



**HYDROGÉOLOGIE
ENVIRONNEMENT**

MUNICIPALITÉ DE L'ISLE-VERTE

Rapport hydrogéologique

Détermination des aires de protection par modélisation numérique et mise à jour de l'indice DRASTIC sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits P-1

projet n°
18-6706-4327

présenté par
LAFORST NOVA AQUA INC.
1470, rue Esther-Blondin, bureau 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
www.LNAqua.com

date :
18 octobre 2019

MUNICIPALITÉ DE L'ISLE-VERTE

Rapport hydrogéologique

Détermination des aires de protection par modélisation numérique et mise à jour de l'indice DRASTIC sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits P-1

soumis à :

Monsieur Guy Bérubé
Directeur général et secrétaire-trésorier
Municipalité de L'Isle-Verte
141, rue Saint-Jean-Baptiste
L'Isle-Verte (Québec) G0L 1K0

projet n° :

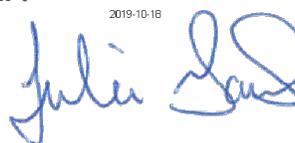
18-6706-4327

Préparé sous direction et
supervision immédiate par :



Karl Lechat, Ph. D.

Vérifié par :

2019-10-18


Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., géo., hydrogéologue
N° OIQ : 129489 | N° OGQ : 2078

LAFORST NOVA AQUA INC.

1470, rue Esther-Blondin, bureau 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
Téléphone : 450 657-7999 | 1 877 657-7999
Télécopieur : 418 657-5999
www.LNAqua.com

date :

18 octobre 2019

Confidentialité et utilisation du rapport

Le présent rapport a été préparé à la demande du ou des clients mentionnés à la page couverture, dans le contexte déterminé par les termes spécifiques du mandat accordé à Laforest Nova Aqua inc. et selon l'entente intervenue entre les deux parties. Aucune copie en tout ou en partie de ce rapport ne peut être divulguée par un tiers sans le consentement explicite de Laforest Nova Aqua inc. Le ou les clients conviennent et s'engagent à obtenir l'autorisation écrite et préalable de Laforest Nova Aqua inc. avant de transmettre ce rapport à un tiers. À défaut, le ou les clients s'engagent à tenir indemnes Laforest Nova Aqua inc. de tout dommage pouvant résulter d'une divulgation du rapport à un tiers.

Toute opinion concernant l'application ou la conformité aux lois et règlements apparaissant dans ce rapport est exprimée sous toute réserve et ne doit, en aucun temps, être considérée comme un avis juridique ou se substituer à un tel avis.

Liste de distribution

Client

Monsieur Guy Bérubé
Directeur général
Municipalité de L'Isle-Verte

- 1 version PDF
- 2 versions papier

Coordonnées

141, rue Saint-Jean-Baptiste
L'Isle-Verte (Québec) G0L 1K0
guyberube@isle-verte.ca

Copie conforme

Monsieur Stéphane Vachon, ing.
Directeur de secteur, Traitement des eaux
Stantec

- 1 version PDF
- 1 version papier

Coordonnées

8476, boulevard Lacroix
Saint-Georges (Québec) G5Y 2B5
stephane.vachon@stantec.com

Équipe de projet

Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., géo., hydrogéologue	Direction de projet et révision du rapport
Karl Lechat, Ph. D.	Chargé de projet, modélisation numérique et production du rapport
U'ilani Arai, M. Sc.	Rédaction du rapport
Martin Gascon, dessinateur	Production des figures
Karine Bertrand, adjointe administrative	Édition

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. SYNTHÈSE DES DONNÉES ET ÉLABORATION DU MODÈLE CONCEPTUEL	2
2.1. Localisation du site	2
2.2. Contexte géologique	2
2.3. Zone d'étude et réseau hydrographique	2
2.4. Topographie	3
2.5. Inventaire des forages présents dans le secteur à l'étude	3
2.6. Piézométrie	4
2.7. Détermination de l'élévation du roc	5
2.8. Détermination de l'élévation des autres couches.....	5
2.9. Paramètres hydrogéologiques	6
2.10. Recharge	6
2.11. Modèle conceptuel.....	7
3. ÉLABORATION ET RÉSULTATS DU MODÈLE NUMÉRIQUE	8
3.1. Conditions aux limites	8
3.2. Calibration en régimes permanent et transitoire.....	8
3.3. Simulations prédictives et aires de protection.....	11
3.4. Sensibilités des paramètres d'entrée	12
4. DÉTERMINATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES AIRES DE PROTECTION	13
4.1. Méthode DRASTIC	13
4.2. Détermination des paramètres et résultats.....	13
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	16
6. RÉFÉRENCES	18

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Échéancier des travaux réalisés	1
Tableau 2 : Lien entre les formations dans le modèle et les dépôts de surface	3
Tableau 3 : Synthèse des données piézométriques	4
Tableau 4 : Paramètres hydrogéologiques	6
Tableau 5 : Recharge annuelle de la nappe calculée par lithologie de surface.....	7
Tableau 6 : Paramètres d'entrée utilisés et calibrés dans le calcul des aires de protection	9
Tableau 7 : Rabattements observés lors de l'essai de pompage de 72 h au puits P-1 et IV-2 et rabattements simulés.....	11
Tableau 8 : Effets sur la superficie de l'aire d'alimentation des principaux paramètres d'entrée utilisés pour la détermination des aires de protection	12

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Plan de localisation du site de prélèvement à l'échelle du territoire à l'étude	
Carte de la géologie du socle rocheux à l'échelle du territoire à l'étude	
Carte des dépôts meubles en surface à l'échelle du territoire à l'étude	
Limites du modèle et réseau hydrographique	
Carte topographique à l'échelle du territoire à l'étude	
Plan de localisation des puits répertoriés sur le territoire à l'étude	
Schéma conceptuel	
Structure géologique et coupe géologique réalisées sur Feflow avec les conditions aux limites	
Résultat de la calibration en régime permanent	
Direction des écoulements simulés	
Plan de localisation des aires de protection	
Annexe B : Calcul de l'indice DRASTIC	
Distribution de la valeur de l'indice DRASTIC dans l'aire d'alimentation	
Vulnérabilité à l'intérieur des aires de protection	

ABRÉVIATIONS

- BDGA** : Base de données géographiques et administratives
- BTEX** : Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes
- CDPNQ** : Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec
- CMA** : Concentration maximale acceptable
- CPTAQ** : Commission de protection du territoire agricole du Québec
- EMV** : Espèce menacée ou vulnérable
- EPA** : Environmental Protection Agency
- ESMV** : Espèce susceptible d'être désignée comme menacée ou vulnérable
- ESSIDES** : Eau souterraine sous l'influence directe d'une eau de surface
- Guide d'intervention** : Guide d'intervention – Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés
- HAM-HAC** : Composés organiques volatils
- HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- HP C₁₀-C₅₀** : Hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀
- LNA** : Laforest Nova Aqua inc.
- LQE** : Loi sur la qualité de l'environnement
- LPTAA** : Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles
- MELLC** : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
- MERN** : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- MFFP** : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
- MRC** : Municipalité régionale de comté
- NWWA** : National Water Works Association
- PACES** : Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
- PVC** : Polychlorure de vinyle
- RCES** : Règlement sur le captage des eaux souterraines
- RPEP** : Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
- RQEP** : Règlement sur la qualité de l'eau potable
- SIGÉOM** : Système d'information géominière du Québec
- SIH** : Système d'information hydrogéologique

UNITÉS DE MESURE

CaCO₃ : carbonate de calcium

COT : carbone organique total

gal : gallon

gal US : gallon américain

GUSPM : gallons us par minute

h : heure

km : kilomètre

kPa : kilopascal

L : litre

L/min : litre par minute

lb/po² : livre par pouce carré

log : logarithme de base 10

μ : micro

μg/L : micron par litre

μS/cm : microsiemens par centimètre

m : mètre

mg/L : milligramme par litre

min : minute

m³/jour : mètre cube par jour

mm : millimètre

pi : pied

po : pouce

ppm : partie par million

s : seconde

UFC : unité formant des colonies

UTN : unité de turbidité néphélométrique

UVC : unité de couleur vraie

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de raccordement de son nouveau puits de captage d'eau souterraine, la municipalité de L'Isle-Verte a mandaté la firme Laforest Nova Aqua inc. (LNA) pour déterminer les aires de protection du puits P-1 à l'aide d'une modélisation numérique et effectuer la mise à jour de l'indice DRASTIC sur l'ensemble de l'aire d'alimentation. Il est important de mentionner que le puits P-1 se situe en zone agricole et que la Commission de protection du territoire agricole du Québec (CPTAQ) doit se prononcer favorablement pour autoriser son exploitation.

En 2010, l'indice DRASTIC avait été estimé à 95 par Mission HGE. En 2018, LNA a eu le mandat de mettre à jour la capacité du puits, la qualité de l'eau et l'indice DRASTIC. Basé sur les informations relatives à la recharge et les aires de protection définies par les équations numériques, l'indice DRASTIC a été estimé à 115. Ceci a eu pour conséquence de modifier le niveau de vulnérabilité de faible à moyen selon le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP). Cette modification de l'indice de vulnérabilité implique l'application de certaines des contraintes aux activités agricoles qui sont détaillées aux articles 58 à 64 du RPEP.

La principale différence dans le calcul de l'indice DRASTIC concerne la valeur attribuée au paramètre de recharge de l'aquifère. La méthode utilisée par LNA en 2018, qui est celle recommandée par le Guide de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC publié en novembre 2017, a permis d'estimer une recharge à 12 cm/an alors que celle-ci a été estimée entre 5 et 10 cm/an par Mission HGE (la méthode de calcul n'est pas mentionnée dans le rapport). Selon le Guide de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC, la recharge peut aussi être estimée par modélisation numérique. Cette méthode est d'ailleurs préconisée dans le Guide comme étant plus fiable. La réalisation d'une étude avec un modèle numérique comprend plusieurs étapes : la collecte des données, la définition du modèle conceptuel, la création du modèle numérique, la calibration et la validation du modèle numérique, en plus des simulations prédictives. Les résultats de ces simulations permettent ensuite de dégager la tendance générale et de définir les aires de protection. L'indice DRASTIC est ensuite calculé à l'intérieur de ces aires de protection et la vulnérabilité de l'aquifère exploité peut être déterminée.

Afin d'éclaircir cette information, LNA a eu le mandat de procéder à la modélisation de l'aquifère pour mettre à jour les aires de protection. Pour répondre aux exigences et aux objectifs de ce mandat, l'échéancier des travaux réalisés est présenté dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 : Échéancier des travaux réalisés

Travaux réalisés	Période
Phase I – Développement du modèle conceptuel	22 juillet au 2 août 2019
Phase II – Modélisation numérique	2 août au 10 octobre 2019
Phase III – Détermination de l'indice DRASTIC et mise à jour du rapport hydrogéologique	30 août au 17 octobre 2019

2. SYNTHÈSE DES DONNÉES ET ÉLABORATION DU MODÈLE CONCEPTUEL

Afin de créer un modèle hydrogéologique à intégrer dans le modèle numérique, les données du rapport hydrogéologique – Mise à jour de l'étude hydrogéologique du puits P-1 (N/Réf. : LNA, 2018), du rapport technique – Construction du puits permanent P-1 (Réf. : Mission HGE, 2010) et de l'avis technique – Essais de pompage et de remontée du puits permanent P-1 (Réf. : Mission HGE, 2013) ainsi que les autres données disponibles dans le secteur comme celles extraites de la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH), du Système d'information géominière (SIGÉOM) ou encore du Programme d'acquisition sur les eaux souterraines (PACES) de la zone Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (NEBSL) ont été compilées et interprétées. Les points suivants proposent une description synthétique de ce travail et des méthodes qui ont été utilisées pour évaluer les différents paramètres.

2.1. Localisation du site

Le site à l'étude est localisé à environ 2,8 km de la municipalité de L'Isle-Verte, à l'est de la rivière verte. La figure 1 de l'annexe A permet de visualiser l'emplacement du site à l'étude.

2.2. Contexte géologique

Dans le secteur à l'étude, la géologie du substratum rocheux, présentée à la figure 2 de l'annexe A est essentiellement constituée de terrains d'âge cambrien à ordovicien inférieur (environ 540 millions d'années) formés de schiste, de siltite et d'argilite. Les dépôts meubles présents aux environs du secteur à l'étude sont quant à eux formés essentiellement de dépôts d'argile marine, de sable d'origine littorale, de sédiments glaciaires (till) et d'un dépôt de sable et gravier dont l'origine est indéterminée.

Les dépôts de surface, issus de la carte des dépôts meubles présentée par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), sont présentés à la figure 3 de l'annexe A.

2.3. Zone d'étude et réseau hydrographique

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir la zone d'étude. C'est l'étape initiale pour créer le modèle conceptuel, car elle permet de limiter la recherche de données à cette zone et surtout, d'établir les conditions aux limites du modèle. En général, le périmètre du bassin versant est choisi comme limite du modèle. Dans l'étude hydrogéologique de mise à jour du puits P-1 réalisée en 2018, la direction d'écoulement de l'eau souterraine a été déterminée à partir de la piézométrie datant du 9 novembre 2009, dans les puits P-1, le puits d'observation IV-6 et le puits privé P-FP. L'écoulement souterrain dans le secteur du puits municipal s'effectue vers le nord-ouest (325°N) et présente un gradient hydraulique de 0,06 %. La rivière verte suit également cette même direction puisqu'elle va se déverser dans le fleuve.

En général, les eaux souterraines s'écoulent dans la même direction que les eaux de surface; le bassin versant de L'Isle-Verte a donc été utilisé en partie comme limites du modèle. Plus précisément, la route 20 et la rivière verte constituent la limite ouest du modèle, le ruisseau des Prairies la limite sud et la limite est, et le nord du modèle est délimité par le bassin versant de L'Isle-Verte. La superficie du modèle est d'approximativement 100 668 386 m². De nombreux cours d'eau intermittents sont présents sur cette surface.

Les limites du modèle ainsi que le réseau hydrographique sont présentés à la figure 4 de l'annexe A.

2.4. Topographie

Le secteur à l'étude se caractérise par une topographie relativement régulière et peu accentuée typique d'une vallée avec des valeurs d'élévation comprises approximativement entre 28 et 236 m. Les valeurs les plus importantes sont situées à l'est de la zone d'intérêt tandis que les valeurs les plus faibles se situent à l'ouest, au niveau de la route 20 et de la rivière verte. La figure 5 de l'annexe A présente la topographie du secteur d'étude.

2.5. Inventaire des forages présents dans le secteur à l'étude

Lors des travaux de recherche en eau pour la municipalité de L'Isle-Verte, plusieurs campagnes de forages ont été réalisées dans le but de connaître la stratigraphie, les propriétés des matériaux rencontrés ainsi que le potentiel de production d'eau de ceux-ci. La localisation des différents forages répertoriés est présentée à la figure 6 de l'annexe A.

Dans le cas présent, en associant la stratigraphie des forages et la carte des dépôts meubles fournie par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), il a été possible de construire le modèle hydrogéologique. Pour cela, les différentes formations ont été comparées en considérant plusieurs aspects comme la granulométrie des dépôts, la position de la formation dans la séquence stratigraphique ou encore la localisation du forage. Le tableau 2 fait le lien des différentes stratigraphies avec la nomenclature de la carte des dépôts meubles de l'UQAR pour les sept formations distinctes considérées pour le modèle :

Tableau 2 : Lien entre les formations dans le modèle et les dépôts de surface

Formation dans le modèle	Dépôts meubles
Dépôts organiques	Sédiments organiques non différenciés (O)
Alluvions	Alluvions actuelles (Ap)
Sable (surface)	Sédiments littoraux – Sable, gravier et blocs, de 1 à 10 m d'épaisseur, flèches plages et codons (Mn)
Argile	Sédiments d'eau profonde – Silt et silt argileux, massifs à finement laminés, avec des lits sablonneux; de 1 à 10 m d'épaisseur (Mo)
Till	Till en couverture généralement continue – Dépôt d'épaisseur moyenne de 1 m ou plus (Tb)
	Till en couverture discontinue – Dépôt d'épaisseur moyenne inférieure à 0,5 m (Tv)

Formation dans le modèle	Dépôts meubles
Delta glaciaire	Sédiments de contact glaciaire – Gravier, sable, blocs de 1 à 25 m d'épaisseur comprennent les eskers, certaines moraines de la zone cotière, les kames et les terrasses de kame (GFc)
	Sédiments deltaïques – Sable, gravier, silt et blocs; de 1 à 30 m d'épaisseur (GMd)
Sable et gravier/roc fracturé	Sédiments glaciaires en place – sable, gravier *
	Roche en place non différenciée (R)

* La carte des dépôts meubles ne montre que les dépôts de surface, dans les forages proches du puits P-1, une couche de sable et gravier constituant l'aquifère prélevé a été recoupée. Compte tenu du contexte géologie du Québec, il est possible que cette formation corresponde à des sédiments glaciaires perméables et bien triés, mis en place durant la période glaciaire.

L'élévation des forages P-1, IV-2, IV-3, IV-4, IV-5 et IV-6 est connue. Pour plus de précision, ces valeurs ont été comparées à celles du Lidar (Light Detection and Ranging) mis à disposition par le ministère des forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP).

2.6. Piézométrie

Dans le secteur de la municipalité de L'Isle-Verte, trois essais de pompage longue durée de 72 h ont été réalisés au puits P-1 : un en février 2008, un en décembre 2012 et un en mai 2018. Pour ces essais, des mesures de niveau d'eau statique ont été réalisées dans les forages P-1, IV-1, IV-2, IV-3, IV-4, IV-5 et IV-6. Les autres données piézométriques sont issues du PACES. Étant donné que tous les puits du PACES répertoriés dans la zone d'étude sont des puits se terminant dans le roc, il n'a pas été possible d'interpoler la surface piézométrique en utilisant ces données.

Le tableau 3 présente la synthèse des valeurs piézométriques obtenues dans les différents forages.

Tableau 3 : Synthèse des données piézométriques

Identifiant	Élévation tubage (m)	2008-02-20 Prof. niveau d'eau (m)	2008-02-20 Élévation niveau d'eau (m)	2012-12-03 Prof. niveau d'eau (m)	2012-12-03 Élévation niveau d'eau (m)	2018-05-28 Prof. niveau d'eau (m)	2018-05-28 Élévation niveau d'eau (m)
P-1	61,16	20,52	39,62	20,86	39,31	21,59*	39,57
IV-1	39,93	0,04	38,96				
IV-2	61,16	20,46	39,54	20,71	39,37	21,53*	39,63
IV-3	61,20	2,68	57,32	2,84	57,22		
IV-4	65,77	2,59	62,41	2,45	62,29		
IV-5	62,76			20,73	41,14		
IV-6	60,13			19,95	39,16		

* Par rapport au sommet du tubage

2.7. Détermination de l'élévation du roc

Dans la présente étude, un des objectifs principaux est de déterminer les limites des aires de protections du puits P-1 à l'aide de simulation numérique dans un modèle tridimensionnel. Il est alors impératif de déterminer la topographie du roc puisque celui-ci, de par ses propriétés hydrogéologiques, régit en partie les écoulements de l'eau souterraine et même de surface.

Le principe général est d'estimer l'épaisseur des dépôts de surface sus-jacents au roc en place sur l'ensemble de la zone d'étude et de soustraire ces épaisseurs à l'élévation fournie par les données Lidar pour ainsi créer une couche raster de l'élévation du roc.

La méthodologie qui a été appliquée est la suivante :

- Extraire les épaisseurs des dépôts (de la surface au roc) présents dans les logs de forages présentés dans les rapports hydrogéologiques de 2010 et 2013;
- Extraire les épaisseurs des dépôts (de la surface au roc) présents dans la base de données du SIH et du PACES;
- Pour chaque puits, soustraire l'épaisseur des dépôts à l'élévation de la couche raster du Lidar afin d'obtenir l'élévation du roc;
- Créer une couche de points géoréférencés à partir de ces informations;
- Ajouter des points manuellement afin de ne pas avoir de zones vides pour faciliter l'interpolation;
- Utiliser une méthode d'interpolation (dans ce cas la méthode « inverse-distance » a été utilisée) pour créer une couche raster de l'élévation du roc.

Les épaisseurs des dépôts relatives aux points ajoutés manuellement ont été fixées de la manière suivante :

- Sur les zones de roc de la carte des dépôts du quaternaire, une épaisseur d'un mètre a été attribuée;
- D'autres épaisseurs ont été attribuées en continuité avec les données avoisinantes.

2.8. Détermination de l'élévation des autres couches

La même démarche a été entreprise pour les autres couches (sable et gravier, argile, till, delta glaciaire, sable (surface), dépôt organique et alluvions) situées juste au-dessus du roc. Ainsi, afin de connaître l'élévation de chaque couche, l'épaisseur de chaque dépôt (entre chaque formation et la surface) a été soustraite à l'élévation de la couche raster du Lidar. Concernant l'interpolation, la méthode « inverse-distance » a également été utilisée ici.

2.9. Paramètres hydrogéologiques

Les valeurs de conductivité hydraulique moyennes, minimums et maximums calculées pour l'aquifère exploité (sable et gravier) à partir des essais de pompage sont présentées dans le tableau 4. Les valeurs de conductivité hydraulique moyennes des autres formations, ainsi que celles de la porosité de toutes les formations sont tirées du PACES, les autres valeurs sont tirées de la littérature (Freeze and Cherry, 1979).

Tableau 4 : Paramètres hydrogéologiques

		Sable et gravier/roc fracturé	Argile	Till	Delta glaciaire	Sable (surface)	Dépôts organiques	Alluvions
Coefficient (S)	Min.	<0,005	-	-	-	-	-	-
	Max.	0,0052	-	-	-	-	-	-
	Moy.	0,005	-	-	-	-	-	-
Conductivité hydraulique (m/s)	Min.	2×10^{-5}	1×10^{-12}	1×10^{-12}	-	1×10^{-6}	-	-
	Max.	1×10^{-3}	1×10^{-9}	1×10^{-6}	-	1×10^{-3}	-	-
	Moy.	$6,28 \times 10^{-4}$	-	-	$3,6 \times 10^{-12}$	6×10^{-6}	7×10^{-7}	5×10^{-6}
Porosité totale	Min.	0,25	0,40	0,20	-	0,25	-	-
	Max.	0,40	0,55	0,55	-	0,40	-	-
Porosité de drainage	Min.	0,20	0,03	0,05	0,05	0,15	0,05	0,05
	Max.	0,35	0,15	0,15	0,20	0,32	0,15	0,20

2.10. Recharge

Selon les informations enregistrées par la station météorologique de l'Île Rouge, située à 16 km de la municipalité de L'Isle-Verte, il y a eu 526 mm en précipitation du 1^{er} janvier 2017 au 1^{er} janvier 2018.

Le calcul de la recharge se base sur les températures moyennes mensuelles et les précipitations totales mensuelles. Pour chaque mois, les paramètres suivants sont déterminés :

1. Le ruissellement R, défini par l'équation : $R = C \times P$, où C est le coefficient de ruissellement et P les précipitations totales;
2. L'infiltration I, définie par l'équation : $I = P - R$;
3. L'évapotranspiration potentielle ETP est calculée à partir de la formule de Thornthwaite;
4. Le déficit en humidité des sols D, défini par l'équation : $D = RAS + I - ETP$, où RAS est la réserve en eau facilement accessible dans le sol;
5. L'évapotranspiration réelle ETR est calculée en fonction de la valeur de D;
6. La recharge de la nappe G pour le mois donné est calculée selon la valeur de D.

La recharge annuelle de la nappe est égale à la somme des recharges mensuelles. Elle a été déterminée pour chaque lithologie présente en surface et les résultats sont présentés dans le tableau 5 suivant :

Tableau 5 : Recharge annuelle de la nappe calculée par lithologie de surface

Lithologie	Recharge annuelle (mm/an)
Dépôts organiques	81
Alluvions	147
Sable (surface)	120
Argile	60
Till	81
Delta glaciaire	114
Roc fracturé (affleurant)	114

2.11. Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel est établi à partir des informations recueillies ci-dessus. L'aquifère de sable et gravier exploité est sus-jacent au roc en place. La nappe est captive lorsqu'elle est surmontée d'une couche d'argile silteuse, comme c'est le cas au droit des puits de production. La recharge se fait principalement dans la zone où le roc affleure, à l'est des puits et lorsque la couche confinante d'argile est absente. Selon les résultats des 3 essais de pompage réalisés à L'Isle-Verte (2008, 2012 et 2018), il y a une nappe libre au-dessus de la couche d'argile qui ne communique pas avec la nappe captive. L'eau souterraine dans l'aquifère captif s'écoule selon une direction approximative d'est vers l'ouest. La figure 7 de l'annexe A illustre schématiquement le modèle conceptuel établi.

3. ÉLABORATION ET RÉSULTATS DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Suite à l'élaboration du modèle conceptuel, le logiciel Feflow a été utilisé pour la modélisation numérique. En effet, Feflow est un logiciel qui permet de simuler les écoulements de l'eau souterraine en deux ou trois dimensions, dans un milieu (poreux ou fracturé) à saturation variable, en régime permanent ou transitoire. Feflow résout les équations d'écoulement à l'aide de la méthode des éléments finis. Dans le cas présent, le maillage en trois dimensions est composé de prismes triangulaires. Les paramètres hydrogéologiques sont précisés pour chaque cellule et des conditions aux limites sont attribuées sur les nœuds.

Après avoir raffiné le maillage dans certains secteurs (puits, cours d'eau, interface entre les différents types de dépôts, etc.), le maillage est composé de 553 728 nœuds et de 903 585 éléments. Les équations d'écoulement utilisées sont celles relatives à un milieu saturé et les conditions de confinement ou non de la nappe dépendent du contexte imposé par les conditions aux limites et les propriétés du milieu.

3.1. Conditions aux limites

Dans un modèle numérique, il est nécessaire de fixer certaines conditions, telles que l'élévation de la nappe ou encore le prélèvement d'eau pour un puits de pompage. On distingue trois types de conditions aux limites :

1. Type 1 (Dirichlet) : potentiel imposé (charge fixe);
2. Type 2 (Neumann) : flux imposé (gradient fixe);
3. Type 3 (Cauchy) : combinaison entre le potentiel et le flux.

Dans le modèle, les rivières ont été considérées comme des conditions aux limites de type 3. Afin de définir une charge aux nœuds de la rivière, des points de contrôle ont été établis à plusieurs endroits sur cette dernière. Ensuite, l'élévation de la surface topographique a été attribuée à ces points de contrôle pour fixer l'élévation de la nappe libre. Des interpolations linéaires entre les différents points de contrôle ont permis d'attribuer les élévations aux autres nœuds qui composent les rivières. Enfin, un taux de transfert a été affecté aux éléments qui composent les rivières (de limite du modèle et interne). La figure 8 de l'annexe A présente la structure géologique du modèle et les conditions aux limites du modèle réalisé sur Feflow.

3.2. Calibration en régimes permanent et transitoire

Concernant les différents paramètres hydrogéologiques, les valeurs extraites des rapports produits ou calculées à partir des informations collectées constituent les valeurs de départ pour la calibration du modèle.

La calibration a été divisée en deux étapes. La première étape consistait à réaliser des simulations en régime permanent et reproduire les données piézométriques relevées sur le terrain. Étant donné que les puits du PACES se terminent dans le roc, seuls les puits suivants ont été utilisés pour la calibration : P-1, IV-2, IV-3, IV-4, IV-5 et IV-6.

Une attention particulière a été portée sur le niveau piézométrique de l'ensemble du modèle. Les puits utilisés pour la calibration étant tous situés dans un périmètre restreint, il est important de s'assurer de la validité du modèle dans son ensemble.

Le paramètre utilisé pour comparer les niveaux piézométriques observés avec ceux simulés est la RMS (root mean square ou écart quadratique moyen). La RMS correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts. Ainsi, une correspondance parfaite entre les niveaux piézométriques observés et simulés se traduit par une RMS nulle. Une RMS égale à 2 signifie qu'il y a en moyenne un écart de 2 m entre les valeurs observées et simulées.

La simulation avec les paramètres initiaux a abouti à une RMS beaucoup trop élevée pour être jugée acceptable (>10). De plus, certains niveaux piézométriques étaient situés à plus de 100 m au-dessus du sol. Une partie du modèle était ainsi fortement inondée. De plus, le modèle affichait une charge élevée supérieure à 10 m au droit des puits. Afin de corriger ces problèmes, deux modifications ont été apportées :

1. Ajouter une couche de 10 cm d'épaisseur à la surface du modèle. Cette couche, de conductivité plus élevée, a pour objectif de faciliter la recharge en particulier au niveau des zones où le roc, le till, l'argile et les dépôts deltaïques glaciaires affleurent selon la carte des dépôts meubles. Le logiciel Feflow ne prenant pas en compte les écoulements de surface, l'ajout de cette couche permet d'ajuster le modèle;
2. Ajuster la recharge au niveau des couches considérées comme imperméables.

La calibration a alors été effectuée en faisant varier la recharge, la porosité, la conductivité hydraulique des formations et le coefficient d'emménagement spécifique de l'aquifère. Les paramètres utilisés ainsi que leur variabilité lors de la calibration sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres d'entrée utilisés et calibrés dans le calcul des aires de protection

Paramètre	Lithologie	Valeurs initiales	Variations lors de la calibration	Valeurs retenues
Conductivité hydraulique (m/s)	Couche de recharge	1×10^{-4}	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-4}
	Sable et gravier/ roc fracturé	$6,28 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$	7×10^{-4}
	Argile	1×10^{-9}	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-8}$	1×10^{-8}
	Till	1×10^{-5}	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-5}
	Delta glaciaire	3×10^{-6}	$5 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	3×10^{-6}
	Sable (surface)	1×10^{-5}	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$	3×10^{-5}
	Dépôts organiques	7×10^{-7}	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$	7×10^{-7}
	Alluvions	3×10^{-6}	$5 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	3×10^{-6}

Paramètre	Lithologie	Valeurs initiales	Variations lors de la calibration	Valeurs retenues
Porosité efficace	Couche de recharge	0,25	0,20 – 0,30	0,20
	Sable et gravier/ roc fracturé	0,25	0,20 – 0,30	0,25
	Argile	0,05	0,05 – 0,15	0,10
	Till	0,10	0,05 – 0,15	0,10
	Delta glaciaire	0,125	0,10 – 0,15	0,125
	Sable (surface)	0,26	0,20 – 0,30	0,26
	Dépôts organiques	0,10	0,05 – 0,15	0,10
	Alluvions	0,125	0,10 – 0,15	0,125
Recharge (mm/an)	Sable et gravier/ roc fracturé	300	50 – 400	160
	Argile	1	0,1 – 20	0,5
	Till	20	10 – 120	10
	Delta glaciaire	50	20 – 150	25
	Sable (surface)	80	20 – 120	90
	Dépôts organiques	20	10 – 120	10
	Alluvions	50	20 – 150	25
Coefficient d'emmagasinement spécifique (m ⁻¹)	Sable et gravier	5 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻⁶ – 1 x 10 ⁻²	5 x 10 ⁻⁴

Le modèle final, avec les paramètres issus de la calibration, a abouti à une RMS de 1,53 m et à une erreur moyenne de 1,34 m. Deux raisons peuvent expliquer cette différence entre les niveaux piézométriques observés et simulés :

- Les élévations utilisées dans le modèle ont été extraites du Lidar et peuvent légèrement différer de la valeur mesurée sur le terrain. L'interpolation de l'élévation effectuée dans Feflow peut engendrer des variations supplémentaires;
- Les valeurs piézométriques simulées constituent une moyenne annuelle alors que les valeurs piézométriques observées ont été mesurées ponctuellement.

Le problème d'inondation a quasiment été résolu. Une petite zone demeure inondée, mais elle est majoritairement située dans l'argile au niveau de la limite nord du modèle et n'interfère pas dans les résultats de la modélisation.

La figure 9 de l'annexe A présente les charges hydrauliques moyennes observées dans les forages (issues de la compilation des valeurs de niveau d'eau prises dans les 3 essais de pompage) en fonction des charges hydrauliques simulées. Les valeurs sont exprimées par rapport à l'élévation du niveau de la mer.

La seconde étape consistait à réaliser des simulations en régime transitoire pour reproduire les rabattements créés dans les puits lors de l'essai de pompage de 72 h au puits P-1 décrit dans le rapport hydrogéologique de Mission HGE de 2013. Le pompage avait été réalisé avec un débit de pompage de 719,2 L/min (environ 1035 m³/jour) pendant 4320 min. Les rabattements à la fin du pompage ainsi que les rabattements simulés dans le logiciel Feflow sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Rabattements observés lors de l'essai de pompage de 72 h au puits P-1 et IV-2 et rabattements simulés

Puits	Rabattement observé	Rabattement simulé	Différence
P-1	1,65	1,97	-0,32
IV-2	1,60	1,00	0,60
IV-5	0,36	0,37	-0,01
IV-6	0,44	0,41	0,03

La calibration à partir de l'essai de pompage intervient sur les paramètres de l'aquifère. Pour cela, les courbes de rabattement simulées et observées ont été comparées. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une conductivité de 7×10^{-4} m/s pour l'aquifère. Cette valeur constitue ainsi la valeur finale de conductivité pour l'aquifère.

3.3. Simulations prédictives et aires de protection

Afin de déterminer les aires de protections, des simulations sous l'effet d'un pompage ont été réalisées en régime permanent avec les paramètres obtenus lors de la calibration. En utilisant les lignes d'écoulements créées par le logiciel suite aux simulations et les temps simulés pour le déplacement des particules jusqu'au puits de production, les aires de protection ont pu être déterminées. La figure 10 de l'annexe A présente le chemin emprunté par les particules d'eau qui vont être captées par le puits.

Les aires de protection sont déterminées à partir du débit projeté sur 30 ans de 952,05 m³/jour qui a été estimé en 2010 par Mission HGE pour répondre aux besoins en eau de la municipalité de L'Isle-Verte.

La densité des lignes d'écoulement indique que la majorité de l'eau captée provient de la zone principale de recharge de l'aquifère, qui se situe au niveau des sommets montagneux lorsque la couche d'argile y est absente.

Les aires de protection intermédiaires ont été tracées en entourant les lignes d'écoulement correspondant à 200 jours et 550 jours de transport pour atteindre l'installation de captage obtenues grâce au logiciel Feflow. L'aire de protection éloignée a été déterminée en traçant le contour des lignes d'écoulement totales. L'aire de protection éloignée, et les aires de protection intermédiaires sont présentées à la figure 11 de l'annexe A.

3.4. Sensibilités des paramètres d'entrée

L'étude de la sensibilité consiste à faire varier les paramètres d'entrée et d'observer l'impact sur l'aire d'alimentation. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Effets sur la superficie de l'aire d'alimentation des principaux paramètres d'entrée utilisés pour la détermination des aires de protection

Paramètre	Modification de la valeur du paramètre	Effet sur la superficie de l'aire d'alimentation
Débit journalier moyen d'exploitation (Q)	Diminution	Diminution
	Augmentation	Augmentation
Porosité efficace (ne)	Diminution	Aucun changement
	Augmentation	Aucun changement
Conductivité hydraulique (K)	Diminution	Diminution
	Augmentation	Augmentation
Recharge (R)	Diminution	Augmentation
	Augmentation	Diminution
Coefficient d'emmagasinement spécifique (S)	Diminution	Aucun changement
	Augmentation	Aucun changement

4. DÉTERMINATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES AIRES DE PROTECTION

4.1. Méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC est l'une des méthodes les plus reconnues et utilisées en Amérique du Nord pour évaluer la vulnérabilité d'une nappe phréatique. Elle fut développée aux États-Unis par le National Water Works Association (NWWA), pour le compte de l'Environmental Protection Agency (EPA). Cette méthode intègre sept paramètres physiques différents qui interviennent dans les processus de transport et d'atténuation des contaminants. Ces paramètres sont : la profondeur de la nappe phréatique (ou du toit de l'aquifère pour une nappe captive), l'infiltration efficace, le milieu aquifère, le type de sol, la topographie, la zone non saturée et la conductivité hydraulique de l'aquifère.

Une cote numérique est attribuée à chacun des sept paramètres mentionnés plus haut. Pour le calcul de l'indice DRASTIC, on doit multiplier le poids prédéfini de chacun des paramètres par la cote attribuée selon la méthode. La somme des cotes multipliées par leur poids respectif donne l'indice DRASTIC dont les valeurs sont comprises entre 23 et 226. La figure 12 de l'annexe B présente les cotes et les poids attribués pour chaque paramètre dans l'aire de protection éloignée.

4.2. Détermination des paramètres et résultats

Pour calculer l'indice DRASTIC, chaque paramètre a été évalué sur l'ensemble de l'aire de protection éloignée à partir de différentes sources d'information comme les études hydrogéologiques, les cartes géologiques et les bases de données accessibles, le SIH, le PACES, le SIGÉOM et la carte des dépôts de surface fournie par l'UQAR.

Le calcul de l'indice DRASTIC est ensuite réalisé sur la superficie complète de l'aire de protection éloignée en croisant les résultats obtenus pour chacun des paramètres. Le traitement des données géoréférencées se fait à l'aide du logiciel QGIS. Le calcul de l'indice DRASTIC est effectué pour chacun des pixels où les valeurs des paramètres ont été attribuées. Ceci nous donne une appréciation locale de l'indice dans les aires de protection.

La figure 13 de l'annexe B présente la distribution de la valeur de l'indice DRASTIC sur l'ensemble des aires de protection établies. Les explications concernant le choix des valeurs attribuées sont présentées ci-après pour chaque paramètre.

Profondeur de la nappe (D)

La nappe exploitée a été considérée captive lorsque la couche d'argile (de 2 m d'épaisseur minimum) est présente au-dessus de l'aquifère. Lorsque cette situation est rencontrée, c'est la profondeur du toit de l'aquifère captif qui est considérée pour attribuer la cote de la profondeur de la nappe. Lorsque la nappe exploitée est proche des montagnes, l'aquifère devient libre, la piézométrie simulée avec le modèle a été utilisée afin d'attribuer la cote de la profondeur de la nappe. La cote pour ce critère varie de 1 à 10 sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits.

Recharge (R)

La recharge varie en fonction de la couche de dépôts présents à la surface. Sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits définie dans le modèle, la recharge peut être distinguée en quatre catégories :

- Argile (cote de 1);
- Till (cote de 1);
- Sable (surface) (cote de 3);
- Roc fracturé (cote de 6).

Aquifère (A)

L'aquifère exploité est composé de sable et gravier au niveau du puits et jusqu'au bas des montagnes. En amont de l'aire d'alimentation, au niveau des montagnes, l'aquifère est composé de roc fracturé. Une cote de 8 a donc été attribuée sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits.

Sol (S)

Selon les études pédologiques de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), le sol sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits peut être différencié en six catégories :

- Argile (cote de 1);
- Terre noire (cote de 2);
- Loam argileux (cote de 3);
- Loam (cote de 5);
- Loam sableux (cote de 6);
- Roc affleurant (cote de 10).

Topographie (T)

Les pentes topographiques ont été calculées à partir du modèle numérique de terrain de type Lidar. Une procédure de calcul effectuée sur QGIS a permis de créer une carte des pentes. Les résultats indiquent qu'au niveau des plaines, la pente varie entre 0 et 5 % alors qu'au niveau des montagnes, celle-ci s'élève à plus de 30 %. Les cotes attribuées varient donc entre 1 et 10 sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits.

Zone vadose (I)

Dans la zone où la nappe est captive, la zone vadose est composée d'argile principalement et peut être considéré comme confinante. Lorsque la nappe devient libre, au pied des montagnes, les dépôts de surface indiquent une zone de roc affleurant (schiste), de till et sable (surface). La cote attribuée pour ce paramètre varie entre 1 et 6 sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits.

Conductivité hydraulique (C)

La conductivité hydraulique est la même pour toute la zone de l'aquifère de sable et gravier. Elle a été déterminée à 7×10^{-4} m/s à partir du modèle numérique et une cote de 8 a donc été attribuée sur l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits.

Selon les analyses et calculs réalisés sur l'ensemble de l'aire de protection éloignée par LNA, la vulnérabilité de l'aquifère doit être considérée comme faible sur l'ensemble de l'aire d'alimentation intermédiaire bactériologique et virologique, et comme moyenne sur l'aire de protection éloignée comme présentée à la figure 14 de l'annexe B. En effet, l'indice DRASTIC calculé est compris entre 78 et 97 dans les aires de protection intermédiaires bactériologique et virologique et entre 78 et 177 dans l'aire de protection éloignée du puits P-1 de L'Isle-Verte. Ces valeurs sont cohérentes avec les calculs réalisés dans l'étude hydrogéologique de 2010 par Mission HGE (indice DRASTIC estimé à 95); cependant, cet indice avait été estimé uniquement au droit des puits et projeté sur l'ensemble de l'aire d'alimentation en forme de parabole, alors que LNA a fait le calcul pour chaque carré de 10 m sur 10 m constituant l'aire de protection éloignée.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans le cadre du projet de raccordement d'un nouvel ouvrage de captage d'eau souterraine, la municipalité de L'Isle-Verte a mandaté LNA au moyen de l'offre de service n° 4327 afin de redéfinir les aires de protection du puits P-1 en réalisant une modélisation numérique et d'effectuer la mise à jour de l'indice DRASTIC sur l'ensemble des aires de protection. La mise à jour des aires de protection répond aux exigences du Guide publié à cet effet en 2017.

Les travaux réalisés ont été divisés en plusieurs étapes :

- Collecter, analyser et interpréter les données disponibles (rapports hydrogéologiques, SIH, PACES, SIGÉOM, cartes géologiques, etc.);
- Délimiter la zone à étudier (bassin versant);
- Déterminer un modèle hydrogéologique simplifié et cohérent (géométrie et agencement des formations géologiques);
- Définir le modèle conceptuel considérant le modèle géologique, les sources d'eau et les limites à appliquer au modèle;
- Intégrer le modèle conceptuel dans le modèle numérique Feflow;
- Calibrer et valider le modèle numérique;
- Réaliser des simulations prédictives pour déterminer les aires de protection;
- Déterminer la cote des sept paramètres qui sont inclus dans le calcul de l'indice DRASTIC sur l'ensemble de l'aire d'alimentation et calculer l'indice DRASTIC;
- Déterminer la vulnérabilité de l'aquifère à l'intérieur de chaque aire de protection.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- C-1.** Le modèle hydrogéologique simplifié est composé de sept formations dont les propriétés sont différentes;
- C-2.** Lors de la calibration, les valeurs de porosité, conductivité hydraulique, et de recharge ont été ajustées afin de s'approcher le plus possible des données observées. Bien que les résultats obtenus à la fin de la calibration soient légèrement différents des observations (piézométrie, charge hydraulique, rabattement lors de l'essai de pompage), le modèle calibré a été jugé représentatif, et des simulations prédictives ont été réalisées pour déterminer les aires de protection;
- C-3.** Les différences observées entre les données mesurées et les résultats des simulations s'expliquent en partie par :
 - Les simplifications du modèle telles que la géométrie, la répartition et l'agencement des dépôts;
 - L'hétérogénéité et l'anisotropie à l'intérieur de chaque formation ne sont pas prises en compte;
 - L'eau et les écoulements de surface ne sont pas considérés dans le modèle numérique Feflow;
 - Les variations piézométriques saisonnières ne sont pas considérées;

- C-4.** Les lignes d'écoulement et les temps simulés pour le déplacement des particules jusqu'au puits P-1 ont été utilisés pour définir les aires de protection. Selon les résultats du modèle numérique, l'aire d'alimentation s'étend jusque dans les zones où le roc affleure au sud-est;
- C-5.** L'indice DRASTIC a été évalué sur l'ensemble de l'aire de protection éloignée et il est compris entre 78 et 177. Au niveau des aires de protection immédiate et intermédiaires (bactériologique et virologique), la vulnérabilité de l'aquifère est faible. Dans l'aire d'alimentation du puits P-1, la vulnérabilité de l'aquifère est moyenne.

Sur la base de ces conclusions, il est possible d'émettre les recommandations suivantes :

- R-1.** Considérant que ces aires de protection sont extrapolées sur la base de connaissance ponctuelle, une évaluation spécifique à un secteur précis devrait être effectuée à l'aide de forage pour confirmer l'impact réel d'une activité dans un secteur couvert par cette étude. En l'occurrence, pour les activités agricoles, l'évaluation faite à l'aide de cette modélisation numérique est valable.

6. RÉFÉRENCES

1. Mise à jour de l'étude hydrogéologique du puits P-1 (Laforest Nova Aqua inc., 2018);
2. Construction du puits permanent P-1 (Mission HGE, 2010);
3. Essais de pompage et de remontée du puits permanent P-1 (Mission HGE, 2013);

ANNEXE A

FIGURES 1 À 11

Municipalité de l'Isle-Verte

Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1

Dépôts de surface

LÉGENDE

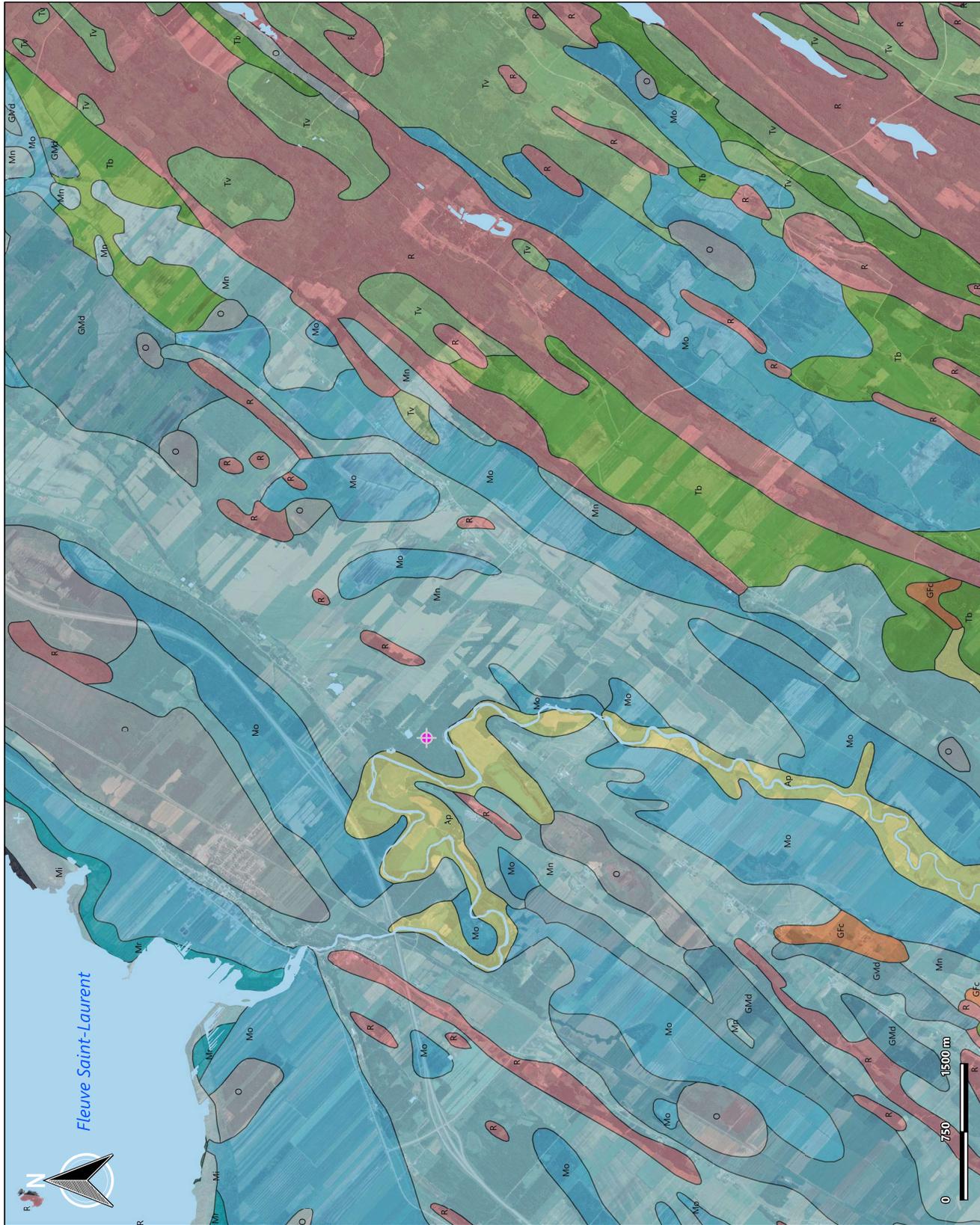
-  Puits à l'étude
-  Étendue d'eau
- Dépôts de surface :**
 -  Alluvion actuelle (Ap)
 -  Sédiment organique non différencié (O)
 -  Roche en place non-différenciée (R)
 -  Till en couverture généralement continue - ou plus (Tb)
 -  Till en couverture discontinue - Dépôt d'épaisseur moyenne inférieure à 0,5 m (Tv)
 -  Sédiments de contact glaciaire - Gravier, sable, blocs de 1 à 25 m d'épaisseur, comprend les eskers, certaines moraines de la zone côtière, les kames et les terrasses de kame (Gfc)
 -  Sédiments littoraux - Sable, gravier et blocs, de 1 à 10 m d'épaisseur, flèches plages et cordons (Mn)
 -  Sédiments deltaïques - Sable, gravier, silt et blocs, de 1 à 30 m d'épaisseur (GMd)
 -  Sédiments d'eau profonde - Silt et silt argileux, massifs à finement laminés, avec des lits sablonneux; de 1 à 10 m d'épaisseur (Mo)

Nom du fichier : 18-6706-4327_fig3_dep_surf
 Fond photographique : Google
 Fond géologique : UGAR
 Projection : NAD83 MTM7

Échelle : 1 : 40 000	Date : 2019-10-15
Figure : 3	Dossier : 18-6706-4327
Dessinée par : Ulliani Arai, M. Sc.	
Préparée par : Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	

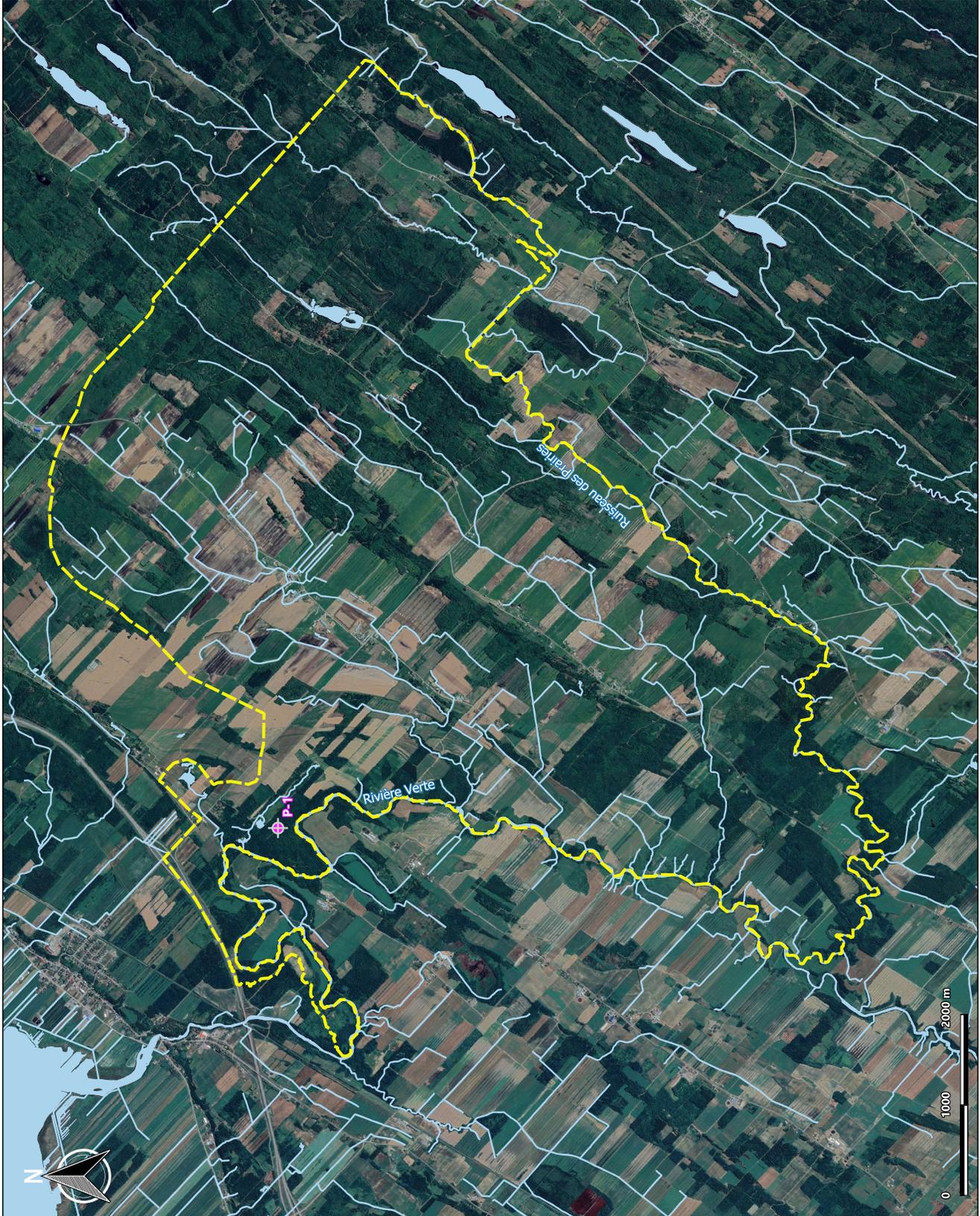


1470, rue Esther Blondin, bur. 230
 Québec (Québec) G1V 3N7
 Téléphone : 418 657-7999
 Sans frais : 1 877 657-7999
 Télécopieur : 418 657-5777



Municipalité de l'Isle-Verte	
Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1	
Limites du modèle et réseau hydrographique	
LÉGENDE	
	Puits à l'étude
	Cours d'eau
	Limite du modèle
	Étendue d'eau
Nom du fichier : 18-6706-4327_fig4_lim_mod Fond photographique : Google Projection NAD83 MTM7	

Échelle : 1 : 40 000	Date : 2019-10-15
Figure : 4	Dossier : 18-6706-4327
Dessinée par : Ujjaini Arai, M. Sc.	
Préparée par : Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	
	
1470, rue Esther Blondin, bur. 230 Québec (Québec) G1Y 3N7 Téléphone : 418 657-7999 Sans frais : 1 877 657-7999 Télécopieur : 418 657-5777	



Municipalité de l'Isle-Verte

Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1

Carte topographique

LÉGENDE

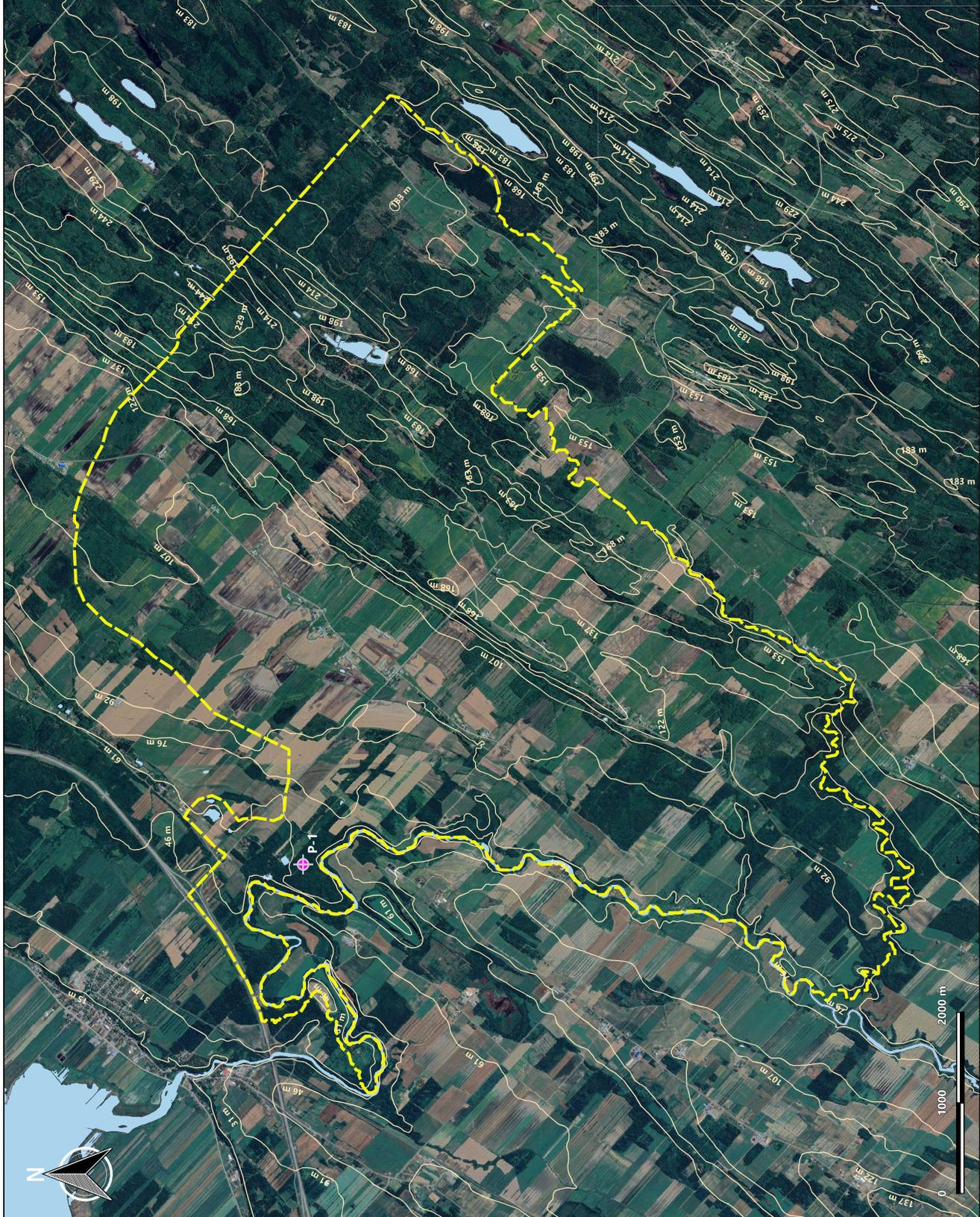
- Puits à l'étude
- Courbe de niveau (15 m)
- Étendue d'eau
- Limite du modèle

Nom du fichier: 18-6706-4327_fig6_topo
Font photographique: Google
Projection NAD83 MTM 7

Échelle:	1 : 40 000	Date:	2019-10-18
Figure:	5	Dossier:	18-6706-4327
Dessinée par:	Ujiani Arai, M. Sc.		

Préparée par: Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue

1470, rue Esther Blondin, bur. 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
Téléphone : 418 657-7999
Sans frais : 1 877 657-7999
Télécopieur : 418 657-5777



Municipalité de l'Isle-Verte

Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1

Localisation des puits

LÉGENDE

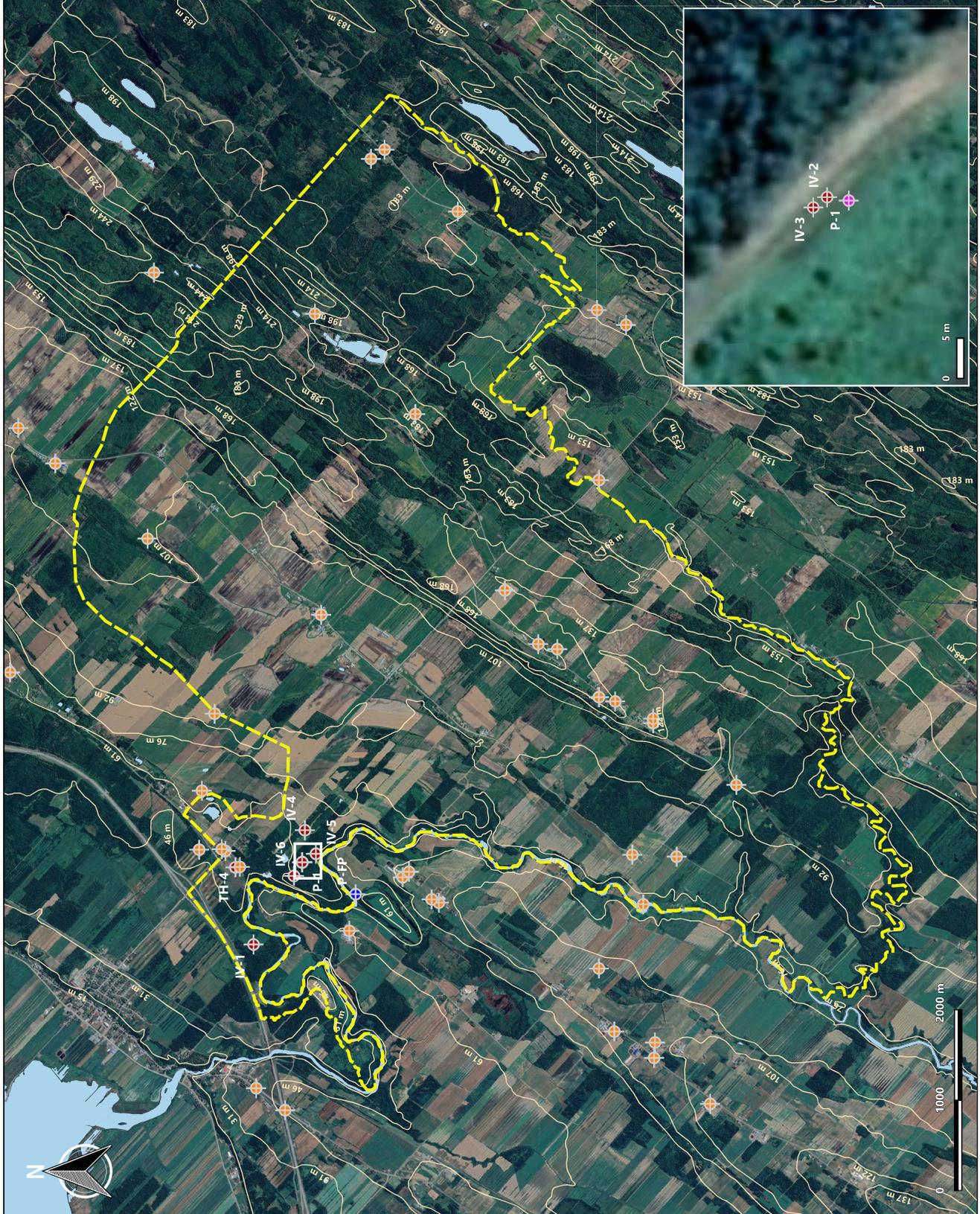
-  Puits à l'étude
-  Puits
-  Piézomètre
-  Puits du PACES
-  Courbe de niveau (15 m)
-  Limite du modèle
-  Étendue d'eau

Nom du fichier: 18-6706-4327_fig6_loc_puits
 Fond photographique: Google
 Projection: NAD83 MTM7

Échelle: 1:40 000 / 1:450	Date: 2019-10-18
Figure: 6	Dossier: 18-6706-4327
Dessinée par: Ullant Arai, M. Sc.	
Préparée par: Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	

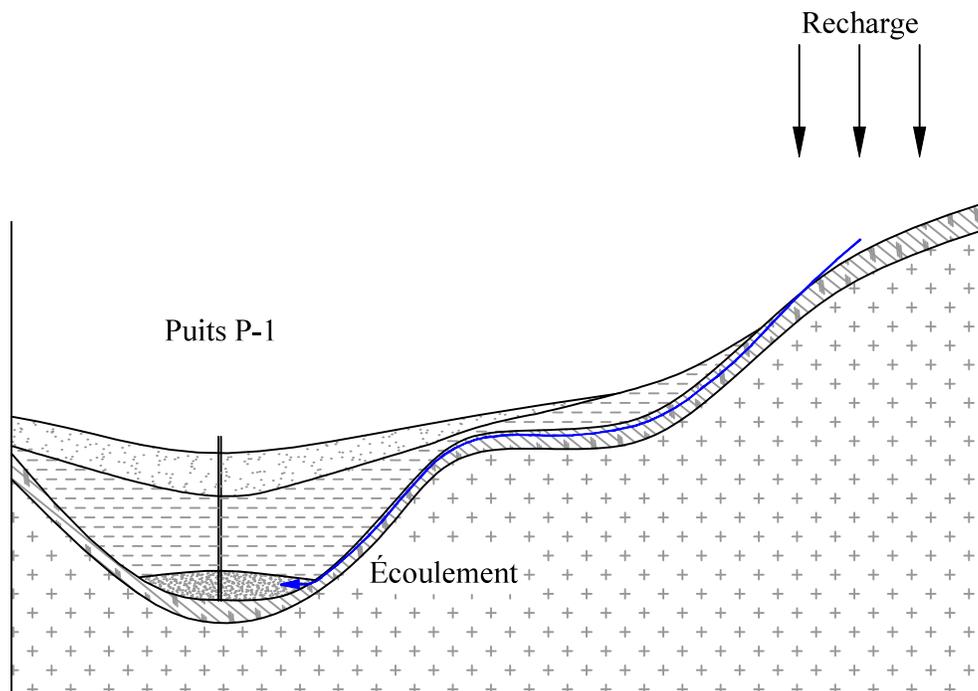


1470, rue Esther Blondin, bur. 230
 Québec (Québec) G1V 3N7
 Téléphone: 418 657-7999
 Sans frais: 1 877 657-7999
 Télécopieur: 418 657-5777



Ouest

Est



Légende

- | | | | |
|---|-----------------------------|---|--------------|
|  | Argile |  | Roc fracturé |
|  | Sable (surface) |  | Roc |
|  | Sable et gravier (aquifère) | | |

Municipalité de l'Isle-Verte
Détermination des aires de protection et mise à
jour de l'indice DRASTIC du puits P-1

Schéma conceptuel

Échelle : n/a

Figure : 7

Date : 17 octobre 2019

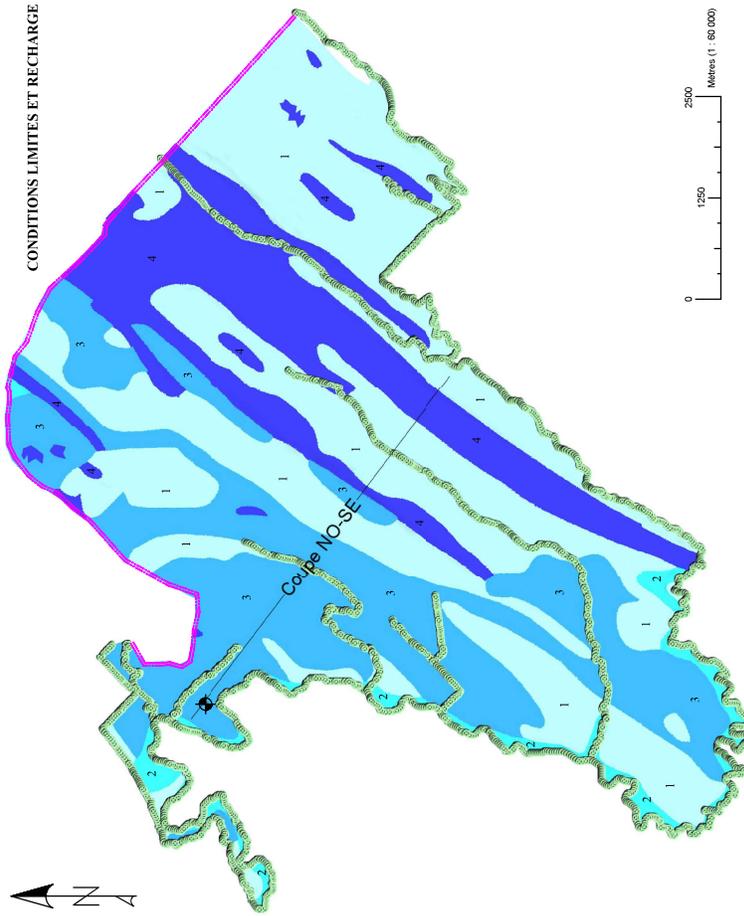
Dossier : 18-6706-4327

Préparé par : Karl Lechat, Ph. D.

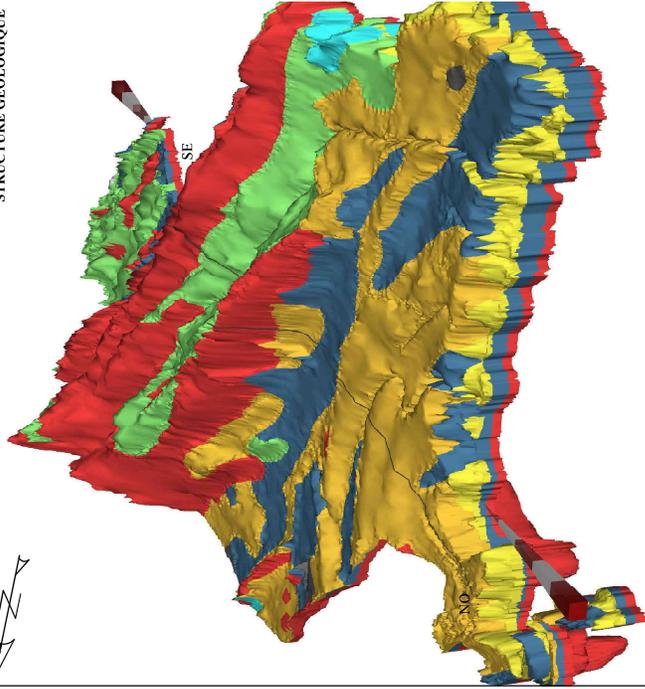
Dessiné par : Martin Gascon



1470, rue Esther-Blondin, bureau 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
Téléphone : 418 657-7999
Sans frais : 1 877 657-7999
Télécopieur : 418 657-5999



STRUCTURE GÉOLOGIQUE



Exagération verticale x20

Légende

Conditions limites

Type 3 (Cauchy)

Type 2 (Neumann)

Puits P-1

Recharge (mm / an)

1 0 < ... ≤ 20

2 20 < ... ≤ 50

3 50 < ... ≤ 100

4 100 < ... ≤ 160

Géologie

Depôts organiques

Alluvions

Sable (surface)

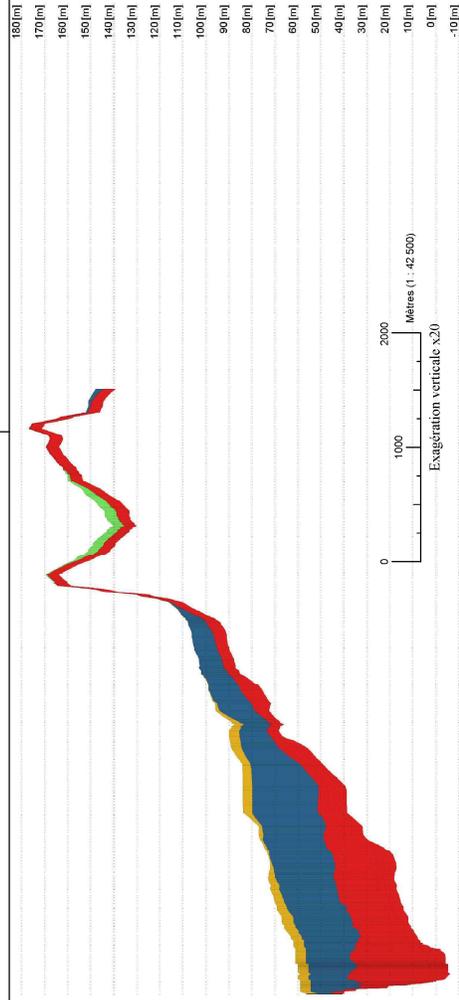
Argile

Till

Delta glaciaire

Sable et gravier / Roc fracturé

COUPE NO-SE



Municipalité de l'Isle-Verte
Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC du puits P-1

Modèle hydrogéologique 3D

Échelle : Indiquée

Figure : 8

Date : 18 octobre 2019

Dossier : 18-6706-4327

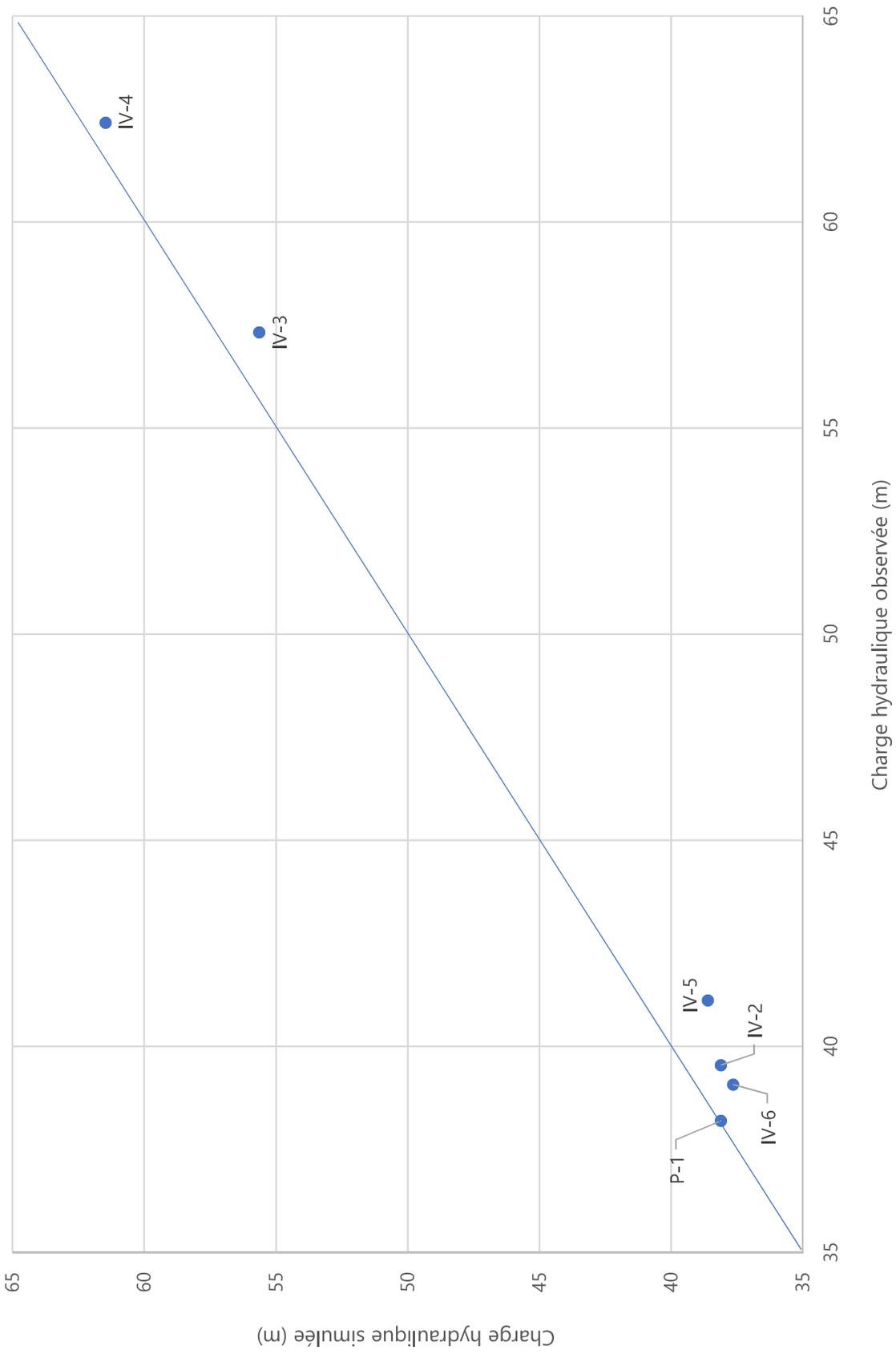
Préparé par : Karl Lechat, Ph. D.

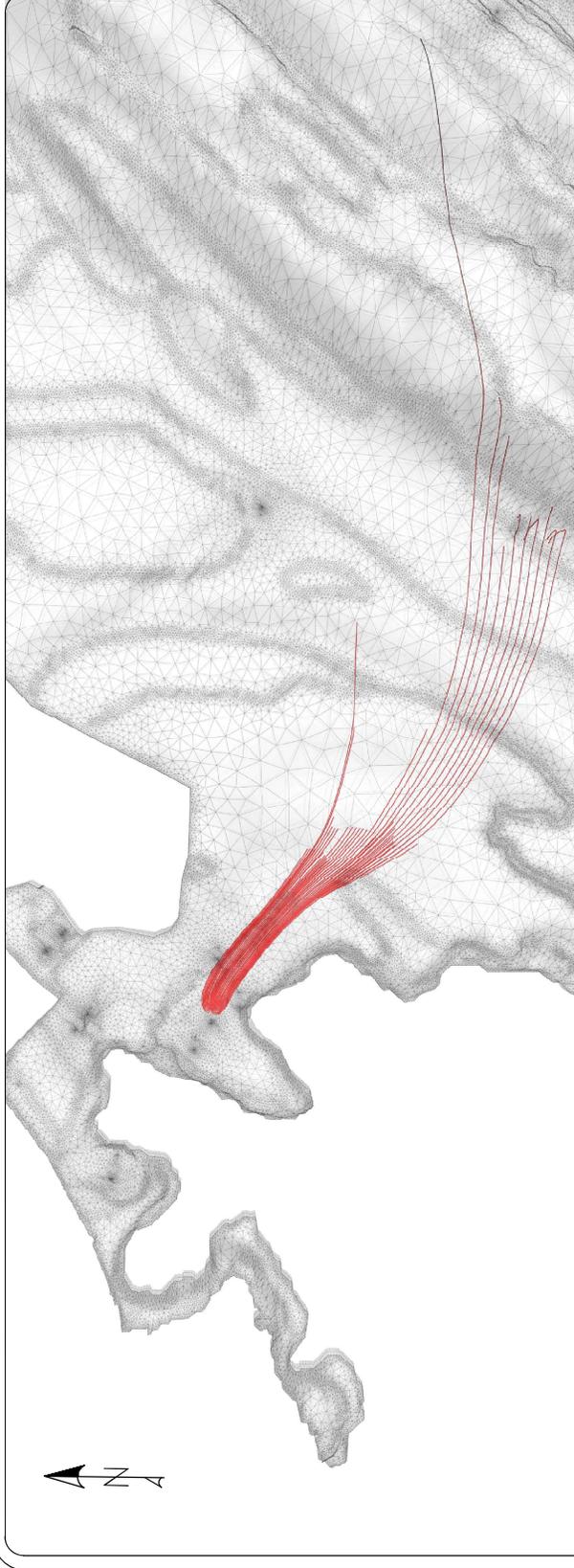
Dessiné par : Martin Gascon



1470, rue Eschsch-Bondin, bureau 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
Téléphone : 418 657-7999
Sans frais : 1 877 657-7999
Télécopieur : 418 657-5999

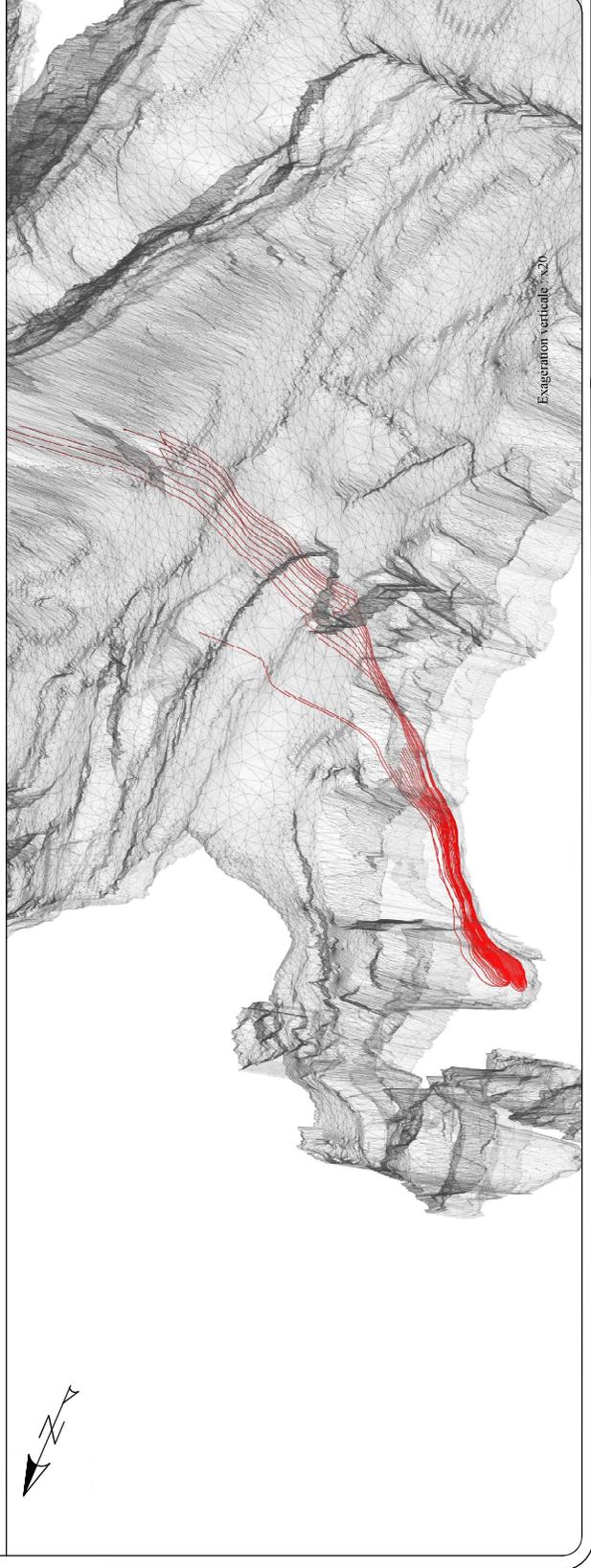
Figure 9 : Résultats de la calibration en régime permanent





Légende

Ligne d'écoulement



Municipalité de l'Isle-Verte
 Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC du puits P-1

Direction des écoulements simulés

Échelle :	n/a
Figure :	10
Date :	18 octobre 2019
Dossier :	18-6706-4327
Préparé par :	Karl Lechat, Ph. D.
Dessiné par :	Martin Gascon

LNA
 HYDROGÉOLOGIE
 ENVIRONNEMENT

1470, rue Estève-Bondin, bureau 230
 Québec (Québec) G1Y 3N7
 Téléphone : 418 657-7999
 Sans frais : 1 877 657-7999
 Télécopieur : 418 657-5999

Municipalité de l'Isle-Verte

Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1

Localisation des aires de protection

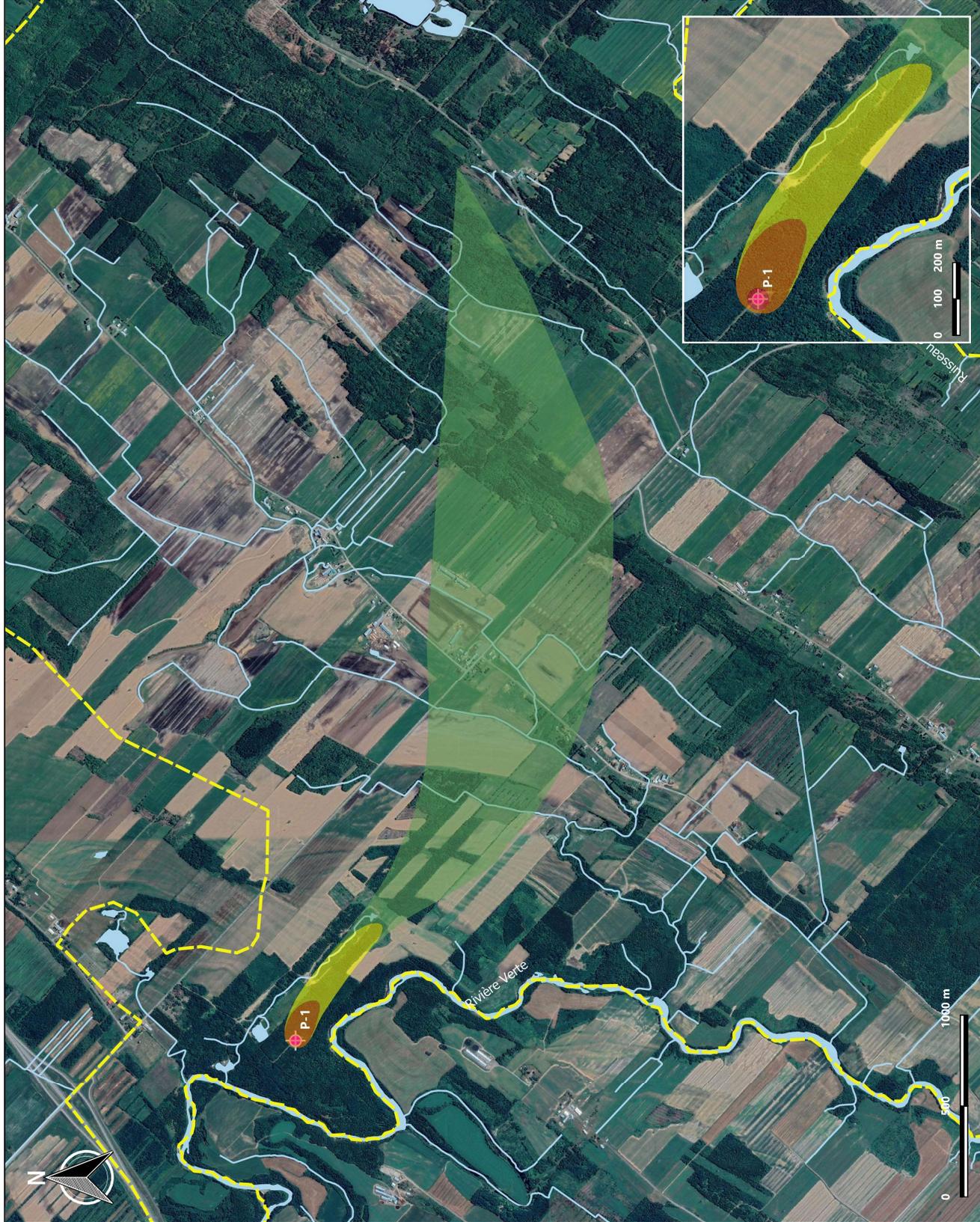
- LÉGENDE**
- Puits à l'étude
 - Cours d'eau
 - Étendue d'eau
 - Limite du modèle
- Aire de protection**
- Immédiate (30 m)
 - Bactériologique (200 jours)
 - Virologique (550 jours)
 - Aire d'alimentation

Nom du fichier : 18-6706-4327_fig11_aires_prot
 Fond photographique : Google
 Projection NAD83 MTMT

Échelle : 1 : 20 000 / 1 : 10 000	Date : 2019-10-17
Figure : 11	Dossier : 18-6706-4327
Dessinée par : Ujjaini Arai, M. Sc.	
Préparée par : Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	



1470, rue Esther Blondin, bur. 230
 Québec (Québec) G1Y 3N7
 Téléphone : 418 657-7999
 Sans frais : 1 877 657-7999
 Télécopieur : 418 657-5777



ANNEXE B

FIGURES 12 À 13



Figure 12 : Calcul de l'indice DRASTIC

Profondeur de la nappe (D)		Recharge (R)		Aquifère (A)		Sol (S)	
poids:		poids:		poids:		poids:	
Intervalle (m)	Cote	Intervalle (cm)	Cote	Lithologie	Cote	Lithologie	Cote
0 à 1,5	10	0 à 5	1	Shale massif	1 à 3	Sol mince ou roc	10
1,5 à 4,5	9	5 à 10	3	Roche ignée/métamorphique	2 à 5	Gravier	10
4,5 à 9	7	10 à 18	6	R. ignée/métamorphique altérée	3 à 5	Sable	9
9 à 15	5	18 à 25	8	Till	4 à 6	Tourbe	8
15 à 23	3	25 et +	9	Lits de grès, calcaire et shale	5 à 9	Argile fissurée	7
23 à 31	2			Grès massif	4 à 9	Loam sableux	6
31 et +	1			Calcaire massif	4 à 9	Loam	5
				Sable et gravier	4 à 9	Loam silteux	4
				Basalte	2 à 10	Loam argileux	3
				Calcaire karstique	9 à 10	Terre noire	2
						Argile	1

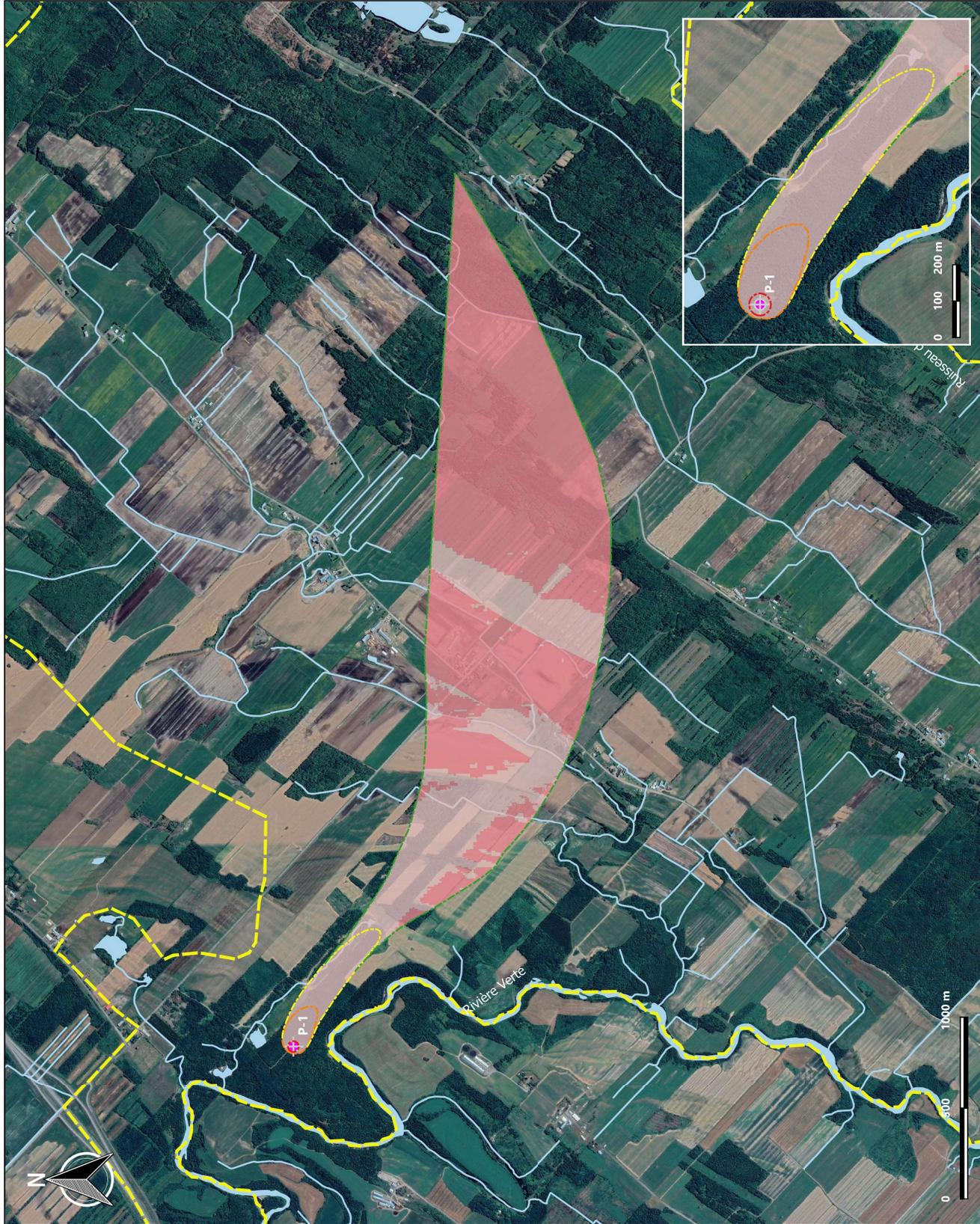
Zone vadose (I)		Conductivité hydraulique (C)	
poids:		poids:	
Lithologie	Cote	Intervalle (m/j)	Cote
Couche imperméable	1	0,04 à 4	1
Silt/argile	2 à 6	4 à 12	2
Shale	2 à 5	12 à 29	4
Calcaire	2 à 7	29 à 41	6
Grès	4 à 8	41 à 82	8
Lits de calcaire, grès et shale	4 à 8	82 et +	10
Sable et gravier avec silt et arg.	4 à 8		
R. métamorphiques/ignées	2 à 8		
Sable et gravier	6 à 9		
Basalte	2 à 10		
Calcaire karstique	8 à 10		

Topographie (T)		Indice DRASTIC	
poids:		Vulnérabilité	
Pente (%)	Cote	<= 100	Faible
0 à 2	10	<= 180	Moyenne
2 à 6	9	> 180	Élevée
6 à 12	5		
12 à 18	3		
18 et +	1		

$$I\text{ndice DRASTIC} = 5 * D + 4 * R + 3 * A + 2 * S + 1 * T + 5 * I + 3 * C$$

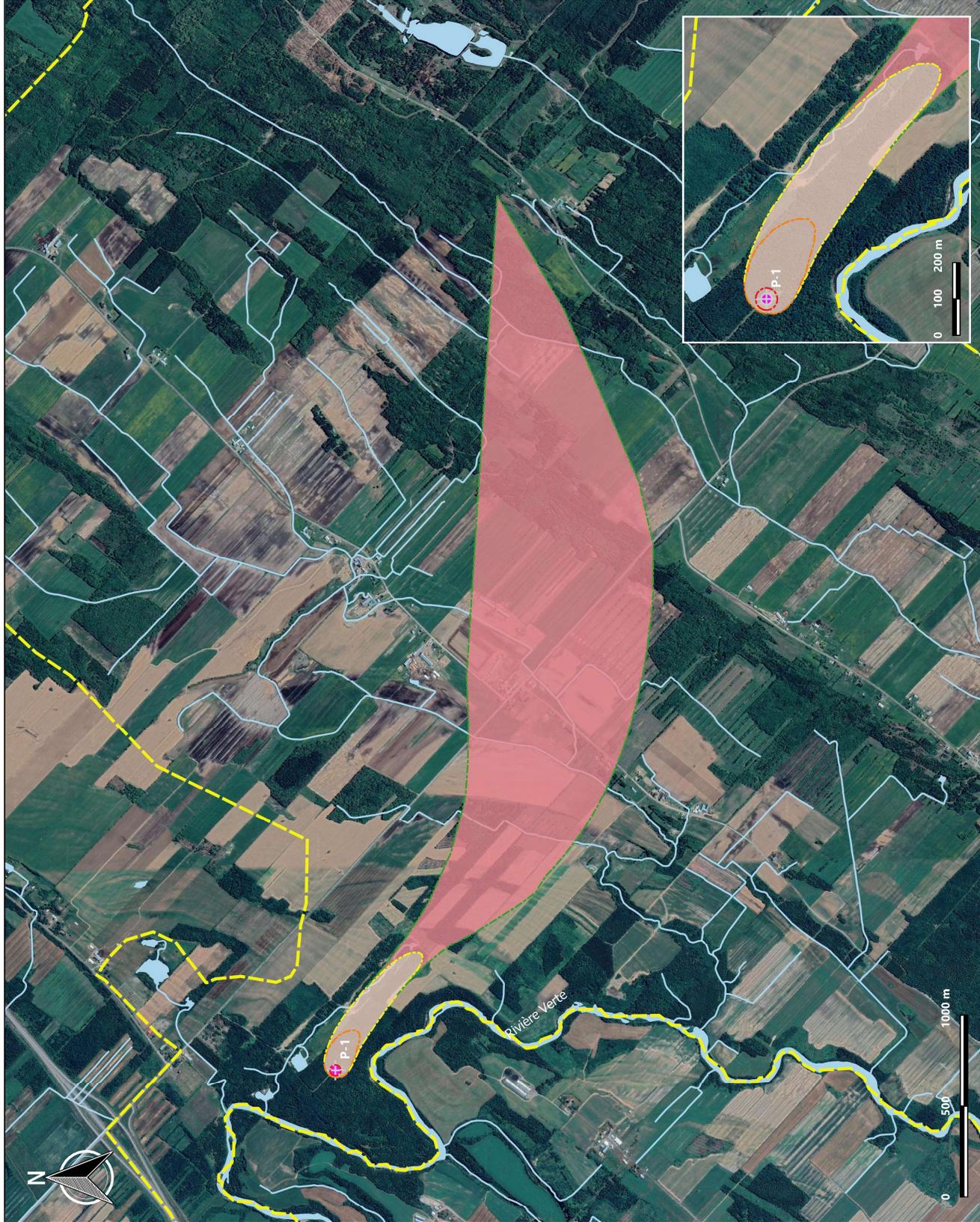
Municipalité de l'Isle-Verte	
Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1	
Distribution de la valeur de l'indice DRASTIC	
LÉGENDE	
	Puits à l'étude
	Cours d'eau
	Étendue d'eau
	Limite du modèle
Aire de protection	
	Immédiate (30 m)
	Bactériologique (200 jours)
	Virologique (550 jours)
	Aire d'alimentation
Indice DRASTIC	
	Indice Drastic faible [0-100]
	Indice Drastic moyen [101-180]
Nom du fichier : 18-6706-4327_fig13_dist_drastic Fonct. photographique : Google Projection NAD83 MTM7	

Échelle : 1 : 20 000 / 1 : 10 000	Date : 2019-10-17
Figure : 13	Dossier : 18-6706-4327
Dessinée par : Ullian Arai, M. Sc.	
Préparée par : Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	
 LNA HYDROGÉOLOGIE ENVIRONNEMENT	
1470, rue Esther Blondin, bur. 230 Québec (Québec) G1V 3N7 Téléphone : 418 657-7999 Sans frais : 1 877 657-7999 Télécopieur : 418 657-5777	



Municipalité de l'Isle-Verte	
Détermination des aires de protection et mise à jour de l'indice DRASTIC - Puits P-1	
Vulnérabilité à l'intérieur des aires de protection	
LÉGENDE	
	Puits à l'étude
	Cours d'eau
	Étendue d'eau
	Limite du modèle
Aire de protection	
	Immédiate (30 m)
	Bactériologique (200 jours)
	Virologique (550 jours)
	Aire d'alimentation
Indice DRASTIC	
	Indice DRASTIC faible [0-100]
	Indice DRASTIC moyen [101-180]
Nom du fichier : 18-6706-4327_fig14_drastric_1m Fond photographique : Google Projection NAD83 MTMT	

Échelle : 1 : 20 000 / 1 : 10 000	Date : 2019-10-17
Figure : 14	Dossier : 18-6706-4327
Dessinée par : Ullani Arai, M. Sc.	
Préparée par : Julie Gauthier, ing., M. Sc. A., hydrogéologue	
1470, rue Esther Blondin, bur. 230 Québec (Québec) G1Y 3N7 Téléphone : 418 657-7999 Sans frais : 1 877 657-7999 Télécopieur : 418 657-5777	





**HYDROGÉOLOGIE
ENVIRONNEMENT**

www.LNAQUA.com

QUÉBEC

1470, rue Esther-Blondin, bureau 230
Québec (Québec) G1Y 3N7
Tél. : 418 657-7999
Télééc. : 418 657-5999
Sans frais : 1 877 657-7999

BROMONT

65, rue du Pacifique Est, local 103
Bromont (Québec) J2L 1J4
Tél. : 450 266-4101
Télééc. : 450 919-1050
Sans frais : 1 877 657-7999