MISE AUX NORMES DE L'EAU POTABLE - SECTEUR EST

ANALYSE NUMÉRIQUE D'UN CONCEPT DE PRISE D'EAU LINÉAIRE SOUS-FLUVIALE DANS LE SECTEUR DES ÎLETS DE LA RIVIÈRE MONTMORENCY

Rapport de recherche No R-765 *Mars 2005*

VILLE DE QUÉBEC

MISE AUX NORMES DE L'EAU POTABLE - SECTEUR EST

ANALYSE NUMÉRIQUE D'UN CONCEPT DE PRISE D'EAU LINÉAIRE SOUS-FLUVIALE DANS LE SECTEUR DES ÎLETS DE LA RIVIÈRE MONTMORENCY

Pour le compte de

GENECOR Civil Inc.

Mandaté par la

Ville de Québec

Mars 2005

SOMMAIRE

Référence pour fins de citation : **Paniconi, C., C. Racine, R. Lefebvre et M. Leclerc (2005).** Mise aux normes de l'eau potable - Analyse numérique d'un concept de prise d'eau linéaire sous-fluviale dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency. Pour le compte de GENECOR- Civil et la Ville de Québec (Service de l'Ingénierie). Rapport INRS-ETE #R-765. 34 pages. Mars

© INRS-ETE

Résumé : Cette étude, mandatée par la Ville de Québec par l'entremise des Consultants GENECOR Civil Inc., a pour but d'analyser à l'aide d'un modèle de simulation numérique 2D (en section verticale) le comportement d'un dispositif horizontal de captage d'eau sous-fluvial dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency.

Des simulations de l'écoulement souterrain de la nappe libre en contact avec la rivière ont été réalisées en prenant en considération les facteurs et paramètres suivants:

- les propriétés du milieu poreux (perméabilité des *stratums* de sable et gravier et du matériel filtrant autour des conduites);
- la recharge naturelle et le niveau de la rivière (effet de l'étiage);
- le colmatage possible du matériel filtrant;
- l'utilisation d'un matériau filtrant à haute perméabilité;
- la configuration du système de captage
  - le nombre de conduites et leur distance de séparation latérale;
  - la profondeur des conduites et leur diamètre;
- l'alternative de captage gravitaire simple et/ou par pompage d'appoint (captage en tension).

Le programme de simulation a notamment permis de tirer les conclusions suivantes :

1. La réponse du modèle s'est révélée très sensible au paramètre de conductivité hydraulique de la zone proximale située à l'aplomb des conduites (tranchée) de sorte que le besoin de caractérisation de l'ensemble de l'aquifère sous-fluvial n'apparaît pas essentiel. Nous pouvons ainsi affirmer que le mode de captage proposé est de type *quasi-superficiel* étant données les courtes distances parcourues par l'eau depuis l'écoulement de surface vers les conduites; en corollaire, la qualité physico-chimique de l'eau captée ne devrait pas beaucoup différer de celle de l'écoulement superficiel mises à part les matières en suspension;

2. Tout paramètre de conception de la (les) tranchée(s) devant recevoir la(les) conduite(s), concernant le colmatage éventuel, le nettoyage par courant inversé (*backwashing*), le pouvoir filtrant, ou encore, l'utilisation de membranes géosynthétiques, peut se limiter à cette zone très réduite. L'option d'utiliser un matériau poreux naturel ou synthétique ajusté à la conductivité hydraulique souhaitée, tout en conservant les propriétés de résistance à l'action érosive du cours d'eau doit être spécialement considérée.
3. Considérant l'importance cruciale de la conductivité hydraulique dans la zone d'implantation, une réduction significative de ce paramètre, due éventuellement au colmatage, pourrait avoir des conséquences négatives très significatives sur le captage et il nous apparaît que la mise en place d'un dispositif de lavage par courant inversé est essentielle. Un dispositif d'observation ou de surveillance devrait être planifié pour mesurer ce phénomène le cas échéant.
4. Une autre implication positive du captage relativement localisé à l'aplomb des conduites est que le débit de captage peut aisément être majoré en ajoutant des conduites parallèles dans le dispositif à condition de respecter un écartement minimal entre elles (typiquement 7-8 m) permettant d'exploiter l'indépendance à cette distance des cônes de captage.
5. L'étude a été conduite en majorant la consommation de base recherchée par le système par un facteur 2, soit 70000 m^3/j. Plusieurs scénarios d'analyse permettent d'atteindre cet objectif, notamment le *cas de base* (implantation à 2 m dans le centre du cours d'eau, réutilisation des matériaux de remblai présents actuellement dans le lit mineur (déblai des tranchées), longueur de conduites de 250 m) qui nous a servi de référence pour fins de comparaison.
6. Parmi les facteurs de conception susceptibles d'accroître l'efficacité du système projeté, mais à un degré moindre que la conductivité hydraulique de la tranchée, on compte la *profondeur d'installation des conduites, leur diamètre, leur espacement et un pompage d'appoint*. Bien que ces paramètres permettent d'accroître la capacité d'un tel système par rapport au cas de base étudié, il ne nous apparaît pas nécessaire d'y recourir pour le moment, considérant que le cas de base analysé ou sa variante à deux conduites répondent déjà au critère d'efficacité sécuritaire fixé; seule une optimisation de type coût/bénéfice pourrait suggérer de modifier les paramètres du cas de base.

Suite à l'analyse paramétrique des éléments de design du système de captage, GENECOR Civil Inc. a proposé une conception révisée à quatre conduites décentrées vers la rive gauche par rapport au lit de la rivière. Il a été demandé à l'INRS-ETE d'analyser numériquement la performance de celui-ci. *Les résultats des simulations indiquent que la conception proposée de la prise d'eau linéaire sous-fluviale permettrait d'obtenir un débit de 70000 m^3/d en considérant les pertes de charge dans les conduites.*

Étant donné le caractère innovateur du concept proposé, dont l'intérêt commence à apparaître dans la bibliographie, il apparaît indiqué, voire nécessaire, de poursuivre un programme de recherche/développement technologique visant à mieux comprendre, une fois mis en place, l'évolution à long terme et le comportement opérationnel d'un tel système.

COLLABORATEURS

Pour le Consultant principal (GENECOR Civil Inc.)

Chargé de projet:
Denis Pinard, M.Sc., Ing.

Pour l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement

Responsable, analyses et rédaction du rapport :
Claudio Paniconi, Ph.D., Professeur d'hydrogéologie

Élaboration du programme de simulations numériques, analyses :
René Lefebvre, Ph.D., Professeur d'hydrogéologie

Réalisation du programme de simulation :
Cintia Racine, M.Sc., Assistante de recherche

Participation aux analyses, rapport final :
Michel Leclerc, Ph.D., Ing. Professeur d'hydraulique fluviale

Données topographiques :
Paul Boudreau, M.Sc-Eau., Agent de recherche

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE ii

1. CONTEXTE ET MANDAT 1

2. CONNAISSANCES EXISTANTES 3

3. RELEVÉS DE TERRAIN ET ANALYSE DES DONNÉES EXISTANTES 4

3.1 Composition de l'aquifère sous-fluvial 4

3.2 Transmissivité et conductivité hydraulique 4

3.3 Topographie du lit mineur 8

4. MODÈLE D'ÉCOULEMENT SOUS-FLUVIAL 11

5. DÉFINITION DES SCÉNARIOS D'ANALYSE 14

6. RÉSULTATS DES SIMULATIONS 19

6.1 Cas de base 19

6.2 Propriétés du milieu poreux 19

6.3 Conditions d'étiage extrême 20

6.4 Colmatage du matériel filtrant 20

6.5 Matériel filtrant à haute perméabilité 20

6.6 Configuration du système de captage 21

6.7 Captage gravitationnelle et par pompage 22

7. ANALYSE D'UNE CONCEPTION RÉVISÉE 23

7.1 Modèle numérique d'écoulement 23

7.2 Résultats des simulations 26

7.3 Pertes de charge dans les conduites 28

7.4 Comparaison avec d'autres cas de la littérature 29

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 30

9. ÉTUDES FUTURES 32

BIBLIOGRAPHIE 33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Emplacement et configuration de la zone d'étude dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency 3

Figure 2 : Résultat typique de sondage (puits F-15) réalisé sur le site d'étude par L.E.Q. (2004) .. 5

Figure 3 : Localisation des puits de sondage réalisés par la firme L.E.Q. dans la zone d'étude 7

Figure 4 : Topographie du site d'étude en 1996 (d'après Leclerc et al., 1998) 9

Figure 5 : Section transversale typique schématisée pour les fins de la modélisation 10

Figure 6 : Maillage d'éléments finis typique dans la partie fluviale du modèle 12

Figure 7 : Détail du maillage dans la région de la tranchée du modèle (conduite non représentée dans ce cas) 13

Figure 8 : Schéma du programme de simulation mis en œuvre dans le cadre de cette étude 15

Figure 9 : Schéma de différentes configurations de tranchée testées 16

Figure 10 : Résultats de la simulation « cas de base » - Charges hydrauliques (équipotentielles) 19

Figure 11 : Influence de l'espacement des conduites sur l'efficacité du captage 22

Figure 12 : Conception révisée des infrastructures de captage 24

Figure 13 : Localisation de la conception révisée 25

Figure 14 : Modèle d'écoulement de la conception révisée 26

Figure 15 : Charges hydrauliques du domaine sud simulé 27

Figure 16 : Charges hydrauliques du domaine nord simulé 27

Figure 17 : Débit de captage en fonction de la longueur de la conduite - Conductivité hydraulique de l'aquifère : 10-3 m/s - Diamètre de la conduite : 100, 200 et 300 mm (Birch *et al.*, 2004) 28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs de conductivité selon diverses méthodes d'estimation ou sources 8

Tableau 2 : Nouveau design des infrastructures de captage linéaire sous-fluvial 23

Tableau 3 : Résultats de la conception révisée comparés à des études de cas rapportées dans la bibliographie réalisée par Birch *et al.* (2004) 29

1. Contexte et mandat

Suite à l'étude de Leclerc et coll. (2004) qui avait notamment recommandé un concept d'implantation d'une prise d'eau horizontale et sous-fluviale dans la rivière Montmorency à la hauteur du secteur des Îlets (arrondissement Beauport), couplée à une prise d'eau superficielle traditionnelle, l'objectif de la présente étude est d'analyser plus en détail ce concept, au niveau de la dynamique d'écoulement, en mettant l'emphase sur les paramètres de conception, naturels ou d'ingénierie. Ce système de captage a pour but d'assurer l'approvisionnement en eau de la station des Îlets qui fournit l'Arrondissement de Beauport. Un débit minimum de captage de 35000 m^3/j est souhaité pour le nouveau système sous-fluvial et servira, majoré par un facteur de sécurité de deux (70000 m^3/j), de critère de conception. Le nombre de conduites, leur longueur et leur distance de séparation devront respecter les limites réglementaires suivantes imposées par le Ministère de l'Environnement du Québec (au-delà de celles-ci, une étude d'impact sur l'environnement est requise):

- La longueur totale du dispositif dans le sens longitudinal du cours d'eau ne doit pas dépasser 300 m;
- La superficie totale du système dans le lit du cours d'eau, plus précisément des travaux réalisés, ne doit pas excéder 5000 m^2 (par exemple, si les conduites ont une longueur de 250 m, la largeur des travaux doit se limiter à 20 m).

Des simulations de l'écoulement souterrain de la nappe libre en contact avec la rivière ont été réalisées en utilisant un modèle 2D (en section verticale) prenant en considération les facteurs et paramètres suivants:

- les propriétés du milieu poreux (perméabilité des *stratums* de sable et gravier et du matériel filtrant autour des conduites);
- la recharge naturelle et le niveau de la rivière (effet de l'étiage);
- le colmatage possible du matériel filtrant;
- l'utilisation d'un matériau filtrant à haute perméabilité;
- la configuration du système de captage
  - le nombre de conduites et leur distance de séparation latérale;
  - la profondeur des conduites et leur diamètre;
- l'alternative de captage gravitationnel simple et/ou par pompage (captage en tension).

Avant la phase de modélisation, une analyse des données existantes a été réalisée pour bien caractériser la zone d'étude, surtout par rapport à des valeurs de perméabilité obtenues par un essai de pompage dans un puits horizontal (Compagnie internationale d'hydrogéologie de Québec (1982), et par plusieurs "slug tests" et analyses granulométriques commandées en 2004 à

le Laboratoire d'Expertise de Québec Inc. (L.E.Q. Inc.) par GENECOR Civil Inc. et réalisées au niveau de cinq forages en rive dans la zone d'étude.

2. Connaissances existantes

Une analyse assez exhaustive de la situation concernant le mode de captage actuel à la station des Îlets a été réalisée par Leclerc et coll. (2004) et le lecteur est renvoyé à cette étude pour de plus amples détails. La Figure 1 illustre l'emplacement et la configuration de la zone d'étude.

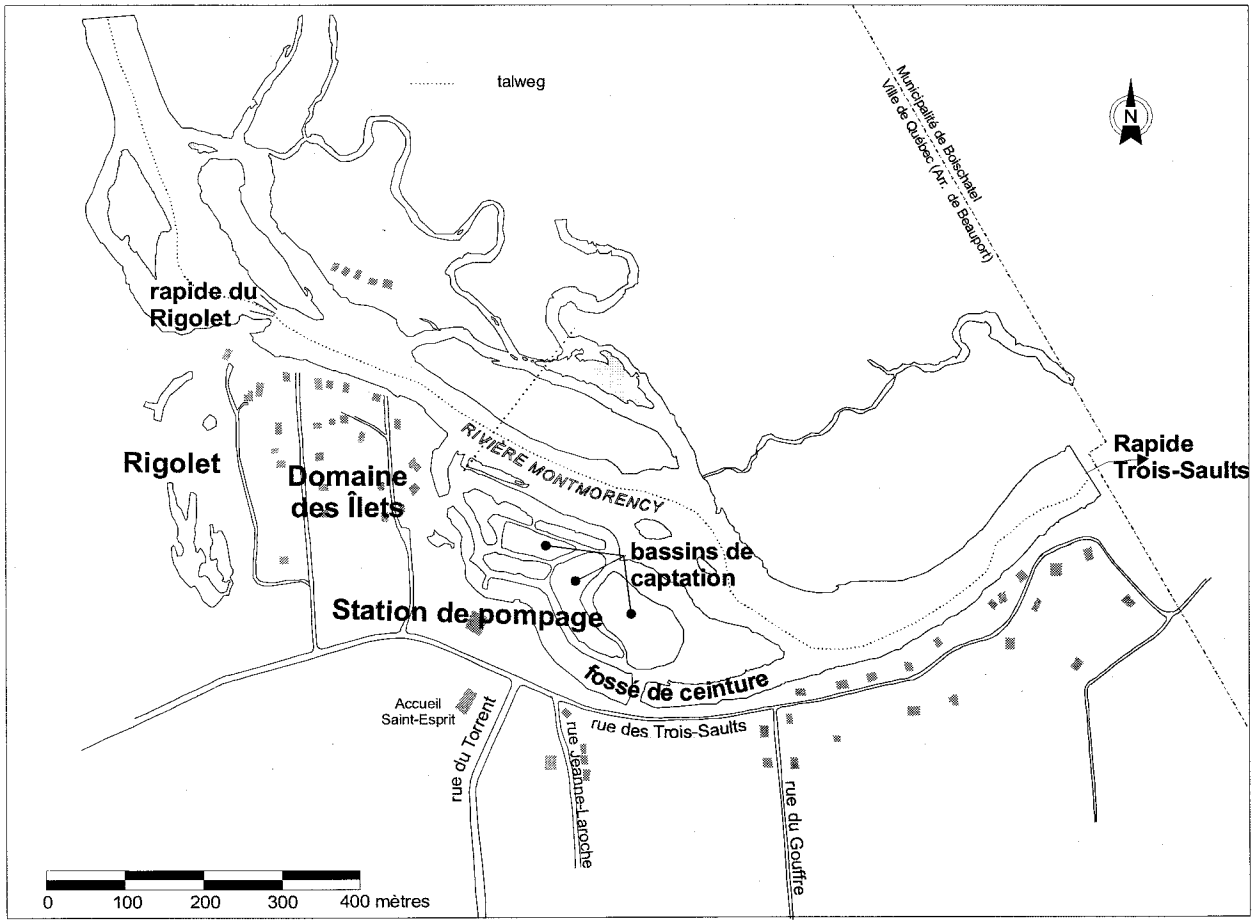

Figure 1 : Emplacement et configuration de la zone d'étude dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency

Une brève revue de littérature sur les systèmes de captation sous-fluvial pour l'approvisionnement en eau a été réalisée. Les articles traitant des aspects suivants ont été consultés.

- Prédiction des débits de captage d'eau potable d'un système de captation sous-fluvial (Birch *et al.*, 2004) ;
- Étude des interactions rivière-eau souterraine (Woessner, 2000) ;
- Étude de l'écoulement dans un puits horizontal (Kawecki, 2000).

3. Relevés de terrain et analyse des données existantes

3.1 Composition de l'aquifère sous-fluvial

À la fin d'août 2004, un consultant en géotechnique, la firme L.E.Q. a été mandatée par la Ville de Québec afin d'effectuer cinq forages de caractérisation en rive sur un île localisée immédiatement en face des bassins de captation actuels de la station des Îlets. Des « slug tests » ont été réalisés dans les puits et des analyses granulométriques ont été conduites sur les carottes échantillonnées afin de déterminer les paramètres de l'aquifère local. Le plus profond des cinq puits a été creusé à une profondeur de 17 m. La carotte correspondante indique que l'aquifère est constitué d'un lit de gravier qui se superpose à un lit de sable sur une profondeur approximative de 12 m au total. Cette couche se superpose à son tour à une couche de till, un matériau beaucoup moins perméable qui est considéré par conséquent comme la base imperméable du domaine d'écoulement spécifié dans le modèle d'écoulement numérique (voir les chapitres subséquents).

Une analyse des données d'études précédentes (notamment par la Compagnie Internationale d'Hydrogéologie de Québec) a permis de confirmer cette vue d'ensemble, sous réserve des hétérogénéités locales, des dimensions et de la stratigraphie de l'aquifère qui sous-tend le lit du cours d'eau et ses rives.

3.2 Transmissivité et conductivité hydraulique

Les valeurs de transmissivité (T, m^2/s) ou de conductivité hydraulique (K, m/s) suggérées par les données de L.E.Q. (2004) sont raisonnablement élevées et correspondent aux valeurs attendues pour un aquifère composé de matériel graveleux et/ou sablonneux ; cependant, les valeurs indiquées sont très variables et sont accompagnées d'un degré d'incertitude important relié au protocole de caractérisation. Par exemple, les rapports n'indiquent pas si les puits étaient pleinement développés avant la réalistion des "slug tests". De plus, de grandes différences apparaissent entre les diverses valeurs de K (ou T) obtenues des slug tests et des analyses granulométriques, ces dernières étant généralement supérieures et plus conformes à celles caractéristiques des sables et graviers (voir la Figure 2 pour un résultat typique de sondage ; la carotte correspondant correspond au sondage le plus profond, soit 17 m ; voir aussi la Figure 3 pour la localisation de ces puits de sondage). Il est à noter que les analyses granulométriques sont des valeurs très "locales" (un échantillon ayant typiquement une épaisseur de 50 cm) et que plusieurs échantillons prélevés de la carotte n'ont pas été analysés.

Des indices objectifs additionnels ont été obtenus d'un rapport de la Compagnie Internationale d'Hydrogéologie de Québec (1982; voir Leclerc et coll., 2004) ; cette étude de pompage a été réalisée *in situ* dans la partie terrestre de la zone d'étude et la configuration du puits de pompage était horizontale à une faible profondeur. Ces données ont été ré-analysées pour la présente étude

en utilisant la solution numérique de Kawecki (2000) et les valeurs de K ainsi obtenues sont en accord avec les valeurs déduites des analyses granulométriques. Le Tableau 1 résume les valeurs de K obtenues par ces divers moyens d'estimation.

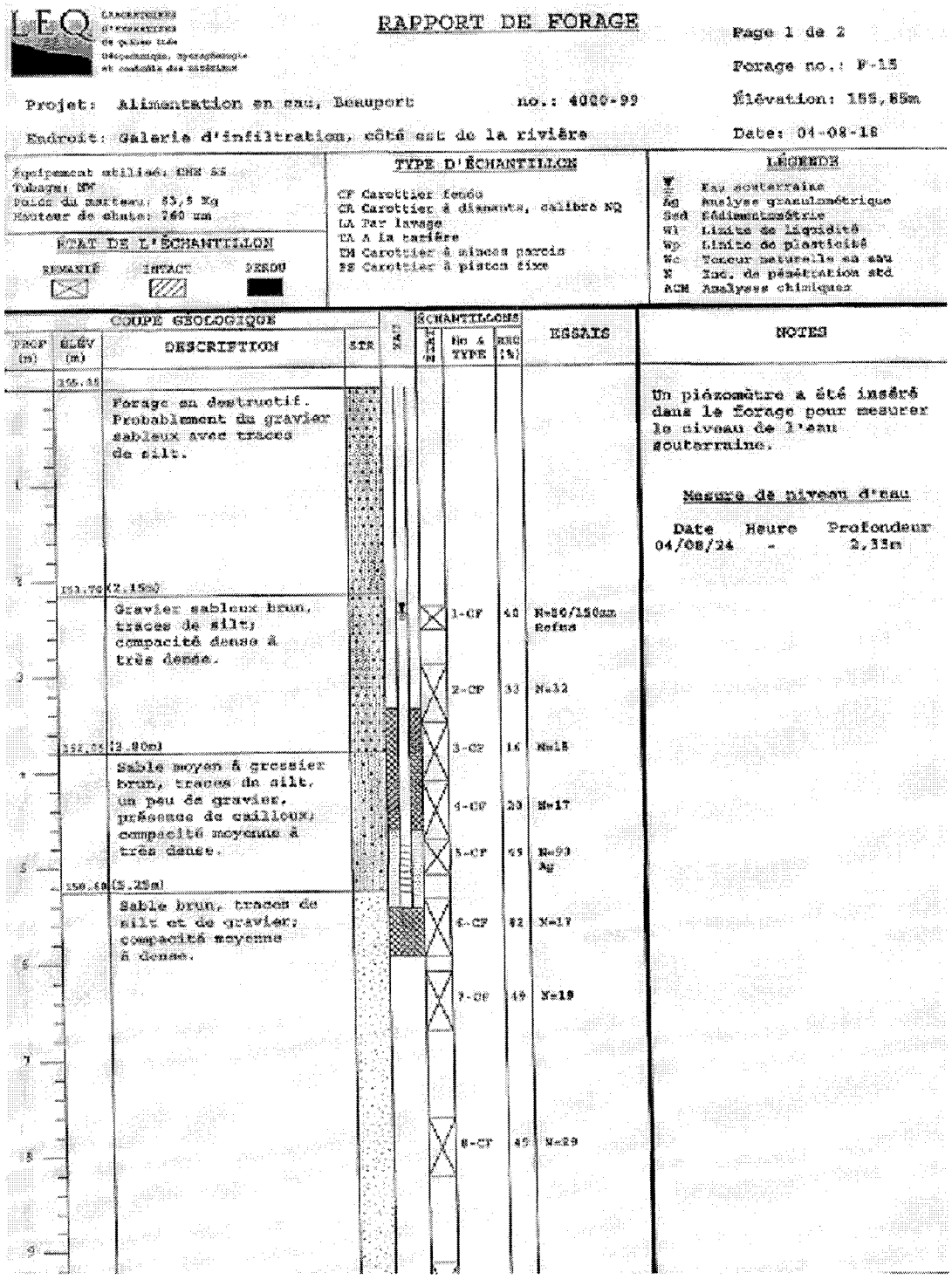

Figure 2 : Résultat typique de sondage (puits F-15) réalisé sur le site d'étude par L.E.Q. (2004)

LEQ

RAPPORT DE FORAGE

Page 2 de 2

Forage no.: F-15

Projet: Alimentation en eau, Beauport — no.: 4000-93 — Élévation: 155,85m

Endroit: Galerie d'infiltration, côté est de la rivière — Date: 04-08-18

COUPE GÉOLOGIQUE					ÉCHANTILLONS				
PROF (m)	ÉLÉV (m)	DESCRIPTION	STR	EAU	STAT	No & TYPE	REC (%)	ESSAIS	NOTES
		Sable brun, traces de silt et de gravier; compacité moyenne à dense.			X	9-CF	46	N=36	Un piézomètre a été inséré dans le forage pour mesurer le niveau de l'eau souterraine.
10									Mesure de niveau d'eau
11					X	10-CF	48	N=38	Date / Heure / Profondeur 04/08/24 / - / 2,35m
12	143.3	(12.34m)							
		Till: gravier et sable à sable graveleux contenant un peu de silt à silteux; compacité très dense.			X	11-CF	41	N=94	
13									
14					X	12-CF	44	N=107	
15									
					X	13-CF	16	N=62	
16									
17					X	14-CF	48	N=60/150mm Refus	
	138.35	(17.50m)							
		Fin du forage							
18									
19									

Figure 2 (suite)

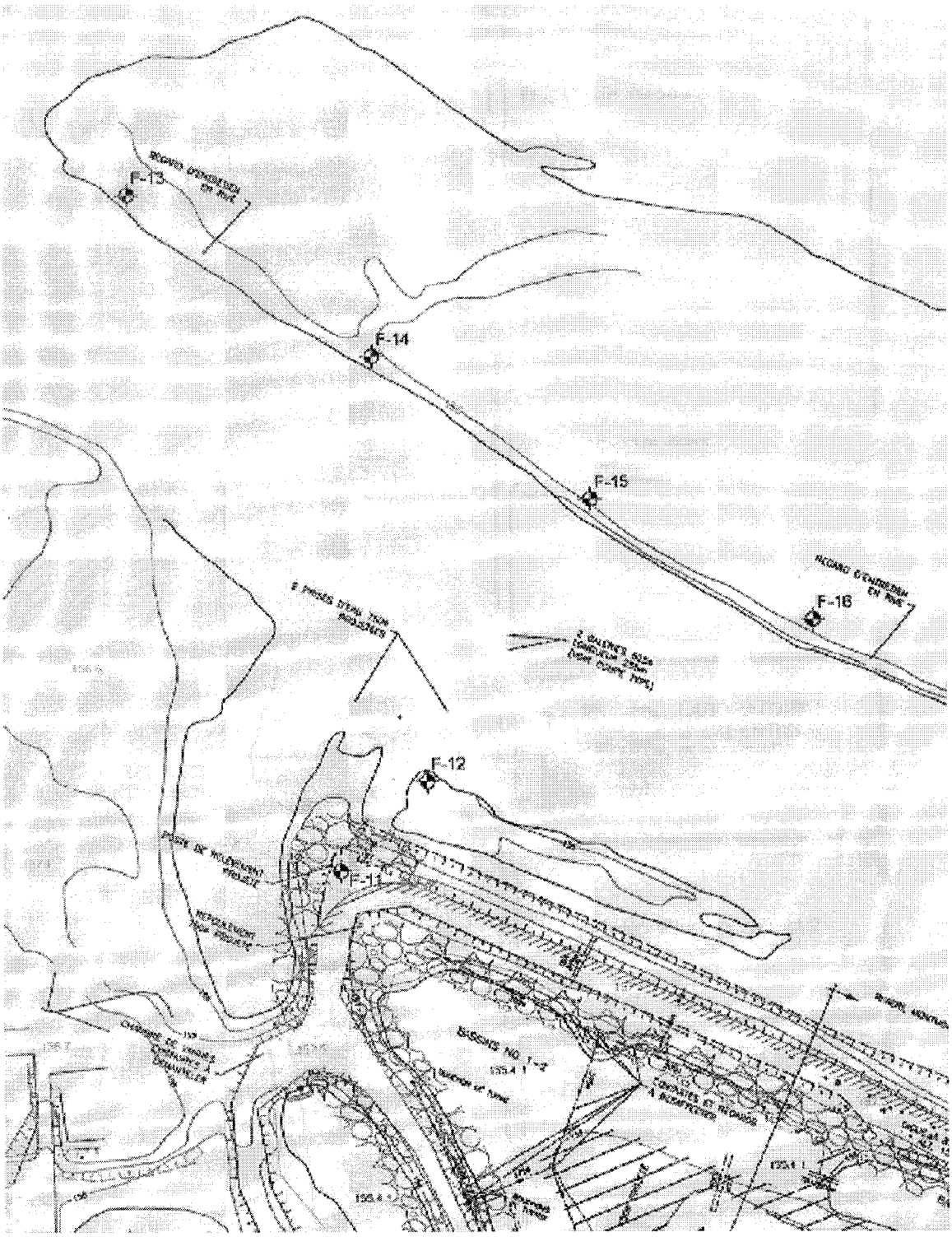

Figure 3 : Localisation des puits de sondage réalisés par la firme L.E.Q. dans la zone d'étude
Note : on remarque sur cette image l'entrée du fossé de ceinture au sud-ouest des bassins de captage existants.

Tableau 1 : Valeurs de conductivité selon diverses méthodes d'estimation ou sources

Méthode ou référence	Valeur de K (m/s)
Valeur selon les forages de L.E.Q.	
Essai de perméabilité	
Gravier	5,80E-05
Sable	4,28E-05
Analyses granulométriques (Hazen)	
Gravier	6,97E-04
Sable	2,00E-04
Valeur pour l'aquifère	
LABORATOIRE D'EXPERTISE DE QUÉBEC (2004)	
Essai de perméabilité	1,10E-05
COMPAGNIE INTERNATIONALE D'HYDROGÉOLOGIE DE QUÉBEC (1982)	
Essai de pompage	1,70E-02
Interprétation de la relation de Theis	3,00E-04
Interprétation de la relation de Kawecki	4,50E-04
Leclerc *et al.* (2004)	5,70E-04
Valeurs retenues pour le modèle (Cas de base)	
Gravier	7,00E-04
Sable	2,00E-04

3.3 Topographie du lit mineur

Une étude détaillée de la topographie du lit mineur avait été réalisée pour l'étude de Leclerc et coll. (2004 ; Figure 4). Les profils transversaux du lit mineur dans cette zone ne présentent pas de thalweg bien défini si bien que les variations topographiques à travers les sections ont été négligées pour les fins de la modélisation. Une cote géodésique uniforme de 153.75 m a donc été attribuée au lit mineur dans le modèle. Afin de représenter le petit bras de rivière jouxtant du côté nord de l'île en face des bassins de captage actuels, une cote de 153.25 m lui a été attribuée. La Figure 5 montre la section typique qui a été utilisée pour les simulations.

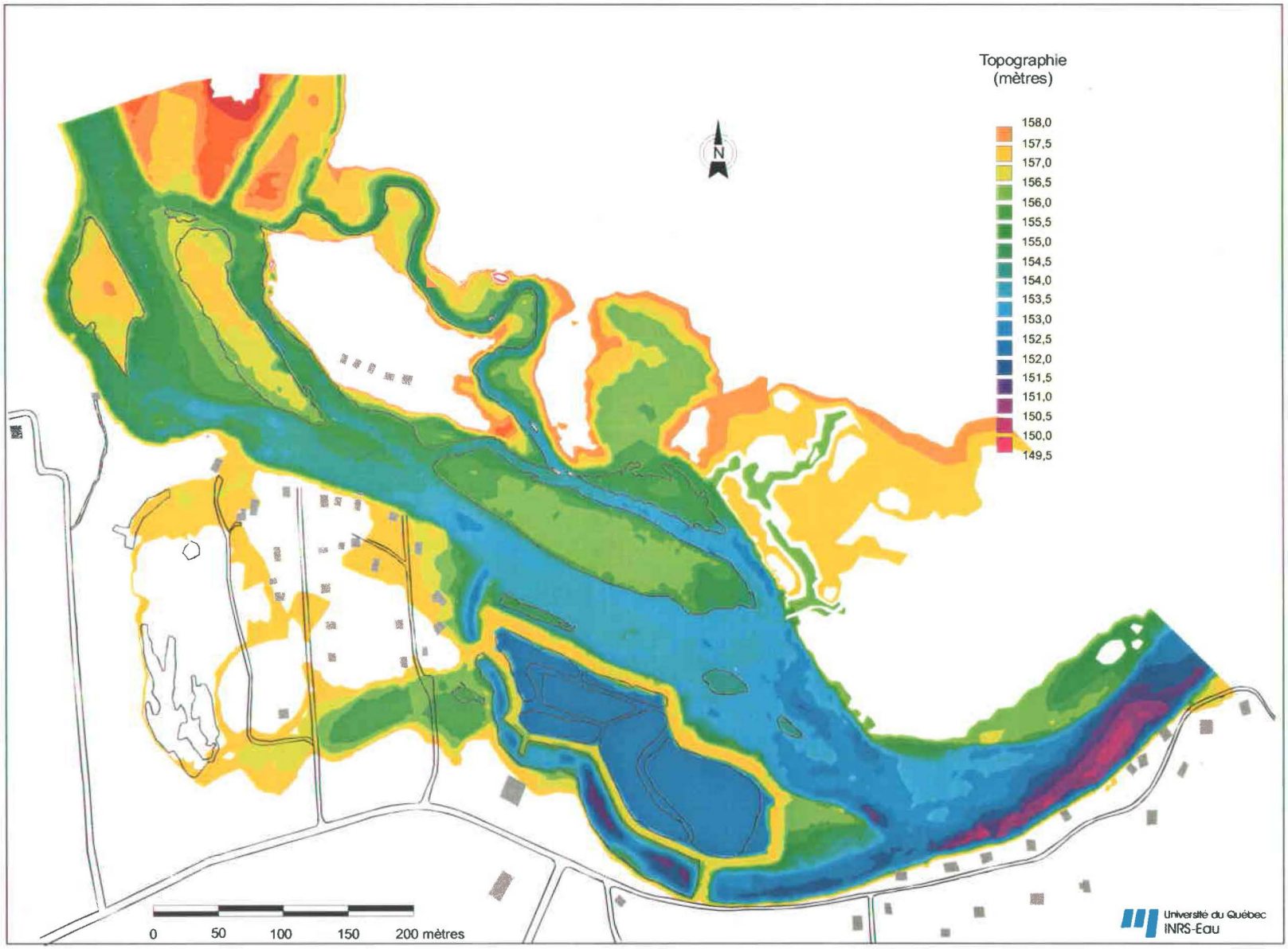

Figure 4 : Topographie du site d'étude en 1996 (d'après Leclerc et al., 1998)

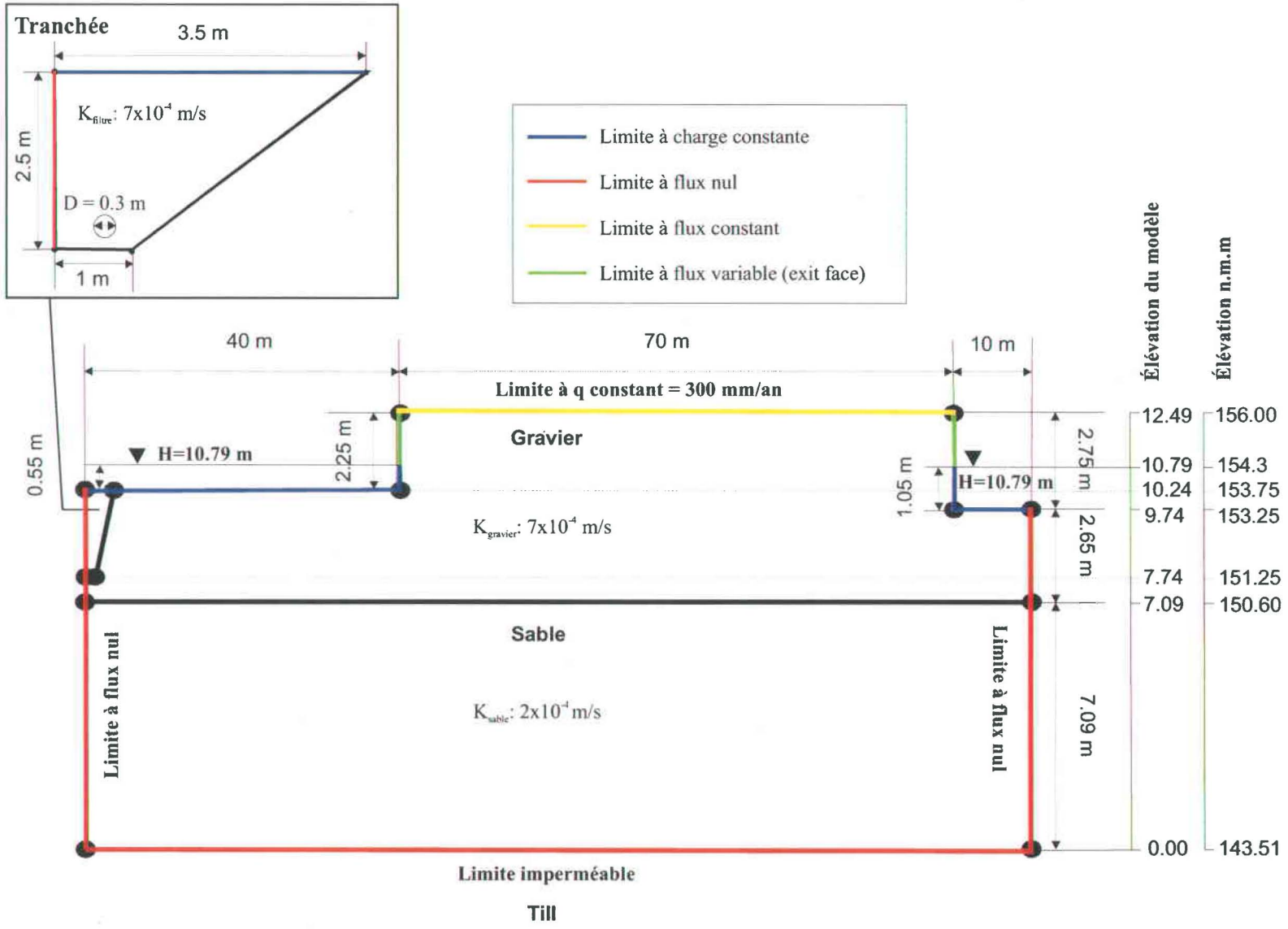

Figure 5 : Section transversale typique schématisée pour les fins de la modélisation

4. Modèle d'écoulement sous-fluvial

Le modèle conceptuel à reproduire numériquement se définit comme étant un aquifère non confiné en contact avec une rivière et dont l'écoulement souterrain (hyporhéïque) est influencé par un puits horizontal implanté à une profondeur donnée. L'écoulement superficiel (rivière) est considéré comme une source permanente et illimitée d'eau permettant la recharge continue de l'aquifère.

Plusieurs modèles numériques, commerciaux ou académiques, sont disponibles pour résoudre ce modèle conceptuel. Étant donné la simplicité de la topographie transversale, la disposition longitudinale des conduites projetées dans l'axe de l'écoulement fluvial, ainsi que la direction préférentielle de l'écoulement souterrain vers les drains (puits horizontaux), le schéma d'écoulement peut être réduit à un régime bi-dimensionnel dont les axes sont verticaux et transverses à l'axe d'écoulement fluvial. Le débit total est simplement obtenu en multipliant le débit spécifique de captage ($m^3/s/m$) par la longueur effective des conduites, soit la partie munie de perforations. Les écarts d'approximation liés à cette hypothèse sont supposés faibles et éventuellement sur-compensés par l'apport additionnel aux extrémités des conduites (contribution tri-dimensionnelle).

Avec cette hypothèse 2D, un modèle simple de ce type spécialisé dans les calculs de propagation et de drainage a été sélectionné. Le modèle SEEP2D est disponible dans la suite de logiciels GMS™ (Groundwater Modeling System). L'outil basé sur la méthode des éléments finis est muni de facilités de maillage et d'une interface graphique spécialisée permettant de construire des simulations et de les piloter vers la convergence.

Dans cette étude, l'hypothèse de régime permanent a été appliquée à toutes les simulations ; celle-ci nous semble raisonnable puisque les conditions aux limites et les paramètres du système sont relativement invariants à court terme et que le système aquifère-rivière va s'équilibrer sur une courte durée comparée aux échelles de temps opérationnelles du régime de captage après l'installation du réseau de conduites. Tout autre changement de configuration ou des paramètres de l'aquifère (par exemple, le colmatage superficiel du lit ou les effets saisonniers comme la glace de fond) peut être analysé en modifiant les scénarios de simulation.

La Figure 5 introduite précédemment est une représentation 2D verticale du domaine d'analyse schématisé, de ses dimensions, des conditions aux limites imposées, des diverses couches d'aquifère considérées, des niveaux d'eau de la rivière et des autres paramètres pertinents. Pour construire le modèle, nous supposons que deux conduites sont placées de part et d'autre du centre du cours principal, c'est-à-dire à 40 m de chaque rive puisque la rivière a 80 m de largeur à l'étiage. Afin de minimiser les calculs, le modèle comporte une frontière latérale passant par le centre du cours d'eau qui forme alors un axe de symétrie où l'écoulement transite verticalement (condition d'imperméabilité latérale ou *no lateral flow boundary condition*). Ainsi seul la moitié du domaine sert pour les simulations et les débits spécifiques de captage sont obtenus en multipliant par 2 les débits de captage simulés par le modèle. Compte tenu des effets de bout favorables aux extrémités des conduites qui ne sont pas pris en compte en 2D, l'approche est conservatrice.

Le seul facteur qui ne répond pas précisément à l'hypothèse de symétrie est la configuration du cours d'eau à l'autre extémité du modèle qui, du coté nord d'une petite île de 20 m de largeur, est constitué d'un petit bras de rivière, et du côté sud, est constitué des bassins de captage actuels avec dans l'intervalle le périmètre des digues. Toutefois, il a été démontré par les simulations que la contribution de ces deux plans d'eau s'est avéré relativement négligeable (du moins celui représenté) dans le résultat et a confirmé *a posteriori* la justesse de l'hypothèse posée.

La Figure 6 et la suivante illustrent la discrétisation par éléments finis du modèle. Bien que la conduite n'y soit pas représentée explicitement, les nœuds formant la circonférence de celle-ci se sont vu imposer une condition dite de Dirichlet, c'est-à-dire, une valeur de pression relative nulle (i.e. pression atmosphérique) pour le cas de captage gravitaire. Par conséquent, nous supposons que l'eau captée se draine *via* une conduite d'amenée vers un puits de pompage (vers la station) dont le niveau à surface libre n'excède pas, en mode opérationnel, le radier de cette conduite. La perte de charge dans la conduite elle-même n'a pas été prise en compte car jugée négligeable en première approximation. Cette hypothèse d'hydraulique des conduites pourrait cependant nécessiter une vérification pour fin de validation.

Pour les simulations de pompage sous tension des conduites perforées, le même genre de conditions sont imposées, cette fois en spécifiant une pression négative.

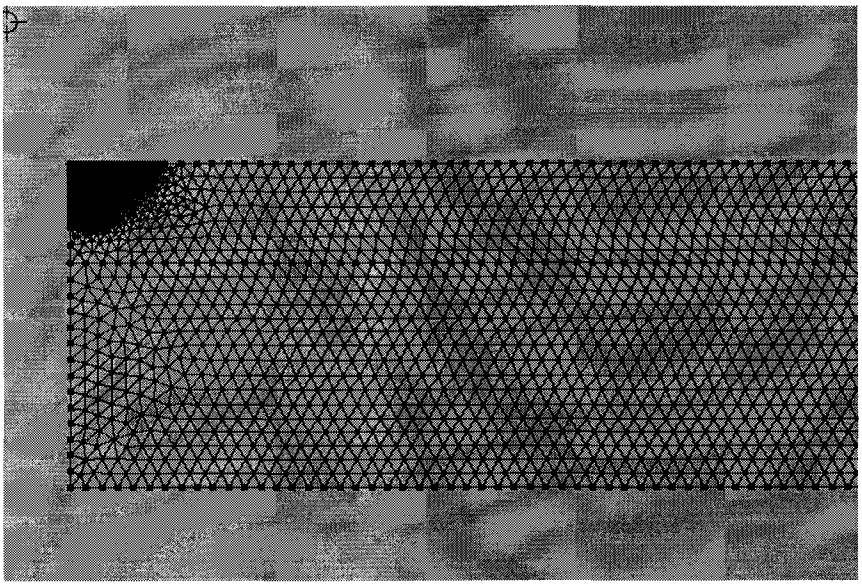

Figure 6 : Maillage d'éléments finis typique dans la partie fluviale du modèle

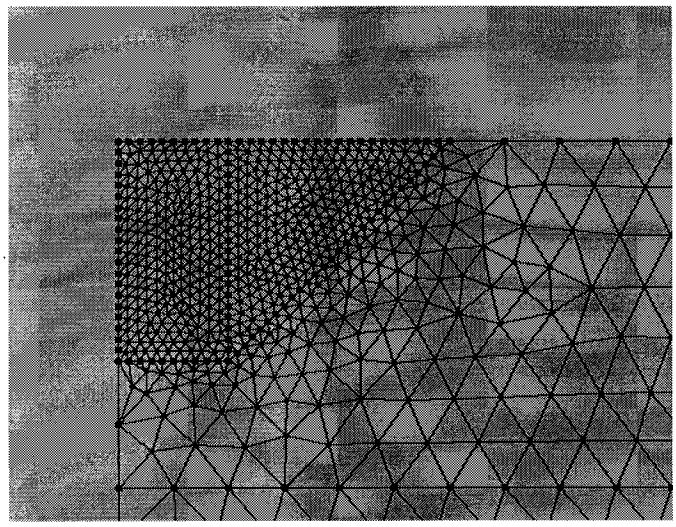

Figure 7 : Détail du maillage dans la région de la tranchée du modèle (conduite non représentée dans ce cas)

5. Définition des scénarios d'analyse

Avec le modèle SEEP2D et le maillage décrit précédemment (ou ses variantes), un programme de simulations a été réalisé pour tester l'efficacité d'une grande variété de scénarios pour le captage sous-fluvial.

Les conditions initiales du modèle ont été établies en exécutant une première simulation en conditions naturelles, c'est-à-dire, en éliminant le terme puits (absence de condition aux limites à la circonférence du drain), en démarrant la simulation en condition de saturation complète ou totale, et en imposant une recharge de 300 mm/an sur la partie terrestre (île) du modèle. Cette première simulation a permis de déterminer le niveau de la nappe phréatique en régime permanent à cet endroit et la distribution des charges hydrauliques sur le domaine. Ces conditions, en plus de procurer un excellent estimé de solution initiale pour les simulations subséquentes, nous ont permis de vérifier que le modèle conceptuel retenu du système aquifère-rivière produit des résultats acceptables et représentatifs de cette réalité. La recharge de 300 mm/an est considérée comme une moyenne représentative de la région d'étude et de sa configuration géologique.

La Figure 8 schématise le programme de simulation mis en œuvre dans le cadre de cette étude, incluant des simulations tenant compte des variations des conditions naturelles à gauche, et des variantes d'implantation reliées à la conception à droite. Étant donné que le modèle numérique ne pouvait bénéficier d'un processus formel de calibration-validation comme c'est habituellement le cas, cette approche permet à tout le moins d'estimer ses marges d'incertitude en plus de vérifier l'influence relative des facteurs naturels considérés et de ne retenir par mesure de précaution que les résultats conservateurs.

Pour chacune des simulations en conditions naturelles mentionnées, toutes les variantes envisagées de conception ont été simulées. Parmi les simulations réalisées, seules ont été retenues comme « acceptables » celles qui procuraient un débit de captage journalier dépassant un seuil de 70000 m^3/j, c'est-à-dire le débit de conception de 35000 m^3/j majoré par un facteur 2 afin de donner une marge de sécurité confortable. Tel que mentionné précédemment, le débit spécifique de captage en $m^3/j/m$ issu du modèle SEEP2D a été multiplié par 2 pour tenir compte de la configuration demi-modèle du maillage (axe de symétrie au centre du cours d'eau), puis ramené en débit réel en multipliant ce résultat par un longueur hypothétique de 250 m tel qu'assumé pour la présente étude. Bien sûr, d'autres hypothèses peuvent aisément être envisagées quant à la longueur de conduite, le résultat étant dans des limites acceptables aux hypothèses 2D linéairement dépendant de ce facteur.

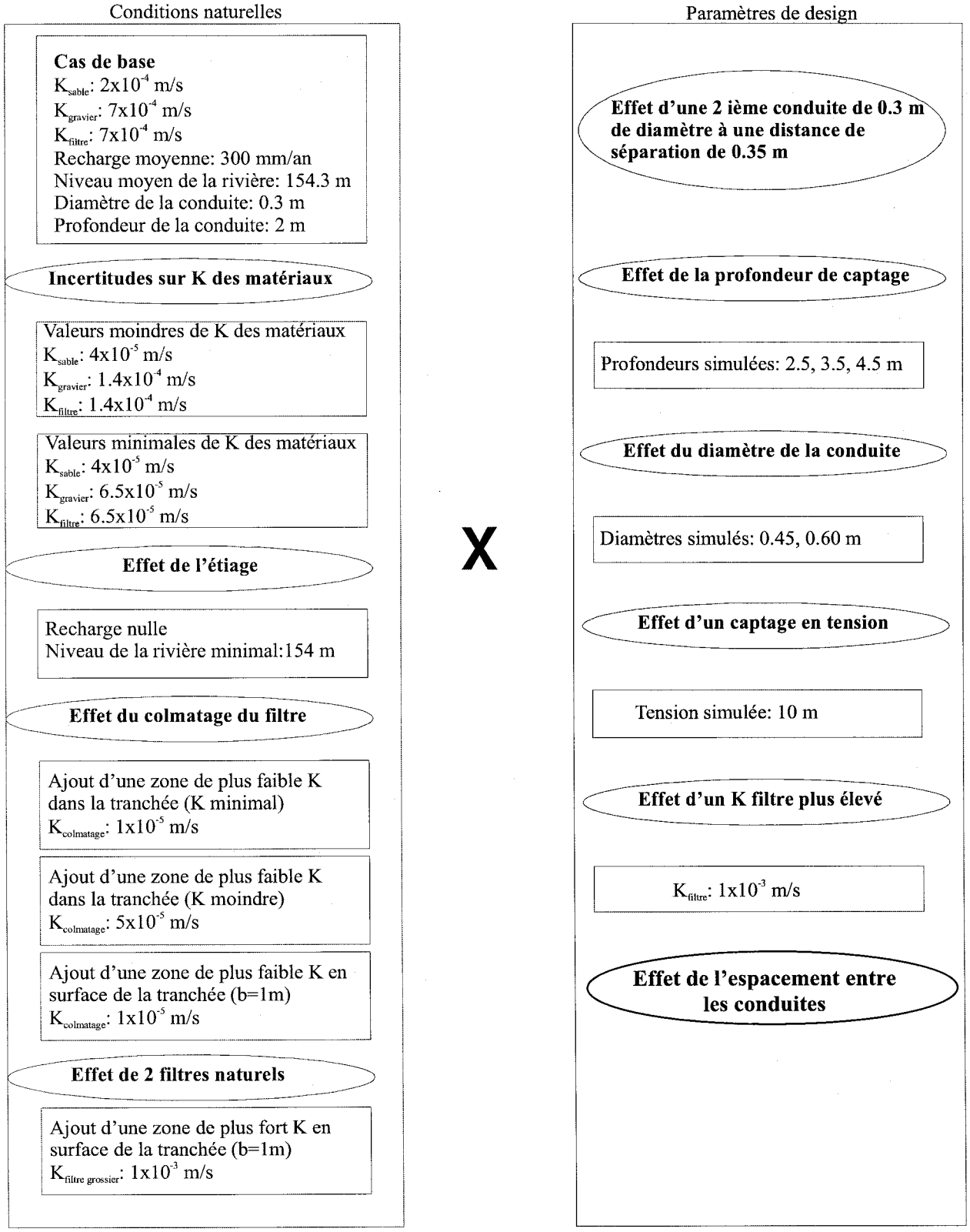

Figure 8 : Schéma du programme de simulation mis en œuvre dans le cadre de cette étude
(Note: Étapes franchies de haut en bas et de droite à gauche)

Nous décrivons brièvement ci-après chacune des configurations naturelles ou aménagées prises en compte dans le programme de simulation, lequel a été établi de concert avec le consultant principal (GENECOR Civil). Les paramètres correspondants sont fournis dans la Figure 8. Pour la conception de la tranchée, différentes configurations ont été étudiées (distribution et conductivité hydraulique des matériaux utilisés; voir la Figure 9) et seront présentées plus loin.

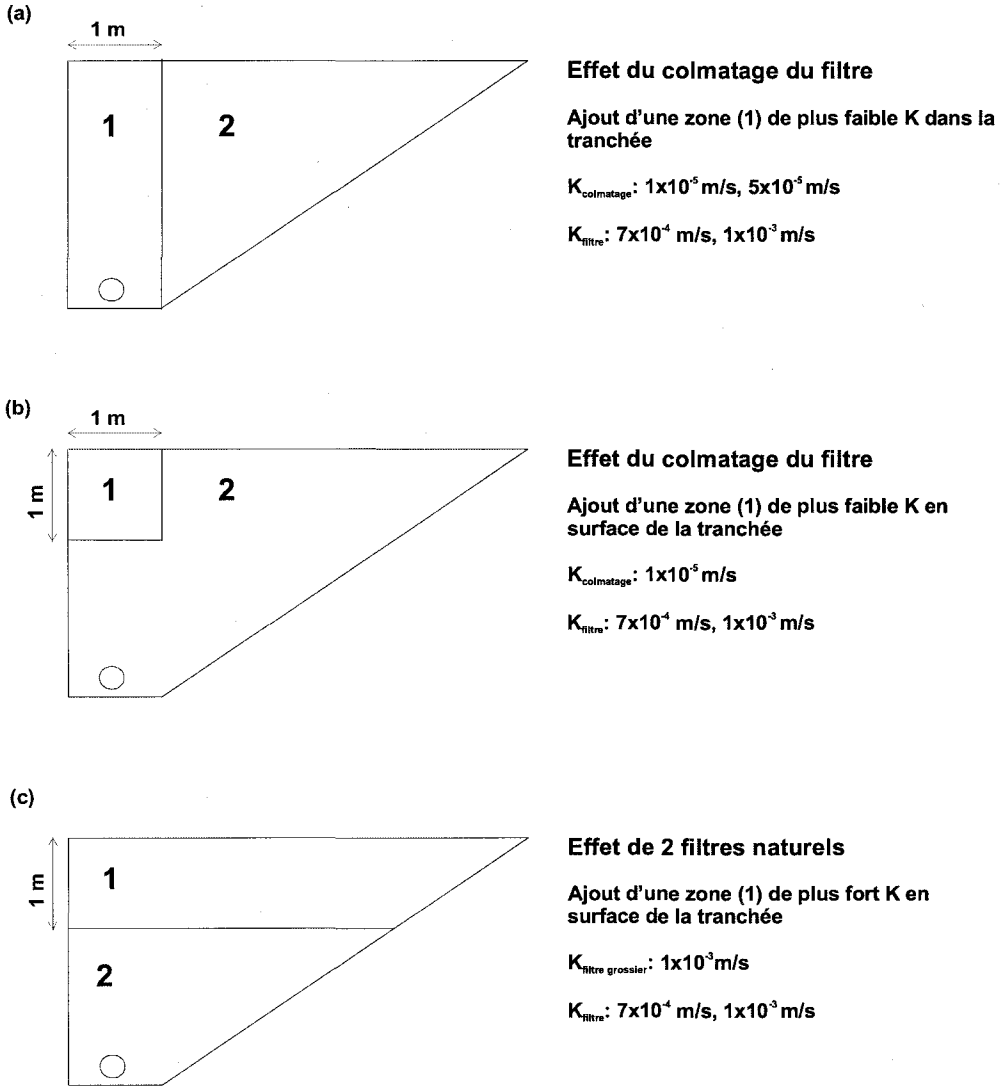

Figure 9 : Schéma de différentes configurations de tranchée testées

Voici en résumé les cas traités :

- ***Le « cas de base »*** est défini en utilisant des valeurs réalistes et justifiables quant aux paramètres naturels et de conception, tels qu'une conductivité hydraulique du filtre de $7x10^{-4}$ m/s et un diamètre de conduite de 30 cm ;

- ***Propriétés du milieu poreux***: trois scénarios prennent en compte une marge d'incertitude sur le paramètre de conductivité hydraulique de l'aquifère sous-fluvial en remplaçant les valeurs utilisées dans le cas de base par des valeurs supérieures (cas « supérieur ») et

inférieures (2 cas, « inférieur » et « minimal ») à celles déduites des différentes analyses mentionnées précédemment (le cas supérieur a été finalement éliminé, le cas de base satisfaisant déjà, comme il est montré dans le chapitre suivant, le critère de conception de 70000 m^3/j). Dans le cas « inférieur », la conductivité hydraulique des matériaux alluvionnaires (sable, gravier) et de la couche filtrante autour de la conduite a été réduite par un facteur 5 par rapport au cas de base. Dans le cas « minimal », la conductivité des matériaux gravier et couche filtrante sont réduits par un facteur 10 tandis celle du sable est réduite par un facteur 5 par rapport au cas de base. Notons que pour tous ces scénarios, incluant le cas de base, K_{filtre} est posé égal à $K_{gravier}$, car nous assumons que la tranchée est remblayée avec le matériau présent originellement après la mise en opération du système. Cette hypothèse a finalement été retenue pour la suite.

- ***Conditions d'étiage extrême***: une condition d'étiage extrême correspondant a un débit très faible dans le cours d'eau, donc à un faible niveau, et des précipitations nulles, situation qui minimise la recharge de l'aquifère *via* la partie terrestre du modèle, a été prise en compte. Ainsi, la condition aux limites de recharge sur l'île a été mise à zéro tandis que le niveau d'eau dans la rivière a été imposé à 154 m, une valeur correspondant à une profondeur moyenne de 65 cm (cette valeur a été extraite de l'étude hydrodynamique de Leclerc et coll., 1999).

- ***Colmatage du matériel filtrant*** : trois scénarios considèrent le problème du colmatage du matériau filtrant présent dans la tranchée. Pour deux de ceux-ci, un colmatage très sévère se produit dans une section de 1 m au-dessus de la conduite (cas a de la Figure 9) ; K_{filtre} est alors réduit par un facteur de 70 par rapport à celui assigné au cas de base, i.e. $1x10^{-5}$ m/s dans le premier cas, et dans une moindre mesure par un facteur 14 à $5x10^{-5}$ m/s dans le deuxième cas. Pour le troisième scénario, le colmatage ($K_{colmatage}$ = 1 x 10^{-5} m/s) ne se produit que dans le premier mètre carré du sommet de la tranchée (voir la Figure 9b), une couche qui est considérée comme partiellement aquifère et partiellement lit d'alluvion, et dont le comportement sédimentaire est susceptible de présenter des épisodes transitoires de sédimentation nette permettant l'infiltration de matériaux fins dans les matériaux de l'aquifère.

  Remarques : l'hypothèse de colmatage ne s'applique que vis-à-vis une partie de la tranchée qui ne représente latéralement qu'un petite partie du domaine de simulation, plutôt que sur l'ensemble de la section. Cette hypothèse se justifie *a posteriori* par le patron d'écoulement qui s'effectue de manière très préférentielle par un chemin vertical au-dessus de la conduite (voir le chapitre suivant sur l'analyse des résultats). De plus, comme le colmatage est une question très préoccupante pour l'opérateur, ce facteur doit être investigué attentivement, mais il n'est pas nécessaire de simuler une grande variété de conditions puisqu'en pratique, le colmatage peut être détecté très rapidement en surveillant le débit capté et en déclenchant, le cas échéant, le processus de lavage inversé (backwash) envisagé dans la conception.

- l'utilisation d'une membrane géosynthétique a été considérée dans l'intention de prévenir ou réduire le colmatage par l'infiltration de matériaux fins dans le substrat filtrant, ainsi que pour améliorer la qualité de l'eau captée. Puisqu'elles retiennent les matériaux fins, elles ont normalement une conductivité hydraulique inférieure aux milieux poreux environnants, En fait, on s'attend à ce qu'elles concentrent l'effet du colmatage sur elles-

mêmes. Dans la mesure où le colmatage se simule en réduisant de manière importante la conductivité hydraulique, les scénarios précédents sur le colmatage du milieu poreux sont aussi applicables à l'utilisation de membranes géosynthétiques sous réserve de leur position d'installation. Ainsi, une membrane géosynthétique peut être installée près ou directement en contact avec les conduites, prévenant la pénétration des fines dans les conduites ou l'obstruction des perforations. Elle peut aussi être installée plus haut dans la tranchée, vraisemblablement sous l'horizon de l'activité sédimentaire naturelle (printanière ou liée aux processus glaciels), protégeant ainsi le matériau sous-jacent de l'infiltration des particules fines et de l'activité érosive et des forces tractrices de l'écoulement. Évidemment, les membranes géosynthétiques sont elles-mêmes sujettes au processus de colmatage, tout comme le milieu poreux ambiant, et un processus de décolmatage par courant inversé, voire même de remplacement périodique, pourraient être requis.

- ***Utilisation de matériel filtrant à haute perméabilité***: À l'opposé de l'hypothèse de colmatage d'un mince couche superficielle de l'aquifère au sommet de la tranchée, on peut aussi considérer celle d'une conductivité hydraulique accrue reliée à la présence de matériaux plus grossiers et moins consolidés que ceux de l'aquifère sous-jacent. Ce scénario est représenté par une valeur très élevée de conductivité hydraulique ($K_{filtre\ grossier}$ = 1 x 10^{-3} m/s) dans le premier mètre d'alluvion (voir la Figure 9c). Une hypothèse analogue serait, comme option de design, de remblayer la tranchée avec un matériel naturel ou trié spécialement pour offrir les propriétés de conductivité hydraulique correspondant à la valeur mentionnée, auquel cas toute la zone de remblai se verrait attribuer cette valeur.

- ***Configuration spatiale des conduites*** : parmi les options de conception, il faut aussi considérer la configuration spatiale du réseau de conduite dans le plan du lit mineur. En considérant les restrictions d'ordre environnemental mentionnées au début du rapport concernant la longueur et la superficie du dispositif, il est vraisemblable que le système comportera plus d'une conduite. Le cas échéant, l'espacement entre celles-ci est le paramètre d'intérêt. Afin de minimiser les interactions entre les conduites, plus précisément entre leur cône de captation respectif, il y a intérêt de les installer le plus loin possible l'une de l'autre, jusqu'à un optimum qui permet de considérer les zones de captage comme quasi-indépendantes les unes des autres.

- ***Captage gravitationnel ou sous tension*** : Le dernière option de conception considérée concerne le mode de soutirage dans la conduite qui peut être naturel (gravitationnel) ou assisté par l'entremise d'une mise sous tension (pompage). Le cas de base et tous les autres cas mentionnés dans les paragraphes précédents ont été traités avec une condition aux limites de pression atmosphérique au périmètre de la conduite. Le système peut aussi être opéré sous tension, auquel cas un pompage imposé sous la forme d'une pression négative en guise de condition aux limites est imposé au modèle. Une valeur de -1 atmosphère (environ -10 m de pression hydraulique) correspondant à la limite physique pour un système de pompage non submersible a donc été imposé pour vérifier l'efficacité de cette option

6. Résultats des simulations

Nous allons examiner ici les résultats de simulation avec SEEP2D des divers scénarios mentionnés, selon la logique de regroupement donnée au chapitre précédent et en posant l'hypothèse d'une installation avewc 250 m de conduites.

6.1 Cas de base

Le cas de base a été réalisé avec les paramètres suivants (Figure 8) : $K_{sable}=2x10^{-4}$m/s, $K_{gravier}=7x10^{-4}$m/s, $K_{filtre}=7x10^{-4}$m/s, recharge = 300 mm/an, niveau hydrostatique de la rivière = 154.3 m ; le drainage est gravitationnel vers une conduite de 30 cm de diamètre placée à 2 m sous le niveau moyen du lit mineur de la rivière. Les charges hydrauliques simulées en régime permanent sont illustrés sur la Figure 10. Rappelons que les lignes de courant suivent une trajectoire perpendiculaire aux lignes équipotentielles montrées. Seul cet exemple est illustré. À prime abord, le régime d'écoulement est particulièrement concentré immédiatement autour de la conduite avec un apport préférentiel en provenance quasi-directe de la section du modèle situé à la verticale de celle-ci. Le cas de base serait en mesure de produire un débit total journalier de 85800 m^3/j, valeur qui dépasse nettement le seuil critique de conception fixé à 70000 m^3/j.

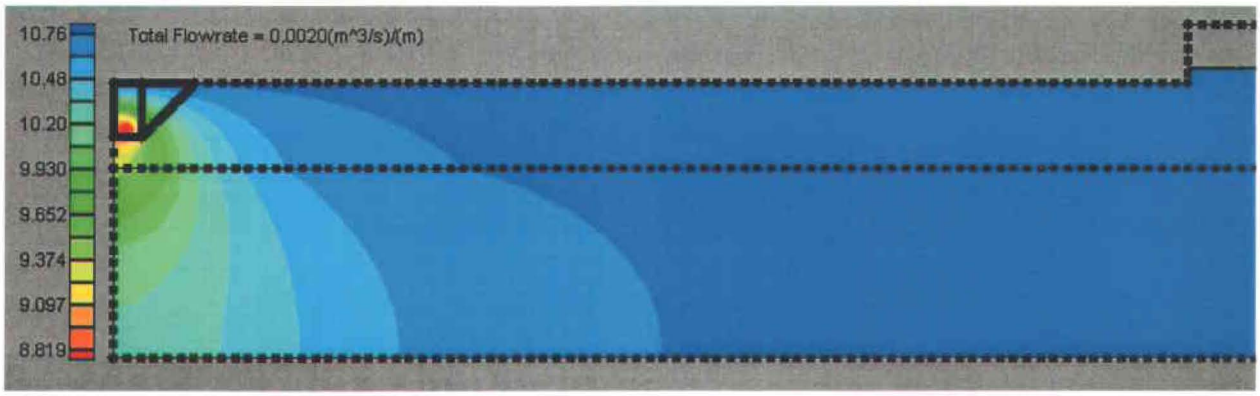

Figure 10 : Résultats de la simulation « cas de base » - Charges hydrauliques (équipotentielles)

6.2 Propriétés du milieu poreux

Les propriétés des différentes couches du milieu poreux (conductivité hydraulique) ont une influence certaine sur le comportement de l'écoulement dans l'aquifère. Quand un facteur de réduction de 5 est appliqué aux valeurs de conductivité, une réduction équivalente dans le débit capté est obtenue ce qui confirme la linéarité du modèle par rapport au paramètre testé. Dans les deux scénarios traités, la cible de 70000 m^3/j n'est pas atteinte et aucun facteur de conception relié à la configuration de conduite n'est capable de rétablir un débit satisfaisant ce critère de 70000 m^3/j, voire même, la cible de base recherchée de 35000 m^3/j. L'option de pompage

permettrait d'atteindre 50000 m^3/j pour le scénario « inférieur », ce qui situe le résultat dans la marge de sécurité

6.3 Conditions d'étiage extrême

La sensibilité du système de captage aux conditions de recharge de l'aquifère et aux niveaux d'eau dans la rivière apparaît beaucoup plus faible que pour la conductivité hydraulique. En réduisant le niveau d'eau à la cote 154 m correspondant à un étiage estival très sévère (donnée tirée de Leclerc et coll., 1998) et en éliminant toute recharge en provenance de l'infiltration des précipitations sur la partie terrestre du modèle, la recharge directe à partir de l'écoulement superficiel supporte encore très bien la fonction de captage du dispositif installé si bien que dans ce cas, une réduction de seulement 14% du débit capté peut être observée dans les résultats de simulation. Dans de telles conditions extrêmes, (le débit de la Montmorency atteignant à peine 4 m^3/s ou 345600 m^3/j), le prélèvement nominal de 35000 m^3/j ne dépasse pas 10% du débit total de la rivière en supposant que toute l'eau est en provenance de cette source et que la nappe phréatique régionale ne contribue pas du tout au captage.

6.4 Colmatage du matériel filtrant

Comme il a été mentionné, dans les scénarios de colmatage, le paramètre de conductivité hydraulique d'une partie de la tranchée est modifié, et dans ce cas, il faut s'attendre à ce que la réponse du système soit très sensible à ce changement. En gardant constante la configuration d'installation des conduites déjà décrite, le colmatage a été simulé en réduisant la conductivité hydraulique tel que décrit à la Figure 9 (b et c) . Dans le deux cas, le débit capté tombe dramatiquement en bas des deux valeurs cible servant à qualifier les scénarios, soit le 70000 m^3/j sécuritaire et le 35000 m^3/j qui est le débit de conception en temps normal. Cet impact majeur du changement de conductivité, malgré le fait que celle-ci ne constitue qu'une petite portion du domaine de simulation, et que le reste du domaine conserve ses propriétés de conductivité hydraulique, confirme nos interprétations antérieures du régime d'écoulement qui se trouve très concentré à la verticale de la conduite. En conséquence, la valeur générale de la conductivité hydraulique dans le lit mineur de la rivière ne ressort pas comme un paramètre de conception vraiment significatif par rapport à celle du matériau présent dans la tranchée.

6.5 Matériel filtrant à haute perméabilité

L'hypothèse de l'utilisation d'un matériau poreux plus grossier et plus perméable sur une épaisseur de 1 m (conductivité de 1×10^{-3} m/s) tel qu'illustré à la Figure 9c conduit à une augmentation du débit capté atteignant 95150 m^3/j comparé au 85800 m^3/j du cas de base. Assigner une conductivité de 1×10^{-3} m/s à l'ensemble de la tranchée accroît le rendement jusqu'à 111750 m^3/j, ce qui confirme, si besoin est, l'importance cruciale de ce paramètre de conception du système.

Comme il a déjà été suggéré, le matériel filtrant utilisé pour recouvrir les conduites et remblayer la tranchée pourrait être le matériau excavé au même endroit, soit un mélange de sable et gravier

formant le lit de la rivière et la couche superficielle de l'aquifère sous-fluvial. Il pourrait tout aussi bien être formé d'un mélange spécialement conçu pour répondre aux exigences de la conception, auquel cas, les propriétés suivantes seraient recherchées : une conductivité hydraulique élevée, résistance au colmatage, pouvoir filtrant amélioré pour la qualité de l'eau ainsi que la résistance à l'érosion superficielle.

6.6 Configuration du système de captage

Les principales caractéristiques de configuration du système de conduite sont la profondeur d'installation dans le lit (simulations réalisées de 2 m à 4.5 m par incrément de 0.5 m) et le diamètre de conduite (30, 45 et 60 cm). Les tests ont révélé une augmentation graduelle du débit capté en relation avec l'accroissement des valeurs, et ce dans les deux cas (Figure 11). Dans le premier cas, l'explication vient d'une plus grande charge hydraulique appliquée sur les conduites; dans l'autre cas, c'est la surface de captage qui se trouve augmentée. Si ces paramètres ont un effet favorable sur le débit de captage, il en résulte aussi une augmentation du coût d'installation qui devra être balancée par rapport au gain d'efficacité. Cette optimisation économique ne fait pas partie de notre mandat. Cependant, il faut mentionner que l'installation des conduites plus profondément dans le lit de la rivière peut rendre plus difficile l'entretien de la conduite lors des opérations de lavage par courant inversé, en plus d'exiger des coûts d'excavation plus élevés (assèchement temporaire de la tranchée), sans compter les coûts éventuels de réparation le cas échéant. Par contre, le degré de protection par rapport à l'érosion du lit ou à l'action glacielle est mieux assurée avec une installation plus profonde, quoiqu'une profondeur de 2 m semble déjà assez sécuritaire.

L'influence de l'espacement des conduites, si plus d'une devaient être mobilisées, est un autre paramètre de configuration à examiner attentivement. Les simulations réalisées ont considéré un espacement entre deux conduites allant de 1 m à 10 m en incréments variables comme le montre la Figure 11. Les résultats démontrent que l'efficacité de captage augmente graduellement avec l'espacement pour plafonner graduellement à une valeur de 7-8 m, ce qui nous indique que au-delà de cette valeur, les cônes de captage de chacune des conduites deviennent quasi-indépendants (ne se chevauchent presque plus). Il est aussi à noter que le débit capté avec un espacement supérieur à 7-8 m est plus du double que celui capté avec la configuration à une seule conduite du cas de base (environ 194000 m^3/j comparé à 85800 m^3/j). La raison pour ce résultat paradoxal est que la première conduite (sur deux) est placée très près de la limite de symétrie (condition aux limites d'imperméabilité située à moins de 1 m de la conduite) de sorte que cette conduite n'atteint pas son plein potentiel de captage. Si 8 m comme distance de séparation (résultat optimal) entre deux conduites est utilisé, alors la simulation idéale devrait distancer la première conduite de 4 m de l'axe de symétrie (ce qui n'a pas été fait).

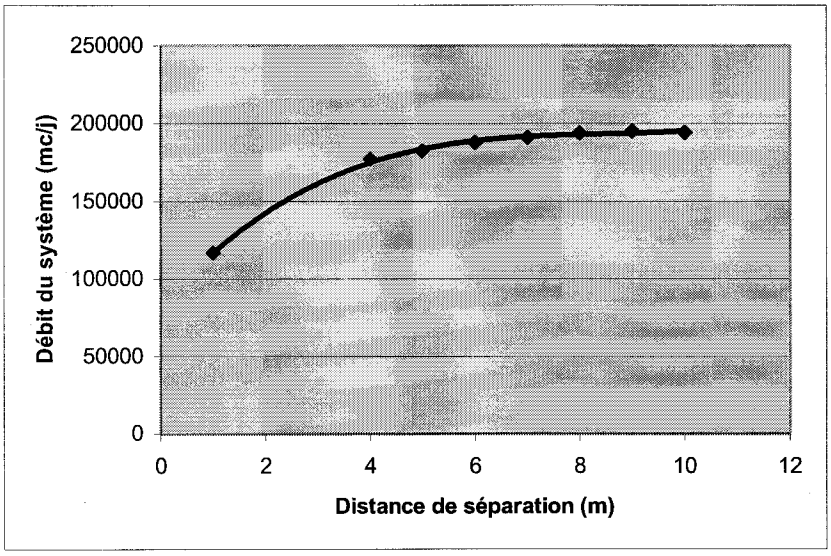

Figure 11 : Influence de l'espacement des conduites sur l'efficacité du captage

6.7 Captage gravitationnelle et par pompage

En comparaison avec le cas de base où la conduite est maintenue à pression atmosphérique, l'introduction d'une option pompage (à –1 atmosphère) accroît le débit de captage de 47%. Ici encore, un problème d'optimisation des coûts survient, puisque cette option est certainement accompagnée d'une plomberie plus coûteuse que le cas « gravitaire ». Considérant que le cas de base et plusieurs configurations d'installation permettraient déjà de satisfaire à la demande, l'option de pompage ne paraît pas absolument requise.

7. Analyse d'une conception révisée

Suite aux résultats des simulations du cas de base et de l'analyse paramétrique, une conception révisée des infrastructures de captage linéaire sous-fluvial a été réalisée par la firme Génécor Civil Inc. qui a demandé à l'INRS-ETE de l'analyser. Les paramètres de conception des infrastructures et leur localisation sont montrés à la Figure 12 et à la Figure 13 respectivement. Cette conception prévoit que la tranchée de captage sera localisée dans le lit de la rivière Montmorency à 5 m de la rive sud et que sa profondeur sera de 2.5 m. Quatre (4) conduites de 450 mm de diamètre sont envisagées pour réaliser le captage. L'espacement entre les conduites placées dans la tranchée est fixé à 4 m. Les paramètres du nouveau design sont donnés au Tableau 2.

Tableau 2 : Nouvelle conception des infrastructures de captage linéaire sous-fluvial

Paramètre	Valeur
Nombre de conduites	4
Diamètre des conduites	0.45 m
Espacement centre à centre des conduites	4.00 m
Profondeur du radier des conduites	2.25 m
Profondeur de la tranchée	2.50 m
Espacement conduite-tranchée	0.60 m
Pente des parois de la tranchée	1/1
Distance rive-tranchée	5.00 m
Largeur de la tranchée à l'interface rivière-aquifère	18.65 m
Largeur de la tranchée à 2.5 m de profondeur de la base de la rivière	13.65 m

7.1 Modèle numérique d'écoulement

Selon cette conception, un second modèle été créé afin de simuler les conditions d'écoulement dans le lit de la rivière en présence des infrastructures de captage. La Figure 14 illustre le modèle d'écoulement, le schéma de conditions limites appliquées et les propriétés des matériaux. À la différence du premier modèle d'écoulement (Voir la Figure 5, page 10), ce second modèle tient compte de toute la largeur du lit de la rivière Montmorency et des rives sud et nord. Cette prise en compte d'un domaine élargi est nécessaire car le concept révisé n'implique plus des conditions de symétrie de chaque côté du captage, lequel n'est plus centré dans la rivière. En effet, la tranchée est plutôt localisée du côté sud du lit de la rivière. Le domaine modélisé a été divisé en deux parties, à $x = 26.375$ m, afin de faciliter la convergence des simulations.

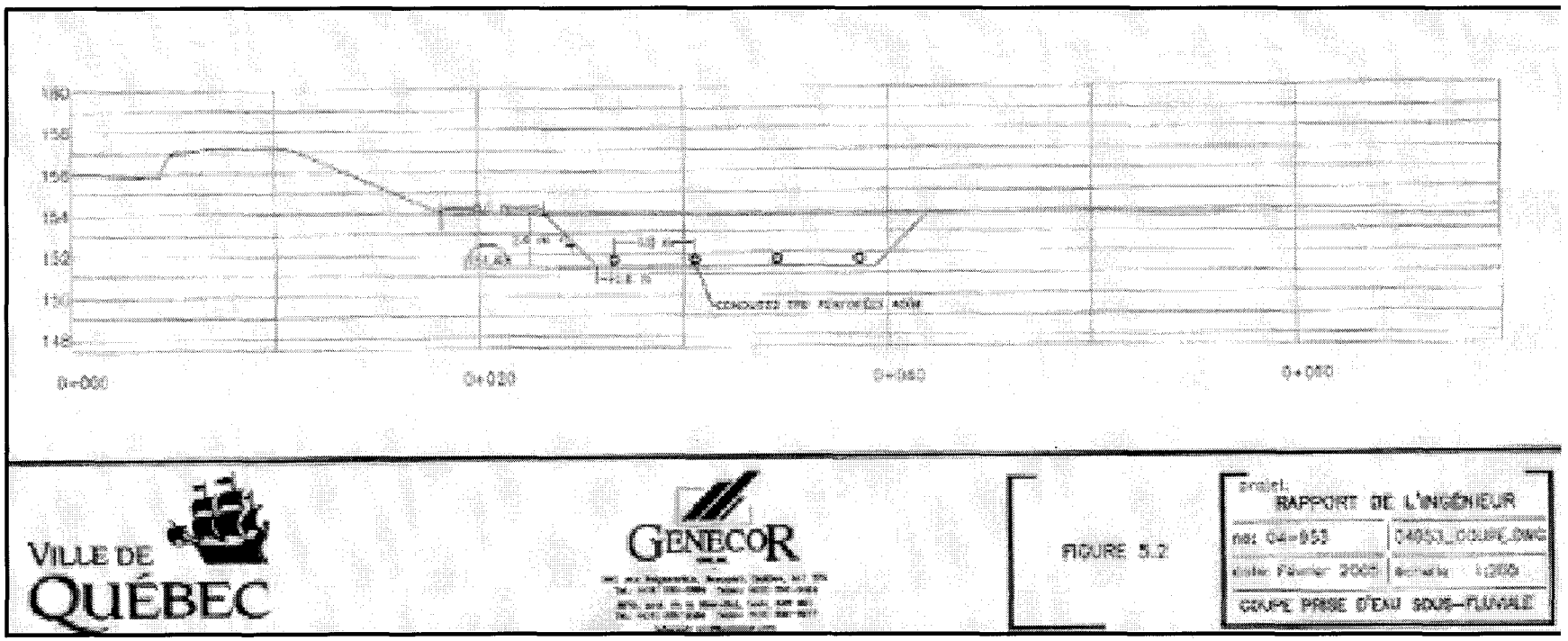

Figure 12 : Conception révisée des infrastructures de captage

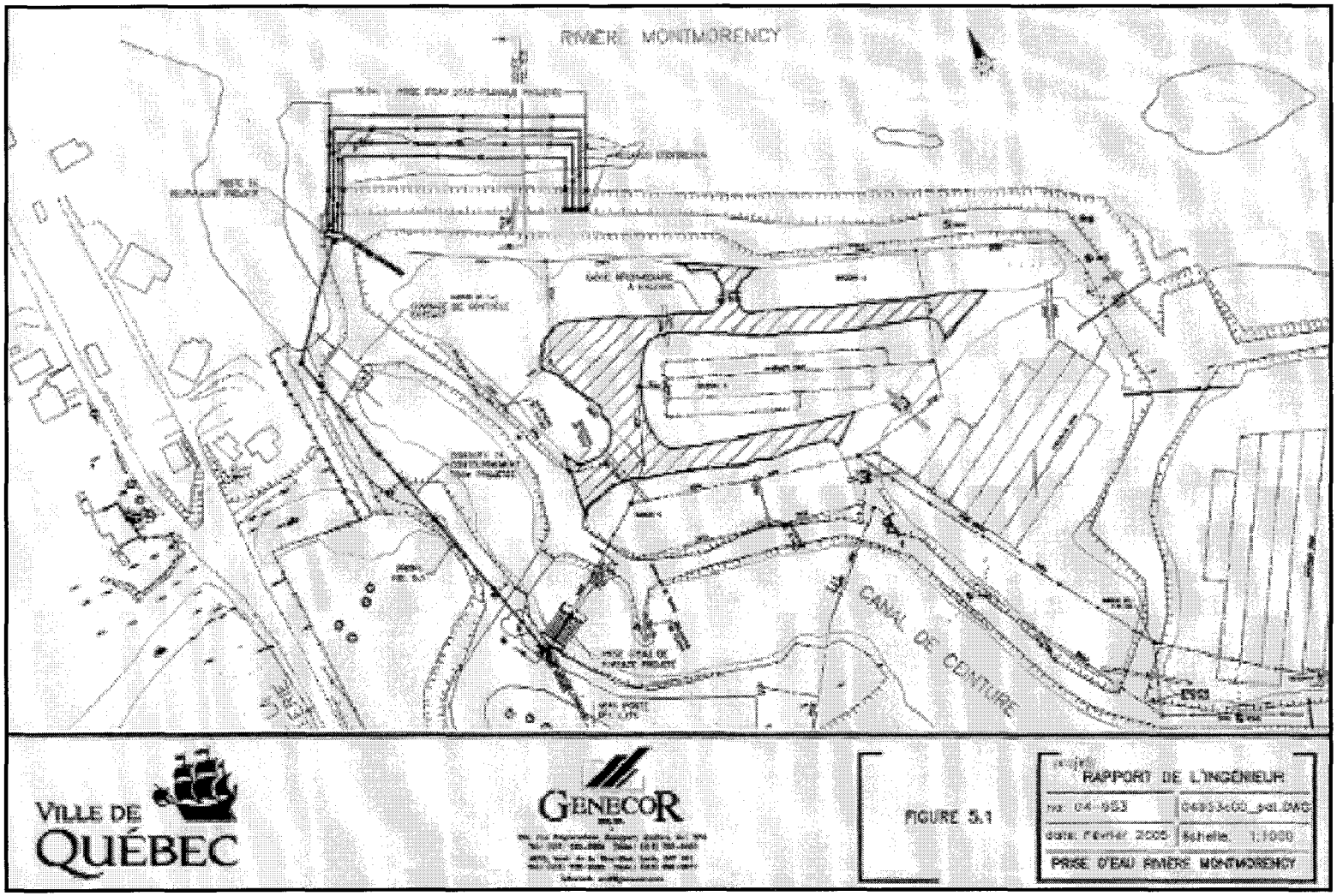

Figure 13 : Localisation de la conception révisée

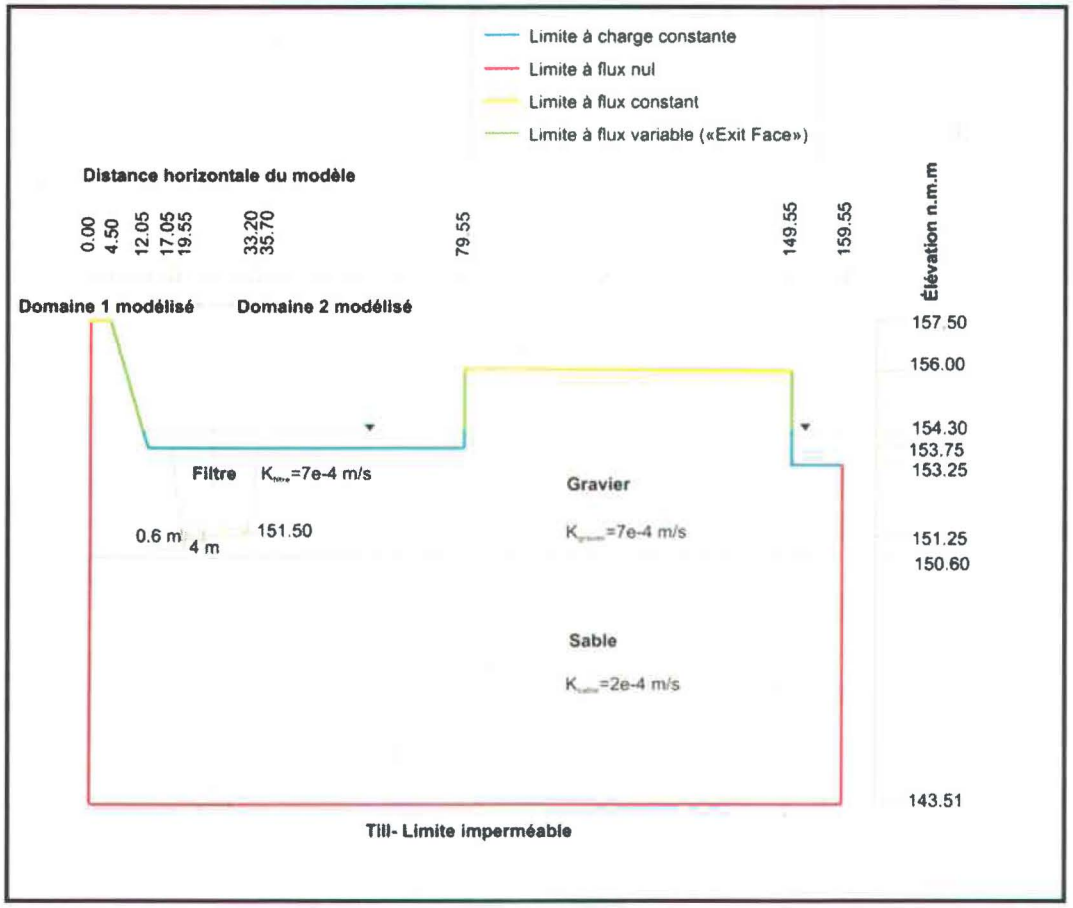

Figure 14 : Modèle d'écoulement de la conception révisée

Deux modèles numériques sont donc exécutés pour représenter chaque cas simulé. Comme pour la première phase de l'étude, le maillage des modèles en éléments finis a été créé dans le logiciel GMS 4.0 et les simulations ont été réalisées dans le modèle SEEP2D (module de GMS 4.0) en conditions saturées.

7.2 Résultats des simulations

Les résultats des simulations réalisées sur les deux domaines modélisés indiquent un débit total spécifique de captage de 1.07×10^{-2} $m^3/s/m$ (5.4×10^{-3} $m^3/s/m$ pour chaque domaine) pour quatre conduites. Ces résultats sont illustrés à la Figure 15 et à la Figure 16 qui présentent respectivement le domaine sud et le domaine nord. Dans le cadre de cette étude, l'objectif de captage est de 70000 m^3/j. Pour atteindre cet objectif, la longueur de la conduite perforée doit être supérieure à 75 m.

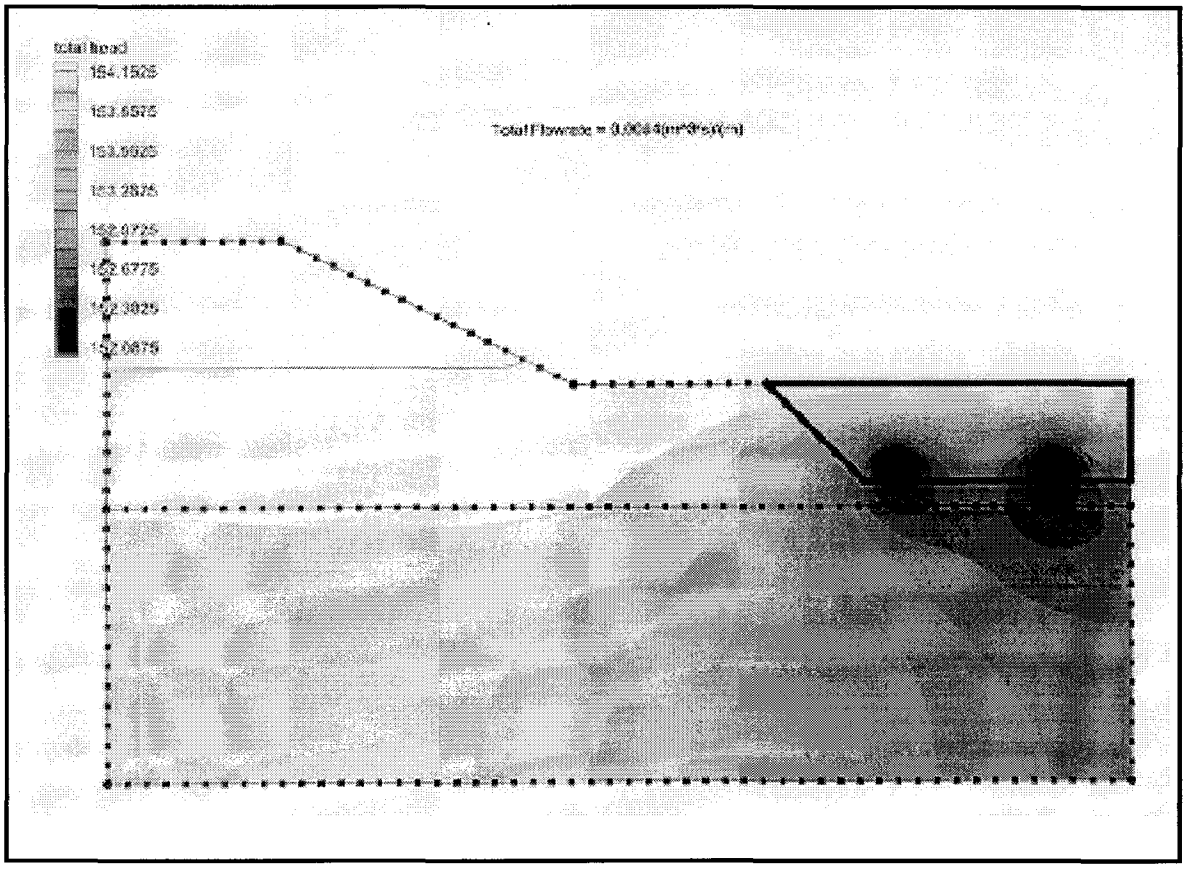

Figure 15 : Charges hydrauliques du domaine sud simulé

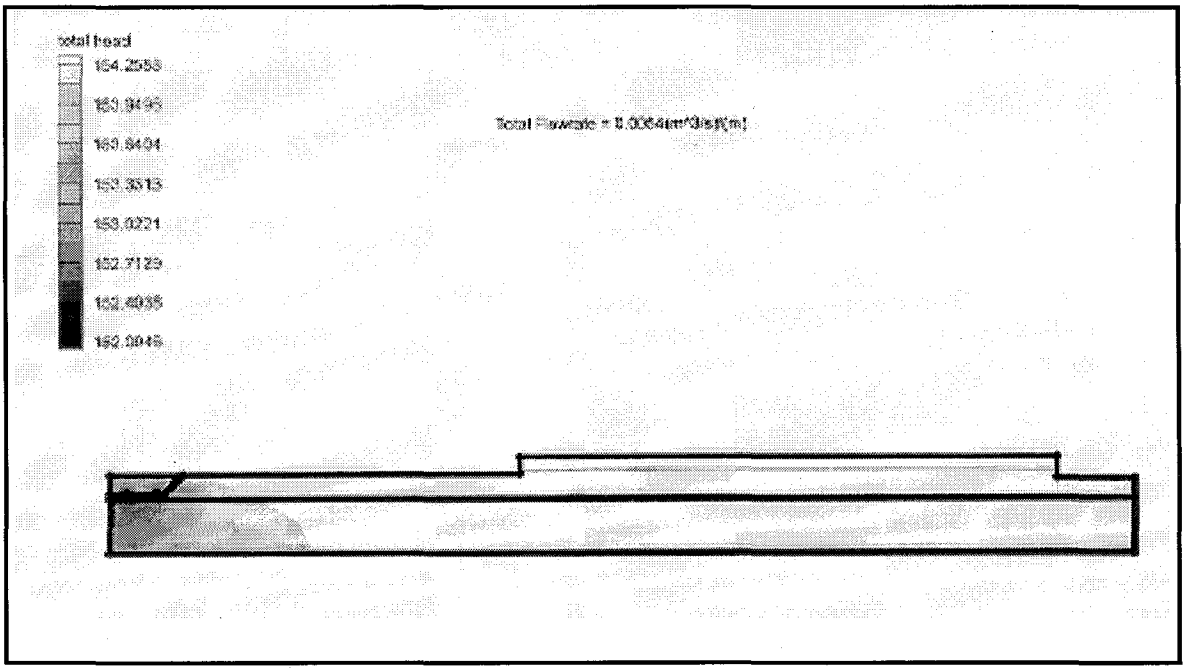

Figure 16 : Charges hydrauliques du domaine nord simulé

7.3 Pertes de charge dans les conduites

Les analyses réalisées ici n'ont pas considéré les pertes de charge dans les conduites. Cependant, les travaux de Birch *et al.* (2004) portant sur la prédiction des débits produits par un système linéaire de captation sous-fluvial ont été consultés car ces auteurs avaient considéré les pertes de charge dans leurs analyses.

L'objectif principal de l'étude de Birch *et al.* (2004) était d'estimer les débits produits par un puits horizontal localisé dans les sédiments sableux et graveleux du lit d'une rivière et d'évaluer l'influence des différents paramètres de conception sur le rendement. Cette estimation a été réalisée à partir d'un modèle d'écoulement numérique utilisant les éléments finis, et les résultats ont été validés par un essai pilote conduit simultanément. Le système linéaire de captage est constitué d'une seule conduite localisée au centre du lit de la rivière. Le lit possède une couche saturée profonde de 10 m et le niveau d'eau de la rivière est de 2 m au-dessus du lit. Les matériaux sableux à graveleux utilisés dans l'essai pilote et simulés dans le modèle possèdent une conductivité hydraulique variant de 10^{-6} à 10^{-3} m/s.

Les résultats des simulations de Birch *et al.* (2004) ont démontré que, pour un aquifère dont la conductivité hydraulique est de 10^{-3} m/s, la conception de la conduite de captage influe grandement sur le rendement du système. Le graphique de la Figure 17 illustre les rendements obtenus par des conduites de 100, 200 et 300 mm de diamètre et de 50, 100, 175, 250 et 500 m de longueur. La profondeur de la conduite simulée est de 5 m. Cette figure démontre que, plus le diamètre de la conduite est important, moins le rendement par unité de longueur de la crépine est restreint par la perte de charge à l'intérieur de celle-ci, ce qui est logique (vitesses réduites).

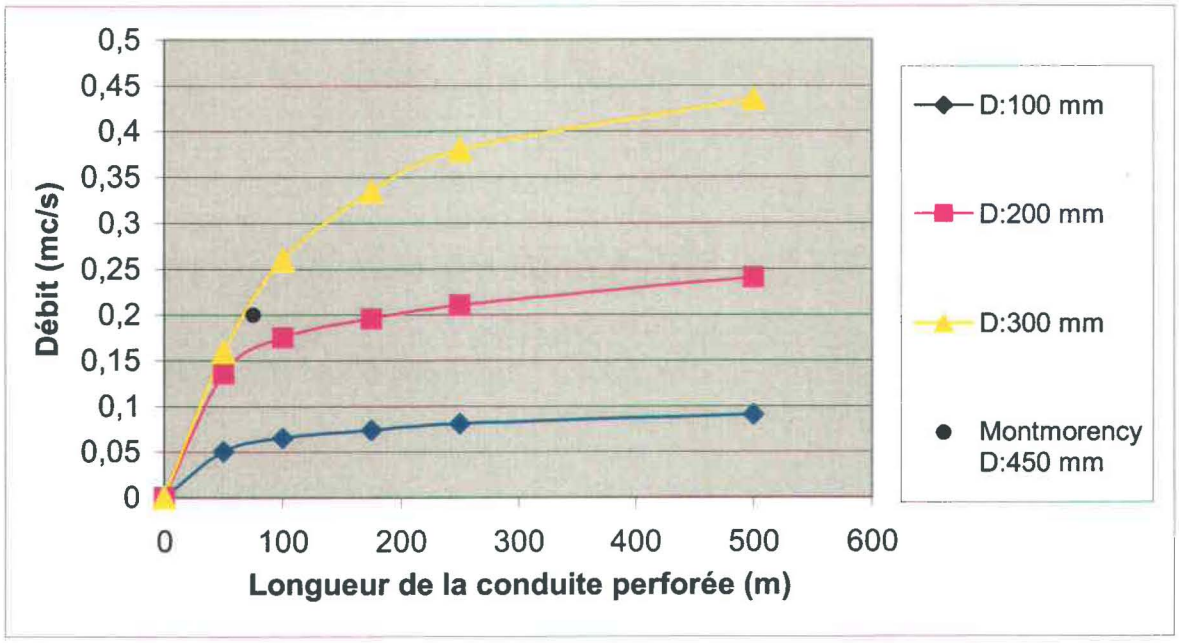

Figure 17 : Débit de captage en fonction de la longueur de la conduite - Conductivité hydraulique de l'aquifère : 10-3 m/s - Diamètre de la conduite : 100, 200 et 300 mm (Birch *et al.*, 2004)

Les résultats des simulations réalisées sur la conception révisée des infrastructures de captage linéaire dans la Montmorency, lesquelles utilisent un diamètre de conduite de 450 mm, indiquent un débit spécifique par conduite de 2.675×10^{-3} $m^3/s/m$ (1.07×10^{-2} pour 4 conduites). Pour une longueur de conduite perforée de 75 m, le débit de captage pour une conduite est évalué à 0.2 m^3/s. En se référant à la Figure 17, ce design révisé devrait se situer dans la partie où le rendement du système de captage est croissant linéairement, c'est-à-dire où les pertes de charge sont négligeables. Les conditions simulées pour la rivière Montmorency ne devraient donc pas impliquer de pertes de charge significatives dans les conduites.

7.4 Comparaison avec d'autres cas de la littérature

D'autres analyses numériques de système de captage linéaire sous-fluvial sont rapportées dans Birch *et al.* (2004). Les débits spécifiques de captage (1 conduite) déterminés par ces analyses sont présentés au Tableau 3. Pour fins de comparaison, le débit spécifique de captage pour la conception révisée de la présente étude, soit 2.675×10^{-3} $m^3/s/m$, est également rapporté. Ce débit spécifique est comparable à ceux cités dans la bibliographie.

Tableau 3 : Résultats de la conception révisée comparés à des études de cas rapportées dans la bibliographie réalisée par Birch *et al.* (2004)

Source	Puits			Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s)	Débits de captage spécifique ($m^3/s/m$)
	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Profondeur (m)		
Ray et *al.*, 2002	41 à 72	200 à 300	15 à 25	N/A	1.1 à 1.8×10^{-3}
Karanth, 1997	76 à 762	310 à 1000	6	5×10^{-5} à 8×10^{-3}	1.2 à 1.1×10^{-3}
Mikels, 1992	6 à 21	N/A	6	1.3×10^{-3} à 3.1×10^{-3}	1.4 à 1.9×10^{-3}
Obst, 1974	36	200	N/A	1.4×10^{-3}	4.5×10^{-4}
Birch *et al.* , 2004	50 à 100	200 à 300	5	1×10^{-4} à 1×10^{-3}	2.8×10^{-4} à 3.1×10^{-3}
Montmorency (2005)	Valeurs diverses	450	2.5	7×10^{-4}	2.6×10^{-3}

8. Conclusions et recommandations

À l'aide d'un modèle bidimensionnel de simulation par éléments finis (SEEP2D) des écoulements souterrains, cette étude a permis d'analyser l'efficacité potentielle d'un éventuel système de captage horizontal de l'aquifère sous-fluvial sous diverses conditions naturelles et de conception dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency.

La réponse du modèle s'est révélée très sensible au paramètre de conductivité hydraulique, influence principalement localisée dans une zone située à la verticale des conduites, plus particulièrement dans la tranchée qui devrait accueillir les conduites. Du point de vue opérationnel à ce stade, cette observation s'avère très positive car elle rend le besoin de caractérisation de l'aquifère sous-fluvial non essentiel. Par contre, elle redirige le besoin de caractérisation vers le matériau de remblai de la tranchée (si celui est le même que le déblai), ou le cas échéant, vers une conception de matériau répondant à certains critères additionnels comme une conductivité hydraulique suffisante, son pouvoir filtrant et sa capacité de résistance au colmatage ou aux efforts d'érosion par l'écoulement superficiel ou le transport de glace.

Ainsi, toute intervention ou considération de conception concernant le colmatage, le lavage par courant inversé (*backwashing*), le pouvoir filtrant ou l'utilisation de membranes géosynthétiques peut se limiter à une zone très limitée située à l'aplomb des conduites (tranchée). Considérant l'importance cruciale de la conductivité hydraulique dans cette zone, une réduction significative de ce paramètre due au colmatage pourrait avoir des conséquences négatives très significatives sur le captage et il nous apparaît que la mise en place d'un dispositif de lavage par courant inversé est essentielle. Les processus de colmatage possibles dans un tel système, quelle qu'en soit la nature, microbiologique ou simplement mécanique, sous l'influence d'un pompage ou d'un drainage gravitaire devront donc, le cas échéant, être étudié et éventuellement surveillés dans le temps afin d'être mieux compris et contrôlés.

Une autre implication positive du captage relativement localisé à l'aplomb des conduites est que le débit de captage peut aisément être majoré en ajoutant des conduites parallèles dans le dispositif à condition de respecter un espacement minimal (typiquement 7-8 m) permettant d'exploiter l'indépendance des cônes de captage. Ainsi, deux conduites de 30 cm de diamètre en mode gravitaire placées à 2 m de profondeur dans le lit de la rivière permettent de doubler à toutes fins pratiques le rendement d'une seule.

Parmi les autres facteurs de conception susceptible d'influencer l'efficacité du système projeté, mais à un degré moindre que les précédents, il y a la profondeur d'installation des conduites, leur diamètre et le pompage. Considérant que le cas de base analysé ou sa variante à deux conduites répondent déjà au critère d'efficacité sécuritaire de 70000 m^3/j, soit le double de la capacité requise en temps normal, il ne nous apparaît plus judicieux de considérer ces paramètres sur la base d'une optimisation du rapport coûts/bénéfice que sur le seul objectif d'atteindre un seuil d'efficacité. Par ailleurs, un système de pompage pourrait être planifié pour installation future ne serait-ce que pour se munir d'une marge de sécurité additionnelle en cas d'urgence ou de comportement imprévu à ce stade, ou encore afin de maintenir le système à pression atmosphérique.

Suite à l'analyse paramétrique des éléments de conception du système de captage, GENECOR Civil Inc. a proposé une conception révisée et a demandé à l'INRS-ETE d'analyser numériquement la performance de celui-ci. Les résultats des simulations indiquent que la conception suggérée de la prise d'eau linéaire sous-fluviale permettrait d'obtenir un débit de 70000 m^3/d en considérant les pertes de charge dans les conduites.

L'analyse des données hydrogéologiques obtenues de plusieurs forages, d'essais de perméabilité et d'un essai de pompage a révélé une certaine variabilité dans les valeurs de conductivité hydraulique des sables et graviers de l'aquifère. Cette variabilité peut être attribuée aux différentes techniques de mesure utilisées, à la qualité même des mesures et d'autres facteurs. De nouveaux essais de perméabilité avec un développement approprié devraient être réalisés, particulièrement dans les récents forages conduits par le L.E.Q qui sont situés près du site envisagé pour l'implantation des infrastructures de captage, pour confirmer les valeurs de conductivité hydraulique des matériaux. Également, cette variabilité peut être due à l'hétérogénéité des dépôts de sables et graviers dans l'aquifère qui a été observée latéralement dans les forages réalisés par le L.E.Q. Il serait utile de mieux caractériser cette hétérogénéité.

9. Études futures

La présente étude a été conduite sur une période relativement courte (3 mois) et concerne un sujet dont les dimensions scientifiques et technologiques sont innovatrices et ne sont pas encore pleinement maîtrisées, notamment, la réponse d'un aquifère sous-fluvial à un captage horizontal, les paramètres de conception d'un tel système de captage, les interactions aquifère-rivière notamment pour les processus de colmatage possibles, les techniques pour y remédier ainsi que les aspects reliés à la qualité de l'eau.

Afin de répondre à ces diverses interrogations, nous recommandons de poursuivre les travaux visant à éclaircir les divers sujets de recherche/développement (R/D) soulevés, et qui pourraient éventuellement être conduites en partenariat avec les intervenants du présent projet et la Ville de Québec.

Bibliographie

Birch, S., R. Donahue, K. W. Biggar et D. C. Sego (2004). Prediction of flow rates for potable water supply from directionally drilled horizontal wells in river sediments. Dans: *GéoQuébec 2004: 57th Canadian Geotechnical Conference / 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference*, CD-ROM, Canadian Geotechnical Society.

Compagnie Internationale de Conseillers en Hydrogéologie (Québec) (1982). Ville de Beauport – Étude hydrogéologique. Dossier 5-1-01-0270-20. p.v.

Kawecki, M. W. (2000). Transient flow to a horizontal water well. *Ground Water*, 38(6), 842-850.

Leclerc, M., Doyon, B., Y. Secretan, M. Heniche, M. Lapointe et P. Boudreau (1998). Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets. Pour le compte de la ville de Beauport. Rapport scientifique INRS-Eau #R522, 120 pages.

Leclerc, M., B. Morse, S. Bélanger et P. Boudreau (2004). Mise aux normes de l'eau potable — Analyse des conditions d'implantation d'une prise d'eau dans le secteur des Îlets de la rivière Montmorency. *Rapport de recherche* INRS-ETE #R-692. Mars, 55 pages.

L.E.Q. Carrier , L. Raymond, J. (2004). Étude géotechnique : Alimentation en eau de Beauport-Lot 2, Québec, Arrondissement n°5. Pour le compte de la ville de Québec. Rapport Dossier : 4000-99. Octobre, 37 pages.

L.M.Q. Leblanc, A. (2004). Mise aux normes de la prise d'eau de la station de Beauport, Beauport, Québec : Étude géotechnique. Pour le compte de la ville de Québec. Rapport N/Dossier : 74-3148-101. Janvier, 27 pages.

Woessner, W.W. (2000). Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought. Article dans Ground Water Vol.38, No. 3. Mai-Juin pages 423-429.