) pour le scénario du milieu rocheux fracturé. Les trois aires d'alimentation sont très différentes les unes des autres. Les perturbations hydrauliques causées par les fractures sont locales mais ont une influence majeure sur la forme de l'aire d'alimentation. Ces perturbations sont détectables seulement si un piézomètre est implanté dans la zone de perturbation hydraulique générée par les fractures.

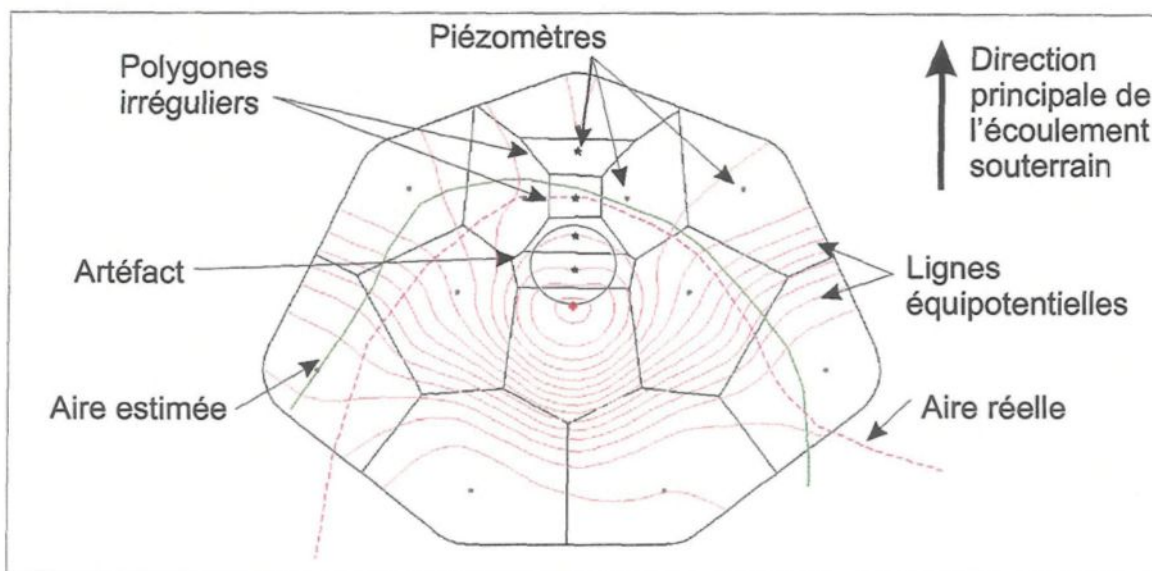


Figure 5.29: Vue en plan de la disposition des piézomètres dans l'hypothèse où les piézomètres en ligne servant à évaluer la limite aval de l'aire d'alimentation sont inclus à l'agencement proximal. Les polygones de Thiessen qui servent à la méthode des voisins naturels sont irréguliers, ce qui crée une non correspondance des lignes équipotentiellles avec la réalité. Les résultats obtenus suite à cette disposition de piézomètres sont moins bons que ceux générés à l'aide du patron proximal présenté précédemment et ce, même si le nombre de piézomètres est supérieur sur la présente figure.

Tableau 5.2 : Sommaire des résultats obtenus.

Scénarios	Aire réelle (m ²)	Aire estimée IOP (m ²)	Aire estimée analytiquement (m ²)	Norme avec l'IOP (m)	Norme avec rel. Analytiques (m)
Rivière fossile	41 540 000	39 040 000	8 054 000	193	2 172
Delta	11 101	11 182	12 872	1	3.7
Milieu fracturé	3 788 000	3 221 000	5 017 000	390	350

5.4 Discussion de l'IOP

Cette section présente de façon séquentielle les éléments important à considérer lors de l'application de la méthode d'implantation optimale de piézomètre (IOP).

L'aire d'alimentation étant estimée par traçage inverse de particules, la précision de la méthode dépend en grande partie de la précision du positionnement du point de départ des particules. A prime abord, on pourrait croire qu'il serait plus avantageux d'implanter les particules directement sur le puits de pompage. Cependant, le changement de direction important des lignes d'écoulement en aval du puits et proche de la limite aval de l'aire d'alimentation, demande une quantité de points d'observation importante. Pour cette raison, les particules sont introduites sur l'ensellement situé à la limite aval de l'aire d'alimentation. Si cet ensellement (point initial) est mal positionné, l'estimation entière sera moins précise.

La méthode d'implantation en ligne de piézomètres présentée plus haut est une des méthodes qui permet de déterminer la localisation de la limite aval de l'aire d'alimentation. Malheureusement, ces piézomètres en ligne ne peuvent être conservés

pour l'analyse de l'écoulement dans la portion proximale. En effet, outre les points présents dans l'agencement proximal, aucun autre point ne peut être inclus pour estimer l'aire d'alimentation proximale, car il rendrait hétérogène le diagramme de Voronoï; des dimensions et des formes trop différentes des polygones de Thiessen génèrent une interpolation qui ne donne pas un résultat recherché (figure 5.29). Si la précision désirée est supérieure, plusieurs autres points devront être ajoutés afin de générer un diagramme de Voronoï homogène. Dans un tel cas, l'agencement proximal devra être complètement réorganisé. Il existe d'autres logiciels qui utilisent la méthode de Voronoï tout en permettant d'avoir des polygones de Thiessen de forme anisotrope.

Lors de l'estimation distale de l'aire d'alimentation, les triangles doivent être à peu près équilatéraux. Si un des points résulte en un triangle trop allongé, celui-ci engendrera une mauvaise interpolation en bordure des limites de l'analyse et le résultat obtenu ne sera pas approprié à l'objectif de leur implantation. La méthode de triangulation avec adoucissement utilise chaque triangle et considère les voisins de l'agencement. Les facteurs pris en compte dans l'interpolation avec l'adoucissement (location du centre de gravité de chaque triangle, l'aire du triangle, l'angle du triangle par rapport à la pente générale et la pente statistiquement dérivé du vertex du triangle) génèrent un poids différent à chaque triangle interpolé. Les triangles non équilatéraux ont donc des poids variables qui altère la qualité du résultat recherché. Il est alors préférable de négliger le point qui génère le triangle.

Advenant le cas d'une importante déviation locale de la direction de l'écoulement souterrain, un point des triangles peut être situé sur, ou très près d'un des bras (figure 5.30). Dans cette éventualité, il peut être difficile de restaurer la formation triangulaire en bordure des limites de l'aire d'alimentation et la création d'un polygone irrégulier est obligatoire. Il est cependant très important que les points qui suivent forment à nouveau des triangles presque équilatéraux enjambant le bras de l'aire d'alimentation.

En milieu fracturé l'aire d'alimentation estimée par l'IOP est différente de la réalité. Cette différence est attribuable à des perturbations hydrauliques locales qui ont un impact considérable sur la quantité d'eau qui circule dans des conduits de faible largeur. Ces fractures créent des divergences brutales et importantes des limites de l'aire d'alimentation. À cause de ces fractures et de leur impact, il est difficile d'estimer l'aire d'alimentation en milieu fracturé à l'aide des méthodes considérées ici. Il est cependant probable que l'IOP puisse s'appliquer lorsque les fractures sont horizontales, comme dans un calcaire ou dans un shale fracturé et interconnectés avec des fractures verticales. En effet, les mauvais résultats obtenus pour l'IOP dans l'exemple du terrain virtuel représentant un milieu fracturé, sont dus aux fractures verticales. Dans le cas du puits PE-3 de Saint-Félicien, il est probable que la méthode donne de bons résultats car les fractures sont horizontales et verticales et semblent bien interconnectées.

La méthode d'IOP est valable pour un débit d'exploitation constant. Si le débit d'exploitation est changé, les limites de l'aire d'alimentation changent également et risquent de sortir des corridors investigués par l'implantation piézométrique.

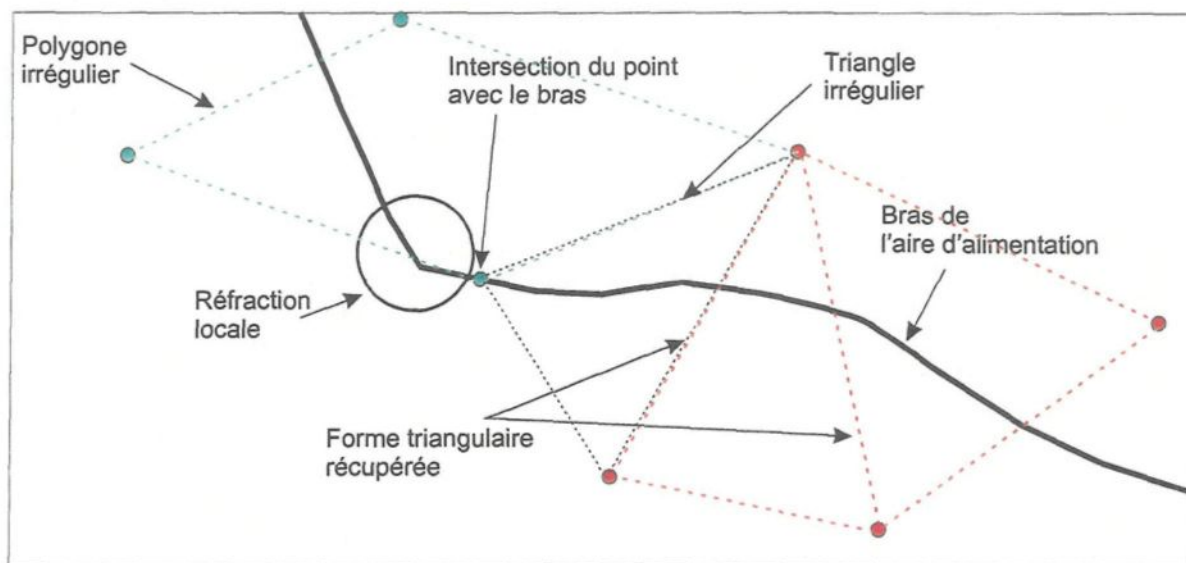


Figure 5.30: Figure montrant la stratégie à suivre lorsqu'un point est sur un bras de l'aire d'alimentation. Dans ce cas, deux autres points doivent être ajoutés pour former de nouveau le triangle. Cependant, ces deux points ne doivent pas former un triangle équilatéral mais plutôt un triangle légèrement décalé qui permet l'implantation en alternance de chaque côté du bras de l'aire d'alimentation.

La méthode d'IOP ne considère pas l'infiltration à la verticale à partir de la surface. Considérer l'infiltration dans l'analyse de l'aire d'alimentation n'a d'influence que sur la localisation de la limite aval et non sur les limites latérales (les deux bras). Afin d'inclure cet élément, une évaluation des gradients verticaux est nécessaire.

L'estimation de l'aire d'alimentation à l'aide de l'IOP considère seulement l'épaisseur de l'aquifère ou l'eau est captée par le puits de pompage. L'évaluation de l'aire d'alimentation s'applique à l'eau circulant à la profondeur des crépines des puits d'observation.

Comme les piézomètres sont implantés en bordure des limites de l'aire d'alimentation distale, aucun point n'est inutile et la méthode d'IOP ne peut être comparée à d'autres dispositions systématiques connues. Par exemple, une disposition en quadrillé peut être efficace si le domaine d'investigation est connu précisément avant de débiter les travaux. Cependant, ce domaine est impossible à définir au préalable et plusieurs points peuvent être implantés inutilement, surtout si l'aire d'alimentation est de forme évasée. En effet, dans une telle situation, plusieurs points peuvent être implantés au centre de l'aire d'alimentation alors qu'ils ne fournissent aucune information sur les limites de l'aire d'alimentation.

VI

CONCLUSION

Plusieurs méthodes permettent d'estimer l'aire d'alimentation d'un puits de pompage. Parmi celles-ci, on retrouve les relations analytiques qui s'appliquent pour des milieux isotropes, homogènes, d'épaisseur constante, et d'une étendue latérale infinie, la cartographie piézométrique dont la qualité de l'estimation dépend de l'emplacement des piézomètres, la cartographie hydrogéologique et la modélisation numérique qui nécessite une bonne connaissance de la géométrie des dépôts meubles de l'aquifère ou de la fracturation d'un massif rocheux.

Le présent projet de recherche avait comme objectif d'élaborer des méthodes permettant l'estimation de l'aire d'alimentation en milieu complexe. Deux volets majeurs ont été développés au cours de ce projet, soit les travaux d'investigation sur le terrain et une méthode d'implantation optimale de piézomètres (IOP) qui permet d'estimer l'aire d'alimentation par cartographie piézométrique.

Les travaux d'investigation sur le terrain comprennent deux volets: les essais de traçage en eau souterraine et les levés de sismique réflexion. Les essais de traçage quantitatifs permettent notamment d'évaluer la dispersivité du milieu, la relation

hydraulique entre différents points d'un aquifère et les temps de transfert de l'eau souterraine.

Trois essais de traçage ont été réalisés en direction du puits PE-3 de Saint-Félicien. Ces essais étaient de type convergent et se déroulaient pendant que le puits PE-3 alimentait la municipalité en eau potable à débit constant. Afin de préserver la potabilité de l'eau pompée, deux aspects ont nécessité une attention particulière, soit le choix du traceur et la quantité de traceur injectée. Afin d'évaluer la quantité de traceur à injecter, un logiciel mathématique développé par Field (2001a) a été utilisé. Ce logiciel tient compte de plusieurs paramètres hydrogéologiques tels la dispersion, la distance entre le point d'échantillonnage et le point d'injection, le débit de pompage; le logiciel permet de prévoir la quantité maximale de traceur au puits de récupération en fonction de la quantité et de la durée d'injection. Quatre bons traceurs ont été identifiés comme étant non toxiques pour l'être humain et l'environnement sous certaines conditions, soit : le chlore, le sodium, l'uranine et la riboflavine. Ces traceurs ont aussi été retenus à cause de leur faible degré de sorption et leurs propriétés conservatives. Seulement l'uranine a été utilisée au cours de ce projet.

Les résultats des essais de traçage démontrent le lien hydraulique entre le puits de pompage PE-3 et l'eau s'infiltrant sur la rive opposée (sud-est) de la rivière à l'Ours. Les temps de transfert (32 heures pour l'essai no.2 et 21 heures pour l'essai no.2), ainsi que la récupération de la masse de traceur, suggèrent que l'aire d'alimentation, du moins dans la partie proximale du puits PE-3 est orientée vers le sud-sud-est et est beaucoup moins

large au droit du puits que ce qui avait été estimée précédemment. L'orientation préférentielle du réseau de fracture et la karstification possible ont vraisemblablement affecté les résultats des essais de traçage.

Le traçage en eau souterraine est une méthode prometteuse et doit être investiguée davantage. La riboflavine est un traceur potentiel qui mérite d'être analysé pour fin de traçage en eau potable. Comme le traceur est inoffensif, il serait moins critique d'évaluer les quantités à injecter en fonction de la concentration au puits de pompage lorsque celui-ci distribue de l'eau potable.

Les levés de sismique réfraction permettent notamment d'estimer les dimensions de la section normale à la direction de l'écoulement souterrain. La largeur de cette section vue en surface correspond également à la largeur de l'aire d'alimentation. Quatre lignes de sismique réfraction ont été effectuées à Saint-Félicien. Deux d'entre-elles ont une longueur totale de 230 mètres chacune et les deux autres ont une longueur de 69 mètres chacune. Les levés plus courts ont permis une caractérisation plus fine de la stratigraphie et ils ont permis d'interpréter trois couches stratigraphiques, soit l'argile, l'unité de sable et gravier et la base du socle cristallin. Les lignes les plus longues n'ont permis que la détermination de la profondeur du socle cristallin.

Les résultats de la sismique réfraction sont difficiles à interpréter lorsque la stratigraphie est complexe. Cependant, la sismique réfraction est utile pour définir un modèle conceptuel pour effectuer une modélisation numérique. Aussi, en tentant

d'estimer les dimensions de la section normale à l'écoulement souterrain, on suppose que le puits de pompage capte l'eau de l'aquifère sur toute son épaisseur, ce qui génère une surestimation de l'aire d'alimentation

L'estimation de l'aire d'alimentation à partir de la méthode d'IOP permet d'évaluer précisément l'aire d'alimentation par cartographie piézométrique. La disposition des puits d'observation est critique pour la précision de l'estimation.

La localisation de la limite aval de l'aire d'alimentation constitue le point de départ du traçage de particule et est donc un point critique. Une imprécision dans l'estimation de la limite aval de l'aire d'alimentation engendre une erreur cumulative de l'estimation de l'aire d'alimentation vers l'amont. Une estimation précise de l'aire d'alimentation à proximité du puits de captage peut se faire à l'aide de l'interpolation de l'élévation de la table d'eau à l'aide de la méthode des voisins naturels. Un agencement d'implantation élaboré par cette méthode inclut 11 piézomètres. Cet agencement a été développé en fonction de la méthode des voisins naturels, de la distribution des points, de la distribution anisotrope des lignes équipotentiels à proximité du puits et par comparaison des résultats avec plusieurs autres agencements de piézomètres testés. Plus loin en amont, l'interpolation par triangulation est plus efficace. Les piézomètres doivent former des triangles quasi équilatéraux et doivent chevaucher chaque bras de l'aire d'alimentation estimée. Cette méthode est moins efficace en milieu fracturé s'il n'y a pas ou peu de fractures horizontales pour assurer l'interconnexion des fractures verticales.

Plusieurs autres agencements de piézomètres sont possibles afin d'estimer l'aire d'alimentation. D'autres agencements proximaux pourraient être élaborés et une comparaison des résultats obtenus permettrait d'identifier les dispositions les plus efficaces.

RÉFÉRENCES

Aley T.J., 1999. *The Ozark Underground Laboratory's Ground Water Tracing Handbook*. Mo., 35 p.

Avramchev L., 1993. *Carte minérale de la région du Saguenay – Lac-Saint-Jean* ; échelle 1 :500 000, PRO 93-07, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.

Bair E.S. et Lahm T.D., 1996. Variations in capture-zone geometry of a partially penetrating pumping well on an unconfined aquifer. *Ground Water*, **54**, pp.842-852.

Banton O., 1998. PARAPOL : *Logiciel analytique pour la détermination de l'aire d'alimentation*. INRS-EAU.

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

Bendel L., 1948. *Ingenieurgeologie II*. Springer, Vienna. 832 p.

Bhatt K., 1993. Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values. *Journal of Hydrology*, **149** no.1 / 4, p.1.

- Bradbury K.R., 1991. *Delineating wellhead protection area in fractured rocks*. United State Environmental Protection Agency, EPA Report no. EPA/813/K-93/001, 144p.
- Bradbury K.R. et Muldoon M.A., 1994, Effects of fracture density and anisotropy on delineation of wellhead protection areas in fractured-rock aquifers. *Applied Hydrogeology*, **3**, pp. 17-23.
- CCME, 1999. *Sommaires des recommandations canadiennes existantes pour la qualité de l'environnement*. Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 12 p.
- Darcy H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris, V. Dalmont, 674 p.
- Davis S.N., Campbell D.J., Bentley H.W. et Flynn T.J., 1985. *Ground Water Tracers*. National Water Well Association, Oklahoma, 200p.
- Desbiens S. et Lespérance P.J., 1988. Stratigraphy of the Ordovician of the lac Saint-Jean and Chicoutimi outliers, Quebec. *Canadian Journal of Earth Science*, **26**, pp.1185-1202.
- Dupuits J., 1863. *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. 2^{ième} édition, Paris, Dunod, 30p.

Earle R. et Middleman B., 1993. Modeling horizontal and vertical capture zones in the Brunswick shale : An application to porous flow theory to a fractured aquifer. *Ground Water Management Book 16*, pp. 797-807.

Field M.S., Wilhelm R.G., Quinlan J.F. et Aley T.J., 1995. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environnemental Monitoring and Assesement*, **38**, pp. 75-96.

Field M.S., 1999. *The QTRACER Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Karst and Fractured-Rock Aquifers*. United State Environmental Protection Agency, Report no. EPA/600/R-98/156a, 137p.

Field M.S., 2002. Efficient hydrologic tracer-test design for tracer-mass estimation and sample-collection frequency, 1, Method development; *Environmental Geology*, **47**, no.7, p.827-838.

Fortin A., 1995. Analyse numérique pour ingénieur. École polytechnique de Montréal, Montréal, 448 p.

French H.K., S.M. Van et Leijnse A., 2000. Prediction uncertainty of plume characteristics derived from a small number of measuring points. *Hydrogeology Journal*, **8**, pp. 188-199.

Gaspar E., 1987. *Modern Trend in Tracer Hydrology, vol II*. CRC Press, Inc., Boca Raton, 145p.

Gilbert R., Douma M., Dyke L., Good R.L., Hunter J.A., Hyde C., Michaud Y., Pullan S.E. et Robinson S.D., 1999. *A Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic and Environmental Research*. Geological Survey of Canada, open file 3731, 125p.

Grubb S., 1993. Analytical model for estimation of steady state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers. *Ground Water*, 31, pp. 27-32.

Gunn J. et Lowe D., 2000. Editorial. *Cave and Karst Science*, 26, 99-100.

Haitjema H. M., Wittman J., Kelson V. et Bauch N., 1994. WHAEM: Program documentation for the wellhead analytic element model. United State Environmental Protection Agency, EPA Report no. EPA/600/R-94/210, 117 p.

Hudak P.F., 2000. Procedure for upgrading contaminant detection networks in aquifers. *Bulletin of Environment and Contaminant Toxicology*, 65, pp. 62-69.

Hydrogéo-sol Inc. 1997. Évaluation de la vulnérabilité de la formation aquifère à la contamination et recherche en eau souterraine - Secteur nord - est du parc industriel - Ville de Saint-Félicien. Rapport du projet : HS 97264-01 remis à Ville de Saint-Félicien, 46 pages.

Jacobson E., Andricevic, R. et Hultin T., 1994. *Wellhead Protection Area Delineation Under Uncertainty*. University of Nevada, Las Vegas publication no. 45118, 63p.

Käss W., 1998. *Tracing Technique in Geohydrology*. A.A Balkema, Rotterdam, 581 p.

Lamontagne E., Archambault G., Woussen G. et Roy D.W., 1994. Characterizing regional joint, fault and shear zone patterns for paleostress analysis and its implication in geotechnical and seismic design; 47th Canadian Geotechnical Conference, Halifax, septembre 1994, Conference Preprints, p.398-407.

Laboratoire Géo-construction, 1994. Étude hydrogéologique exhaustive au puits PE-3, Rapport technique. Projet : HS 9378-02/94LG047, 100 pages.

Leibundgut C., 1974. Fluoresziende markierfarbstoffe in der hydrologie. *Mitt. Naturforsch. Ges. Bern*, 31, pp. 63-84.

Lutz T. et Parriaux A., 1988. The identification of uranine in natural water by high performance liquid chromatography (HPLC). *Sterische Beitrage zur Hydrogeologie. Goldbrunner J Ed.* 141-148.

- Marzo M. et Anadon P., 1988. Anatomy of a Conglomeratic Fan-Delta Complex : the Eoene Montserrat Conglomerate, Ebro Basin, Northeastern Spain. Dans: Fan-Deltas: Sedimentology and tectonic Setting; édité par W. Nemeč et R.J. Stell, Blakie London: 318-340.
- MENVIQ, 1995. *Guide pour la détermination des périmètres de protection autour de captage d'eau souterraine*. Ministère de l'Environnement du Québec, 43p.
- Palmer D., 1981. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46, pp. 1508-1518.
- Paradis D., 2001. *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, 240p.
- Risser D.W. et Barton G.J., 1995. *A Strategy for Delineating the Area of Groundwater Contribution to Wells Completed in Fractured Bedrock Aquifers in Pennsylvania*. United State Geological Survey, report 95-4033, pp. 29.
- Scalzo C., 1998. *Estimation de l'incertitude des périmètres de protection par l'analyse du transport dispersif*. Mémoire de maîtrise, Ecole polytechnique de Montréal, 161p.

Smart P.L., Atkinson T.C., Laidlaw I.M.S., Newson M.d. ET Trudgill S.T., 1986.

Comparison of the results of quantitative and nonquantitative tracer tests for determination of karst conduit networks: An example from the Traligill basin, Scotland. *Earth Surface Processes*, **11**, pp. 249-261.

Todd, D. K., 1980. Groundwater Hydrology. JohnWiley and sons, NY, 535 p.

USEPA, 1979. *Office of Toxic Substances 8E Status Report.*, United State Environnemental Protection Agency, Report Number EPA 8E-0179-0271.

USEPA, 1987. *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas.* United State Environnemental Protection Agency, EPA Report no. EPA/440/5-93-001, 212p.

Northwood Technologies inc., 2000. Vertical Mapper: Contour modeling and display software : version 2.6. Northwood Technologies inc.

Vieux B.E., Mubarak M.A., Brown D., 1998. Wellhead protection area delineation using a coupled GIS and groundwater model. *Journal of Environmental Management* **54** no.3, p.205.

Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L. and Alley W.M. 1998. *Ground Water and Surface Water; A Single Resource.* United State Geological Survey, circular 1133.

ANNEXE I

Méthodes d'injection, d'échantillonnage et d'analyse des traceurs

Méthode d'injection

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour injecter un traceur dans l'eau souterraine. Celles-ci varieront en fonction du type d'essai, du milieu aquifère et de l'objectif de l'essai de traçage. Idéalement, le traceur est injecté dans l'horizon perméable alimentant le puits de pompage, par l'entremise d'un piézomètre. Dans un essai convergent, les conditions d'écoulement souterrain au droit du puits d'injection ne doivent pas être modifiées.

Les trois piézomètres qui ont été utilisés pour l'injection du traceur possèdent des crépines dans le socle rocheux. Les trois injections se sont donc effectuées dans cet horizon. Chaque piézomètre est constitué d'un tube de PVC de 19 mm de diamètre.

Le débit d'injection a été de 50 l/heure pour les trois essais. Ce débit est très faible par rapport à la capacité de l'aquifère ainsi que des puits d'injection et il perturbe l'écoulement souterrain de façon négligeable. Afin d'assurer l'échantillonnage du pic de la courbe de restitution, l'injection était d'une durée d'une heure au cours de chacun des trois essais. En effet, le pic de la courbe de restitution risque de ne pas être échantillonné si l'injection est ponctuelle et que le puits d'injection est proche du puits de pompage. Par contre, une longue injection près du puits de pompage provoque un plateau et rend plus difficile l'évaluation du temps de transfert du traceur dans l'eau souterraine.

L'injection du traceur s'est effectuée de façon gravitaire et à l'aide d'une bouteille de "Mariotte" (figure A.1), laquelle permet de conserver un débit d'injection constant. Un tube ouvert à l'atmosphère génère une pression négative à l'intérieur de la bouteille et maintient constante la différence de charge hydraulique causant l'écoulement à la sortie de la bouteille. Si le tube était absent, la différence de charge hydraulique entre le sommet de l'eau dans la bouteille et l'exutoire varierait dans le temps, ce qui causerait une variation du débit d'écoulement.

Parmi les diverses méthodes d'injection du traceur, deux méthodes très simples peuvent être utilisées, soit le déversement direct de la solution traçante au sommet du tube du piézomètre ou soit le déversement par l'intermédiaire d'une tubulure à l'intérieur du tube du piézomètre et ouverte à la profondeur de la crépine. Le déversement direct comporte plusieurs inconvénients. D'abord, si le tube de PVC du piézomètre fuit à certains endroits, le traceur sera perdu en partie. Ensuite, le temps nécessaire au recyclage de l'eau à l'intérieur du tube peut être long et générer un délai avant que le traceur ne quitte le point d'injection. Ce délai crée une dilution du traceur dans le temps qui risque d'occasionner des concentrations plus faibles au point d'échantillonnage et générer une dispersion supérieure à la réalité.

L'injection par l'intermédiaire d'une tubulure est légèrement plus complexe mais plus efficace. En effet, l'ouverture inférieure de la tubulure peut être amenée directement à l'ouverture de la crépine et permet l'évacuation directe du traceur. Aussi, si la crépine est d'une longueur importante, le traceur peut être injecté à la profondeur voulue. Il est

cependant probable que celui-ci s'étale à l'intérieur de la crépine avant de quitter le piézomètre.

L'insertion d'une tubulure flexible à l'intérieur du piézomètre peut s'avérer complexe. Les joints du tube de PVC du piézomètre créent des obstacles au passage de la tubulure et, quelquefois, il est impossible d'effectuer l'insertion. Pour cette raison, il est recommandé d'utiliser une tubulure rigide avec une pointe solide au bout du tube (figure A.2). La pointe solide permet d'éviter les joints du tube du piézomètre et la tubulure rigide permet un meilleur contrôle à partir de la surface.

La tubulure doit d'abord être remplie d'eau avant d'être insérée à l'intérieur du tube du piézomètre. Si la tubulure est vide, le traceur ne s'écoulera pas car la différence de charge hydraulique entre la sortie du traceur dans la bouteille d'injection et le sommet de l'eau dans cette bouteille ne génère pas une pression suffisante pour faire évacuer l'air de la tubulure. La tubulure est d'abord remplie d'eau à l'aide d'une première bouteille de 18 litres et ce n'est que par la suite que l'injection du traceur débute. Un changement de bouteille est utile afin d'éviter l'infiltration d'air dans la tubulure. Ce changement de bouteille doit se réaliser rapidement. Dans ce projet, un simple système de connexion rapide pour boyau d'arrosage a été efficace afin d'effectuer rapidement le transfert entre les bouteilles (figure A.3).

Lorsque l'injection s'effectue par l'intermédiaire d'une tubulure, la différence de charge hydraulique qui génère le débit d'injection du traceur correspond à la différence

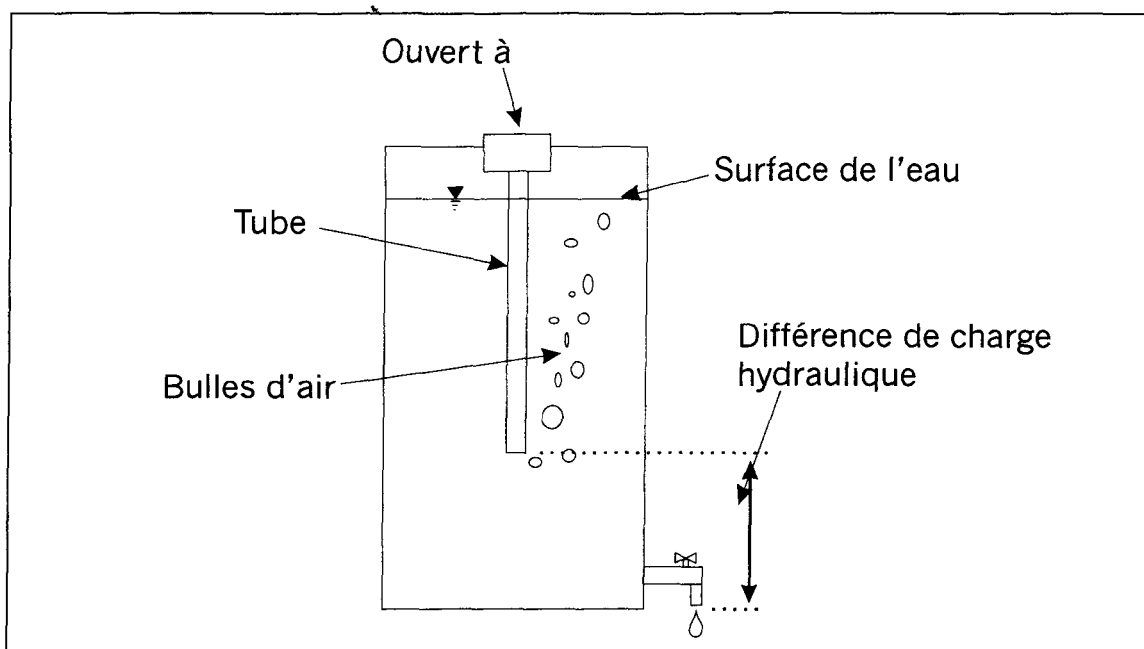


Figure A.1: Schéma illustrant le fonctionnement d'une bouteille de Mariotte. Le tube est ouvert à l'atmosphère et provoque une pression négative à l'intérieur de la bouteille. A mesure que l'eau sort par le robinet, l'air entre par le tube ce qui génère des bulles. La différence de charge hydraulique demeure donc constante et est égale à la distance entre le bas du tube et le robinet.

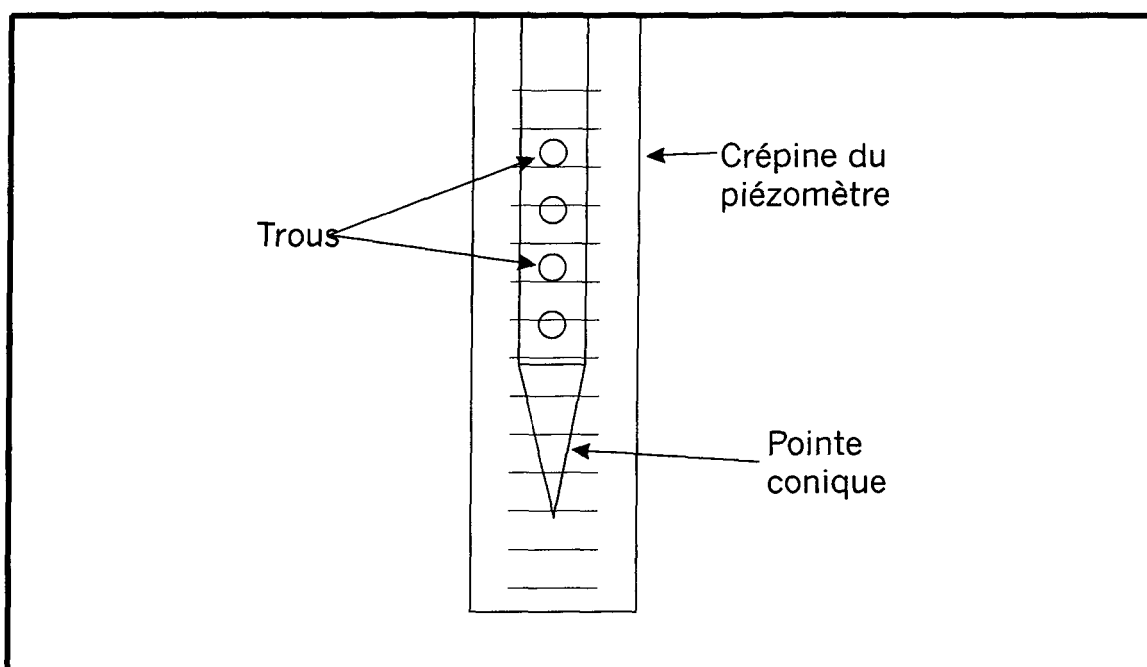


Figure A.2: Schéma du tube à l'intérieur du piézomètre. La pointe conique est installée à la base de la tubulure. Les trous situés un peu plus haut permettent l'évacuation du traceur.



Figure A.3: Photo illustrant le système de connexion rapide utilisé pour permettre le changement de bouteille sans infiltration d'air dans le tuyau.

entre la base du petit tube de la bouteille de Mariotte et l'élévation du niveau d'eau dans le piézomètre. Cette différence de charge hydraulique génère un débit d'écoulement rapide et nécessite un ajustement sur le terrain. Le petit tube qui crée l'effet siphon à l'intérieur de la bouteille de Mariotte permet tout de même la conservation du débit constant. Si la différence de charge hydraulique entre le sommet de l'eau dans la bouteille de Mariotte et le niveau de l'eau dans le piézomètre est grande, l'utilisation d'une bouteille de Mariotte n'est plus nécessaire. En effet, la variation de charge hydraulique générée par la vidange de la bouteille sans le système de Mariotte est négligeable par rapport à la différence de charge hydraulique totale.

Échantillonnage et analyses

L'échantillonnage de l'eau souterraine captée par le puits de pompage s'effectue simplement à l'aide de bords propres et exempts d'uranine. L'eau récoltée doit être échantillonnée immédiatement à la sortie du puits afin que la valeur temporelle attribuée à l'échantillon soit juste. Aussi, l'eau doit être recueillie avant tout traitement pour ne pas affecter la fluorescence de l'uranine dans l'eau. En effet, certains traitements, tels la chloration ou l'émission de rayons ultraviolets détruisent l'uranine dans l'eau.

L'analyse de l'uranine s'effectue à l'aide d'un fluoromètre par spectre ou par filtre. Le premier type de fluoromètre est plus efficace mais aussi plus dispendieux. Les fluoromètres par spectre offrent la possibilité de modifier la longueur d'onde et permettent donc d'obtenir une limite de détection plus basse et d'utiliser différents

traceurs fluorescents sans ajout de modules externes. Les fluoromètres par filtre, utilise des filtres qui possèdent une longueur d'onde fixe. Chaque colorant fluorescent doit être analysé avec le filtre correspondant. Les fluoromètres portables, qui sont plus petits, utilisent surtout des filtres. Il est évident que l'utilisation de fluoromètres portables permet de mieux cibler la période de temps nécessaire entre chaque analyse et le moment de la dernière prise d'échantillons, car les analyses peuvent s'effectuer directement sur le terrain.

Les standards d'analyse doivent être calibrés avec l'eau souterraine captée par le puits de pompage avant le début de l'essai de traçage. De cette façon, on élimine l'effet de l'uranine existante naturellement dans l'eau souterraine (*background*) ainsi que l'effet du pH ou de substances ayant un effet sur la fluorescence de l'uranine.

ANNEXE II

Levés de sismique réfraction

Éléments techniques sensibles lors de levés de sismique réfraction

Parmi les éléments techniques qui sont critiques lors de l'exécution de levés de sismique réfraction, mentionnons l'installation des charges, leur profondeur et la compaction du matériel de remplissage des trous servant à l'installation des charges. La distance entre les géophones et l'emplacement de l'explosion sont aussi des facteurs influençant la qualité d'un relevé.

À Saint-Félicien, les tirs éloignés lors de la réalisation des deux premières lignes étaient à une distance considérable, soit à 70 mètres de l'extrémité de la ligne. Les charges d'explosifs utilisées devaient être plus importantes. Cependant, plus la charge est élevée, plus la dissipation de l'énergie vers le sommet est importante. Pour contrer ce phénomène, la charge d'explosifs doit être introduite en plus grande profondeur (au moins 1 m) et la compaction du matériel sus-jacent doit être bien effectuée. Par exemple, chaque tir éloigné lors des deux premières lignes comptait environ 10 bâtons de dynamite de 2,5 cm de diamètre par 20 centimètres de longueur. Les résultats obtenus à partir de ces tirs sont de mauvaise qualité (figure A.4). En effet, les premières arrivées à chaque ligne sont difficilement identifiables et souvent, des arrivées doivent être ignorées. Par contre, lors des deux dernières lignes réalisées sur le site, les résultats étaient excellents et les premières arrivées sont très claires (figure A.5).

Le type de détonateurs est un autre élément critique lors de levés de sismique réfraction.. Le délai doit être court (idéalement nul) entre l'explosion et le début de

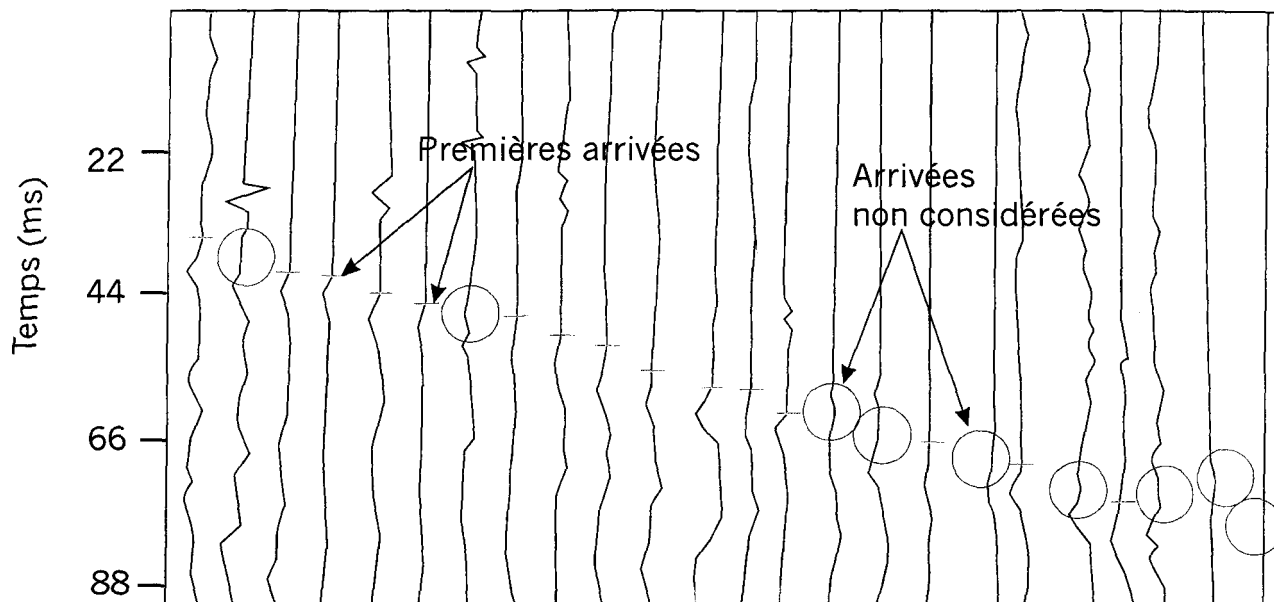


Figure A.4: Schéma illustrant la mauvaise qualité des données enregistrées lors du tir no. 1 effectué sur la première ligne de sismique réfraction.

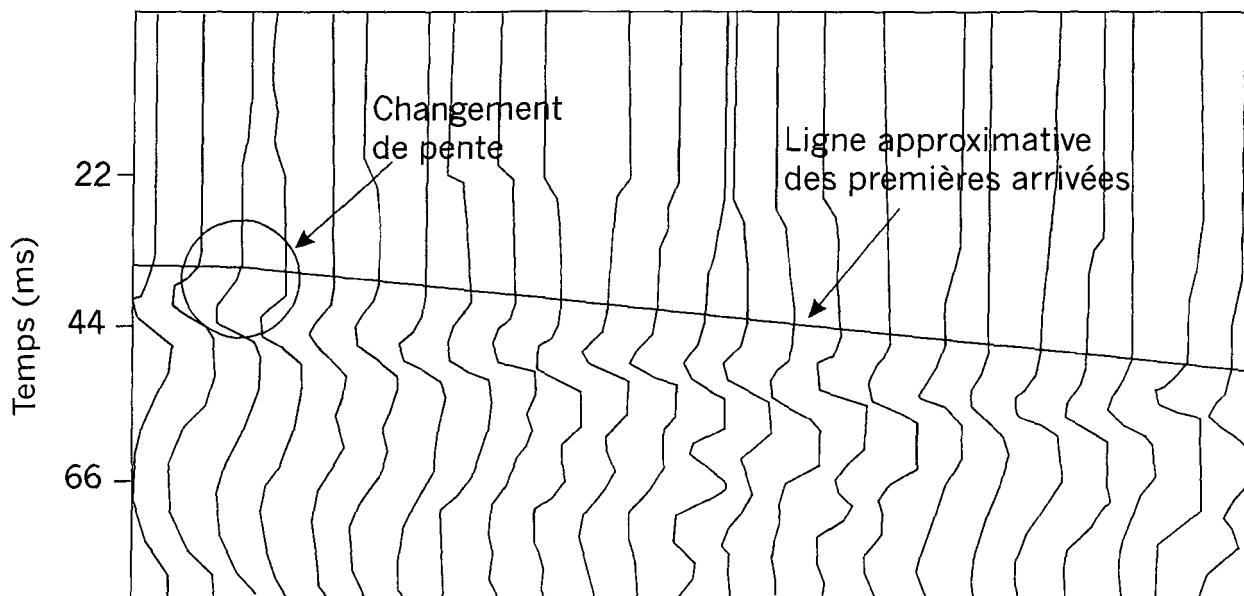


Figure A.5: Schéma illustrant la bonne qualité des données enregistrées lors du tir numéro 6 de la ligne numéro 3. Remarquez le fort contraste des premières arrivées.

l'enregistrement. Si le délai est trop grand, la profondeur des couches stratigraphiques mesurées sera surestimée. Dans ce projet, des détonateurs de type « seismocap » ont été utilisés. Ces détonateurs sont conçus pour les levés de sismique réfraction. Les lignes 3 et 4 effectuées à Saint-Félicien ne peuvent être corrélées avec les deux premières lignes car celles-ci n'ont pas été réalisées avec le même type de détonateur.