ÉTUDE DE L'IMPACT DES INSTALLATIONS SANITAIRES AUTONOMES ET DES SELS DE DÉGLAÇAGE SUR LA QUALITÉ D'EAU DES PUITS INDIVIDUELS

Présenté à la Communauté métropolitaine de Québec

Gabriel Bolduc Deraspe, M. ATDR, M. Sc. Biogéosciences

Gaétan Daigle, M. Sc. Statistique, P. Stat.

François Proulx, Ph.D., chimiste

Octobre 2018

Table des matières

Résumé VIII
1. **Mise en contexte** 1
2. **Zone d'étude** 2
3. **Méthodologie** 6
3.1. Estimation de la zone de vulnérabilité des puits 6
3.2. Sélection des variables et traitement des données 10
3.2.1 Sélection des variables dépendantes et indépendantes 10
3.2.2 Association des variables indépendantes aux puits 11
3.2.3 Classification des variables dépendantes et indépendantes 16
3.3. Analyses statistiques 17
4. **Résultats** 20
4.1 Modèle pour l'azote total 20
4.2 Modèle pour l'azote ammoniacal 21
4.3 Modèle pour les nitrites et nitrates 22
4.4 Modèle pour le phosphore total 23
4.5 Modèle pour l'*E. coli* 24
4.6 Modèle pour les chlorures 25
4.7 Modèle pour la conductivité 27
4.8 Modèle pour le sodium 28
4.9 Analyses considérant les niveaux de services du réseau routier 29
5. **Discussion** 30
5.1 Interprétation des résultats des analyses statistiques des modèles en lien avec les installations sanitaires autonomes 30
5.2 Interprétation des résultats des analyses statistiques des modèles en lien avec les sels de déglaçage 37
6. **Conclusion** 41
7. **Limites** 43
Bibliographie 46
Annexe 1 : Identification des sources autres que les ISA susceptibles de contaminer les puits par les traceurs sélectionnés 49
Annexe 2 : Résultats significatifs des approches univariées 50
Annexe 3 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout 63
Annexe 4 : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin versant de la prise d'eau sur la rivière Saint-Charles 66
Annexe 5 : Définitions des niveaux de service du réseau routier 68
Annexe 6 : Localisation des sources potentielles d'apports et concentration d'azote, de phosphore, d'*E. coli,* de chlorures et de sodium dans les puits testés du bassin versant 69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Méthodes choisies afin d'associer les variables sélectionnées aux puits testés 13
Tableau 2 : Formes des variables pour la réalisation des analyses statistiques 17
Tableau 3 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'azote total 21
Tableau 4 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'azote ammoniacal 22
Tableau 5 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle des nitrites et nitrates 23
Tableau 6 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle du phosphore total 24
Tableau 7 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'E. coli 25
Tableau 8 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle des chlorures 26
Tableau 9 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de la conductivité 27
Tableau 10 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle du sodium 29
Tableau 11 : Proportion de territoire développée et densité des ISA par km^2 dans les aires de vulnérabilité spécifiques par rapport à l'élévation relative des puits 35
Tableau 12 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les nitrites et nitrates 50
Tableau 13 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'azote total 52
Tableau 14 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'azote ammoniacal 54
Tableau 15 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le phosphore total 54
Tableau 16 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'*E. coli* 56
Tableau 17 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les chlorures 57
Tableau 18 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour la conductivité 59
Tableau 19 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le sodium 61

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des puits testés utilisés dans l'étude 3
Figure 2 : Réseau routier du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles 4
Figure 3 : Localisation des installations sanitaires autonomes et des réseaux d'égout du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles 5
Figure 4 : Délimitation de l'aire de vulnérabilité initiale des puits 7
Figure 5 : Délimitation des aires de vulnérabilité spécifiques des puits 8
Figure 6 : Calcul de l'élévation relative des puits 14
Figure 7 : Hydrostratigraphie du bassin versant 32
Figure 8 : Zones de vulnérabilité du RCI 2016 32
Figure 9 : Pentes de la zone 2 du RCI 2016 33
Figure 10 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 1) 63
Figure 11 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 2) 64
Figure 12 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 3) 65
Figure 13 : Indice DRASTIC du bassin versant 66
Figure 14 : Confinement des aquifères de roc fracturé du bassin versant 66
Figure 15 : Pentes du bassin versant 67
Figure 16 : Élévation du bassin versant 67
Figure 17 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 1 69
Figure 18 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 2 70
Figure 19 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 3 71
Figure 20 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 4 72
Figure 21 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 5 73
Figure 22 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 6 74
Figure 23 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 7 75
Figure 24 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 1 76
Figure 25 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 2 77
Figure 26 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 3 78
Figure 27 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 4 79
Figure 28 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 5 80
Figure 29 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 6 81
Figure 30 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 7 82
Figure 31 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 1 83
Figure 32 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 2 84
Figure 33 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 3 85
Figure 34 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 4 86
Figure 35 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 5 87

Figure 36 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 6 88
Figure 37 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 7 89
Figure 38 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 1 90
Figure 39 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 2 91
Figure 40 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 3 92
Figure 41 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 4 93
Figure 42 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 5 94
Figure 43 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 6 95
Figure 44 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 7 96
Figure 45 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 1..... 97
Figure 46 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 2..... 98
Figure 47 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 3..... 99
Figure 48 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 4..... 100
Figure 49 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 5..... 101
Figure 50 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 6..... 102
Figure 51 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 7..... 103
Figure 52 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 1 104
Figure 53 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 2 105
Figure 54 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 3 106
Figure 55 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 4 107
Figure 56 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 5 108
Figure 57 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 6 109
Figure 58 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 7 110
Figure 59 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 1..... 111
Figure 60 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 2..... 112
Figure 61 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 3..... 113
Figure 62 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 4..... 114
Figure 63 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 5..... 115
Figure 64 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 6..... 116
Figure 65 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 7..... 117

Lexique

Aire de vulnérabilité du puits : portion du territoire à proximité d'un puits à l'intérieur de laquelle les contaminants qui s'infiltrent dans les sols sont susceptibles de dégrader la qualité d'eau du puits.

Aire de vulnérabilité initiale : première aire de vulnérabilité tracée (voir Figure 4).

Aires de vulnérabilité spécifiques : aires de vulnérabilité tracées à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité initiale (voir Figure 5).

Aire de vulnérabilité maximale : aire de vulnérabilité spécifique possédant la superficie la plus grande.

Azote total : somme de l'azote présent sous toutes ses formes.

Dépôt de matériaux secs : lieu d'élimination pour les résidus broyés ou déchiquetés qui ne sont pas fermentescibles et qui ne contiennent pas des matières dangereuses mentionnées dans le paragraphe e de l'article 1, le bois tronçonné, les gravats et plâtras, les pièces de béton et de maçonnerie et les morceaux de pavage (Règlement Q-2, r.13).

Dépotoir : lieu d'élimination où l'on déposait des déchets à ciel ouvert sur le sol au 10 mai 1978 et qui n'est pas conforme aux normes prévues aux sections IV, IX et X du Règlement (Règlement Q-2, r.13).

Dispositif étanche : réservoir étanche destiné à recevoir les eaux noires et parfois également les eaux grises.

Dispositif non étanche : ouvrage destiné à répartir l'effluent d'un système de traitement primaire ou secondaire en vue d'en compléter l'épuration par infiltration dans le terrain récepteur (Règlement Q-2, r.22).

Hydrofaciès : composé de matériau géologique (dépôts ou roches) aux propriétés hydrauliques similaires et ce, sans égard à son mode de déposition (Talbot Poulin et al., 2013).

Indice DRASTIC : indice de vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination estimé à l'aide de sept facteurs : la profondeur de l'aquifère, la recharge, le milieu aquifère, le type de sol, la pente, l'impact de la zone vadose et la conductivité hydraulique de l'aquifère.

Niveaux de services : type d'entretien (incluant la quantité d'abrasifs et de sels de déglaçage épandue) durant la période hivernale.

Phosphore total : somme des fractions dissoute et particulaire du phosphore.

Profondeur du puits : profondeur du forage des puits tubulaires.

Puits individuel : puits destiné à desservir une résidence isolée.

Résidence isolée : habitation unifamiliale ou multifamiliale comprenant 6 chambres à coucher ou moins et qui n'est pas raccordée à un système d'égout autorisé en vertu de l'article 32 de la Loi sur la qualité de l'environnement; est assimilé à une résidence isolée tout autre bâtiment qui rejette exclusivement des eaux usées et dont le débit total quotidien est d'au plus 3 240 litres (MDDELCC, 2015).

Territoire développé : tout secteur comportant des développements de nature anthropique (bâtiments, pelouses, routes, carrières et sablières, etc.).

Traceurs sélectionnés : les huit traceurs sélectionnés dans la présente étude, soit l'azote total, l'azote ammoniacal, les nitrites et nitrates, le phosphore total, les bactéries *E. coli*, la conductivité, les chlorures et le sodium.

Tubage du puits : structure cylindrique possiblement constituée de divers matériaux (acier, acier inoxydable, plastique, etc.) permettant de retenir les dépôts meubles.

Zone vadose : zone non saturée du sol contenant principalement de l'air et une faible proportion d'eau attachée aux parois des cavités.

Résumé

Les installations sanitaires autonomes (ISA) et les sels de déglaçage épandus sur le réseau routier sont actuellement considérés comme des sources majeures de contamination des puits du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles, même si en réalité il s'avère très difficile d'établir la preuve directe de ces relations.

Afin d'améliorer les connaissances en la matière et d'aider à la prise de décision, la présente étude s'est donnée pour objectif, dans un premier temps, de déterminer s'il est plausible que les ISA affectent la qualité d'eau des puits individuels du secteur et, le cas échéant, d'identifier les caractéristiques du territoire, des puits et des ISA qui sont corrélées à la présence de traceurs sélectionnés (azote total, azote ammoniacal, nitrites et nitrates, phosphore total et bactéries *E. coli*) dans les puits. Dans un second temps, l'étude s'est intéressée à l'impact potentiel des sels de déglaçage sur la qualité d'eau de ces mêmes puits en utilisant les concentrations en chlorures et en sodium, ainsi que la conductivité de l'eau comme traceurs. Finalement, les analyses statistiques ont cherché à valider l'adéquation entre les zones du Règlement de contrôle intérimaire (RCI) de 2016 et l'apparente vulnérabilité des puits à la contamination, une question demeurée sans réponse évidente.

Une campagne d'échantillonnage ayant été réalisée en 2016 et 2017 par la Ville de Québec et l'OBV de la Capitale, il a été possible de disposer des données nécessaires pour réaliser l'étude sur un échantillon de 1452 puits tubulaires auquel un ensemble de variables ont été associées. Les résultats générés par les analyses statistiques ont permis de constater qu'il apparait tout à fait plausible que les ISA et les sels de déglaçage soient responsables d'une proportion appréciable de la concentration des traceurs ciblés dans les puits, ainsi que d'identifier certains des éléments influençant la concentration ou la présence de ces traceurs. Du côté des traceurs liés aux ISA, il apparait que la variance de l'impact est principalement liée à la proportion de territoire développée, à la densité et au nombre d'ISA, aux précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement, ainsi qu'à l'épaisseur moyenne des dépôts meubles. Pour ce qui est des traceurs liés aux sels de déglaçage, la variabilité de leur impact semble principalement affectée par la densité du réseau routier et la proportion de territoire développée.

1. Mise en contexte

Le présent rapport fait suite à un projet de recherche intitulé *Étude de l'impact des installations sanitaires autonomes sur la qualité d'eau des puits individuels* (Bolduc Deraspe, 2017) qui a été réalisé dans le cadre d'un essai de maîtrise en Biogéosciences de l'environnement.

Cette première étude s'était donnée pour objectif de déterminer à l'aide d'analyses statistiques s'il est plausible que les installations sanitaires autonomes (ISA) du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles affectent la qualité d'eau des puits tubulaires et, le cas échéant, d'identifier les caractéristiques du territoire, des puits et des ISA qui sont corrélées à la présence des traceurs sélectionnés (azote total, azote ammoniacal, nitrites et nitrates, phosphore total et bactéries *E. coli*) dans les puits.

Malgré le pouvoir explicatif très inégal des différents modèles d'analyse (2,4 % à 73,3 %), situation peu surprenante compte tenu des limites de l'étude (indisponibilité ou imprécision de plusieurs variables explicatives, délimitation approximative des aires de vulnérabilité des puits, localisation approximative des puits et des ISA) et des réactions très différentes affectant les traceurs sélectionnés, les résultats des analyses ont permis d'observer l'incidence de plusieurs variables sur la concentration des traceurs ciblés dans les puits de la zone d'étude. Cela a notamment été le cas de la proportion de territoire développée, de la présence de cultures ou de grands jardins dans l'aire de vulnérabilité des puits, de la longueur du tubage, du nombre et de la densité des ISA, ainsi que des précipitations totales et de la température moyenne au cours des 30 jours précédant l'échantillonnage des puits.

Dans l'optique de profiter des données rendues disponibles par la campagne de caractérisation des puits de 2017 et de minimiser l'incidence des limites de la première étude, il a été jugé souhaitable de répéter les analyses statistiques afin de renforcer la validité des résultats générés et possiblement d'observer de nouvelles relations qui auraient pu ne pas s'être manifestées lors des premières analyses en raison de la taille plus faible de l'échantillon.

Le premier projet, réalisé à l'aide d'un échantillon de 630 puits testés en 2016, a ainsi été bonifié par l'ajout de 822 nouveaux puits testés en 2017 pour en arriver à un total de 1452 puits. Aussi, en plus de répéter les analyses visant à évaluer l'impact potentiel des ISA sur la qualité d'eau des puits individuels, la présente étude s'est intéressée à l'impact potentiel des sels de déglaçage sur la qualité d'eau de ces mêmes puits.

2. Zone d'étude

Le bassin versant (BV) de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles (349,5 km^2) se situe au nord-ouest de la ville de Québec et chevauche le territoire de nombreuses entités administratives soit les municipalités des cantons-unis de Stoneham-et-Tewkesbury, de Lac-Beauport, de Saint-Gabriel-de-Valcartier, de Shannon et de Sainte-Brigitte-de-Laval, ainsi que les villes de Québec et de Lac-Delage et le territoire de Wendake (Figure 1).

Le territoire est occupé principalement par les milieux boisés (70,89 %), les milieux ouverts (4,30 %) et les multiples lacs, rivières et autres milieux hydriques (2,61 %). Les autres espaces du territoire sont surtout des milieux résidentiels et des zones de villégiature (stations de ski, terrains de golf, etc.), mais on y retrouve également d'autres usages à l'étendue plus restreinte comme les carrières et sablières, les activités agricoles, les commerces et les industries, les anciens sites d'enfouissement, ainsi que les cimetières de voitures (APEL, 2013). Le territoire compte également près de 559,5 km de réseau routier (Figure 2).

Malgré le fait que la situation ait quelque peu évolué depuis, en raison du raccordement à l'égout de certains secteurs et de la construction de nouvelles propriétés munies d'ISA, l'APEL (2009) évoque que 40,6 % des habitations du bassin versant n'étaient pas reliées à un système d'égout lors de la rédaction de leur rapport, une situation qui explique le nombre relativement élevé d'ISA qu'on retrouve à l'intérieur des limites de la zone d'étude (~ 5 250 unités). Les réseaux d'égout sont principalement concentrés dans le sud du bassin versant, alors que les secteurs plus au nord s'appuient surtout sur les ISA pour traiter les eaux usées (Figure 3). Aussi, il est estimé qu'il y a approximativement 4 980 puits individuels qui se trouvent sur le territoire du bassin versant (Figure 1).

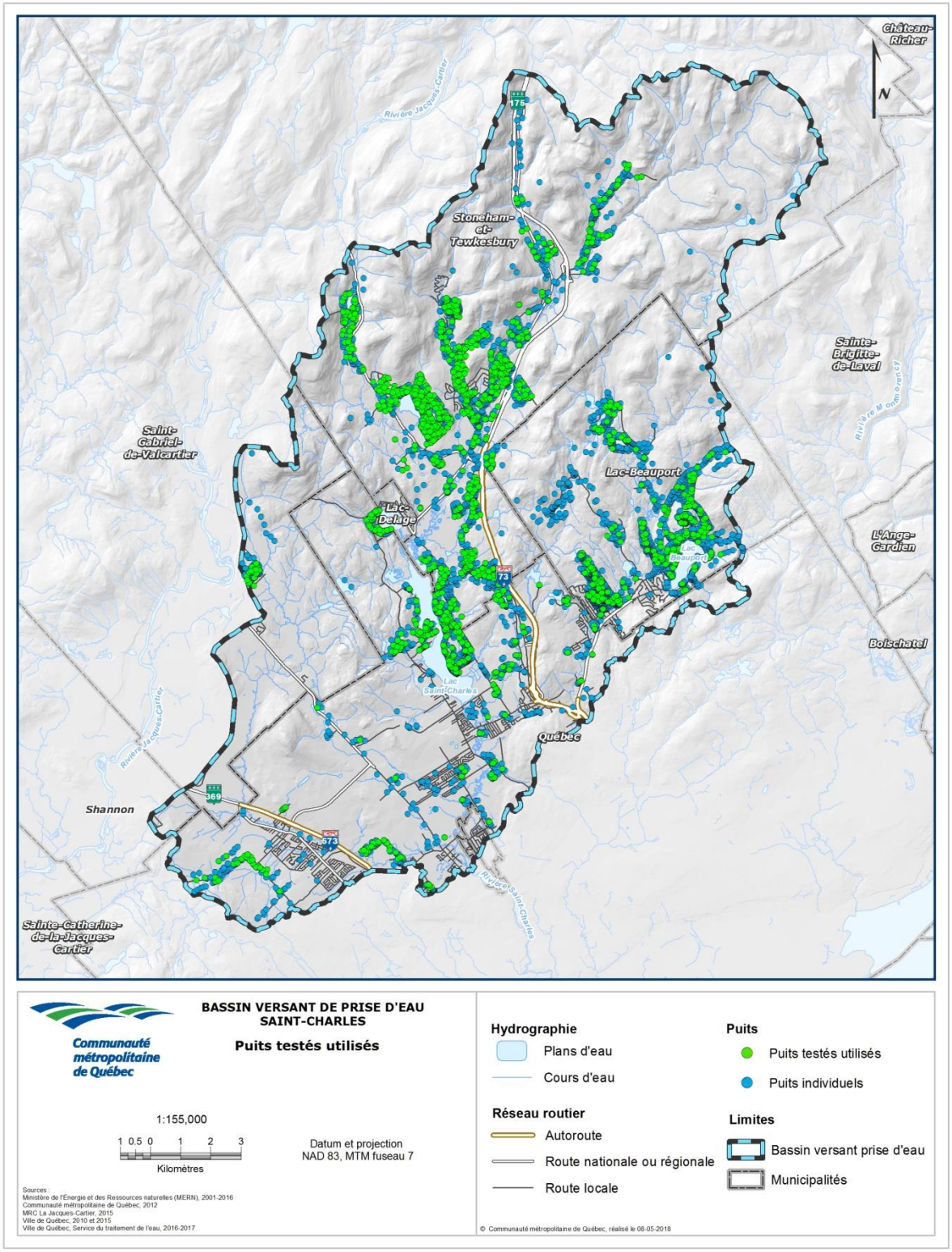


Figure 1 : Répartition des puits testés utilisés dans l'étude

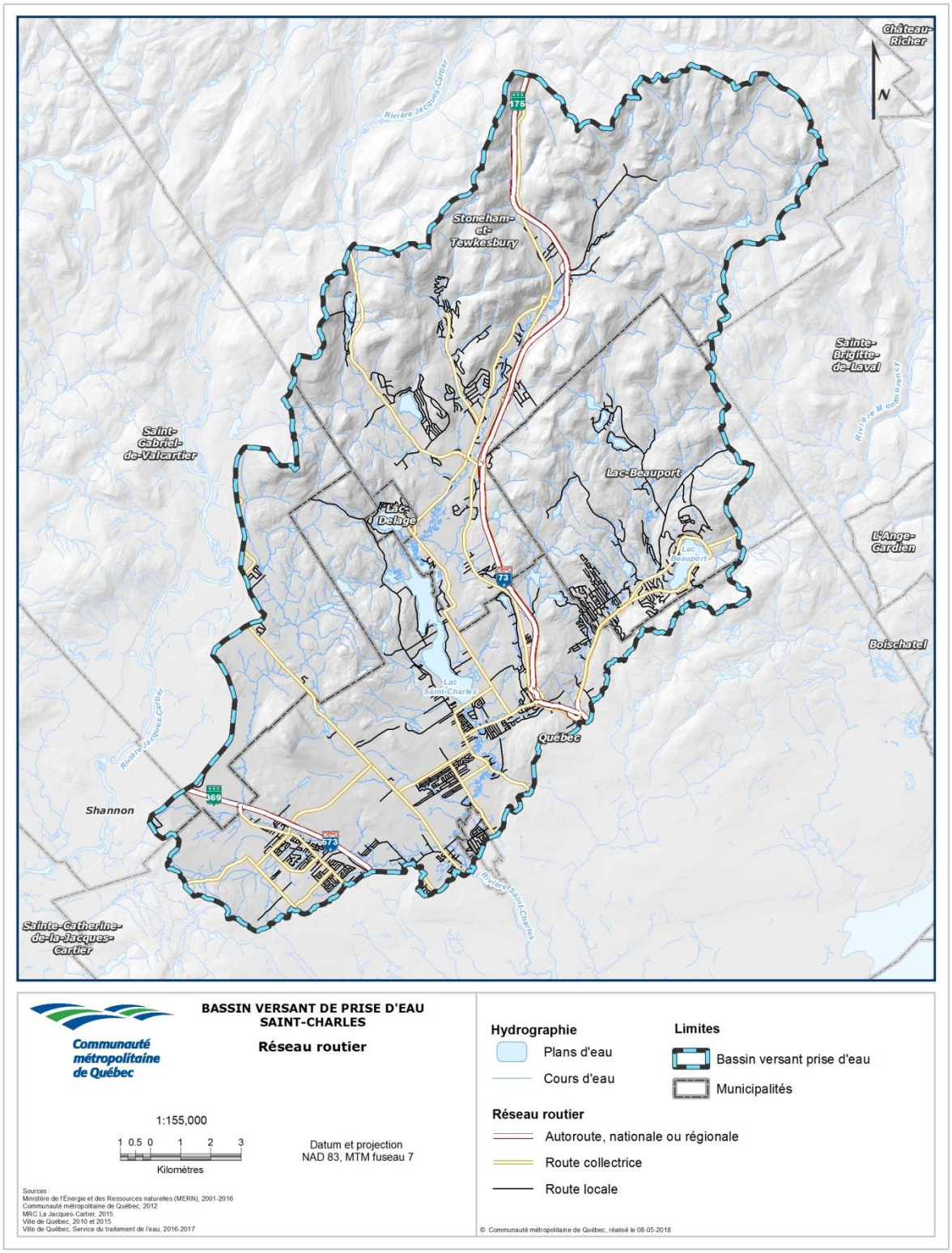


Figure 2 : Réseau routier du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles

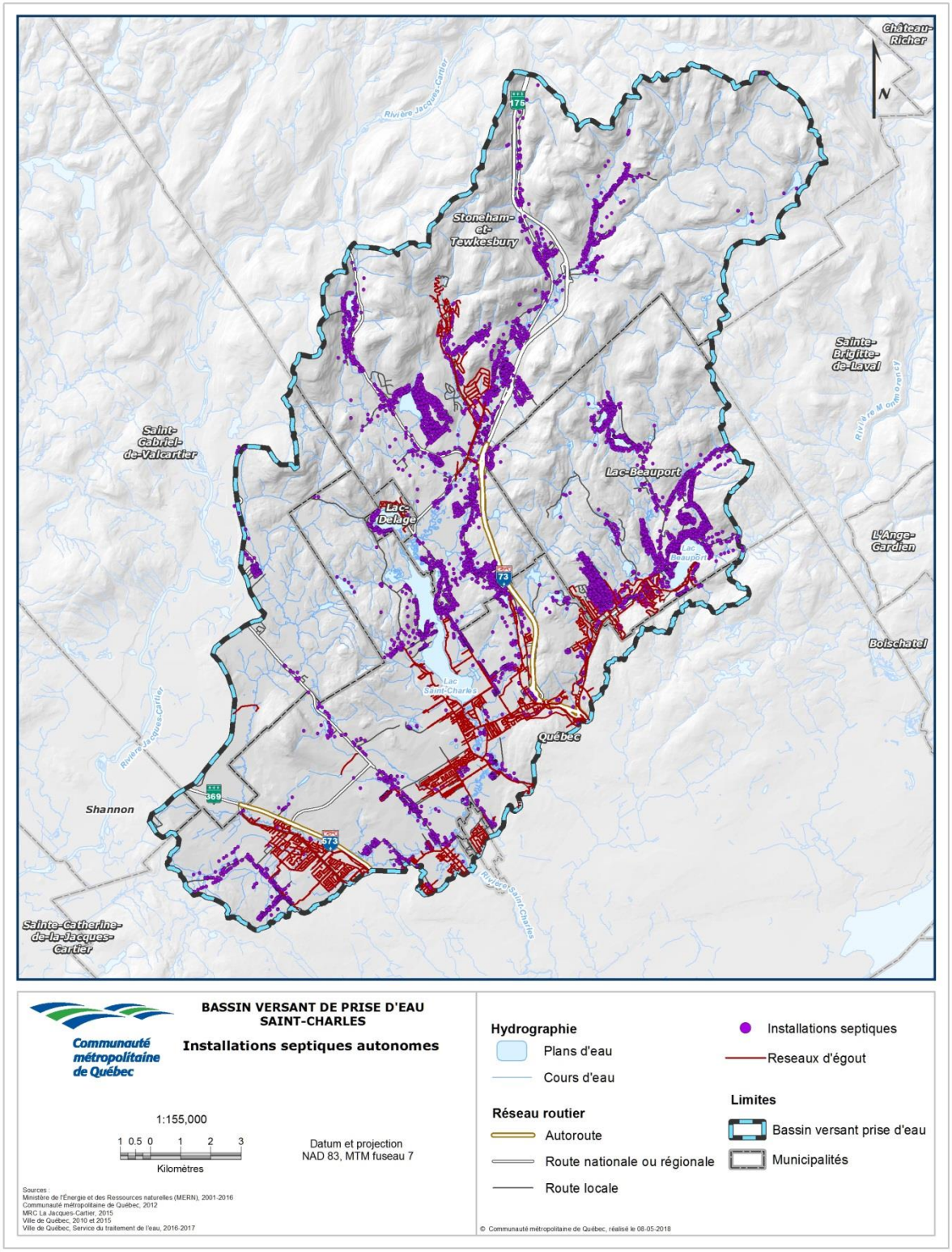


Figure 3 : Localisation des installations sanitaires autonomes et des réseaux d'égout du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles

3. Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs de l'étude, c'est-à-dire de déterminer s'il est plausible que les ISA du bassin versant et les sels de déglaçage qui y sont épandus affectent la qualité d'eau des puits tubulaires et, le cas échéant, d'identifier les caractéristiques du territoire, des puits, des ISA et du réseau routier qui sont corrélées à la présence des traceurs sélectionnés dans les puits (azote total, azote ammoniacal, nitrites et nitrates, phosphore total, bactéries *E. coli*, chlorures, conductivité et sodium), la méthodologie suivante a été établie.

3.1. Estimation de la zone de vulnérabilité des puits

Puisque les contaminants présents dans les puits ne sont pas nécessairement originaires uniquement du terrain auquel le puits appartient et qu'ils sont particulièrement susceptibles de provenir des secteurs adjacents lorsque le puits est situé dans un lieu possédant des pentes prononcées, il fut décidé de délimiter approximativement des aires de vulnérabilité propres à chacun des puits tout en faisant varier leur étendue en fonction de la force de la pente afin d'évaluer le risque de contamination engendré par certains éléments du territoire et d'utiliser ces zones pour associer certaines variables aux puits.

Les contaminants qui s'infiltrent en aval hydraulique du puits ne représentent qu'un faible risque pour la qualité de ses eaux, ce qui explique pourquoi les aires de vulnérabilité s'étirent principalement vers l'amont. Néanmoins, en raison du caractère accidenté du secteur à l'étude (plusieurs talus et cuvettes), les éléments polluants situés à proximité des puits dans la zone en aval pourraient tout de même parvenir à affecter la qualité de ses eaux si la topographie du terrain y est propice. Afin de tenir compte de cette possibilité, il a été décidé de faire varier la longueur des aires de vulnérabilité dans la zone en aval selon la pente de cette zone. L'étendue de l'aire de vulnérabilité en aval du puits varie ainsi entre 15 mètres, dans les secteurs possédant une pente de plus de 30 %, à 40 mètres dans les secteurs possédant une pente de moins de 2 %.

Les aires de vulnérabilité initiales (limites de la zone pouvant potentiellement influencer la qualité d'eau du puits; Figure 4) ont été délimitées manuellement sur ArcGIS pour chacun des puits en utilisant l'hydrologie surfacique et linéaire de la BDTQ, les aires de drainage et les réseaux d'écoulement d'une précision de 2 mètres, les courbes de niveau d'une précision de 5 mètres, un modèle numérique d'élévation au 5 mètres, ainsi qu'une orthophotographie datant de 2013. Cette méthode se base

principalement sur le postulat que les eaux souterraines s'écoulent selon une trajectoire qui respecte la topographie de surface et ignore la présence de matériaux imperméables et de chemins d'écoulement préférentiels. Bien que ce dernier puisse s'avérer erroné dans certains cas, il a été jugé qu'en l'absence de courbes piézométriques suffisamment précises, il était adéquat de se fier à la topographie de surface. Aussi, étant donné que les éléments potentiellement polluants, même situés à proximité du puits, sont très peu susceptibles d'avoir une incidence sur celui-ci lorsqu'ils se trouvent dans une aire de drainage différente ou de l'autre côté d'un cours d'eau (communication personnelle, René Lefebvre et Jean-Marc Ballard, décembre 2016), les zones de vulnérabilité ont été limitées aux aires de drainage respectives des puits.

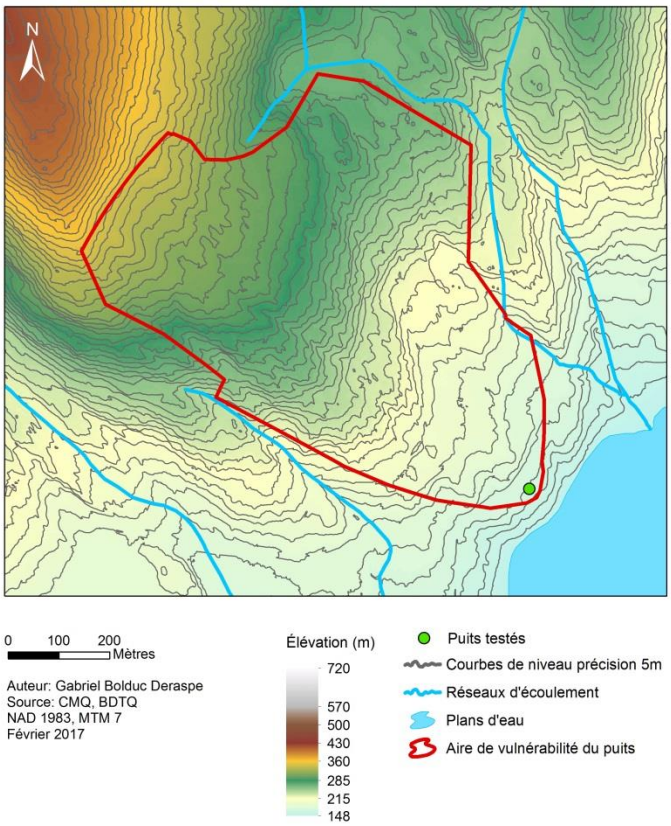


Figure 4 : Délimitation de l'aire de vulnérabilité initiale des puits

Chacune des aires de vulnérabilité initiales s'étendait jusqu'aux limites de l'aire d'approvisionnement du puits ou jusqu'à un maximum d'environ 1 050 mètres. Cette dernière décision, approuvée par les hydrogéologues consultés, s'explique notamment par le fait que même les panaches de contaminants des sites d'enfouissement, qui possèdent souvent des concentrations élevées en nitrates, ne dépassent

que rarement cette distance (Christensen et al., 1994). Il est donc apparu souhaitable de s'y limiter afin d'éviter la délimitation d'aires de vulnérabilité trop étendues.

Par la suite, un ensemble de zones tampons ont été délimitées à partir de la position du puits et circonscrites à l'intérieur des limites des aires de vulnérabilité initiales (voir Figure 5). En procédant de la sorte, il a été possible de générer un total de 12 aires de vulnérabilité spécifiques qui ont servi à calculer le nombre, la densité par km^2 et l'âge moyen des ISA comprises à l'intérieur des chacune de ces aires, ainsi que la proportion de territoire développée, la densité du réseau routier et la densité des différents niveaux de services à associer aux puits.

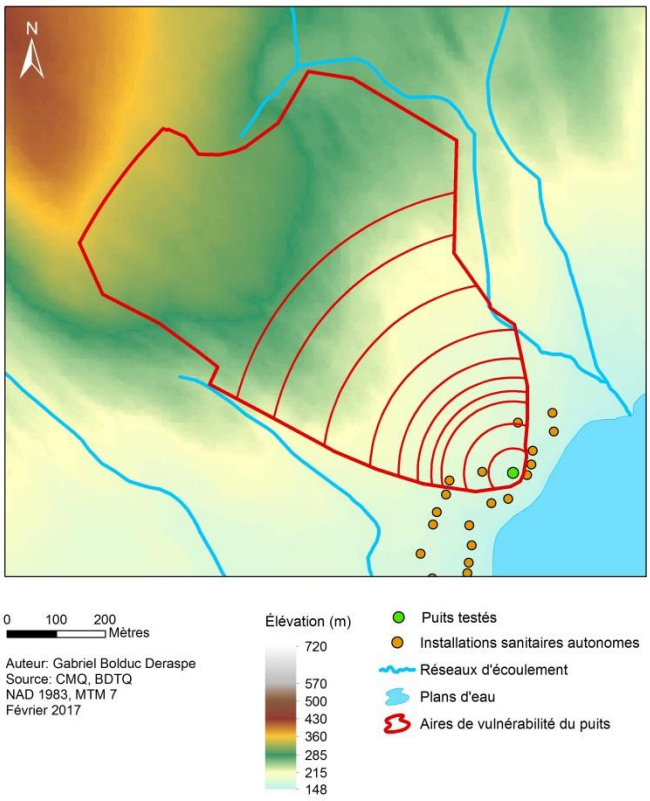


Figure 5 : Délimitation des aires de vulnérabilité spécifiques des puits

Quatre des aires de vulnérabilités spécifiques possèdent un rayon fixe identique pour tous les puits, soit 50, 100, 500 et 1 000 mètres, alors que les 8 autres possèdent un rayon (d) qui a été calculé à l'aide de l'équation suivante fournie par des hydrogéologues de l'INRS :

$$V = (k/n) * p$$
$$d = V * t$$

Où **V** est la vitesse de déplacement de l'eau souterraine, **k** la conductivité hydraulique en m/s, **n** la porosité du sol, **d** le rayon de l'aire de vulnérabilité, **p** la classe de pente de la zone en amont et **t** le temps de survie moyen des bactéries *E. coli* suite à leur infiltration dans le sol.

La consultation de la littérature scientifique par rapport au temps de survie et aux distances parcourues dans les sols et les eaux souterraines par des bactéries *E. coli*, ainsi que de la température des eaux souterraines de la zone d'étude, a permis de déterminer comme souhaitable d'utiliser 90 jours comme valeur de temps dans la formule (voir Bolduc Deraspe, 2017). Bien que cette valeur puisse apparaître faible par rapport aux résultats de certaines études, il est nécessaire de garder à l'esprit que le but de l'exercice n'était pas de protéger les puits en tenant compte du principe de précaution, ce qui exigerait une valeur de 200 jours selon le RPEP, mais plutôt de déterminer dans quelles aires les bactéries *E. coli* qui s'infiltrent dans le sol ont une probabilité acceptable d'être repérées lors de l'échantillonnage des eaux des puits testés.

Compte tenu de l'épaisseur des dépôts meubles relativement faible à l'intérieur des aires de vulnérabilité initiales (6,92 mètres en moyenne), il a été jugé souhaitable d'utiliser dans la formule la conductivité hydraulique moyenne estimée du roc fracturé du secteur, soit 1×10^{-5} m/s. La valeur utilisée pour la pente est pour sa part celle de la classe de pente associée au puits dans l'aire de vulnérabilité maximale. Finalement, huit valeurs de porosité différentes (1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 6 %, 7 % et 8 %) sont utilisées pour générer un nombre égal d'aires de vulnérabilité.

Afin d'éviter la création d'aires de vulnérabilité spécifiques extrêmement restreintes ou encore beaucoup trop larges, les valeurs calculées à l'aide de la formule ont été limitées à un minimum de 40 mètres, dans le but de prendre minimalement en compte l'ISA de la propriété, et à un maximum de 1 000 mètres, pour ne pas dépasser les limites des aires de vulnérabilité initiales. Néanmoins, en raison de cette limitation volontaire et du fait que certaines aires de vulnérabilité initiales possèdent des dimensions inférieures à 1 000 mètres, il est fréquent de voir plusieurs aires de vulnérabilité d'un même

puits posséder une superficie identique. C'est d'ailleurs ce qui explique que sur la Figure 5 il n'est possible d'observer que 11 des 12 aires de vulnérabilité spécifiques.

3.2. Sélection des variables et traitement des données

3.2.1 Sélection des variables dépendantes et indépendantes

De nombreux éléments sont susceptibles de jouer un rôle important dans le risque de contamination des puits par les effluents des ISA et les sels de déglaçage. Le départage initial des variables d'importance de celles possédant une faible incidence a été réalisé à l'aide de la littérature scientifique (voir Bolduc Deraspe, 2017) et de l'avis de divers experts.

Compte tenu des éléments présents dans les effluents des ISA, des éléments testés lors de l'échantillonnage des puits et des traceurs présentés comme les plus intéressants par la littérature scientifique (voir section 3.6 de Bolduc Deraspe, 2017), les variables dépendantes sélectionnées pour les ISA ont été les suivantes : azote total, nitrites et nitrates, azote ammoniacal, phosphore total et bactéries *E. coli*. En ce qui a trait aux sels de déglaçage, le choix des variables dépendantes s'est arrêté sur les chlorures, la conductivité et le sodium.

Au niveau des variables indépendantes, la consultation de la littérature scientifique a permis de faire une première sélection comprenant la composition du sol, l'épaisseur des dépôts meubles, la recharge annuelle des aquifères, la hauteur de la nappe phréatique, le degré de confinement des aquifères, l'indice DRASTIC, la pente du terrain, la densité des ISA, l'âge des ISA, le type d'ISA, l'état des ISA, la distance séparant le puits des dispositifs non étanches avoisinants, l'élévation des puits, l'âge des puits, la profondeur des puits, la longueur du tubage des puits, la hauteur de la colonne d'eau des puits, le niveau de service du réseau routier, la pente moyenne du réseau routier, la densité du réseau routier, la complexité du réseau routier (densité des croisements et des courbes prononcées), ainsi que la température moyenne et la somme des précipitations totales durant la période précédant l'échantillonnage. Néanmoins, suite à la consultation des données disponibles et à la prise en compte de l'avis d'hydrogéologues, certaines de ces variables ont dû être abandonnées par choix (impact trop faible sur les puits de la zone d'étude) ou par contrainte (indisponibilité des données nécessaires ou corrélation évidente avec une autre variable sélectionnée), alors que les variables conservées ont été associées aux puits selon les méthodes suggérées par les experts consultés (voir Tableau 1).

Néanmoins, avant de procéder à l'association des variables aux puits concernés, il a été nécessaire d'effectuer un tri dans certaines données afin de limiter les biais. Lorsque l'information était disponible dans la base de données des ISA fournie par l'APEL, les installations à vidange totale ont été éliminées puisque, mis à part celles qui pourraient être devenues non étanches avec le temps, ces installations ne devraient pas émettre d'effluents qui pourraient affecter de manière appréciable les eaux souterraines au niveau des traceurs sélectionnés. Il aurait donc été peu souhaitable de les considérer de la même manière que les autres ISA. Une décision identique a été prise pour les ISA à vidange périodique puisqu'elles ne permettent l'infiltration dans les sols que des eaux ménagères, alors que les eaux noires sont recueillies dans une fosse étanche et vidangées régulièrement. Or, en raison de l'adoption du *Règlement sur la concentration en phosphore dans certains produits de nettoyage* qui limite fortement la concentration de ce nutriment dans les produits à usage domestique, ces ISA ne représentent que peu de danger pour les eaux souterraines au niveau des traceurs sélectionnés.

Aussi, dans la base de données des puits testés, les puits de surface et les pointes filtrantes ont été éliminés en raison de leur vulnérabilité à la contamination généralement supérieure à celle des puits tubulaires (Simpson, 2015).

3.2.2 Association des variables indépendantes aux puits

De nombreuses données utilisées dans l'étude (contexte hydrostratigraphique, épaisseur des dépôts meubles, confinement des aquifères, recharge annuelle moyenne des aquifères et indice DRASTIC) sont tirées du projet PACES-CMQ et représentent par le fait même des moyennes de portions assez larges du territoire, chaque cellule (pixel d'information distinct) couvre une superficie de 62 500 m^2. De plus, ces cellules doivent être considérées en groupe et non individuellement pour en tirer une information fiable. La consultation d'une seule cellule, par exemple celle à la position exacte du puits, ne permettrait souvent pas d'associer une information valable au puits concerné. Afin de tenir compte de ces limites et du fait que les contaminants qui s'infiltrent n'importe où à l'intérieur des aires de vulnérabilité des puits représentent un risque de contamination pour ces derniers, il est apparu préférable d'associer les variables du PACES à ces aires plutôt qu'à la position exacte du puits.

Ainsi, pour l'épaisseur des dépôts meubles, la recharge annuelle moyenne des aquifères et l'indice DRASTIC, une moyenne a été calculée à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (aire de vulnérabilité spécifique la plus large) de chacun des puits. Néanmoins, puisque certaines de ces aires ne couvrent que de faibles superficies (deux ou trois cellules du PACES), il a été nécessaire de comparer les

résultats obtenus avec une seconde moyenne réalisée dans une zone tampon d'un rayon de 450 mètres à partir du puits. Ces zones étant suffisamment larges pour considérer de huit à neuf cellules, il a été possible de comparer les moyennes qui leur étaient associées aux moyennes obtenues pour les aires de vulnérabilité maximales afin de s'assurer que les différences importantes entre les deux résultats étaient justifiées. Dans le cas contraire, une nouvelle moyenne était générée à l'aide du résultat des deux analyses.

Du côté du contexte hydrostratigraphique, il a été jugé souhaitable de le transformer en variables dichotomiques en créant une classe pour chacun des types possibles et en inscrivant la valeur 1 lorsque le type était présent ou 0 lorsqu'il était absent. Les types étaient considérés présents lorsqu'ils occupaient 20 % ou plus de la surface de l'aire de vulnérabilité maximale du puits ou lorsqu'ils se trouvaient à moins de 250 mètres du puits. Cette dernière possibilité est apparue souhaitable en raison de la faible précision des données du PACES et du fait que la majorité du territoire à l'étude est constituée d'un seul type d'hydrofaciès (voir Figure 7). Cette méthode a donc permis de mieux différencier les puits qui possédaient des hydrofaciès d'un type différent à proximité.

Le confinement des aquifères a été associé aux puits en calculant le pourcentage de couverture des surfaces confinées, semi-confinées ou discontinues à l'intérieur des aires de vulnérabilité maximales de chacun des puits. Néanmoins, afin de rendre les informations comparables entre elles et exploitables dans des analyses statistiques, il a été nécessaire de les regrouper en quatre catégories de la manière suivante :

- Catégorie 1 : aire confinée à 85 % ou plus.
- Catégorie 2 : aire confinée à 50 % ou plus, ou bien combinaison de confinée, semi-confinée et discontinue à 85 % ou plus.
- Catégorie 3 : aire confinée à 15 % ou plus, ou bien combinaison de confinée, semi-confinée et discontinue à 50 % ou plus.
- Catégorie 4 : tout confinement de nature inférieure.

Tableau 1 : Méthodes choisies afin d'associer les variables sélectionnées aux puits testés

Variables sélectionnées	Méthodes d'association aux puits
Contexte hydrostratigraphique	Types présents à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et à proximité du puits.
Épaisseur des dépôts meubles	Moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale.
Confinement des aquifères	Division en 4 types selon le pourcentage de superficie couverte par chacun des types de confinement.
Recharge annuelle moyenne des aquifères	Moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale.
Indice DRASTIC	Moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale.
Pente moyenne du terrain	Moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et de l'aire de vulnérabilité de 100 mètres.
Densité des ISA par km^2	Densité à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques.
Nombre d'ISA	Nombre à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques.
Âge des ISA	Moyenne à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques.
Âge des puits	Données des puits ou âges des propriétés.
Élévation réelle des puits	Élévation à la position exacte des puits.
Élévation relative des puits	Élévation relative dans chacune des aires de drainage respectives.
Longueur du tubage	Donnée du puits ou interprété grâce à l'épaisseur des dépôts meubles lorsque la donnée n'était pas disponible.
Profondeur des puits	Données des puits.
Longueur de la colonne d'eau	Interprété en soustrayant le niveau piézométrique de la profondeur du puits.
Température moyenne (30 jours avant le prélèvement)	Données de la station pluviométrique disponible la plus proche.
Précipitations totales (30 jours avant le prélèvement)	Données de la station pluviométrique disponible la plus proche.
Zones de vulnérabilité du RCI 2016	Types présents à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale.
Système de gestion des eaux usées (ISA ou égout)	Selon la présence ou non d'une ISA sur la propriété.
Présence d'autres éléments potentiellement polluants	Associés lorsque présents dans l'aire de vulnérabilité qui les concernent.
Proportion de territoire développée	Proportion de territoire développée à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques.
Pente moyenne du réseau routier	Moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et de l'aire de vulnérabilité de 500 mètres.
Densité du réseau routier	Densité du réseau routier par catégories à l'intérieur des aires de vulnérabilité spécifiques.
Complexité du réseau routier	Densité des intersections et courbes prononcées à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et de l'aire de vulnérabilité de 500 mètres.
Niveaux de service du réseau routier	Densité par catégories à l'intérieur des aires de vulnérabilité spécifiques.

La profondeur des puits, donnée disponible pour seulement 64 % de ceux-ci, a servi à déterminer la longueur de la colonne d'eau d'une proportion égale de puits en soustrayant le niveau piézométrique à la profondeur, alors que les différentes zones de vulnérabilité du RCI 2016 ont été associées aux puits lorsqu'elles occupaient 20 % ou plus de la superficie de leurs aires de vulnérabilité maximales. Cette dernière méthode, légèrement différente de celle utilisée pour associer le contexte hydrostratigraphique, se justifie par la précision beaucoup plus élevée du zonage du RCI. Contrairement aux données du PACES, le zonage du RCI est basé sur une localisation précise plutôt que sur une approximation. Il est par conséquent apparu souhaitable de l'associer aux puits en ne tenant compte que des types présents à l'intérieur des aires de vulnérabilité maximales.

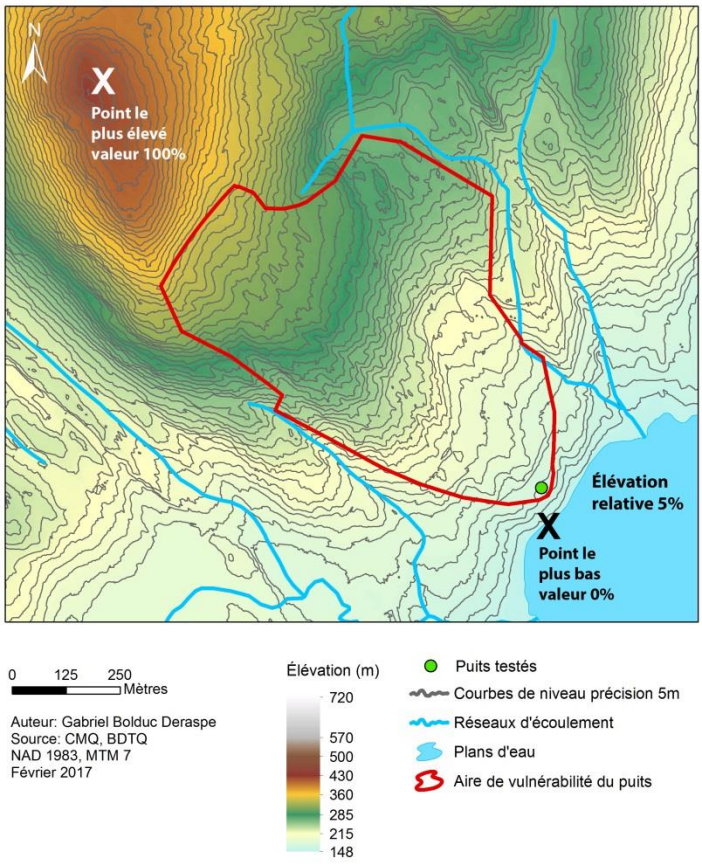


Figure 6 : Calcul de l'élévation relative des puits

Du côté de l'élévation des puits, il a été nécessaire de transformer les données en valeurs relatives afin d'être à même de comparer les puits entre eux lorsqu'ils n'appartenaient pas aux mêmes aires de drainage. Pour chacune des aires de drainage, le point le plus élevé (généralement le sommet d'une colline ou d'une montagne) se voyait attribuer la valeur de 100 % alors que le point le plus bas (cours

d'eau, lacs ou grande superficie plane) recevait la valeur de 0 %. Les puits obtenaient pour leur part une valeur équivalente à leur élévation par rapport aux deux extrêmes possibles (Figure 6). Le but recherché était d'évaluer la position du puits par rapport au point le moins susceptible de recevoir des contaminants des zones adjacentes et le point le plus susceptible d'en recevoir.

Pour leur part, la température moyenne et les précipitations totales ont été considérées sur une période de 30 jours précédant l'échantillonnage et déterminées grâce aux valeurs enregistrées à la station pluviométrique la plus proche de chacun des puits : Montchatel, Honfleur, rivière Jaune ou rivière des Hurons. La valeur de 30 jours a pour sa part été sélectionnée suite à la consultation de la littérature scientifique (temps de survie et vitesse de déplacement des bactéries). Bien qu'une valeur de 90 jours ait été sélectionnée pour le calcul des aires de vulnérabilité bactériologiques, une période de temps aussi longue pour les données météorologiques est apparue comme nivelant trop fortement les résultats, rendant les différences entre les saisons plus difficiles à apprécier.

L'âge moyen, tiré de la base de données disponible ou estimé à l'aide de l'année de construction du bâtiment, et la densité des ISA, donnée localisée sur les centroïdes des lots concernés, ont été calculés à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques des puits. Afin de prendre en compte l'incidence de la superficie des aires de vulnérabilité spécifiques et d'accroître les chances d'observer une corrélation, le nombre d'ISA a également été transformé en densité par km^2. Au final, 12 valeurs différentes pour le nombre d'ISA, la densité par km^2 et l'âge moyen ont été associées à chaque puits.

La proportion de territoire développée a été associée à chacun des puits en tenant compte de la superficie occupée à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilité spécifiques.

Puisque la longueur du tubage était inconnue pour 63,8 % des puits, il a été nécessaire dans de nombreux cas de l'estimer grâce à l'épaisseur des dépôts meubles. Sur le territoire québécois la très grande majorité des puits tubulaires possèdent un tubage qui ne s'étend pas au-delà des dépôts meubles, mis à part dans les cas où ceux-ci sont d'une épaisseur de moins de 5 mètres. Par conséquent, la longueur du tubage et l'épaisseur des dépôts meubles devraient, dans la majorité des cas, posséder des valeurs similaires. La valeur d'épaisseur des dépôts meubles utilisée pour cette estimation est une moyenne d'une zone d'un rayon de 200 mètres à partir de chacun des puits. Comme cette variable possède un niveau de précision plus élevé que les autres variables du PACES, il a été possible de se limiter à cette zone pour le calcul d'une moyenne.

Les éléments potentiellement polluants à localisation fixe (voir liste en Annexe 1) ne furent associés aux puits testés que lorsqu'ils se trouvaient à l'intérieur de l'une des deux aires de vulnérabilité utilisées à

cet effet. Les sources éventuelles de bactéries *E. coli*, d'azote ou de phosphore total n'étaient associées que lorsqu'elles étaient présentes dans les aires de vulnérabilité qui les concernaient, soit les aires maximales pour les nutriments et celles de 500 mètres pour les bactéries *E. coli*. Des éléments pouvaient par conséquent être associés aux deux aires de vulnérabilité d'un même puits ou à une seule d'entre elles. Certains de ces éléments devaient néanmoins posséder une superficie minimale dans les aires de vulnérabilité afin d'être pris en compte.

La pente moyenne du réseau routier, ainsi que la complexité du réseau routier (nombre d'intersections et de courbes prononcées) ont été associés à chacune des aires de vulnérabilité maximale et des aires de vulnérabilité de 500 mètres.

Pour sa part, la densité des classes de réseaux routiers a été calculée pour chacune des aires de vulnérabilités spécifiques. Pour ce faire, une largeur moyenne a été attribuée à chaque type de route (autoroute : 10 mètres; nationale ou régionale : 9,5 mètres; collectrice : 8,5 mètres; local : 7,5 mètres) et les routes ont été regroupées en 3 classes (1 : autoroute, nationale et régionale; 2 : collectrice; 3 : local). Suite à ces manipulations, il a été possible de calculer la densité des différentes catégories, ainsi que la densité globale du réseau routier à l'intérieur de chacune des aires de vulnérabilités spécifiques.

Finalement, les niveaux de service du réseau routier, qui n'étaient disponibles que pour une portion du territoire à l'étude, ont été associés à chacune des aires de vulnérabilité spécifiques selon la densité respective des catégories 1 et 2 combinées et de la catégorie 3 (voir définitions en Annexe 5) à l'intérieur de ces mêmes aires.

La décision d'associer les ISA, les caractéristiques du réseau routier et les autres éléments potentiellement polluants à caractère fixe de manière différente aux puits, douze aires pour les ISA et le réseau routier et deux aires pour les autres éléments, se justifie par le très faible nombre d'éléments potentiellement polluants à caractère fixe sur le territoire. Alors que les ISA et les routes sont abondantes dans beaucoup d'aires de vulnérabilité, les autres éléments polluants sont pour leur part plutôt rares.

3.2.3 Classification des variables dépendantes et indépendantes

Suite à l'association de chacune des variables sélectionnées à leurs puits respectifs, il a été nécessaire de déterminer, grâce aux conseils de statisticiens, de quelle manière les variables seraient utilisées dans les analyses (Tableau 2). Afin de conserver une plus grande richesse, la plupart des variables possédant une forme continue ont été laissées sous cette forme, alors que les variables pour lesquels la grande

majorité des puits possédaient une valeur de 0 (signifiant l'absence de l'élément) ont été transformées en valeurs dichotomiques.

Tableau 2 : Formes des variables pour la réalisation des analyses statistiques

Variables sélectionnées	Formes des variables
Contexte hydrostratigraphique (10 types)	Dichotomique : 0 ou 1
Épaisseur des dépôts meubles	Continue
Confinement des aquifères	Classes : 1, 2, 3 et 4
Longueur du tubage	Continue
Recharge annuelle moyenne des aquifères	Continue
Pente moyenne de l'aire de vulnérabilité maximale	Classes (%) : 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30
Pente moyenne à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 mètres	Continue
Indice DRASTIC	Continue
Densité des ISA par km^2	Continue
Nombre d'ISA	Continue
Âge des ISA	Continue
Âge des puits	Continue
Élévation réelle des puits	Continue
Élévation relative des puits	Continue
Profondeur des puits	Continue
Longueur de la colonne d'eau	Continue
Température moyenne (30 jours avant le prélèvement)	Continue
Précipitations totales (30 jours avant le prélèvement)	Continue
Zones de vulnérabilité du RCI 2016 (4 zones)	Dichotomique : 0 ou 1
Système de gestion des eaux usées	ISA ou égout
Présence d'autres éléments potentiellement polluants	Dichotomique : 0 ou 1
Proportion de territoire développée	Continue
Pente moyenne du réseau routier	Continue
Densité du réseau routier	Continue
Complexité du réseau routier	Continue
Niveaux de service du réseau routier	Continue

3.3. Analyses statistiques

Des analyses ont été effectuées afin d'identifier les variables explicatives permettant de mieux prédire la concentration de différents traceurs dans les puits. En fait, des modèles de régression linéaire multiples ont été ajustés sur les données afin de prédire la concentration d'azote total, d'azote ammoniacal, de nitrites et nitrates, de phosphore total, de chlorures, de sodium, ainsi que la conductivité des eaux du

puits. Pour l'*E. coli*, il a été nécessaire d'avoir recours à un modèle de régression logistique, puisque cette variable utilise la présence ou l'absence de l'élément plutôt que son abondance.

Une première étape a consisté en l'imputation des données manquantes sur certaines variables en utilisant la méthode FCS (Fully Conditional Specification). Cette méthode a été utilisée puisqu'elle permet d'imputer des valeurs aux variables, autant sur celles qui sont continues que sur celles qui sont nominales. Elle a donc permis de remplacer chaque donnée manquante par une valeur probable, en tenant compte de l'ensemble des relations existantes entre les variables.

Par la suite, des modèles de régression ont été ajustés sur chacune des variables réponses en considérant l'ensemble des variables explicatives préalablement sélectionnées. Le postulat de normalité a été vérifié sur les résidus de chacun de ces modèles à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Pour respecter ce postulat, il a été nécessaire de transformer chacune des variables réponses. Le choix de la meilleure transformation s'est effectué à l'intérieur de la famille Box-Cox en retenant celle qui maximisait la statistique log-vraisemblance. C'est la transformation logarithmique qui a été retenue pour chacune des variables réponses. De plus, puisque les coordonnées géographiques de chaque puits étaient disponibles, nous avons également testé la présence d'une autocorrélation spatiale entre les puits à l'aide du test dérivé de l'indice de Moran. Ce test, effectué à l'aide la fonction moran.test() de la librairie "spdep" du logiciel R (version 3.5.1), a permis de conclure qu'il n'y avait pas de corrélation spatiale dans les données, pour aucune des variables réponses.

La construction des modèles sur chaque variable réponse s'est faite en deux étapes. D'abord, une approche univariée a été utilisée afin de mesurer l'effet de chacune des variables explicatives, prises isolément, sur les variables réponses. Par la suite, les variables explicatives constituant chaque modèle ont été choisies à l'aide d'un certain algorithme pas-à-pas à la fois ascendant et descendant (« stepwise »). À chaque pas, une variable est ajoutée dans le modèle sur la base du critère SBC (Schwarz bayesian criterion), lequel est calculé à partir de la fonction de vraisemblance du modèle et d'un certain paramètre de pénalité pour tenir compte de la complexité du modèle. La variable qui donne la valeur SBC la plus faible est introduite dans le modèle. Avant d'ajouter une nouvelle variable, l'algorithme évalue la possibilité de retirer une variable déjà incluse. L'algorithme se termine quand la moyenne des erreurs de prévision du modèle, calculée dans un contexte de validation croisée en 5 blocs, est à son minimum. Ce critère d'arrêt a été choisi afin de constituer un modèle qui n'a pas de

problème de surajustement, c'est-à-dire qu'il prédit aussi bien dans l'échantillon que dans la population en général.

Enfin, la colinéarité entre les variables explicatives composant chaque modèle a été examinée. Cet examen s'est fait à partir des facteurs d'inflation de la variance (VIF) et des indices de conditionnement. Il est essentiel pour ne pas augmenter indûment les variances aux paramètres du modèle, ou encore pour ne pas inverser le signe de certains paramètres et ainsi faire voir une relation positive entre les variables au lieu d'une relation négative ou inversement. Pour tous les modèles, les valeurs aux facteurs d'inflation de la variance et aux indices de conditionnement ont toujours été largement en dessous de la limite acceptable.

4. Résultats

4.1 Modèle pour l'azote total

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la concentration d'azote total dans les puits testés. Du côté des variables affectant positivement la concentration d'azote total, on y trouve la proportion de territoire développée (12 aires spécifiques sur 12), la densité d'ISA par km^2 dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), le nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), l'âge moyen des ISA dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), l'âge du puits, le niveau de confinement des aquifères, l'élévation relative des puits testés, l'appartenance aux zones 1 et 2 du RCI 2016, la présence de terrains de golf, ainsi que des contextes hydrostratigraphiques sable et gravier, sur roc et dépôt organique, sur sable et gravier ou dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits (voir Tableau 13 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration d'azote total, on y trouve la longueur du tubage du puits, la recharge annuelle moyenne des aquifères et l'épaisseur moyenne des dépôts meubles dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'appartenance aux zones 3 et 4 du RCI 2016, la pente moyenne du terrain à l'intérieur des aires de vulnérabilité de 100 mètres et maximale, la présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et la température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement (voir Tableau 13 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour l'azote total, qui réussit à expliquer 31,87 % de la variance, comprend les neuf variables présentées au Tableau 3. De celles-ci, six sont corrélées de manière positive et trois de manière négative.

Tableau 3 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'azote total

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.02180	0.00295	< 0.0001	- 7.38
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 1000 m	0.00527	0.00078491	< 0.0001	6.71
Élévation relative du puits [1]	0.08145	0.01253	< 0.0001	6.50
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.00116	0.00019137	< 0.0001	6.05
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.00931	0.00176	< 0.0001	5.30
Présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.14811	0.02897	< 0.0001	5.11
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 0.22850	0.04820	< 0.0001	- 4.74
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.00253	0.00059322	< 0.0001	4.27
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 100 m [1]	- 0.02507	0.00599	< 0.0001	- 4.19

[1] Résultats contre-intuitifs qui seront analysés plus amplement à la section 5.1.

4.2 Modèle pour l'azote ammoniacal

L'approche univariée a permis de faire ressortir certaines variables comme ayant une incidence significative sur la concentration d'azote ammoniacal dans les puits testés. Du côté des variables affectant positivement la concentration d'azote ammoniacal, on y trouve la proportion de territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 mètres, le nombre d'ISA dans les aires de vulnérabilité de 500 mètres et maximales, l'âge moyen des ISA dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'indice DRASTIC, la présence de dépôts de matériaux secs, ainsi que du contexte hydrostratigraphique de type silt, sur sable et gravier, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 14 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration d'azote ammoniacal, on y trouve l'appartenance à la zone 3 du RCI 2016, la présence du contexte hydrostratigraphique de type sable et gravier silteux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et la température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement (voir Tableau 14 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour l'azote ammoniacal, qui réussit à expliquer 3,80 % de la variance, comprend les trois variables présentées au Tableau 4. De celles-ci, une est corrélée de manière positive et deux de manière négative.

Tableau 4 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'azote ammoniacal

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 0.03175	0.00488	< 0.0001	- 6,50
Présence de la zone 3 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.17296	0.04670	0.0002	- 3.70
Présence du contexte hydrostratigraphique de type silt, sur sable et gravier, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	0.49222	0.17228	0.0043	2.86

4.3 Modèle pour les nitrites et nitrates

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la concentration de nitrites et nitrates dans les puits testés. Du côté des variables affectant positivement la concentration de nitrites et nitrates, on y trouve la proportion de territoire développée (12 aires spécifiques sur 12), la densité d'ISA par km^2 dans l'aire de vulnérabilité (11 aires spécifiques sur 12), le nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité (11 aires spécifiques sur 12), l'âge moyen des ISA dans l'aire de vulnérabilité (7 aires spécifiques sur 12), l'âge du puits, l'élévation relative des puits testés, l'appartenance aux zones 1 et 2 du RCI 2016, la présence de terrains de golf, ainsi que du contexte hydrostratigraphique dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 12 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration de nitrites et nitrates, on y trouve la hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits, la recharge annuelle moyenne des aquifères et l'épaisseur moyenne des dépôts meubles dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'appartenance à la zone 3 du RCI 2016, la pente moyenne du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, la gestion par ISA des eaux usées de la propriété, la présence d'élevage de volailles, ainsi que du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits (voir Tableau 12 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour les nitrites et nitrates, qui réussit à expliquer 24,73 % de la variance, comprend les onze variables présentées au Tableau 5. De celles-ci, six sont corrélées de manière positive et cinq de manière négative.

Tableau 5 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle des nitrites et nitrates

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.00417	0.00057434	< 0.0001	7.27
Élévation relative du puits [1]	0.31430	0.04434	< 0.0001	7.09
Présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.59455	0.09968	< 0.0001	5.96
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.01021	0.00177	< 0.0001	5.77
Gestion par ISA des eaux usées de la propriété [1]	- 0.61240	0.11617	< 0.0001	- 5.27
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 0.70620	0.16830	< 0.0001	- 4.20
Hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits	- 0.00468	0.00118	< 0.0001	- 3.98
Indice DRASTIC moyen à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale [1]	- 0.01711	0.00458	0.0002	- 3.73
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.01751	0.00543	0.0013	3.23
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.03330	0.01191	0.0052	- 2.80
Niveau de confinement des aquifères [1]	0.40833	0.15418	0.0082	2.65

[1] Résultats contre-intuitifs qui seront analysés plus amplement à la section 5.1.

4.4 Modèle pour le phosphore total

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la concentration de phosphore total dans les puits testés. Du côté des variables affectant positivement la concentration de phosphore total, on y trouve la proportion de territoire développée (11 aires spécifiques sur 12), la densité d'ISA par km^2 dans l'aire de vulnérabilité (5 aires spécifiques sur 12), l'âge moyen des ISA dans l'aire de vulnérabilité (3 aires spécifiques sur 12), l'âge du puits, l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, l'indice DRASTIC, l'appartenance aux zones 2 et 4 du RCI 2016, la présence de terrains de golf, de carrière ou de sablière, de culture fourragère, de culture annuelle et de milieux humides à l'intérieur de

l'aire de vulnérabilité maximale, la température moyenne et les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement, la présence des contextes hydrostratigraphiques de type dépôt hétérogène, sur roc et silt sableux ou graveleux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 15 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration de phosphore total, on y trouve la densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, la profondeur du puits et la longueur de la colonne d'eau à l'intérieur de celui-ci, la recharge annuelle moyenne des aquifères et leur niveau de confinement dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'appartenance à la zone 3 du RCI 2016, la pente moyenne du terrain à l'intérieur des aires de vulnérabilité de 100 mètres et maximale, ainsi que la présence du contexte hydrostratigraphique de type sable et gravier silteux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits (voir Tableau 15 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour le phosphore total, qui réussit à expliquer 7,06 % de la variance, comprend les cinq variables présentées au Tableau 6. De celles-ci, quatre sont corrélées de manière positive et une de manière négative.

Tableau 6 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle du phosphore total

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement	0.02292	0.00478	< 0.0001	4.80
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	0.37215	0.08515	< 0.0001	4.37
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.00303	0.00074829	< 0.0001	4.04
Profondeur du puits	- 0.00178	0.00056837	0.0018	- 3.13
Présence de cultures fourragères à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.22515	0.07899	0.0044	2.85

4.5 Modèle pour l'*E. coli*

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la présence d'*E. coli*. Du côté des variables affectant positivement la présence d'E. coli, on y trouve la densité d'ISA par km^2 dans l'aire de vulnérabilité (5 aires spécifiques sur 12), le nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité (11 aires spécifiques sur 12), l'âge moyen des ISA dans l'aire de

vulnérabilité (10 aires spécifiques sur 12), l'âge du puits, l'appartenance à la zone 1 du RCI 2016, ainsi que les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement (voir Tableau 16 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la présence d'*E. coli*, on y trouve l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et la longueur du tubage du puits (voir Tableau 16 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour l'*E. coli*, qui réussit à prédire correctement la présence ou l'absence d'*E. coli* dans les puits dans 68,7 % des cas, comprend les trois variables présentées au Tableau 7. De celles-ci, deux sont corrélées de manière positive et une de manière négative.

Tableau 7 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de l'*E. coli*

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Khi-deux de Wald
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	0.00708	0.00175	< 0.0001	16.3408
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.0405	0.0106	0.0001	14.6837
Longueur du tubage	- 0.0928	0.0332	0.0052	7.8253

4.6 Modèle pour les chlorures

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la concentration de chlorures. Du côté des variables affectant positivement la concentration de chlorures, on y trouve la densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau collecteur à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (11 aires spécifiques sur 12), la complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), l'âge du puits, ainsi que l'indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 17 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration de chlorures, on y trouve la recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, l'élévation réelle des puits testés, ainsi que la pente du terrain à l'intérieur des aires de vulnérabilité maximale et de 500 mètres (voir Tableau 17 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour les chlorures, qui réussit à expliquer 44,23 % de la variance, comprend les onze variables présentées au Tableau 8. De celles-ci, six sont corrélées de manière positive et cinq de manière négative.

Tableau 8 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle des chlorures

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.08756	0.00872	< 0.0001	- 10.04
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.23738	0.02996	< 0.0001	7.92
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	0.01649	0.00209	< 0.0001	7.89
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.04040	0.00848	< 0.0001	4.77
Indice DRASTIC moyen à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale [1]	- 0.01627	0.00343	< 0.0001	- 4.75
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.03313	0.00713	< 0.0001	- 4.65
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	0.09724	0.02661	0.0003	3.65
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale [1]	- 0.09391	0.02786	0.0008	- 3.37
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	0.00799	0.00291	0.0060	2.75
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.00114	0.00037718	0.0025	- 3.03
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.01596	0.00585	0.0064	2.73

[1] Résultats contre-intuitifs qui seront analysés plus amplement à la section 5.2.

4.7 Modèle pour la conductivité

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la conductivité. Du côté des variables affectant positivement la conductivité, on y trouve la densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau collecteur à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (10 aires spécifiques sur 12), la complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), l'âge et la profondeur du puits, la hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits, ainsi que l'indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 18 en Annexe 2).

Tableau 9 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle de la conductivité

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	0.01342	0.00107	< 0.0001	12.50
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.03989	0.00487	< 0.0001	- 8.19
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.07211	0.00975	< 0.0001	7.39
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	0.03820	0.00647	< 0.0001	5.90
Élévation réelle des puits	- 0.00157	0.00031273	< 0.0001	- 5.01
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 % [1]	- 0.03732	0.00846	< 0.0001	- 4.41
Hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits [1]	0.00209	0.00049351	< 0.0001	4.23
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	- 0.00300	0.00081733	0.0003	- 3.67
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.01355	0.00375	0.0003	- 3.61
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 0.00083832	0.00024738	0.0007	- 3.39
Indice DRASTIC moyen à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale [1]	- 0.00618	0.00188	0.0010	- 3.29

[1] Résultats contre-intuitifs qui seront analysés plus amplement à la section 5.2.

Du côté des variables affectant négativement la conductivité, on y trouve la recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, l'élévation réelle des puits testés, les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement, ainsi que la pente du terrain à l'intérieur des aires de vulnérabilité maximale et de 100 mètres (voir Tableau 18 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour la conductivité, qui réussit à expliquer 45,10 % de la variance, comprend les onze variables présentées au Tableau 9. De celles-ci, quatre sont corrélées de manière positive et sept de manière négative.

4.8 Modèle pour le sodium

L'approche univariée a permis de faire ressortir plusieurs variables comme ayant une incidence significative sur la concentration de sodium. Du côté des variables affectant positivement la concentration de sodium, on y trouve la densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau collecteur à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), la densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (9 aires spécifiques sur 12), la complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité (2 aires spécifiques sur 12), la proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité (12 aires spécifiques sur 12), l'âge et la profondeur du puits, la hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits, ainsi que l'indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale (voir Tableau 19 en Annexe 2).

Du côté des variables affectant négativement la concentration de sodium, on y trouve la recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale, l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, l'élévation réelle des puits testés, les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement, ainsi que la pente du terrain à l'intérieur des aires de vulnérabilité maximale et de 100 mètres (voir Tableau 19 en Annexe 2).

En multivarié, le modèle retenu pour le sodium, qui réussit à expliquer 41,47 % de la variance, comprend les dix variables présentées au Tableau 10. De celles-ci, cinq sont corrélées de manière positive et cinq de manière négative.

Tableau 10 : Variables explicatives sélectionnées pour le modèle du sodium

Variables explicatives	Estimations aux paramètres	Erreurs types associées	Seuils observés	Valeurs de t
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	0.01247	0.00133	< 0.0001	9.34
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.10019	0.01363	< 0.0001	7.35
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.04684	0.00667	< 0.0001	7.02
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.05102	0.00733	< 0.0001	- 6.96
Élévation réelle des puits	- 0.00255	0.00047087	< 0.0001	- 5.41
Hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits [1]	0.00382	0.00074268	< 0.0001	5.14
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.02510	0.00567	< 0.0001	- 4.43
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 0.00135	0.00037455	0.0003	- 3.61
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.05522	0.01715	0.0013	3.22
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.00154	0.00054710	0.0050	- 2.81

[1] Résultats contre-intuitifs qui seront analysés plus amplement à la section 5.2.

4.9 Analyses considérant les niveaux de services du réseau routier

En plus des analyses présentées aux sections 4.6, 4.7 et 4.8, des analyses supplémentaires ont été réalisées pour les trois variables dépendantes liées aux sels de déglaçage afin de considérer les niveaux de service du réseau routier durant la période hivernale, une donnée qui n'était disponible que pour l'aire de vulnérabilité de 328 des 1452 puits. Cette seconde analyse, réalisée sur les 328 puits concernés, ayant produits des modèles possédant un pouvoir explicatif inférieur pour chacun des trois modèles concernés (39,32 % contre 44,23 % pour les chlorures, 35,09 % contre 45,10 % pour la conductivité et 11,45 % contre 41,47 % pour le sodium), il a été jugé souhaitable de présenter et d'interpréter les résultats des modèles réalisés avec la totalité des 1452 puits dans la présente étude.

5. Discussion

5.1 Interprétation des résultats des analyses statistiques des modèles en lien avec les installations sanitaires autonomes

Compte tenu de la complexité des phénomènes étudiés et des nombreuses variables impliquées, il a été jugé qu'un modèle (analyses multivariées) possédant un pouvoir explicatif avoisinant les 25 % était satisfaisant. Par conséquent, les seuls modèles possédant un pouvoir explicatif suffisamment élevé pour être considérés plus sérieusement sont ceux de l'azote total (31,87 %), des nitrites et nitrates (24,73 %) et de l'*E. coli* (68,7 %). À l'intérieur de ces derniers, quelques corrélations assez fortes et suffisamment plausibles ressortent.

Les plus importantes de ces corrélations sont de loin la proportion de territoire développée, la densité des ISA par km^2, le nombre d'ISA, la présence de la zone 2 du RCI 2016, ainsi que l'épaisseur moyenne des dépôts meubles.

Les corrélations positives impliquant les ISA sont peu surprenantes compte tenu des nombreuses études qui ont établi un lien entre la densité élevée des ISA et la présence de contaminants dans les eaux souterraines (Miller, 1972; Yates, 1985; Bauman et Schäfer, 1985; Gold et al., 1990; Hantzsche et Finnemore, 1992; Nizeyimana et al., 1996; Tuthill et al., 1998; Bourne, 2001; Dawes et Goonetilleke, 2003; Carroll, 2005; Standley et al., 2008; Borchardt et al., 2011). Pour les trois modèles, l'incidence du nombre d'ISA se fait sentir principalement à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 % (aire qui s'étire entre 40 et 583 mètres en amont du puits selon la pente du terrain; moyenne approximative de 250 mètres). L'impact positif de la densité des ISA par km^2 sur la concentration d'azote total et de nitrites et nitrates est de son côté principalement associé à l'aire de vulnérabilité maximale.

Il est néanmoins important de souligner la présence d'une corrélation contre-intuitive au niveau du nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 100 mètres pour le modèle de l'azote total. Le modèle indique que plus il y a d'ISA dans ce périmètre, moins la concentration en azote total serait importante. Le fait que cette variable soit la plus faiblement corrélée du modèle ($t = - 4,19$; Seuil observé = $< 0,0001$), que cette relation soit ressortie comme positive dans l'analyse univariée et que ce même modèle présente la densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et le nombre d'ISA

dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 % comme ayant une incidence positive sur la concentration d'azote total rend cette relation très peu plausible.

Pour sa part, l'impact positif de la proportion de territoire développée, qui n'a été observé que dans les modèles de l'azote total et des nitrites et nitrates, apparait affecter le plus fortement les puits dans un rayon de 100 et 1000 mètres pour le premier modèle et dans un rayon de 100 mètres pour le second. Il est peu étonnant que cette variable ait été associée à ces formes d'azote puisque les secteurs plus développés comporteront nécessairement de plus nombreuses sources d'azote.

L'impact négatif de l'épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, respectivement fortement et faiblement corrélée aux modèles de l'azote total et des nitrites et nitrates, apparait être une relation plausible. En effet, des dépôts meubles plus épais, dans un secteur où l'épaisseur de sol non saturé d'eau est suffisamment élevée, sont susceptibles de permettre au sol de mieux retenir l'azote, même si ce nutriment demeure très mobile dans l'environnement (Sikora et Corey, 1975; Chambers et al., 2001; U.S. EPA, 2002).

Compte tenu de la faible proportion du territoire possédant un contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène sur roc et du fait que la grande majorité des puits qui sont associés à cette variable sont situés dans un secteur très restreint (la petite zone la plus au nord sur la Figure 7), il est possible que la relation négative qui apparait unir cet élément à la concentration d'azote total et de nitrites et nitrates soit en réalité due à un autre facteur. Il apparait en effet peu plausible que ce type de sol à lui seul puisse avoir une incidence importante sur la concentration de ces traceurs, alors qu'aucune autre corrélation n'a été observée pour les autres types de contextes hydrostratigraphiques.

L'incidence positive de la présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale sur la concentration d'azote total et de nitrites et nitrates est plausible puisque cette zone est en majeure partie située dans des secteurs à faible pente qui favorisent l'infiltration verticale des nutriments et comprends de nombreux valons qui sont propres à recueillir les contaminants des zones adjacentes plus élevées (voir Figures 8 et 9).

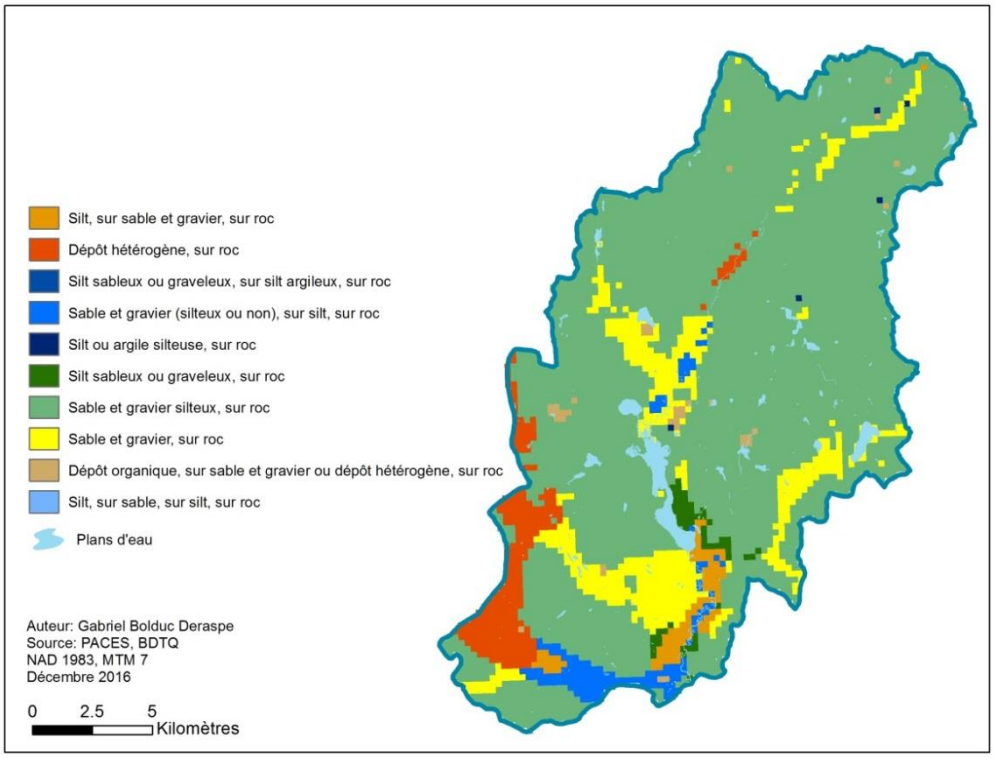


Figure 7 : Hydrostratigraphie du bassin versant

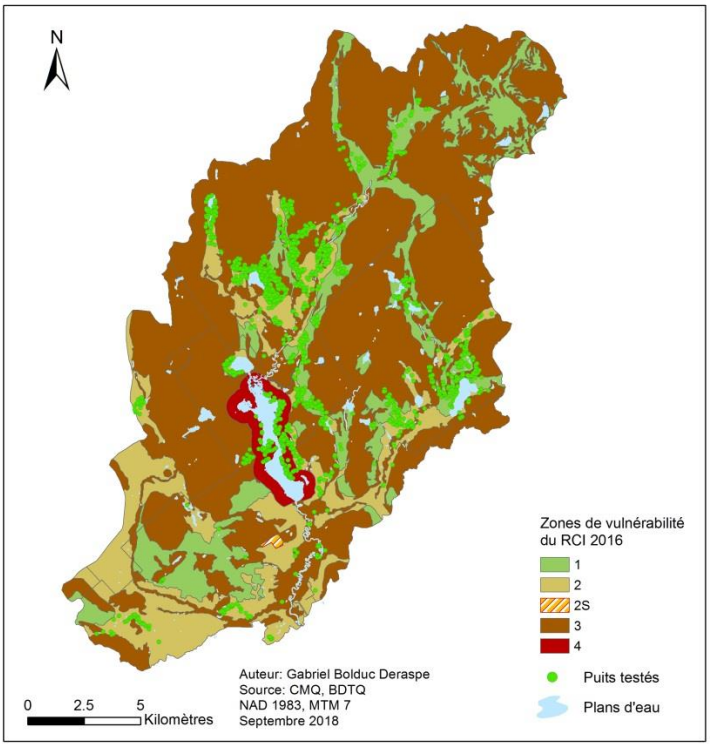


Figure 8 : Zones de vulnérabilité du RCI 2016

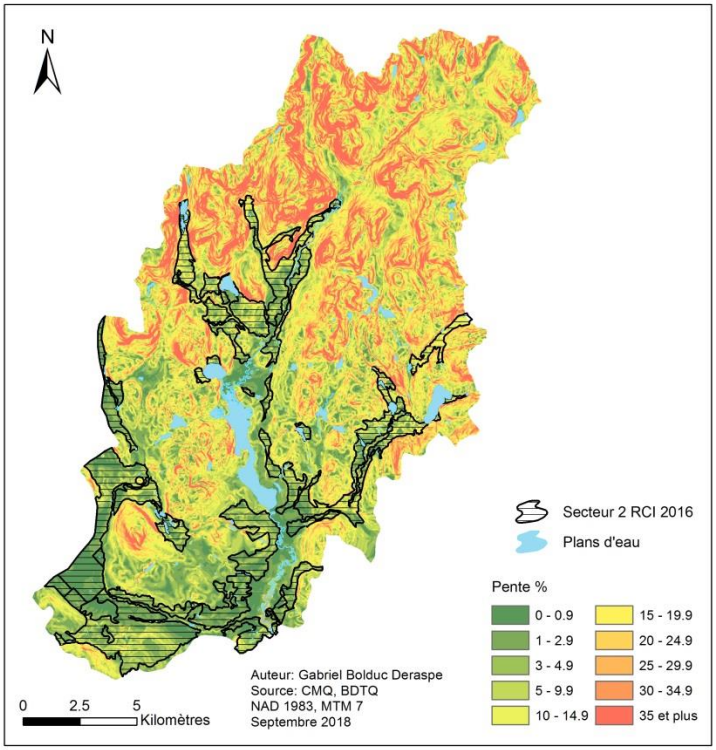


Figure 9 : Pentes de la zone 2 du RCI 2016

Le modèle des nitrites et nitrates présente également la hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits comme ayant une incidence négative sur la concentration de ces formes d'azote. Cette relation apparait plausible puisqu'une colonne d'eau plus importante permettra une plus grande dilution des nutriments et des contaminants qui ont atteint le puits.

D'un autre côté, il apparait que des précipitations totales plus abondantes au cours des 30 jours précédant le prélèvement entrainent un risque plus élevé d'observer la présence d'*E. coli* dans les puits individuels. Cette relation peut s'expliquer par le fait que des précipitations plus abondantes accroîtront la recharge des eaux souterraines et entraineront possiblement une forte baisse de l'efficacité de la couche de sol filtrante à retenir les microorganismes (Shadford et al., 1997; Nicosia et al., 2001). Ces bactéries possédant une durée de vie limitée, elles en seront nécessairement avantagées. Néanmoins, il est vrai de dire que des précipitations plus abondantes auront également pour effet de diluer la concentration des contaminants (Robin, 1998), mais il apparait qu'ici la première relation l'emporte.

Encore une fois du côté du modèle de l'*E. coli*, il apparait qu'un tubage plus long réduira le risque d'observer ce type de bactéries dans l'eau des puits. Il s'agit d'une observation en accord avec les résultats de plusieurs études (Clawges et Vowinkel, 1997; Tuthill et al., 1998; Pinette et al., 1999;

Ballard, 2004). En effet, un tubage plus long obligera les bactéries à parcourir une plus grande distance avant de pouvoir se mélanger aux eaux du puits entrainant ainsi un taux de mortalité plus élevé, en plus du fait qu'un tubage plus profond peut obliger les puits à drainer des eaux plus anciennes exemptes de bactéries *E. coli*. Toutefois, il est important de considérer que 63,8 % des données de cette variable ont été estimées grâce à l'épaisseur des dépôts meubles dans un rayon de 200 mètres du puits. La corrélation observée est par conséquent autant liée à la longueur du tubage qu'à l'épaisseur des dépôts meubles, deux variables possédant souvent des valeurs similaires sur le territoire québécois.

Néanmoins, les analyses ont également généré des résultats contre-intuitifs qui vont dans le sens contraire des études consultées. Par exemple, il est très peu plausible que l'élévation relative du puits soit positivement corrélée à la concentration en azote total et en nitrites et nitrates, et ce malgré le fait que l'approche univariée en arrive à une conclusion similaire, puisque cela reviendrait à dire que les puits situés dans des secteurs plus élevés sont plus susceptibles d'être contaminés. Il était plutôt attendu que la situation contraire serait observée, comme ce fut le cas dans l'étude de Ballard (2004). Il est concevable que le résultat obtenu soit dû en partie à une lacune dans l'association des données plutôt qu'à un phénomène réel. Il est possible que lors du calcul de l'élévation relative, la localisation des valeurs minimales et maximales (élévation relative de 0 et 100 %) ait été mal attribuée. De plus, le processus ayant permis de calculer l'élévation relative (voir section 3.2.2) n'a pas considéré la position des sources de contamination comprises dans l'aire de vulnérabilité en raison de la complexité de la procédure et de l'incapacité à prendre en compte l'ensemble des éléments du territoire pouvant potentiellement entrainer la présence des traceurs sélectionnés dans les puits. Comme les sources de contamination ne sont pas réparties de manière uniforme sur le territoire, il est possible que plusieurs des puits possédant une élévation relative plus élevée aient également compté un nombre plus grand de sources de contamination dans leurs aires de vulnérabilité, ce qui aurait eu pour conséquence de produire l'effet observé.

Une manière de vérifier partiellement cette hypothèse est de comparer la proportion de territoire développée, ainsi que le nombre et la densité des ISA dans les aires de vulnérabilité des puits possédant une élévation relative de 25 % et plus (n = 503; moyenne de 1,31 mg/L de nitrites et nitrates) à ceux des puits possédant une élévation relative de moins de 25 % (n = 949; moyenne de 1,03 mg/L de nitrites et nitrates). Malgré le fait que le nombre d'ISA comprises dans les différentes aires de vulnérabilité soit en général légèrement supérieur pour les puits possédant une élévation relative de moins de 25 %, l'étude des valeurs converties en densité par km^2 permet pour sa part de constater une grande différence qui

vient soutenir l'hypothèse (voir Tableau 11). Par exemple, dans l'aire de vulnérabilité de 1000 mètres, la densité par km^2 du groupe possédant une élévation relative de 25 % et plus est largement supérieure à celle de l'autre groupe (99,0 contre 62,0). Il est par conséquent probable que le résultat des analyses statistiques concernant l'élévation relative soit fortement biaisé par ce facteur, et ce malgré l'intégration de la densité et du nombre ISA comme variables dans les analyses statistiques. La proportion de territoire développée est pour sa part plutôt similaire dans les deux groupes, mis à part dans certaines aires de vulnérabilité où elle est supérieure pour les puits possédant une élévation relative de moins de 25 %. Puisque la différence est peu importante et que, contrairement aux ISA, la proportion de territoire développée prend en compte plusieurs éléments qui ne sont pas nécessairement susceptibles de contaminer les puits, cette donnée ne permet ni de renforcer ni d'affaiblir l'hypothèse.

Tableau 11 : Proportion de territoire développée et densité des ISA par km^2 dans les aires de vulnérabilité spécifiques par rapport à l'élévation relative des puits

Nombre d'ISA	50 m Nb	100 m Nb	500 m Nb	1000 m Nb	1 % Nb	2 % Nb	3 % Nb	4 % Nb	5 % Nb	6 % Nb	7 % Nb	8 % Nb
É.R. 25 % et plus	1,5	3,1	10,8	12,5	11,3	8,6	6,8	5,6	4,7	4,1	3,6	3,1
É.R. moins de 25 %	1,4	3,0	14,6	21,1	15,3	11,5	9,3	7,6	6,4	5,4	4,6	4,1
Densité d'ISA	**50 m Km^2**	**100 m Km^2**	**500 m Km^2**	**1000 m Km^2**	**1 % Km^2**	**2 % Km^2**	**3 % Km^2**	**4 % Km^2**	**5 % Km^2**	**6 % Km^2**	**7 % Km^2**	**8 % Km^2**
É.R. 25 % et plus	256,4	193,1	109,1	99,0	112,2	129,4	145,1	160,9	172,3	183,0	193,3	199,7
É.R. moins de 25 %	230,6	178,0	78,5	62,0	76,0	92,1	109,3	125,1	136,0	147,1	157,0	165,3
Proportion territoire développée	**Dév. 50 m**	**Dév. 100 m**	**Dév. 500 m**	**Dév. 1000 m**	**Dév. 1 %**	**Dév. 2 %**	**Dév. 3 %**	**Dév. 4 %**	**Dév. 5 %**	**Dév. 6 %**	**Dév. 7 %**	**Dév. 8 %**
É.R. 25 % et plus	42,3 %	37,8 %	26,6 %	24,0 %	26,6 %	29,5 %	31,3 %	32,4 %	33,5 %	34,6 %	35,6 %	36,5 %
É.R. moins de 25 %	52,3 %	47,6 %	28,9 %	22,8 %	26,3 %	31,0 %	35,3 %	38,3 %	40,1 %	41,7 %	43,1 %	44,3 %

* É.R. = Élévation relative

Le modèle des nitrites et nitrates comporte une autre variable possédant une corrélation contre-intuitive, mais cette fois assez faible (t = - 5,27; Seuil observé = < 0,0001). Selon les analyses, les puits des propriétés qui sont munies d'une ISA contiennent des concentrations en nitrites et nitrates moins importantes que ceux des propriétés raccordées à l'égout, une conclusion partagée par l'approche univariée. Or, ce même modèle présente le nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité comme un facteur augmentant la concentration de ce nutriment dans les puits. La situation ne pourrait donc se révéler véridique que si les égouts du secteur étaient tous en très mauvais état et laissaient s'échapper une quantité importante d'eau usée, ce qui n'est probablement pas le cas. Il apparait donc improbable que l'effet prédit des deux variables soit réel et, entre les deux, l'effet du nombre d'ISA est de très loin le plus plausible.

Il existe plusieurs raisons qui peuvent être responsables de la corrélation observée. La première est que le problème peut provenir de la méthode d'association de la variable aux puits. En effet, contrairement à la densité et au nombre d'ISA qui ont été associés aux puits en tenant compte de l'ensemble du territoire compris à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale, le mode de gestion des eaux usées de la propriété ne considère que la propriété elle-même, sans tenir compte de ce qui se trouve en amont.

La seconde explication plausible du phénomène provient de la localisation des propriétés testées qui sont desservies par un réseau d'égout. Une étude rapide de leur répartition permet de constater qu'elles sont regroupées en trois zones principalement localisées dans des secteurs possédant de faibles pentes (voir Figures 10, 11 et 12 en Annexe 3), des secteurs où les eaux souterraines sont généralement plus vulnérables à la contamination. De plus, beaucoup des puits concernés sont situés dans des valons ou en bordure de lacs, des zones où les contaminants provenant des secteurs adjacents auront tendance à s'accumuler avant de rejoindre les eaux de surface.

Un autre élément non négligeable vient du fait que les secteurs raccordés à l'égout sont généralement ceux qui possèdent la plus forte densité de population et de diverses sources de pollution (engrais des pelouses et des jardins, animaux domestiques, etc.). Il est donc normal que les aquifères y contiennent une concentration appréciable de nitrites et de nitrates puisque les ISA ne sont pas les seules sources de ces nutriments sur le territoire.

Par conséquent, il est très peu probable que les puits des propriétés sur égout contiennent une plus grande concentration de nitrites et nitrates en raison de cette caractéristique précise. Cette dernière, considérée isolément, devrait même faire diminuer la quantité de nitrites et nitrates observée dans les eaux souterraines puisque contrairement aux ISA qui permettent une infiltration des contaminants sur place, les égouts les acheminent aux usines de traitement des eaux usées qui rejetteront leurs effluents dans les eaux de surface.

Deux autres éléments sont associés de manière contre-intuitive au modèle des nitrites et nitrates. Un indice DRASTIC plus élevé est associé à une concentration moindre de nitrites et nitrates, alors qu'un meilleur confinement des aquifères est associé à une concentration plus élevée de ces mêmes formes d'azote. Pour le niveau de confinement des aquifères, il apparait très probable qu'il s'agit d'une relation liée à la répartition géographique des quelques zones confinées, semi-confinées ou à confinement discontinu du territoire. En effet, ces dernières sont situées dans des secteurs possédants des pentes et

une élévation faible les rendant propices à l'accumulation des contaminants provenant des zones adjacentes (Voir Figures 13, 14, 15 et 16 en Annexe 4).

Du côté de l'indice DRASTIC, qui n'est pas ressorti dans l'analyse univariée, la relation spatiale expliquant le fait que les puits possédant des eaux souterraines plus vulnérables à la contamination provenant de la surface possèdent une concentration moindre en nitrites et nitrates est beaucoup moins évidente à expliquer. Néanmoins, il demeure fortement improbable que cette relation soit réelle. Il est important de spécifier à ce sujet que des études qui cherchaient à déterminer la valeur de l'indice DRASTIC pour prédire le niveau de nitrates présent dans l'aquifère en sont arrivées à des résultats non concluants (Richards et al. 1996; Bourne, 2001). La présence d'une corrélation valable entre les deux apparait donc comme incertaine.

5.2 Interprétation des résultats des analyses statistiques des modèles en lien avec les sels de déglaçage

La forte similarité entre les trois modèles (analyses multivariées) s'explique par le fait que les sels de déglaçage utilisés sur les routes en hiver sont principalement sous la forme de chlorure de sodium et que la conductivité de l'eau est en fait un très bon indicateur de la concentration de chlorures qui y sont dissous (APEL, 2016).

Les plus importantes des corrélations présentes dans les modèles sont la densité du réseau routier, la proportion de territoire développée, l'épaisseur moyenne des dépôts meubles et la pente moyenne du réseau routier.

Les corrélations positives liées à la densité du réseau routier sont peu surprenantes étant donné la quantité très importante de sels épandue sur les routes en période hivernale. Cette donnée qui a été divisée en une multitude de variables, selon le type de réseau routier concerné et l'aire de vulnérabilité affectée, est ressortie le plus fortement sous la forme de densité globale du réseau routier. L'aire d'impact de l'épandage des sels de déglaçage apparait pour sa part se faire ressentir à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale des puits, ce qui est également peu surprenant étant donné la forte mobilité des chlorures dans l'environnement qui leur permet d'être transportés vers les eaux souterraines ou de surface au même rythme que la migration de l'eau qui les contient (Environnement Canada et Santé Canada, 2001).

Il est néanmoins important de soulever qu'une corrélation contre-intuitive a été observée entre la densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale et la concentration de chlorures (une densité plus forte serait liée à une concentration moindre), ainsi qu'entre la densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 % et la conductivité (une densité plus forte serait liée à une plus faible conductivité). Or, ces deux relations, qui ressortent plutôt comme ayant une incidence positive dans les approches univariées, apparaissent peu plausibles puisque les relations inverses sont ressorties de manière plus fréquente et souvent plus fortement corrélées dans les divers modèles. Une explication possible de cette situation peut provenir du fait que les secteurs possédant une forte densité de réseaux routiers locaux comporteront également une plus forte proportion d'imperméabilisation des sols, ainsi qu'une plus forte densité d'égouts pluviaux, deux éléments qui auront pour conséquence de limiter l'infiltration des sels de voiries dans les sols.

La pente moyenne du réseau routier est pour sa part ressortie comme affectant de manière négative la concentration des traceurs dans les puits. Bien qu'on soit en droit de s'attendre à une relation positive, l'épandage d'agents déglaçant étant plus abondant dans les secteurs à forte pente, il ne faut pas oublier que les pentes fortes favorisent également le ruissellement en surface plutôt que l'infiltration vers les eaux souterraines. Il apparait ici que la dernière relation l'emporte sur la première.

La forte corrélation qui a pu être observée entre la proportion de territoire développée et les trois traceurs liés aux sels de déglaçage s'explique aisément par la densité plus importante des surfaces qui y reçoivent des agents déglaçant (stationnements, trottoirs, etc.), ainsi que par la présence d'autres éléments introduisant ces traceurs dans l'environnement (piscines au sel et autres). Le modèle de la conductivité présente néanmoins une relation contre-intuitive au niveau de la proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 mètres (une proportion de territoire développée plus élevée serait liée à une conductivité moindre). Compte tenu de la faiblesse de la corrélation (t = - 3,67; Seuil observé = 0,0003), du fait que cette même relation soit corrélée de manière positive dans l'analyse univariée et de l'existence d'une corrélation contraire beaucoup plus forte dans le même modèle entre la proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 % et la conductivité (t = 12,50; Seuil observé = < 0,0001), la relation contre-intuitive apparait très peu plausible.

Du côté des sols, il apparait qu'une épaisseur moyenne des dépôts meubles plus importante entraine une concentration moindre en chlorures et en sodium dans l'eau des puits, ainsi qu'une plus faible

conductivité dans ces eaux. Bien que les mêmes corrélations se retrouvent au niveau des analyses univariées, il s'agit de relations étonnantes compte tenu de la grande mobilité des chlorures. Les fortes corrélations observées à ce niveau pourraient s'avérer véridiques, mais il est préférable de se montrer prudent avant de leur accorder trop de crédit. En effet, une étude des variables a permis de constater que les puits associés à une épaisseur de dépôts meubles de moins de 5 mètres possèdent une densité moyenne de réseau routier dans l'aire de vulnérabilité maximale de 3,5 % contre 2,6 % pour les puits associés à une densité de dépôts meubles de 5 mètres et plus. D'un autre côté, la proportion de territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 % (autre variable fortement corrélée aux trois modèles) est en moyenne de 25,3 % pour les puits associés à une densité de dépôts meubles de moins de 5 mètres contre 35,5 % pour ceux associés à une épaisseur de 5 mètres et plus. Il est donc incertain que la corrélation soit réellement liée à l'épaisseur des dépôts meubles, même si la relation est possible. Il serait nécessaire de procéder à une étude plus poussée de ce phénomène avant de pouvoir se prononcer.

L'élévation réelle des puits a pour sa part été corrélée de manière négative avec la conductivité et le sodium, une relation plausible étant donné que les puits situés plus haut en altitude seront moins susceptibles de recevoir des contaminants que ceux situés dans les valons.

Les relations négatives entre la recharge annuelle moyenne des aquifères et la concentration en chlorures et en sodium apparaissent également plausibles en raison de la plus grande dilution que connaitront les eaux des puits concernés. Il en va de même pour les relations négatives entre les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement et la concentration en sodium et la conductivité.

Finalement, quelques relations contre-intuitives ont été observées à l'intérieur des différents modèles. Ainsi, les analyses multivariées présentent l'indice DRASTIC comme étant corrélé de manière négative à la conductivité et à la concentration en chlorures, alors qu'en univarié ces relations ressortaient comme positives. Puisque, au même titre que la relation observée pour les nitrites et nitrates, des eaux souterraines plus vulnérables à la contamination provenant de la surface ne sont évidemment pas moins susceptibles de contenir une conductivité plus élevée et une plus forte concentration en chlorures, la corrélation doit être liée à une quelconque relation spatiale qui échappe à la présente étude.

Une autre relation contre-intuitive peut être observée dans les modèles de la conductivité et du sodium où la hauteur de la colonne d'eau (estimée en soustrayant le niveau piézométrique de la profondeur de

forage du puits) est corrélée de manière positive aux deux éléments tant en univarié qu'en multivarié. Puisqu'une colonne d'eau plus importante devrait en théorie permettre une plus grande dilution des nutriments et des contaminants qui ont atteint le puits, la relation inverse devrait plutôt être observée. Encore une fois, la relation est probablement due à une relation spatiale qui demeure incertaine dans la présente étude.

6. Conclusion

Les résultats obtenus dans la présente étude permettent de parler d'une plausibilité très élevée d'un impact négatif important des ISA sur les puits individuels du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles. Cette conclusion n'a rien de surprenant étant donné les très nombreuses études qui ont déjà observé un tel lien, ainsi que la densité très élevée qu'atteignent les ISA dans les aires de vulnérabilité maximales de certains puits de la zone d'étude.

Néanmoins, il est nécessaire de demeurer prudent dans l'interprétation de ces données, et ce principalement au niveau de l'imposition d'un seuil unique de densité comme celui proposé par Yates (1985). Tel que démontré par la présente étude, bien qu'étant très importante, la densité des ISA n'est que l'une des nombreuses variables qui peuvent expliquer la variance de la concentration des contaminants dans les puits individuels. Par conséquent, une même densité d'ISA peut fortement affecter la qualité d'eau des puits d'un secteur et avoir très peu d'effet dans un autre.

Malgré le pouvoir explicatif très inégal des différents modèles (3,80 % à 68,7 %), situation peu surprenante compte tenu du manque de précision de certaines données utilisées, des réactions très différentes affectant les traceurs sélectionnés et du fait que plusieurs variables importantes n'ont pas pu être intégrées dans les analyses statistiques, les résultats des analyses nous ont permis d'observer l'incidence de plusieurs variables sur la concentration des traceurs ciblés (azote total, azote ammoniacal, nitrites et nitrates, phosphore total et *E. coli*) dans les puits de la zone d'étude. Cela a notamment été le cas de la proportion de territoire développée, la densité des ISA par km^2, le nombre d'ISA, les précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement, ainsi que l'épaisseur moyenne des dépôts meubles.

Par conséquent, la détermination d'une densité maximale d'ISA, bien que souhaitable en vertu du principe de précaution et de la complexité des solutions alternatives (par exemple de réaliser des études approfondies dans chaque secteur), n'est assurément pas une solution optimale à elle seule pour éviter la contamination des puits par les ISA. Néanmoins, l'imposition d'une densité maximale, ou à tout le moins une modification des habitudes quant au développement de futurs secteurs résidentiels, apparait indispensable. Si les villes et municipalités impliquées souhaitent réellement protéger les ressources en eaux souterraines, il est nécessaire qu'elles encadrent les différents développements en conséquence et ne permettent plus la construction de secteurs résidentiels denses sur ISA. Pour ce qui est des secteurs déjà bâtis possédant une densité d'ISA élevée, il sera nécessaire d'évaluer sérieusement l'option d'un

raccordement à l'égout lorsque cela s'avère possible (volonté de payer des citoyens, faisabilité technique du raccordement, etc.). Bien entendu, la prise de décision en la matière nécessitera de procéder à des études plus approfondies et plus spécifiques de cette problématique.

Du côté des sels de déglaçage, leur impact négatif sur la qualité d'eau des puits individuels ne laisse que très peu de doute. Contrairement aux contaminants présents dans les ISA qui peuvent provenir de nombreuses autres sources sur le territoire, les chlorures présents dans les puits ne sont susceptibles de provenir que d'un nombre limité de sources. Dans les trois modèles, la proportion de territoire développée, qui rassemble logiquement les autres sources de chlorures importantes (sels de déglaçage épandus sur les trottoirs et dans les stationnements, piscines au sel, etc.), rivalise de près avec la densité du réseau routier en terme d'influence sur la variabilité de l'impact.

Malgré tout, les analyses statistiques réalisées dans la présente étude, qui visaient principalement à identifier les éléments susceptibles de faire varier la concentration de chlorures dans les puits, ont fait ressortir des éléments intéressants. Ainsi, il est apparu que malgré le fait que les réseaux routiers à forte pente du secteur d'étude recevront plus de sels de déglaçage, les puits apparaissent y contenir une concentration moindre en chlorures possiblement en raison du fait que ces contaminants auront tendance à ruisseler en surface plutôt qu'à s'infiltrer. Il est néanmoins important de considérer que les eaux de surfaces en seront tout de même fortement affectées. Aussi, les puits situés dans des secteurs possédant une plus forte élévation et bénéficiant d'une plus grande recharge des eaux souterraines apparaissent moins affectés par les chlorures.

7. Limites

Compte tenu de la complexité de la problématique abordée, la présente étude comporte de multiples limites. L'une des plus importantes de ces limites est sans aucun doute l'absence de données précises pour plusieurs variables (données du PACES et autres) qui ont dû être basées sur des estimations qui peuvent dans certains cas ne pas être suffisamment représentatives de la réalité. De plus, de nombreuses variables telles que la présence de chemins d'écoulement préférentiels, la porosité et la conductivité hydraulique précise du sol et des aquifères, le pH du sol et des eaux souterraines, le taux d'oxygène des eaux souterraines, l'abondance de microorganismes dans les sols, le type d'ISA, l'état des ISA, le nombre de résidents des propriétés munies d'ISA, l'état des puits, la distance séparant les puits des dispositifs non étanches avoisinants, ainsi que la quantité de sels de déglaçage épandue dans les différents secteurs du réseau routier n'ont pu être considérées dans les analyses en raison de l'absence de données précises et fiables.

Aussi, comme la campagne d'échantillonnage des puits du bassin versant de la prise d'eau a été réalisée sur une base volontaire, nécessitant l'intérêt et l'accord des résidents, il est fort possible que la base de données des puits testés sous-estime le degré de contamination des puits du secteur. Les résidents conscients de la mauvaise qualité d'eau de leur puits ou craignant que les tests ne révèlent une mauvaise qualité se sont probablement abstenus de participer à l'étude par peur que cela n'affecte la valeur de leur propriété, et ce malgré l'assurance des acteurs impliqués que la donnée demeurerait confidentielle.

La méthode utilisée pour définir les aires de vulnérabilité des puits représente une autre limite importante de l'étude. Compte tenu du nombre élevé de puits impliqués et du budget limité, il a été nécessaire de recourir à une méthode générale basée sur des estimations grossières plutôt que de réaliser une analyse précise du terrain entourant chacun des puits. Par conséquent, il est possible que le manque de précision dans la délimitation des aires de vulnérabilité ait engendré des biais importants dans les analyses statistiques.

De plus, malgré le fait que les fosses à vidange totale et à vidange périodique connues aient été éliminées de l'étude, il est possible qu'un bon nombre de ces installations soient demeurées partie intégrante de l'analyse en raison des nombreuses ISA dont le type est demeuré inconnu. Aussi, même si en théorie les fosses à vidange totale se doivent d'être parfaitement étanches, en réalité il est possible

que les plus anciennes d'entre elles se soient suffisamment détériorées avec le temps pour permettre à leur contenu de s'infiltrer à travers le sol.

D'un autre côté, les ISA et les puits étaient généralement positionnés sur les centroïdes des lots ou de manière approximative sur la propriété, une position qui peut ne pas être suffisamment représentative de la réalité lorsque les lots sont de grande taille. Il est donc possible que des ISA qui auraient dû être incluses dans l'aire de vulnérabilité des puits n'aient pas été prises en compte ou encore que certaines des ISA comprises auraient dû être exclues.

Une autre limite pouvant engendrer des conséquences similaires est liée à la fiabilité des informations contenues dans la base de données des ISA. En effet, puisque cette base de données n'est pas parfaitement à jour et qu'il a été impossible de valider l'ensemble des informations qu'elle contient en raison du nombre élevé de ces dispositifs à l'intérieur des limites du bassin versant (plus de 5 000), il est fort probable que certaines ISA n'aient plus été en activité (raccordement au réseau d'égout ou autres raisons) au moment de l'échantillonnage des puits. Néanmoins, compte tenu du nombre relativement élevé de puits utilisés et de l'étendue de la zone d'étude, il est peu plausible que cette limite ait affecté de manière prononcée les résultats des analyses statistiques. De plus, en raison du fait que les nutriments (azote et phosphore) générés par les ISA peuvent demeurer présents dans les sols et les eaux souterraines longtemps après le débranchement de l'installation (OMS, 2011), un raccordement récent à l'égout, il y a quelques mois ou quelques années, n'est pas nécessairement susceptible de faire une différence importante par rapport à la concentration d'azote total, de nitrites et nitrates ou de phosphore total observée dans les puits.

En ce qui a trait aux sources d'azote, de phosphore et de bactéries *E. coli*, autres que les ISA, il est fort possible que certains éléments d'importance aient été oubliés en raison de la nature sommaire des recherches effectuées à ce niveau, en plus du fait que d'autres sources n'ont tout simplement pas pu être considérés dans les analyses en raison de la trop grande variabilité de leurs effets ou de l'incapacité à les localiser précisément comme ce fut le cas pour les engrais des pelouses, les animaux domestiques et la faune locale. Sur le même sujet, il est important de considérer le risque d'erreur élevé lié au départage des types d'activités agricoles à l'aide d'une orthophotographie datant de 2013. En plus du fait que cette orthophotographie n'était pas suffisamment à jour pour tenir compte des développements récents, l'opération elle-même était difficile à réaliser et le risque de commettre une erreur d'interprétation était élevé. Le même type de limite est présent pour les modèles des chlorures,

du sodium et de la conductivité puisque l'étude n'a pas été en mesure de prendre en compte les sels de déglaçage épandus sur les trottoirs ou dans les stationnements, ainsi que les autres usages susceptibles de représenter un apport en chlorures.

Finalement, il est important de tenir compte du fait que les données de qualité d'eau des puits ne sont représentatives que d'un moment précis au cours de l'année 2016 ou 2017. Il est donc possible qu'un échantillonnage réalisé à un autre moment ou sur plusieurs années produise des résultats différents.

Bibliographie

Association pour la protection de l'environnement du Lac-Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL). (2009) Étude limnologique du haut-bassin de la rivière Saint-Charles, rapport final, Québec.

Association pour la protection de l'environnement du Lac-Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL). (2013) Occupation du territoire, donnée géospatiale.

Association pour la protection de l'environnement du Lac-Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL). (2016) Bulletin d'information, Protéger l'eau de nos lacs et de nos rivières, Ça nous concerne tous!, Automne 2016.

Ballard JM. (2004) Impact des installations septiques sur l'aquifère de roc fracturé du secteur résidentiel du Mont-Cervin, Lac-Beauport, Québec. Mémoire de maitrise en sciences de la terre, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

Bauman BJ., Schafer WM. (1985) Estimating ground-water quality impacts from on-site sewage treatment systems, in: Proceedings of the Fourth National Home Sewage Treatment Symposium. American Society of Agricultural Engineers, New Orleans, Louisiana, pp. 285–294.

Borchardt MA., Bradbury KR., Alexander EC., Kolberg RJ., Alexander SC., Archer JR., Braatz LA., Forest BM., Green JA., Spencer SK. (2011) Norovirus Outbreak Caused by a New Septic System in a Dolomite Aquifer. Ground Water. 49(1), 85–97.

Bolduc Deraspe G. (2017) Étude de l'impact des installations sanitaires autonomes sur la qualité d'eau des puits individuels. École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional, Université Laval. 119 pages.

Bourne AC. (2001) Assessing the Contamination Risk of Private Well Water Supplies in Virginia. Master of Science In Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Carroll SP. (2005) Risk-Based Approach To on-Site Wastewater Treatment System Siting Design and Management. A thesis by publication submitted in partial fulfilment of the requirement of the degree of doctor of philosophy (PhD), Centre for Built Environment and Engineering Research, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology.

Chambers PA., Guy M., Roberts ES., Kent R., Charlton MN., Gagnon C., Grove G., Foster N. (2001) Les éléments nutritifs et leurs effets sur l'environnement au Canada. Environnement Canada, Ottawa.

Christensen TH., Kjeldsen P., Albrechtsen H., Heron G., Nielsen PH., Bjerg PL., Holm PE. (1994) Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. Environmental Science and Technology. 24(2), 119–202.

Clawges RM., Vowinkel EF. (1997) Variables indicating nitrate contamination in Bedrock Aquifers, Newark Basin, New Jersey. Water Resources Bulletin. 32(5), 1055–1066.

Dawes L., Goonetilleke A. (2003) An investigation into the role of site and soil characteristics in onsite sewage treatment. Environmental Geology. 44(4), 467–477.

Environnement Canada et Santé Canada. (2001) Rapport d'évaluation de la liste des substances d'intérêt prioritaires - Sels de voirie. Ottawa, Environnement Canada, 188 p.

Gold AJ., DeRagon WR., Sullivan WM., Lemunyon JL. (1990) Nitrate-Nitrogen Losses Groundwater From Rural and Suburban Land Uses. Journal of Soil and Water Conservation. 45(2), 305–310.

Hantzsche N., Finnemore E. (1992) Predicting Ground-Water Nitrate-Nitrogen Impacts. Ground Water. 30(4), 490–499.

Lefebvre R. (2016) Professeur titulaire. Centre Eau Terre Environnement, INRS, Communication personnelle en décembre.

Miller JC. (1972) Nitrate Contamination Of The Water-Table Aquifer In Delaware, Report of Investigation no. 20. Newark, DE.

Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015) Guide d'interprétation et d'application, Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (Q-2, r.8). Direction générale des politiques de l'eau, Direction des eaux municipales.

Nicosia LA., Rose JB., Stark L., Stewart MT. (2001) A field study of virus removal in septic tank drainfields. Journal of environmental quality. 30(6), 1933–1939.

Nizeyimana E., Petersen GW., Anderson MC., Evans BM., Hamlett JM., Baumer GM. (1996) Statewide GIS/census data assessment of nitrogen loadings from septic systems in Pennsylvania. Journal of Environmental Quality. 25(2), 346–354.

Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2011) Nitrate and nitrite in drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.

Pinette SR., Noble WT., Locke DB., Loiselle MC. (1999) Residential Septic Impact On Groundwater Quality in Maine, Characterization of Nitrate Concentrations in Domestic Wells at Subdivisions, State of Maine.

Richards RP., Baker DB., Creamer NL., Kramer JW., Ewing DE., Merryfield BJ., Wallrabenstein LK. (1996) Well water quality, well vulnerability, and agricultural contamination in the midwestern United States. Journal of Environmental Quality. 25(3), 389–402.

Robins NS. (1998) Recharge: the key to groundwater pollution and aquifer vulnerability. Groundwater Pollution. 130, 1–5.

Shadford CB., Joy DM., Lee H., Whiteley HR., Zelin S. (1997) Evaluation and use of a biotracer to study ground water contamination by leaching bed systems. Journal of Contaminant Hydrology. 28(3), 227–246.

Sikora LJ., Corey RB. (1975) Fate of nitrogen and phosphorus in soils under septic tank wastedisposal fields.

Simpson H. (2015) Les eaux souterraines - Une ressource rurale importante, Les puits d'eau privés en milieu rural. [En ligne] http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-048.htm, (consulté le 5 janvier 2017).

Standley LJ., Rudel RA., Swartz CH., Attfield KR., Christian J., Erickson M., Brody JG. (2008) Wastewater-contaminated groundwater as a source of endogenous hormones and pharmaceuticals to surface water ecosystems. Environmental Toxicology and Chemistry. 27(12), 2457–2468.

Talbot Poulin MC., Comeau G., Tremblay Y., Therrien R., Nadeau MM., Lemieux JM., Molson J., Fortier R., Therrien P., Lamarche L., Donati-Daoust F., Bérubé S. (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (PACES-CMQ) Rapport final.

Tuthill A., Meikle DB., Alavanja MCR. (1998) Coliform bacteria and nitrate contamination of wells in major soils of Frederick, Maryland. Journal of Environmental Health. 60(8), 16–20.

US Environmental Protection Agency. (2002) Wastewater Technology Fact Sheet Bacterial Source Tracking.

Yates MV. (1985) Septic tank density and ground water contamination. Ground Water.

Annexe 1 : Identification des sources autres que les ISA susceptibles de contaminer les puits par les traceurs sélectionnés

Au cours de cette étape, une revue de littérature a été réalisée afin d'identifier les principaux éléments du bassin versant susceptibles d'influencer d'approximativement plus de 10 % la concentration d'azote ammoniacal, de nitrites et de nitrates, d'azote total, de phosphore total et d'*E. coli* dans les puits. Compte tenu de la complexité des interactions pouvant influencer le degré d'incidence d'une source de pollution sur un puits et des ressources limitées de la présente étude, la démarche adoptée a surtout consisté à départager les éléments potentiellement problématiques des éléments qui ne le sont pas.

Par la suite, il fut possible d'utiliser les informations recensées par l'APEL et l'OBV de la Capitale au cours des dernières années afin de dresser, lorsque possible, un portrait général de la localisation et de l'étendue des différents éléments connus du territoire qui sont les plus susceptibles de contaminer l'eau des puits par les traceurs sélectionnés. Il a néanmoins été nécessaire de départager en différentes catégories les surfaces agricoles qui avaient préalablement été rassemblées sous un type unique, afin de tenir compte de leurs impacts potentiellement très différents. Cette opération fut réalisée à l'aide d'une orthophotographie du bassin versant datant de 2013.

Au niveau des analyses statistiques, seuls les éléments à caractère fixe suivant ont été considérés :

- Carrières et sablières
- Centres de ski
- Centres équestres
- Chenils
- Dépotoirs (fermés)
- Dépôts de matériaux secs
- Élevages de volailles
- Installations sanitaires autonomes
- Milieux agricoles : cultures et grands jardins
- Milieux agricoles : enclos à bétail
- Milieux agricoles : pâturages et fourrages
- Milieux agricoles : production de sapins
- Milieux humides, marécages et marais (excepté tourbières)
- Sites d'enfouissement sanitaire (fermés)
- Terrains de golf et champs de pratique

Annexe 2 : Résultats significatifs des approches univariées

Tableau 12 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les nitrites et nitrates

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	14.21	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	13.36	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	9.33	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	5.26	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	11.90	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	10.57	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	9.43	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	8.75	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	8.57	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	8.21	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	7.94	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	7.58	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 1000 m	7.50	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	9.45	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	5.47	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	8.89	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	9.01	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	8.74	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	8.42	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	7.53	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	6.76	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	5.93	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	5.23	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	14.21	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	13.82	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	6.20	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	12.01	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	10.08	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	8.21	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	8.22	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	7.67	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	7.09	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	6.46	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	5.97	< 0.0001

Tableau 12 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les nitrites et nitrates (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 1000 m	2.94	0.0033
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 500 m	3.43	0.0006
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	3.12	0.0018
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	2.76	0.0058
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	2.20	0.0282
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	1.97	0.0494
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	2.05	0.0407
Âge du puits	2.11	0.0348
Hauteur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits	- 2.14	0.0325
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 6.12	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 3.92	< 0.0001
Présence de la zone 1 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	6.24	< 0.0001
Présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	7.19	< 0.0001
Présence de la zone 3 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 4.10	< 0.0001
Élévation relative des puits testés	6.22	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 3.92	< 0.0001
Gestion par ISA des eaux usées de la propriété	- 4.49	< 0.0001
Présence de terrains de golf à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	4.03	< 0.0001
Présence d'élevage de volailles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 2.43	0.0154
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 2.65	0.0082
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt organique, sur sable et gravier ou dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	3.31	0.0010

Tableau 13 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'azote total

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	16.00	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	14.78	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	9.62	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	5.48	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	14.02	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	12.24	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	10.50	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	9.54	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	9.34	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	8.95	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	8.59	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	8.20	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 1000 m	9.83	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	12.14	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	7.29	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	3.90	0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	10.85	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	10.60	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	9.95	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	9.29	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	8.02	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	7.18	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	6.31	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	5.55	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	18.57	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	18.36	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	8.32	< 0.0001
Densité des ISA par km2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	3.77	0.0002
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	16.40	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	14.24	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	11.79	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	11.35	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	10.46	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	9.93	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	9.26	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	8.78	< 0.0001

Tableau 13 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'azote total (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 1000 m	5.04	0.0033
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 500 m	5.51	0.0006
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 100 m	3.05	0.0023
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 50 m	3.05	0.0024
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	5.24	0.0018
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	4.82	0.0058
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	4.10	0.0282
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	3.73	0.0002
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	3.70	0.0002
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	3.56	0.0004
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	3.27	0.0011
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	3.05	0.0023
Âge du puits	2.84	0.0046
Longueur du tubage du puits	-2.27	0.0231
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	-6.92	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	-6.22	< 0.0001
Niveau de confinement des aquifères	3.00	0.0028
Présence de la zone 1 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	6.30	< 0.0001
Présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	6.46	< 0.0001
Présence de la zone 3 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 5.67	< 0.0001
Présence de la zone 4 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 2.20	0.0281
Élévation relative des puits testés	7.57	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 5.64	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	- 2.82	0.0048
Présence de terrains de golf à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	3.14	0.0017
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 3.37	0.0008
Présence du contexte hydrostratigraphique de type sable et gravier, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	2.30	0.0217
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt organique, sur sable et gravier ou dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	3.45	0.0006
Température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 2.53	0.0114

Tableau 14 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'azote ammoniacal

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 5.94	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité maximale	3.02	0.0025
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	2.36	0.0183
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité maximale	2.18	0.0294
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	1.97	0.0485
Présence du contexte hydrostratigraphique de type silt, sur sable et gravier, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	2.39	0.0168
Présence du contexte hydrostratigraphique de type sable et gravier silteux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 1.98	0.0478
Indice DRASTIC	2.74	0.0063
Présence de la zone 3 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 2.93	0.0035
Présence d'un dépôt de matériaux secs à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.09	0.0370

Tableau 15 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le phosphore total

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	5.37	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	4.65	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	4.36	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	5.90	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	5.56	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	6.00	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	6.19	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	6.14	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	5.98	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	5.83	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	5.64	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 2.20	0.0282
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	6.00	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	2.64	0.0085
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	2.67	0.0077
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	2.28	0.0229
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	2.15	0.0317
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 1000 m	3.42	0.0006
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 500 m	2.78	0.0055
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	2.67	0.0076

Tableau 15 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le phosphore total (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Âge du puits	2.75	0.0060
Longueur de la colonne d'eau à l'intérieur du puits	- 4.00	< 0.0001
Profondeur du puits	- 4.78	< 0.0001
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 4.53	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	5.24	< 0.0001
Niveau de confinement des aquifères	- 2.51	0.0122
Indice DRASTIC	4.26	< 0.0001
Présence de la zone 2 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	5.36	< 0.0001
Présence de la zone 3 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 3.46	0.0005
Présence de la zone 4 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.60	0.0094
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 4.46	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	- 6.15	< 0.0001
Présence de terrains de golf à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.86	0.0043
Présence de carrière ou de sablière à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.77	0.0057
Présence de culture fourragère à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	4.77	< 0.0001
Présence de culture annuelle à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	3.90	< 0.0001
Présence de milieux humides à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.71	0.0069
Présence du contexte hydrostratigraphique de type dépôt hétérogène, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	4.95	0.0008
Présence du contexte hydrostratigraphique de type silt sableux ou graveleux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	3.42	0.0006
Présence du contexte hydrostratigraphique de type sable et gravier silteux, sur roc à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale du puits	- 2.60	0.0094
Température moyenne au cours des 30 jours précédant le prélèvement	6.04	< 0.0001
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	2.15	0.0314

Tableau 16 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour l'*E. coli*

Variables	Estimations aux paramètres	Khi-deux de Wald	Seuils observés
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 1000 m	0.00985	11.3285	0.0008
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	0.0201	14.8325	0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	0.2094	4.8507	0.0276
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	0.0170	16.0182	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	0.0266	20.4337	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	0.0364	20.4671	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.0470	21.2123	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	0.0548	18.6206	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	0.0629	15.6607	< 0.0001
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	0.0666	11.7701	0.0006
Nombre d'ISA dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	0.0774	11.4691	0.0007
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.00430	13.7140	0.0002
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	0.00448	17.0029	< 0.0001
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	0.00202	6.5857	0.0103
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	0.00171	8.6037	0.0034
Densité des ISA par km^2 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	0.00310	7.9626	0.0048
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 500 m	0.0375	5.1388	0.0234
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité de 100 m	0.0266	4.5603	0.0327
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	0.0387	5.5113	0.0189
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	0.0334	4.8728	0.0273
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	0.0327	5.2750	0.0216
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	0.0281	4.3274	0.0375
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	0.0286	4.6574	0.0309
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	0.0279	4.6430	0.0312
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	0.0298	5.4818	0.0192
Âge moyen des ISA dans l'aide de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	0.0282	5.1683	0.0230
Âge du puits	0.0163	5.3773	0.0204
Longueur du tubage du puits	- 0.0999	9.7107	0.0018
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 0.1751	11.7342	0.0006
Présence de la zone 1 du RCI 2016 à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	0.6518	6.6991	0.0096
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	0.00754	18.8904	< 0.0001

Tableau 17 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les chlorures

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	26.51	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	24.95	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	13.48	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	7.86	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	23.59	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	21.51	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	19.23	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	17.55	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	16.62	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	15.43	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	14.18	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	12.99	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	18.91	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	19.45	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	10.63	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	7.05	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	17.99	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	16.89	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	14.85	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	13.59	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	13.03	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	12.26	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	11.56	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	10.85	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	9.61	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	8.90	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	4.14	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	2.11	0.0353
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	6.86	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	6.38	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	6.03	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	5.95	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	5.15	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	4.71	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	4.08	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	3.76	0.0002

Tableau 17 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour les chlorures (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	7.93	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	6.21	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	2.29	0.0219
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	7.00	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	5.48	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	5.32	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	4.35	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	4.19	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	3.76	0.0002
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	2.97	0.0030
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	1.98	0.0483
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 1000 m	15.71	< 0.0001
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	16.29	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 8.07	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	- 7.96	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	21.23	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	20.53	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	15.87	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	11.06	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	19.09	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	20.07	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	19.01	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	17.75	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	17.22	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	16.60	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	16.01	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	15.37	< 0.0001
Âge du puits	6.23	< 0.0001
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 9.36	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 7.05	< 0.0001
Indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	2.67	0.0076
Élévation réelle des puits testés	- 5.17	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 8.20	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	- 6.96	< 0.0001

Tableau 18 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour la conductivité

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	24.66	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	22.71	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	13.09	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	7.60	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	23.80	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	22.23	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	19.97	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	18.27	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	17.55	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	16.40	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	15.03	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	13.72	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	17.78	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	18.47	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	9.65	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	6.57	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	18.06	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	17.74	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	15.88	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	14.41	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	13.70	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	12.90	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	12.00	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	11.23	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	10.34	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	9.18	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	5.14	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	2.62	0.0088
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	7.93	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	7.22	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	6.79	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	6.81	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	6.19	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	5.58	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	4.95	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	4.44	0.0002

Tableau 18 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour la conductivité (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	6.26	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	4.29	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	2.70	0.0070
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	5.70	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	4.13	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	3.93	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	3.08	0.0021
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	3.19	0.0015
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	3.04	0.0024
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	2.52	0.0118
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 1000 m	15.99	< 0.0001
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	16.47	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 8.23	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	- 8.28	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	21.92	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	22.19	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	16.14	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	11.26	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	21.84	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	23.25	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	22.07	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	20.57	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	19.85	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	19.17	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	18.52	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	17.82	< 0.0001
Âge du puits	5.49	< 0.0001
Profondeur du puits	2.75	0.0061
Hauteur de la colonne d'eau du puits	3.40	0.0007
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 12.31	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 3.88	0.0001
Indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	3.62	0.0003
Élévation réelle des puits testés	- 9.38	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 13.78	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	- 9.94	< 0.0001
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 2.95	0.0032

Tableau 19 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le sodium

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	23.66	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	22.60	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	14.92	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	8.99	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	23.06	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	22.28	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	20.29	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	18.64	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	17.79	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	16.37	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	15.06	< 0.0001
Densité du réseau routier de tous les niveaux confondus à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	14.00	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	17.11	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	17.61	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	11.29	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	7.71	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	17.35	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	17.18	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	15.63	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	14.36	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	13.77	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	12.85	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	12.08	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau local à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	11.50	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	9.74	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	9.36	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	5.26	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 50 m	3.17	0.0016
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	7.85	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	7.35	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	7.03	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	6.89	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	6.37	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	5.82	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	5.14	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau collectrice à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	4.75	< 0.0001

Tableau 19 : Résultats significatifs de l'approche univariée pour le sodium (suite)

Variables	Valeurs de t	Seuils observés
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	6.49	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	5.23	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	2.12	0.0338
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	6.00	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	5.16	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	4.72	< 0.0001
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	3.90	0.0021
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	3.37	0.0008
Densité du réseau routier de niveau autoroute, nationale et régionale à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	2.67	0.0076
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 1000 m	14.58	< 0.0001
Complexité du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	14.96	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 8.75	< 0.0001
Pente moyenne du réseau routier à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 500 m	- 8.83	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité maximale	19.25	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 500 m	19.91	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 100 m	16.19	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité de 50 m	11.85	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 1 %	19.14	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 2 %	20.51	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 3 %	19.69	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 4 %	18.70	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 5 %	18.25	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 6 %	17.70	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 7 %	17.18	< 0.0001
Proportion du territoire développée dans l'aire de vulnérabilité calculée avec une porosité de 8 %	16.62	< 0.0001
Âge du puits	5.95	< 0.0001
Profondeur du puits	2.79	0.0053
Hauteur de la colonne d'eau du puits	3.57	0.0004
Recharge annuelle moyenne des aquifères dans l'aire de vulnérabilité maximale	- 10.44	< 0.0001
Épaisseur moyenne des dépôts meubles à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 3.77	0.0002
Indice DRASTIC à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	4.07	0.0003
Élévation réelle des puits testés	- 10.15	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité maximale	- 12.72	< 0.0001
Pente du terrain à l'intérieur de l'aire de vulnérabilité de 100 m	- 9.99	< 0.0001
Précipitations totales au cours des 30 jours précédant le prélèvement	- 3.12	0.0019

Annexe 3 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout

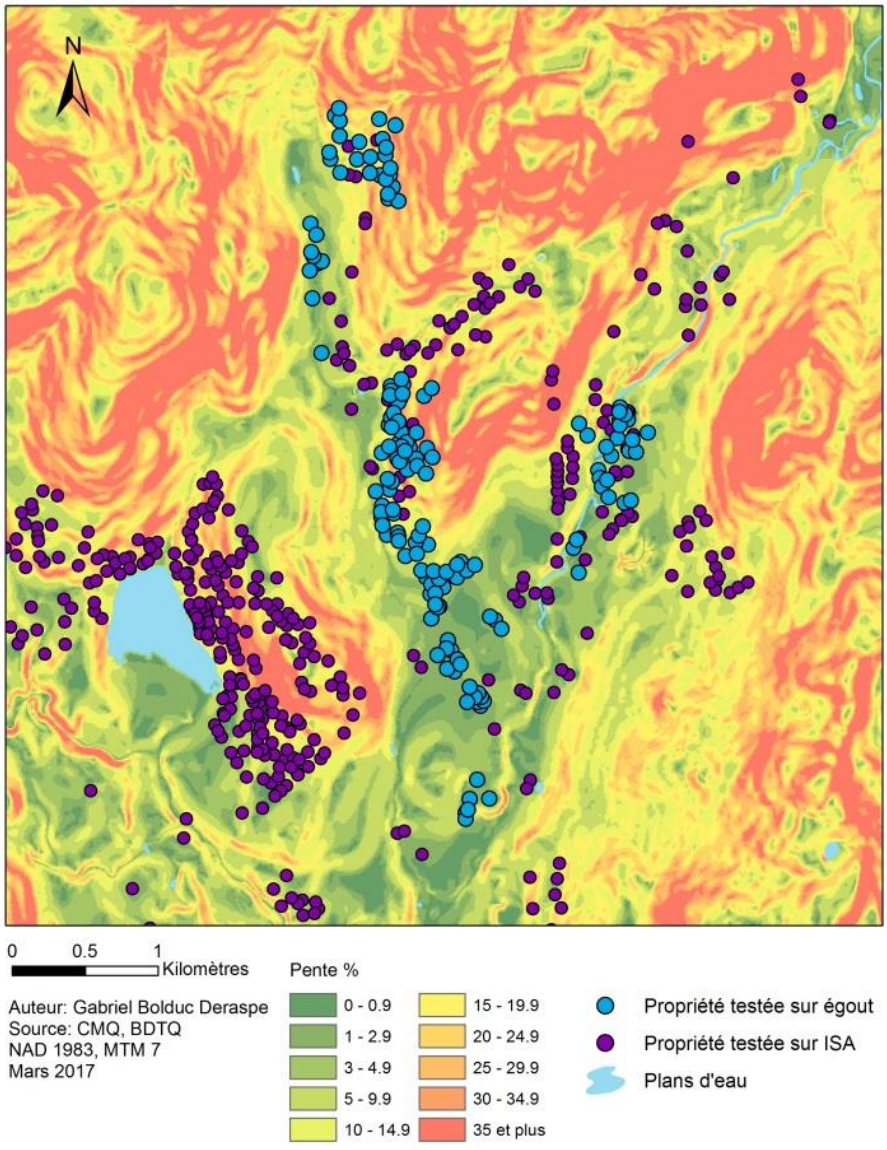


Figure 10 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 1)

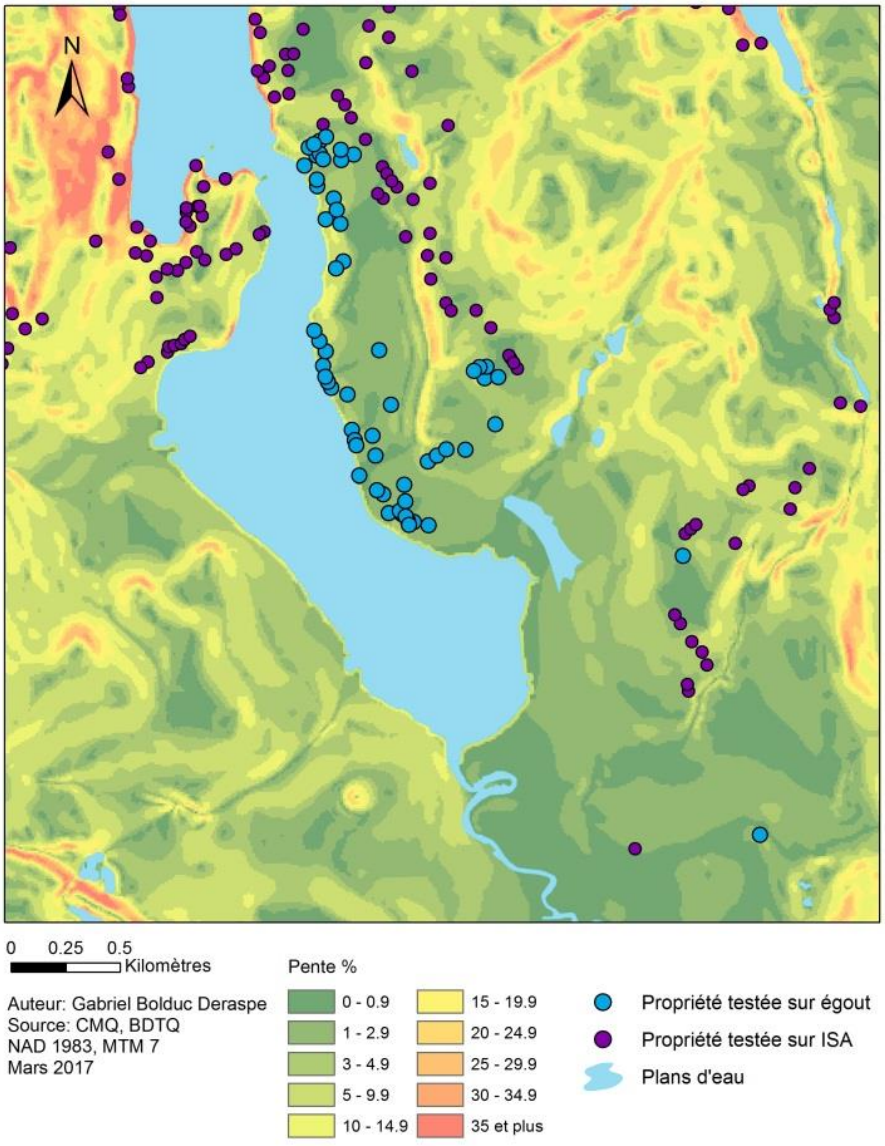


Figure 11 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 2)

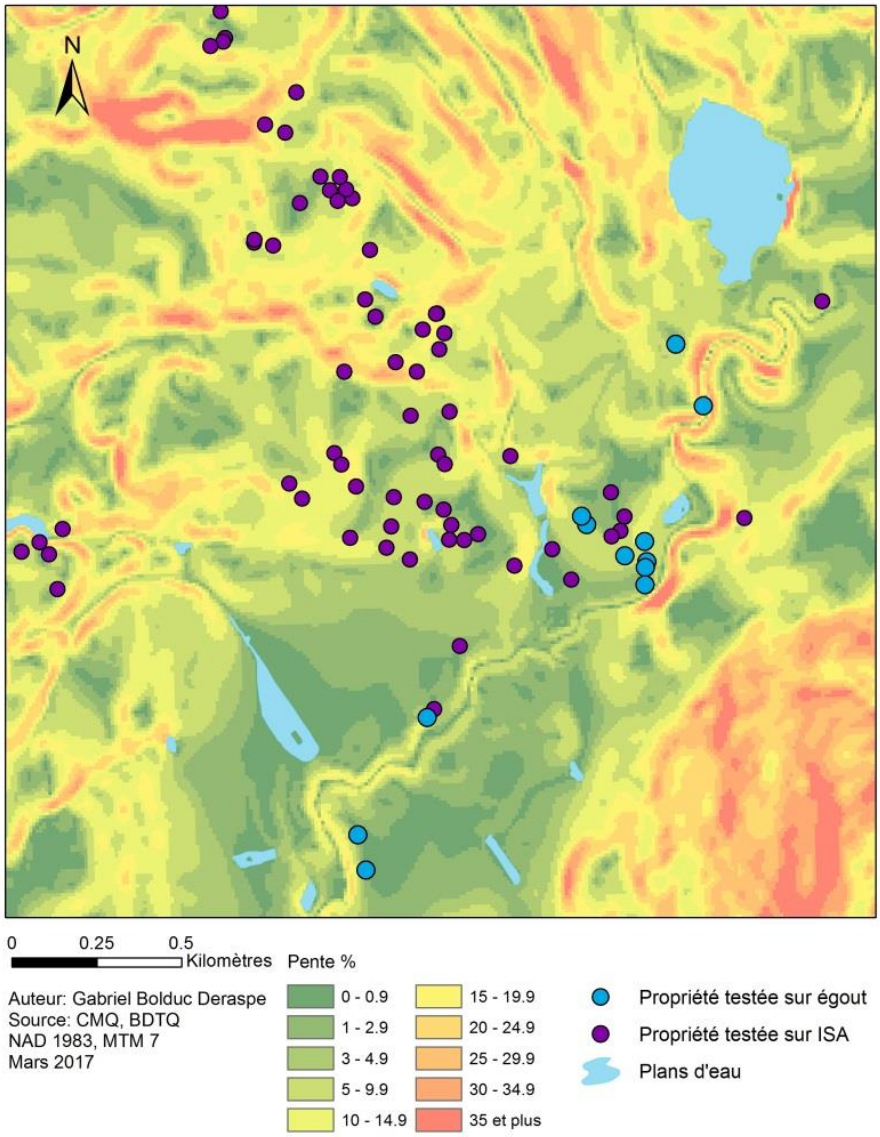


Figure 12 : Localisation des propriétés testées desservies par un réseau d'égout (secteur 3)

Annexe 4 : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines du bassin versant de la prise d'eau sur la rivière Saint-Charles

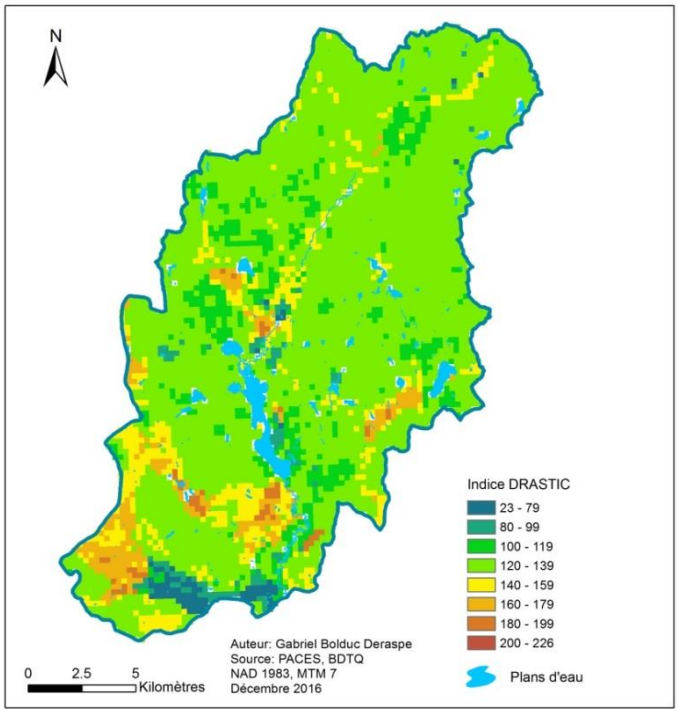


Figure 13 : Indice DRASTIC du bassin versant

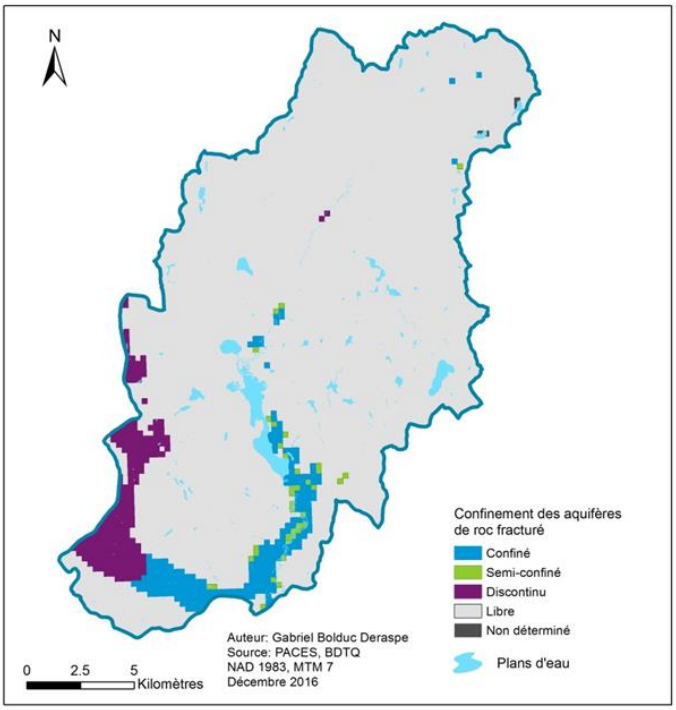


Figure 14 : Confinement des aquifères de roc fracturé du bassin versant

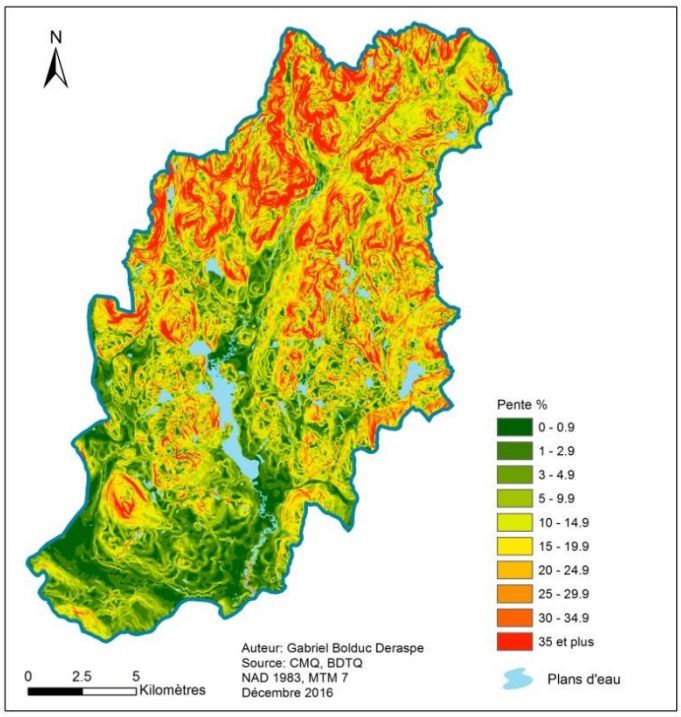


Figure 15 : Pentes du bassin versant

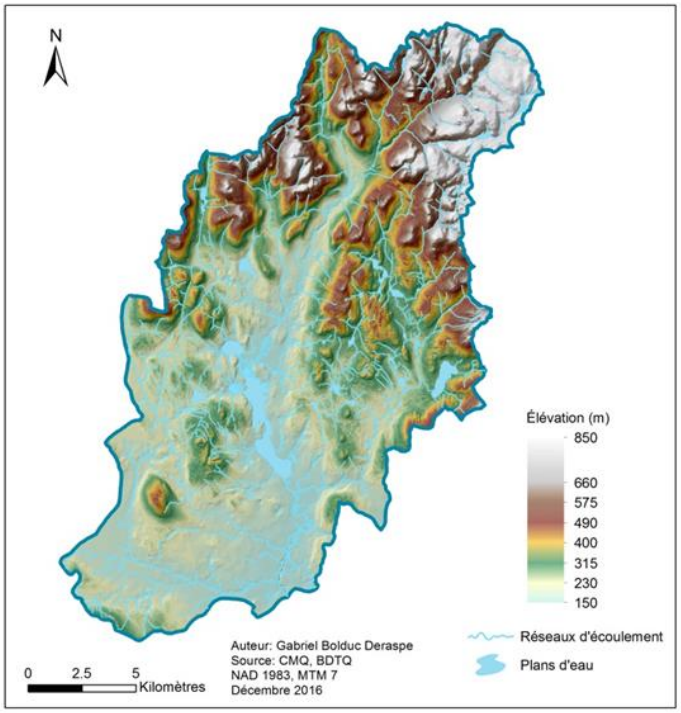


Figure 16 : Élévation du bassin versant

Annexe 5 : Définitions des niveaux de service du réseau routier

Chaussée de niveau 1 :

- Durant la précipitation, épandage avec fondant ou avec mélange « fondant – pierre abrasive » aux endroits suivants :
  - aux intersections munies de signaux lumineux ou d'arrêt obligatoire sur une distance de 60 mètres de la voie de freinage (fig. 1 et 2);
  - aux arrêts d'autobus;
  - vis-à-vis des zones scolaires;
  - aux endroits en pente;
  - aux approches des traverses à niveau;
  - dans les courbes prononcées;
  - sur les surfaces glacées.

- Après la précipitation, épandage au besoin de fondant ou avec mélange « fondant – pierre abrasive » sur toute la longueur de la chaussée afin que sa surface soit complètement libre de neige et de glace.

Chaussée de niveau 2 :

- Durant la précipitation, épandage avec fondant ou avec mélange « fondant – pierre abrasive » aux endroits suivants :
  - aux intersections munies de signaux lumineux ou d'arrêt obligatoire sur une distance de 60 mètres sur la voie de freinage (fig. 1 et 2);
  - aux arrêts d'autobus;
  - aux endroits en pente;
  - aux approches des traverses à niveau;
  - dans les courbes prononcées;
  - sur les surfaces glacées.

- Après la précipitation, intersections et arrêts d'autobus au pavage ou recouverts de fondant ou de mélange « fondant – pierre abrasive » et épandage au besoin d'abrasif sur le reste de la chaussée.

Chaussée de niveau 3 :

- Durant la précipitation, épandage avec abrasif aux endroits suivants :
  - aux intersections sur une distance de 60 mètres de la voie de freinage (fig. 2 et 3);
  - aux endroits en pente;
  - aux approches des traverses à niveau;
  - dans les courbes prononcées;
  - sur les surfaces glacées.

- Après la précipitation, intersections recouvertes d'abrasif ou au pavage et épandage au besoin d'abrasif aux endroits glacés.

Annexe 6 : Localisation des sources potentielles d'apports et concentration d'azote, de phosphore, d'*E. coli,* de chlorures et de sodium dans les puits testés du bassin versant

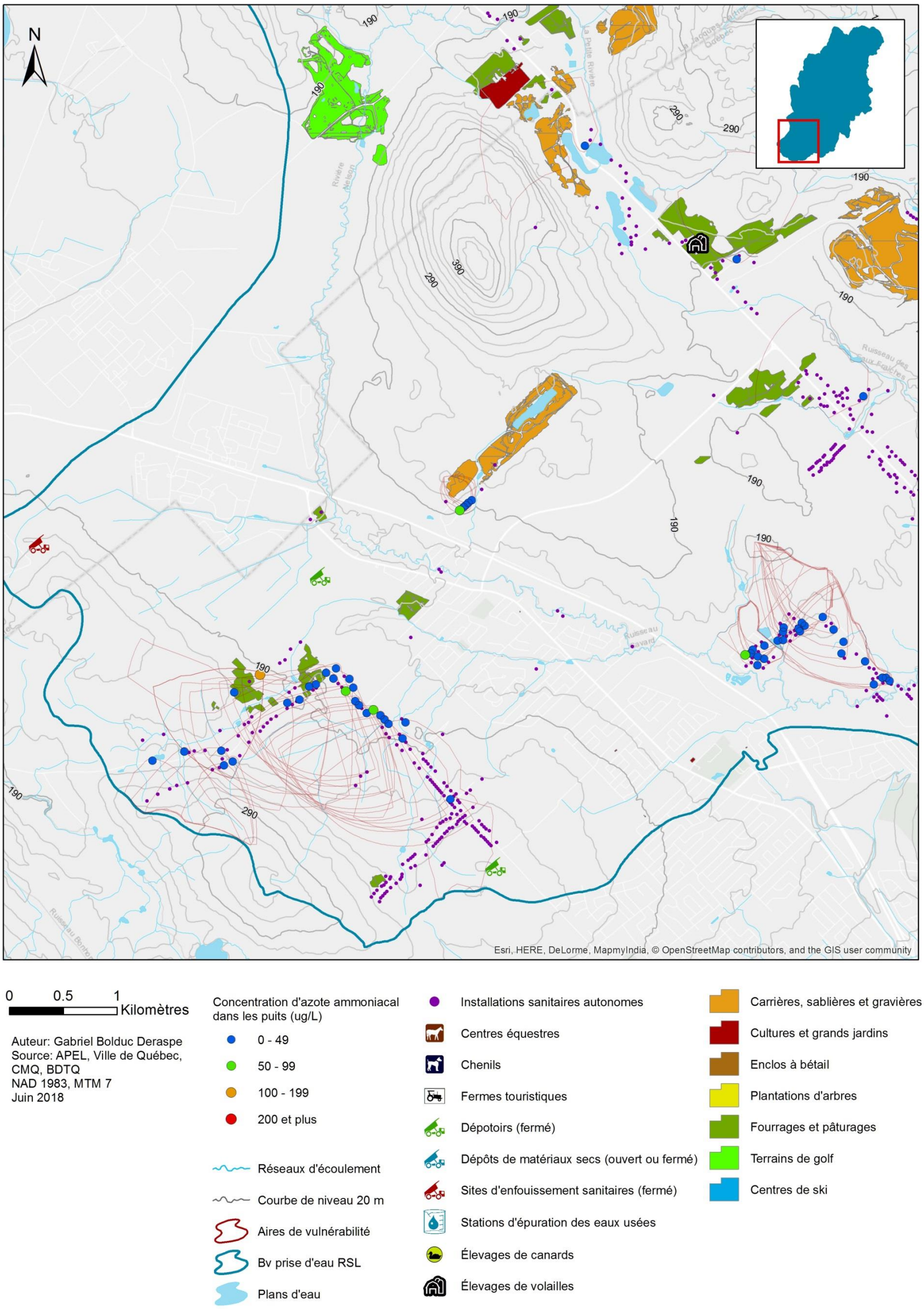


Figure 17 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 1

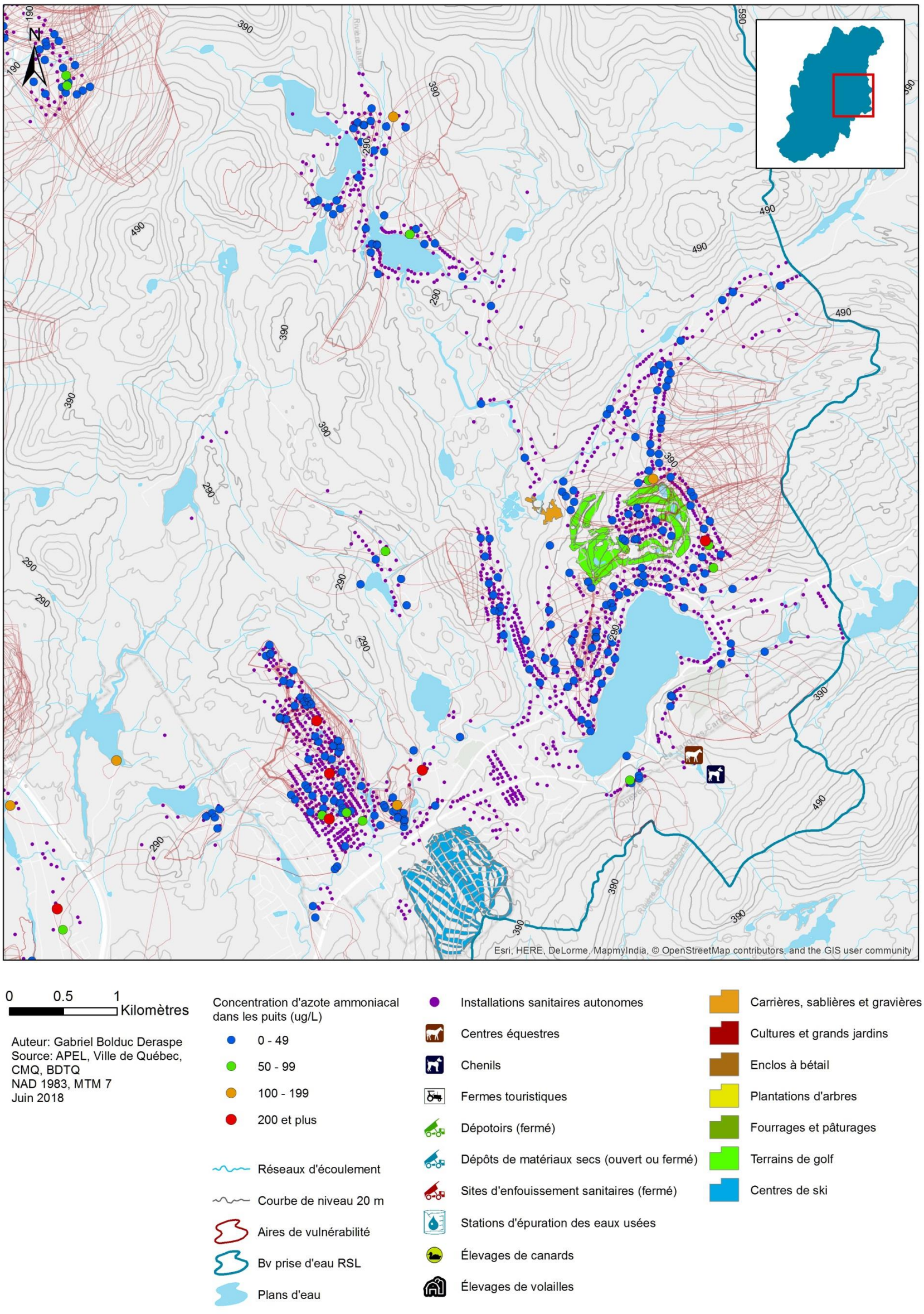


Figure 18 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 2

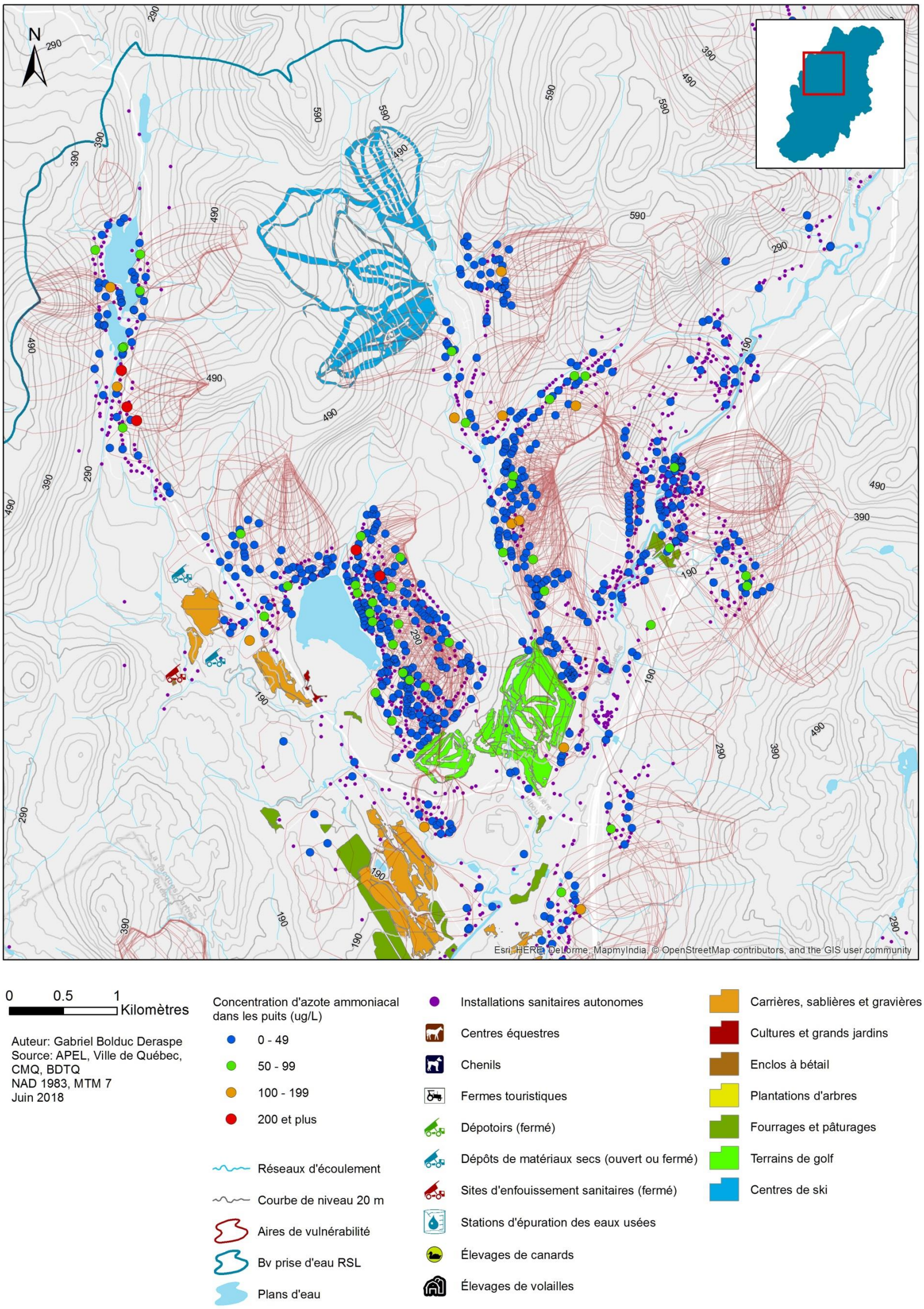
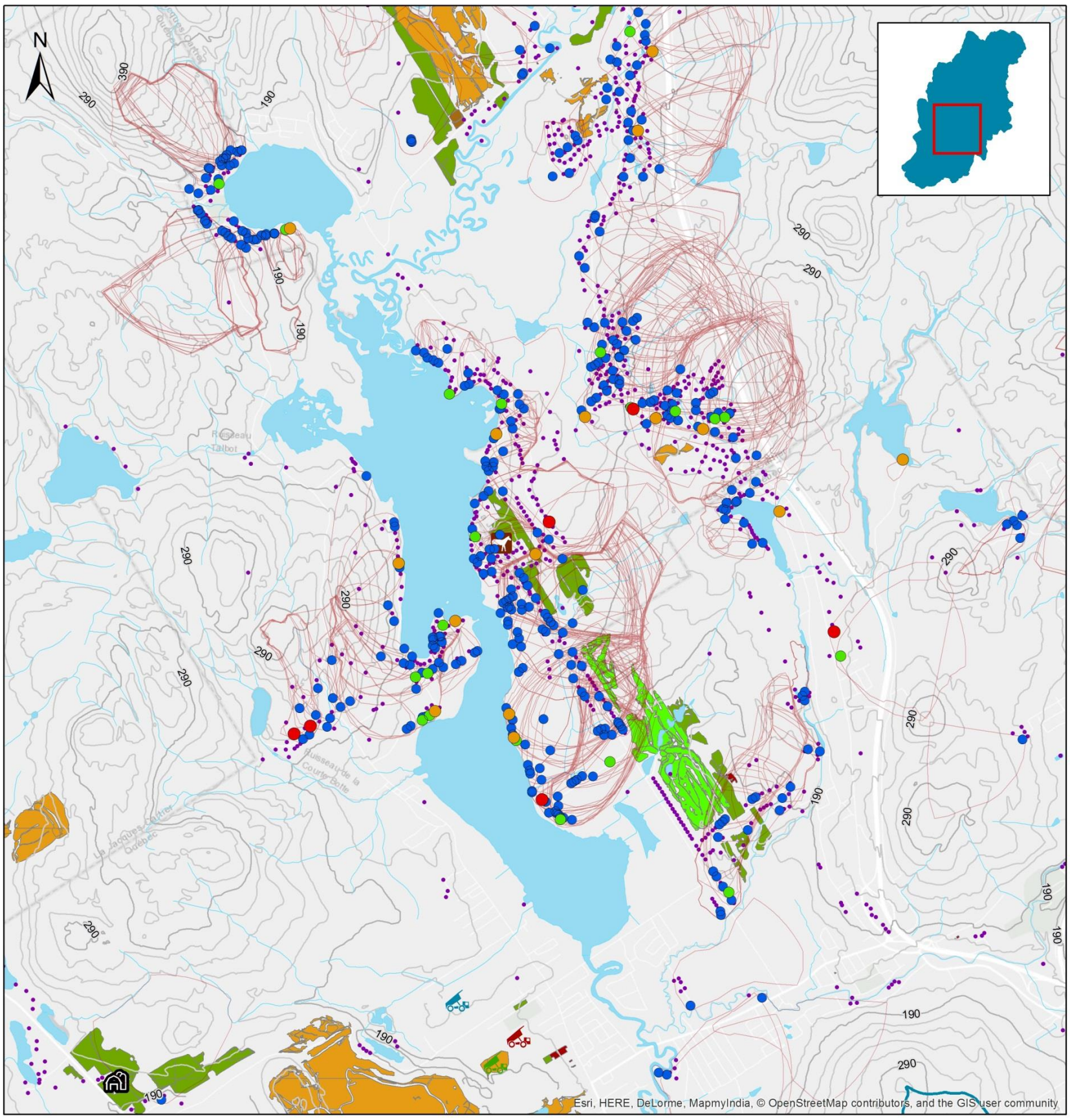


Figure 19 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 3



0 0.5 1 Kilomètres

Auteur: Gabriel Bolduc Deraspe
Source: APEL, Ville de Québec, CMQ, BDTQ
NAD 1983, MTM 7
Juin 2018

Concentration d'azote ammoniacal dans les puits (ug/L)

- 0 - 49
- 50 - 99
- 100 - 199
- 200 et plus

- Réseaux d'écoulement
- Courbe de niveau 20 m
- Aires de vulnérabilité
- Bv prise d'eau RSL
- Plans d'eau

- Installations sanitaires autonomes
- Centres équestres
- Chenils
- Fermes touristiques
- Dépotoirs (fermé)
- Dépôts de matériaux secs (ouvert ou fermé)
- Sites d'enfouissement sanitaires (fermé)
- Stations d'épuration des eaux usées
- Élevages de canards
- Élevages de volailles

- Carrières, sablières et gravières
- Cultures et grands jardins
- Enclos à bétail
- Plantations d'arbres
- Fourrages et pâturages
- Terrains de golf
- Centres de ski

Figure 20 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 4

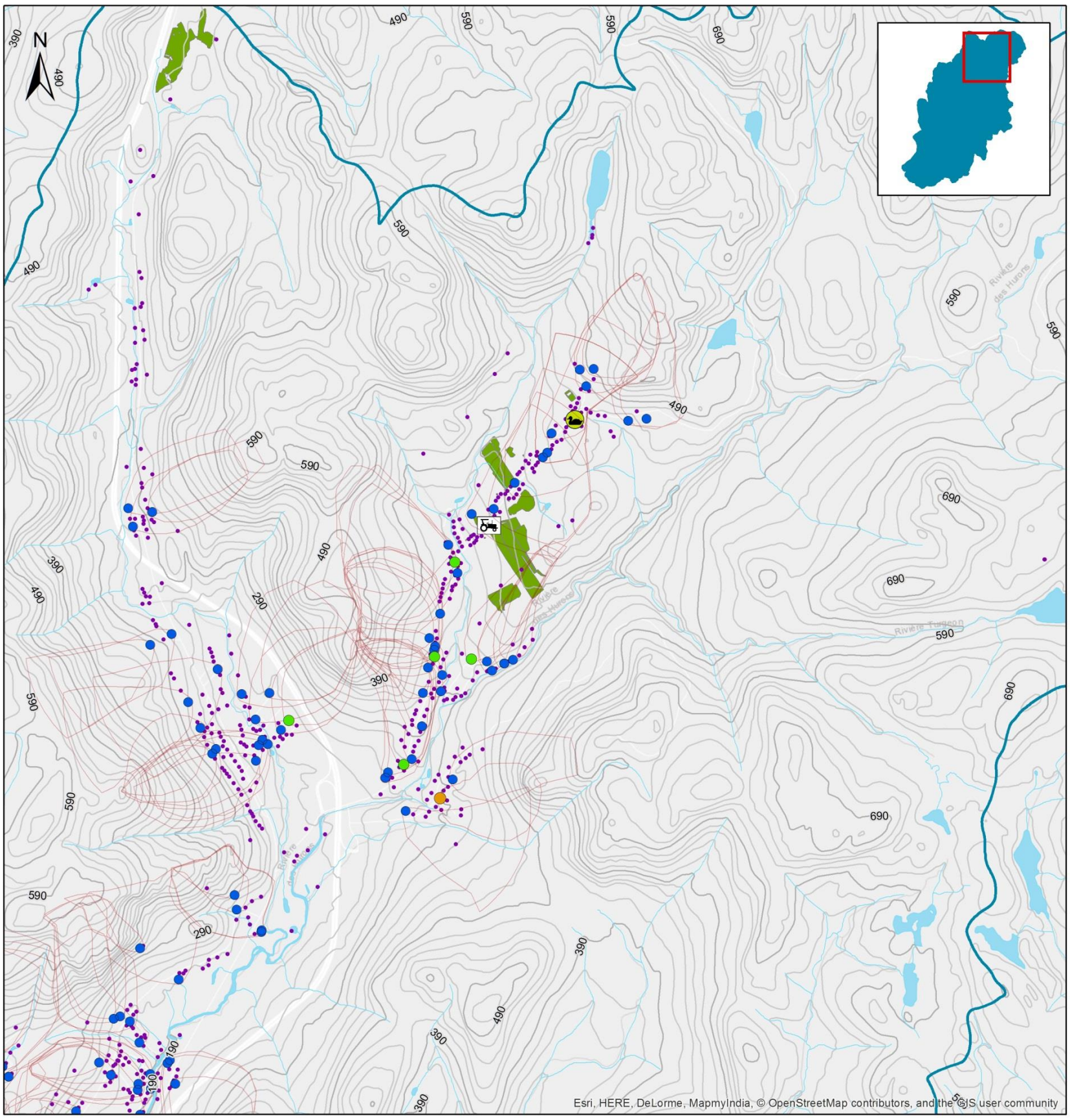


Figure 21 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 5

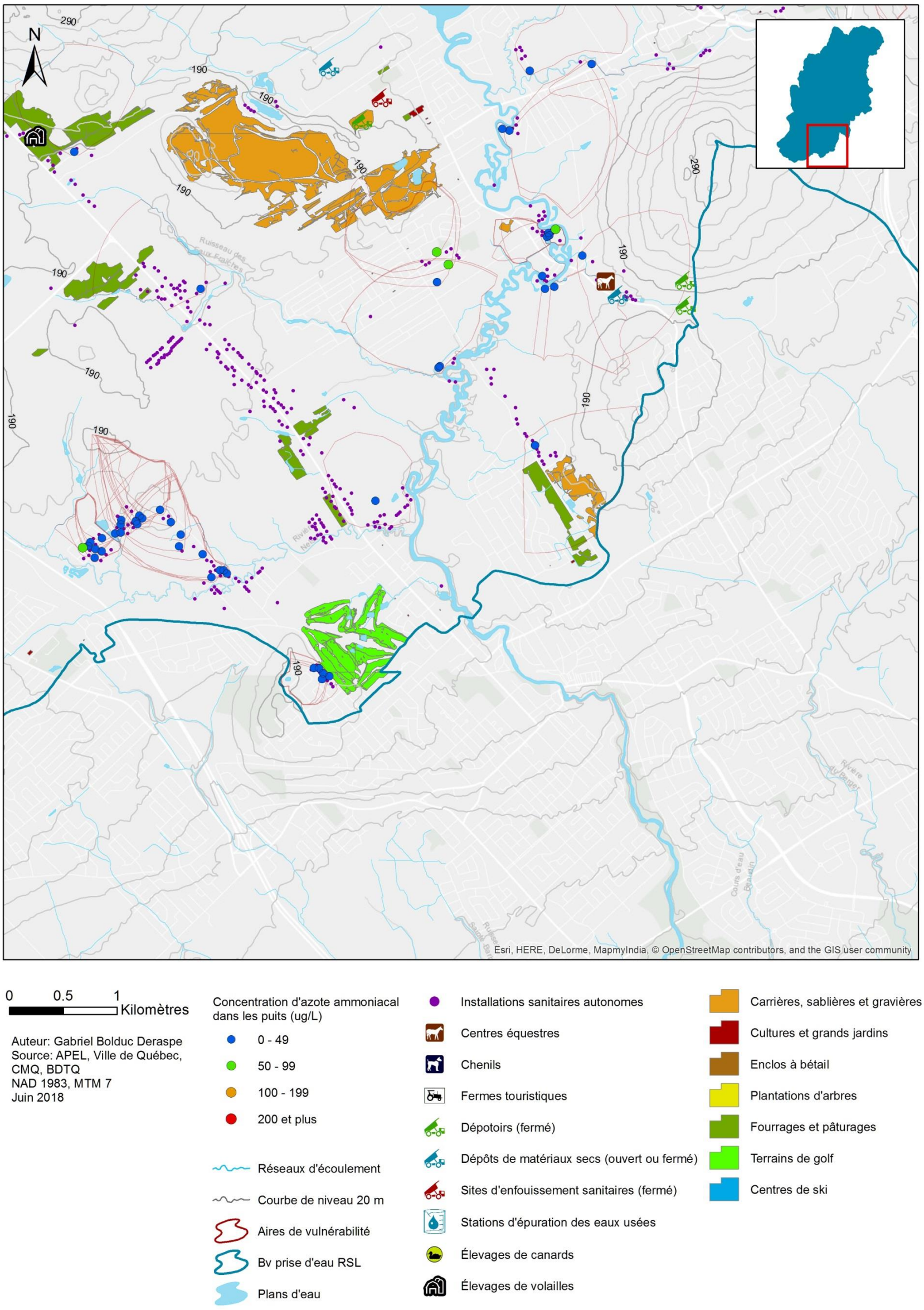


Figure 22 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 6

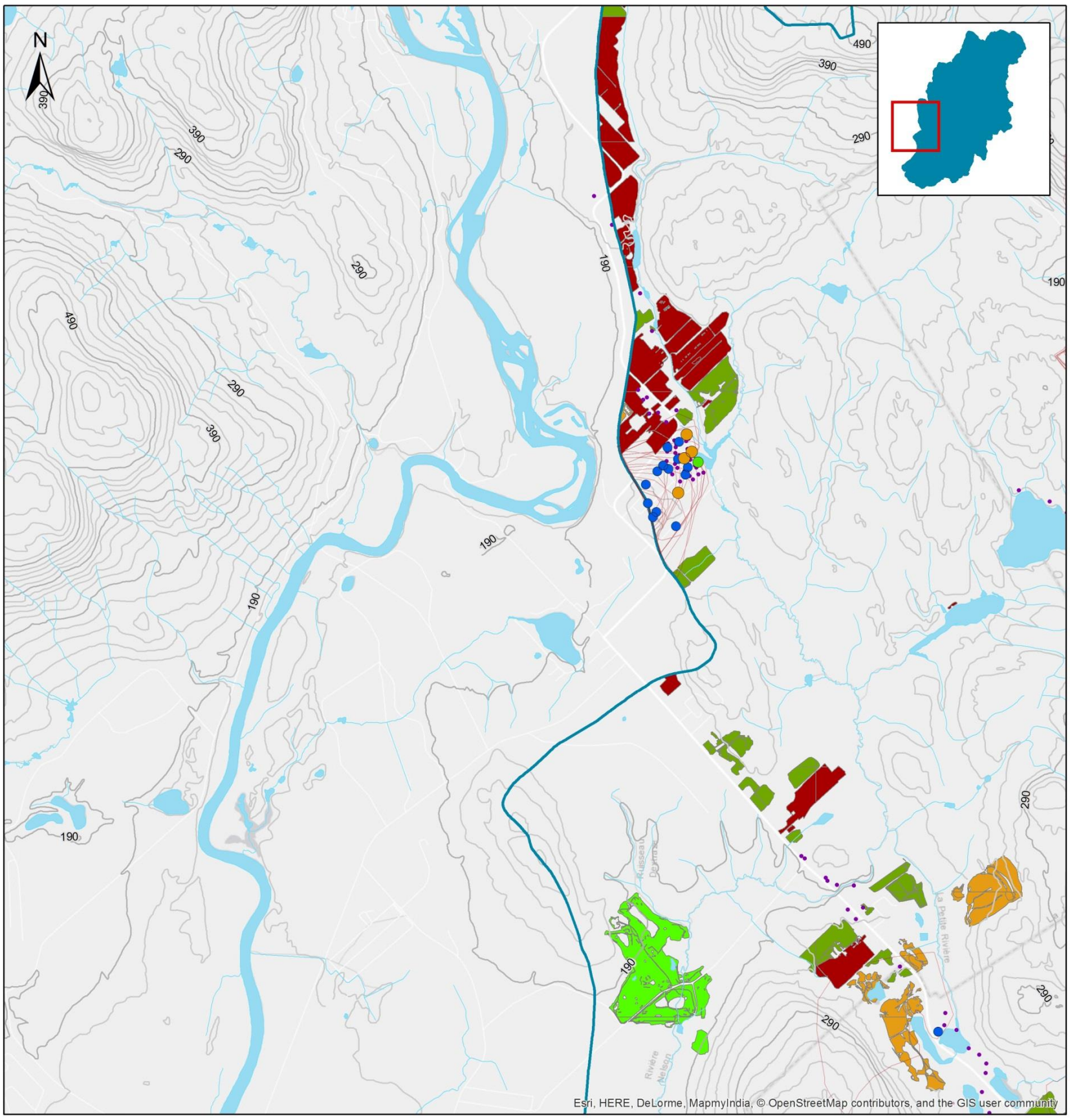


Figure 23 : Concentration d'azote ammoniacal dans les puits de la zone 7

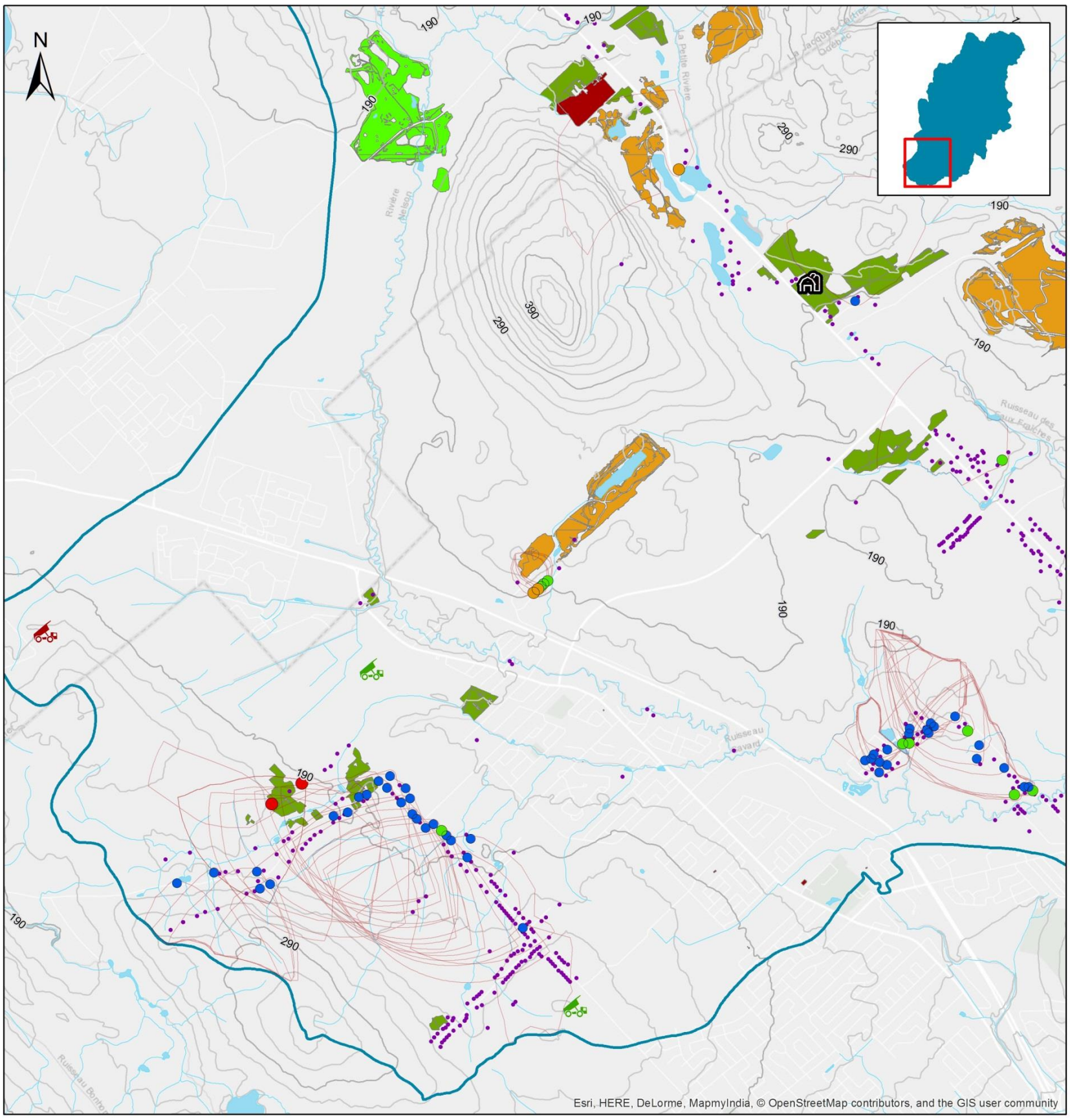


Figure 24 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 1

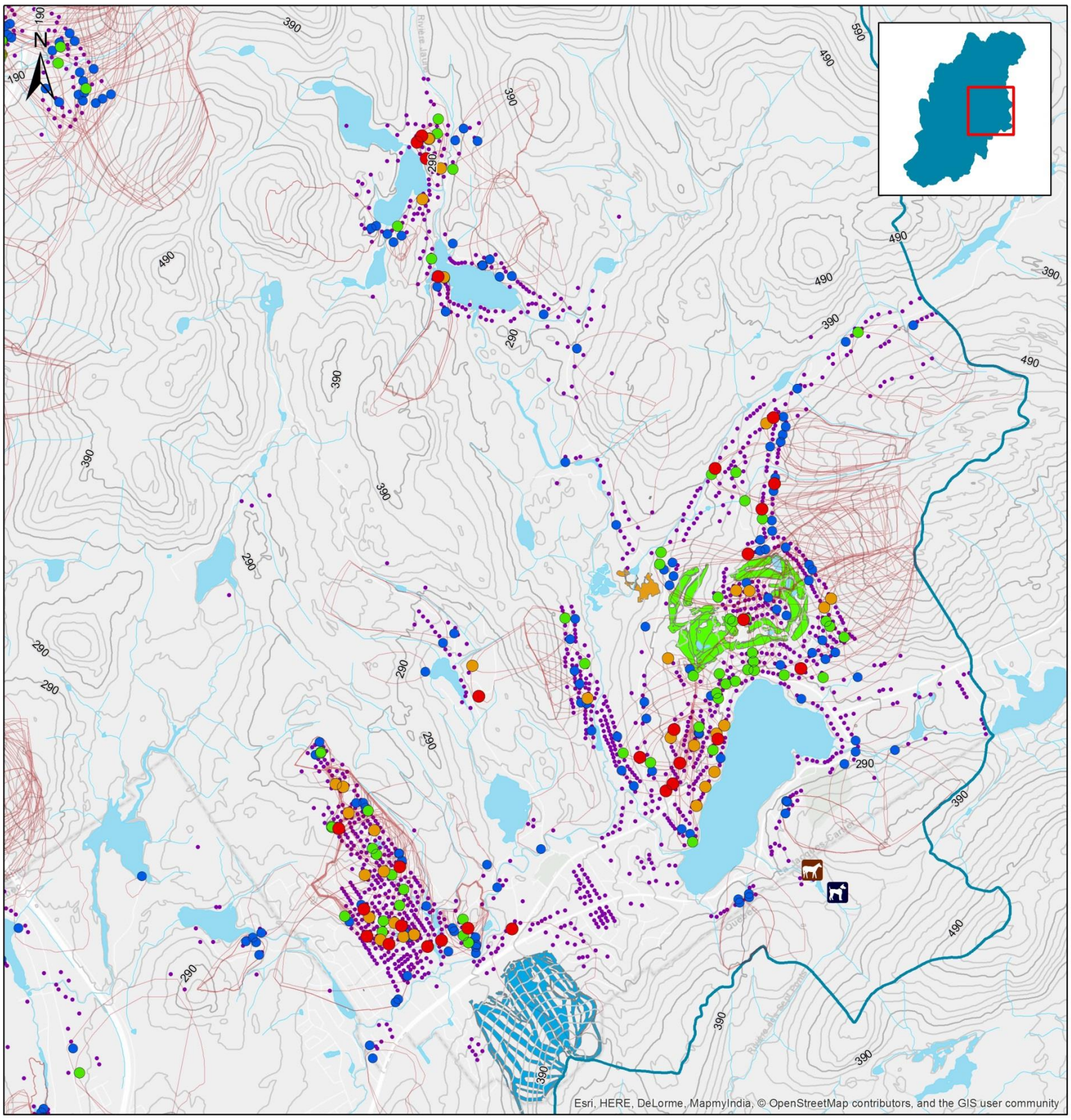


Figure 25 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 2

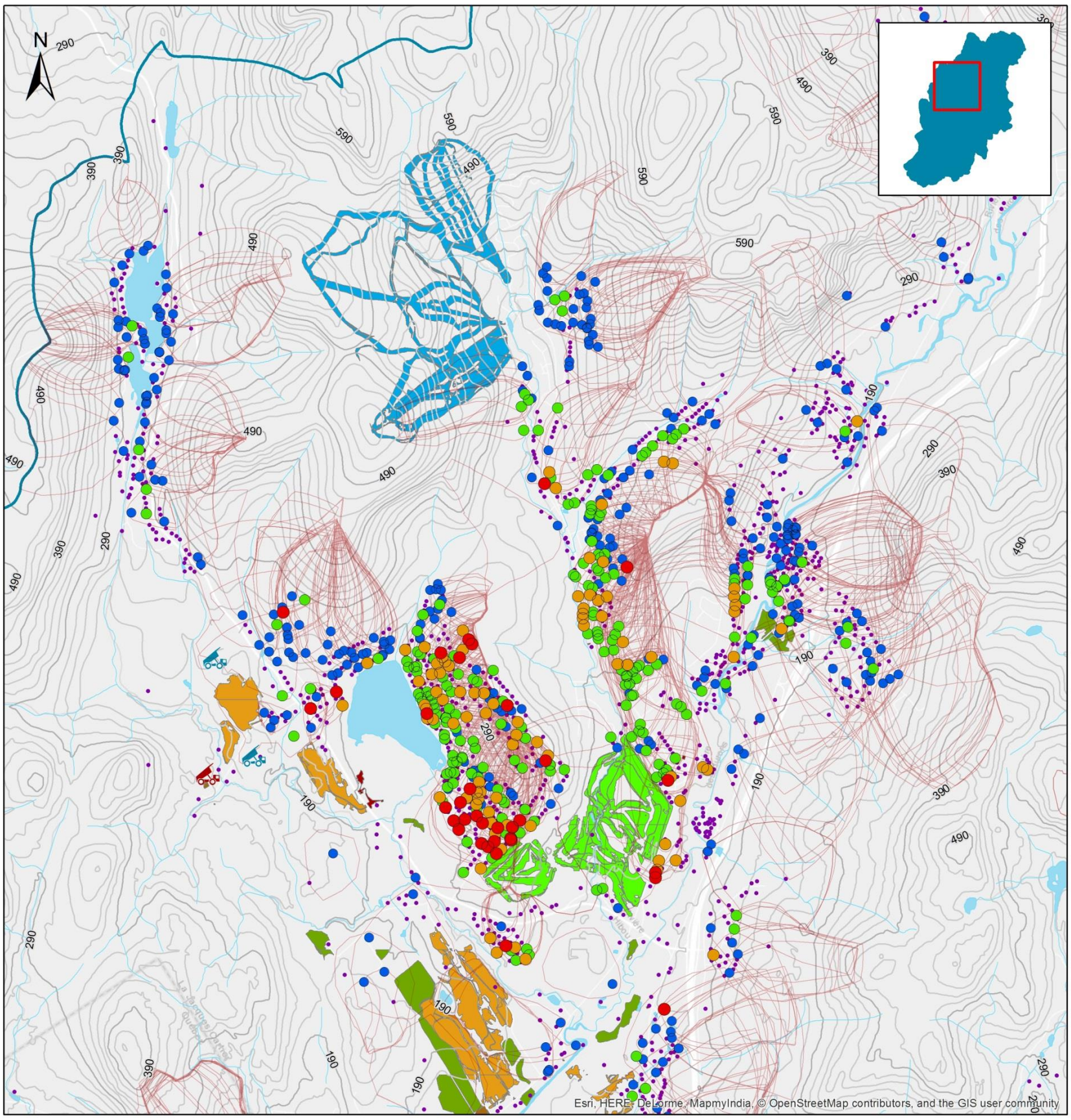


Figure 26 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 3

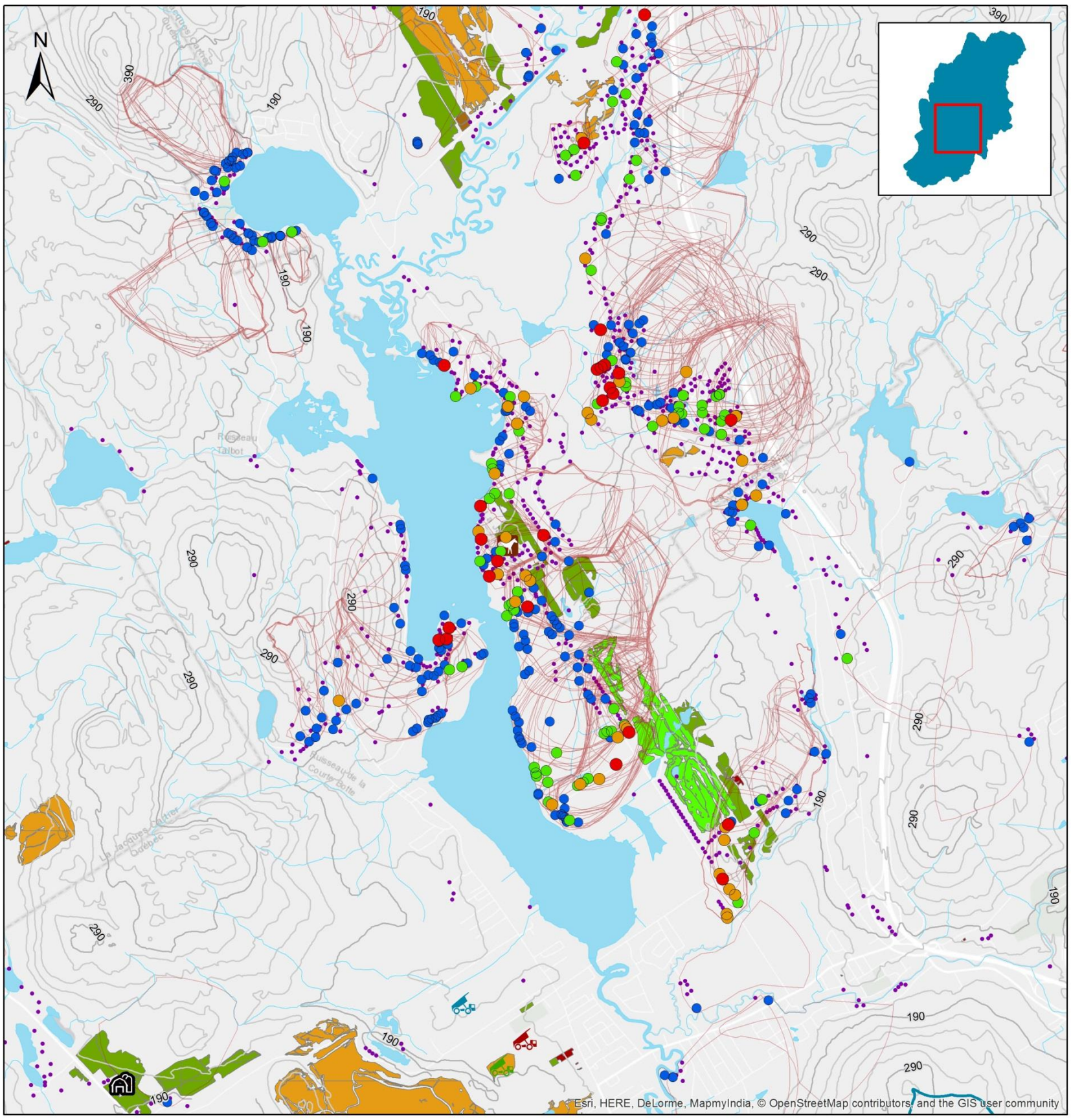


Figure 27 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 4

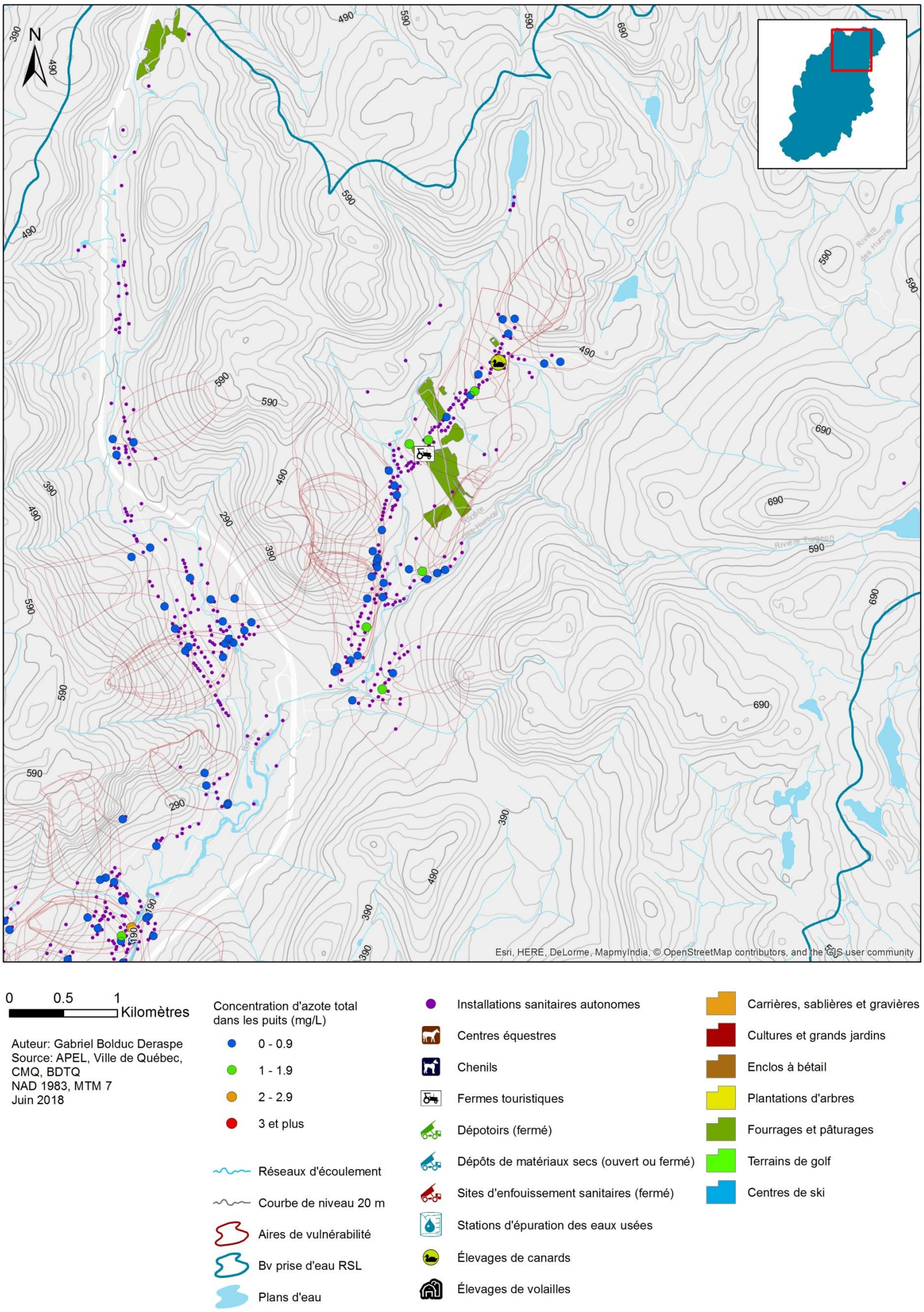


Figure 28 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 5

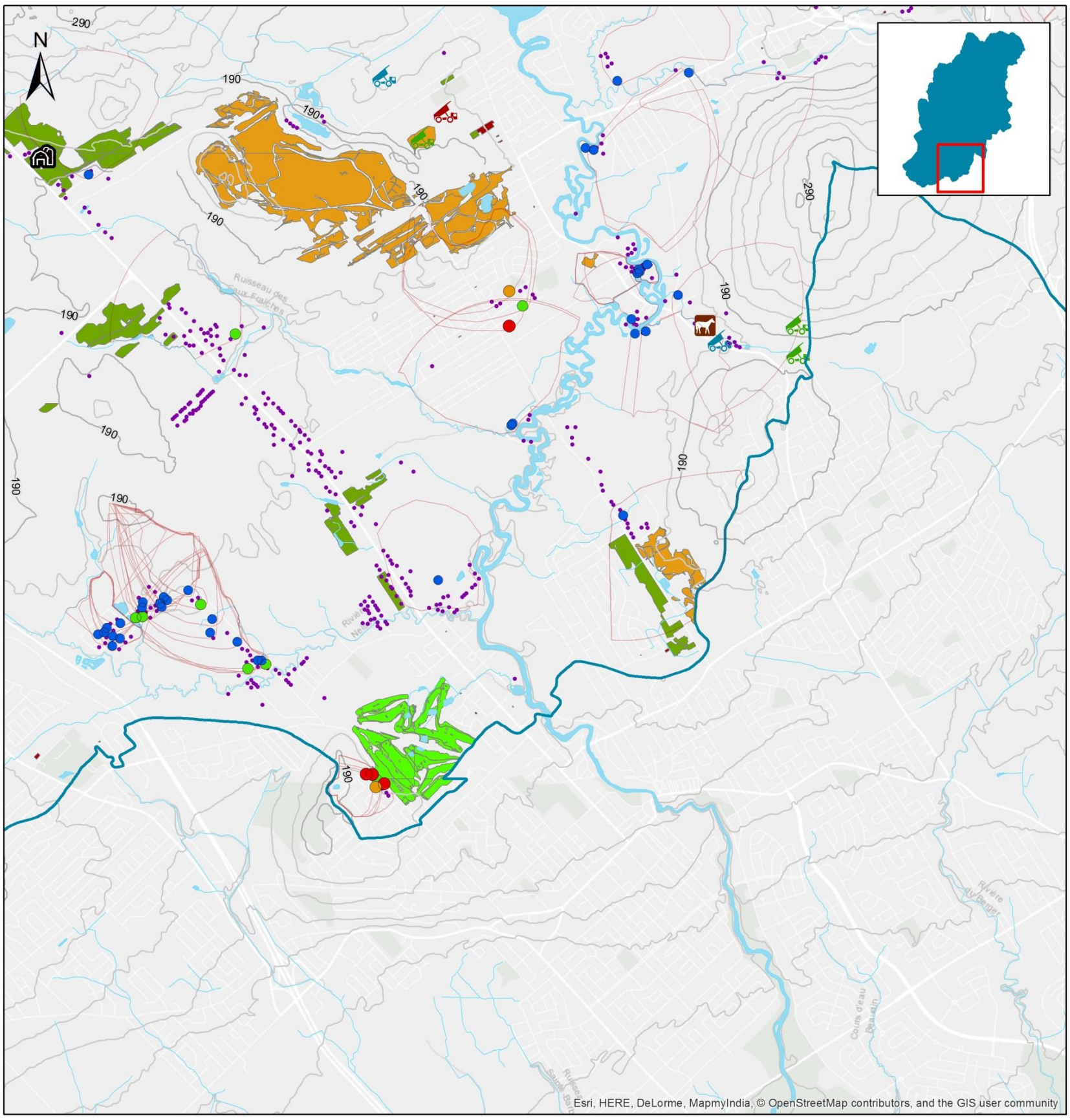


Figure 29 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 6

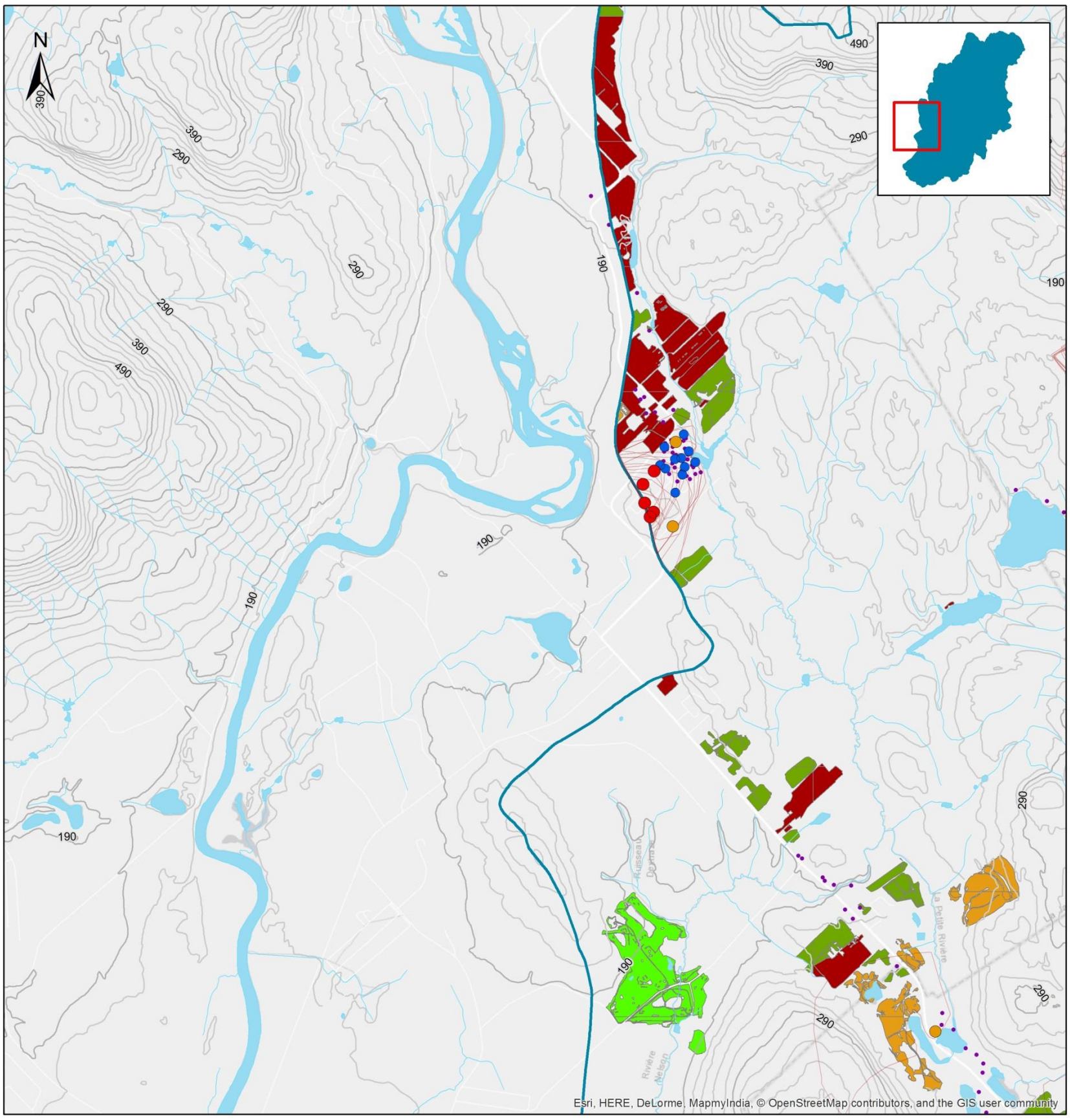


Figure 30 : Concentration d'azote total dans les puits de la zone 7

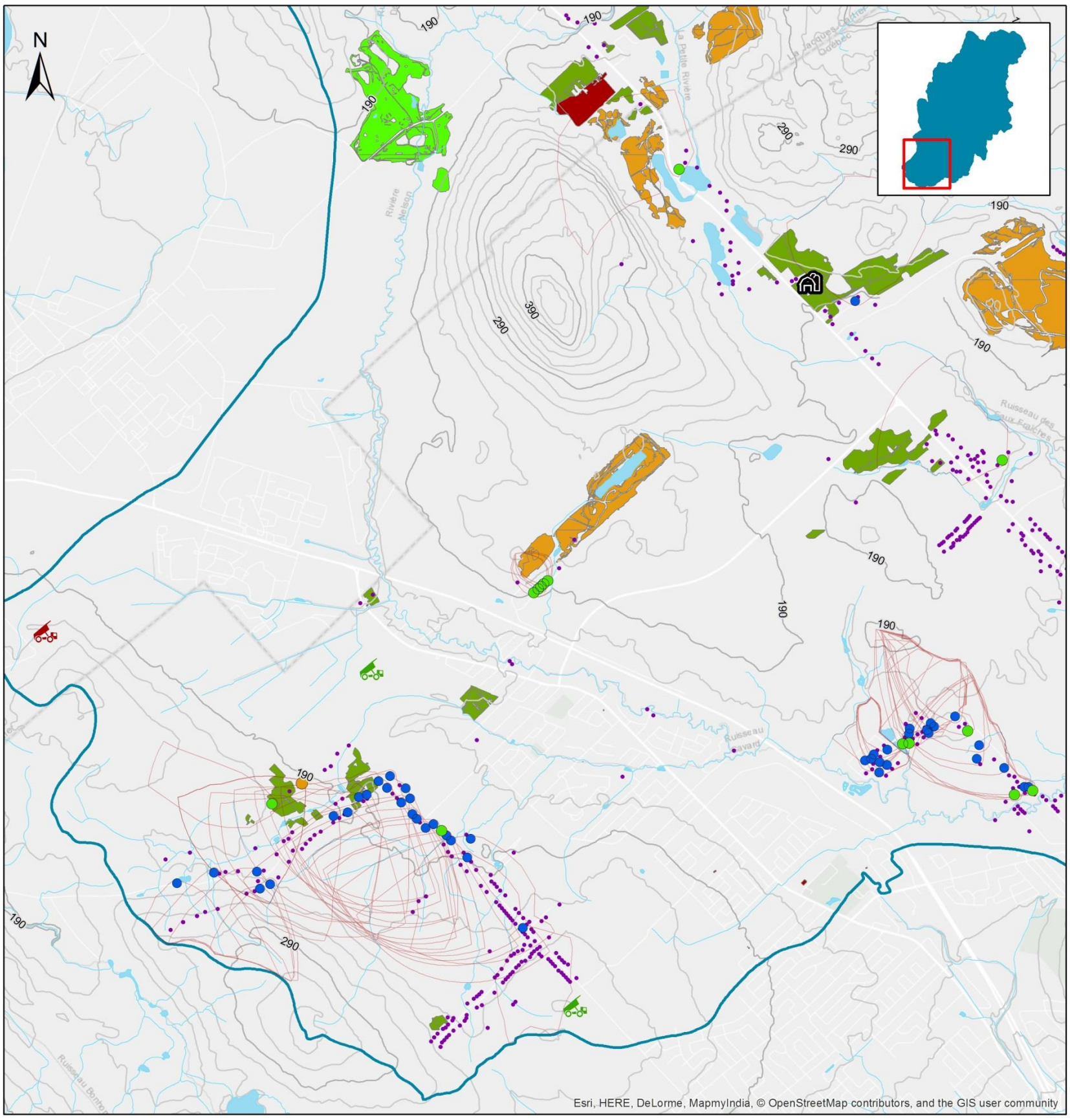


Figure 31 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 1

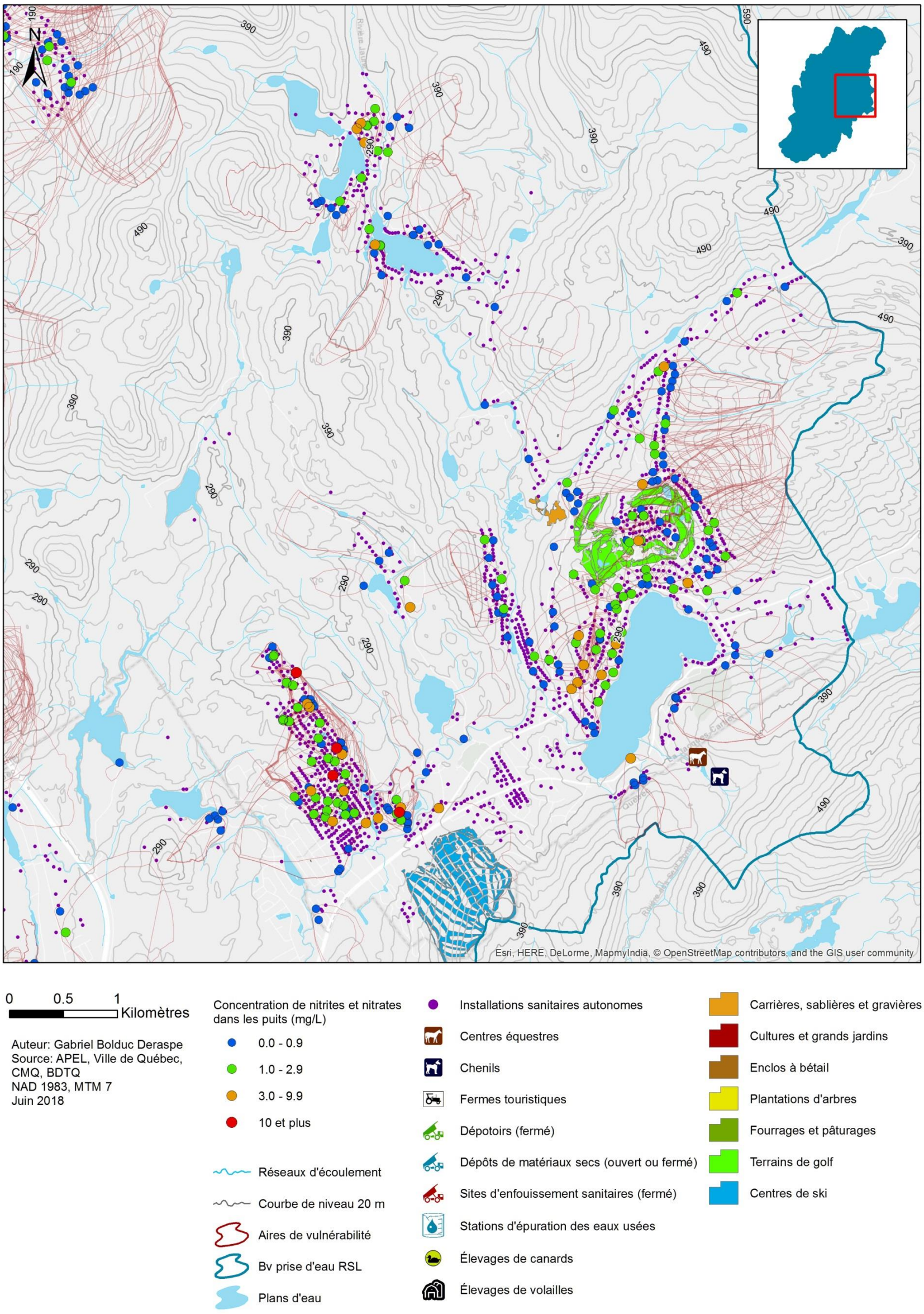


Figure 32 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 2

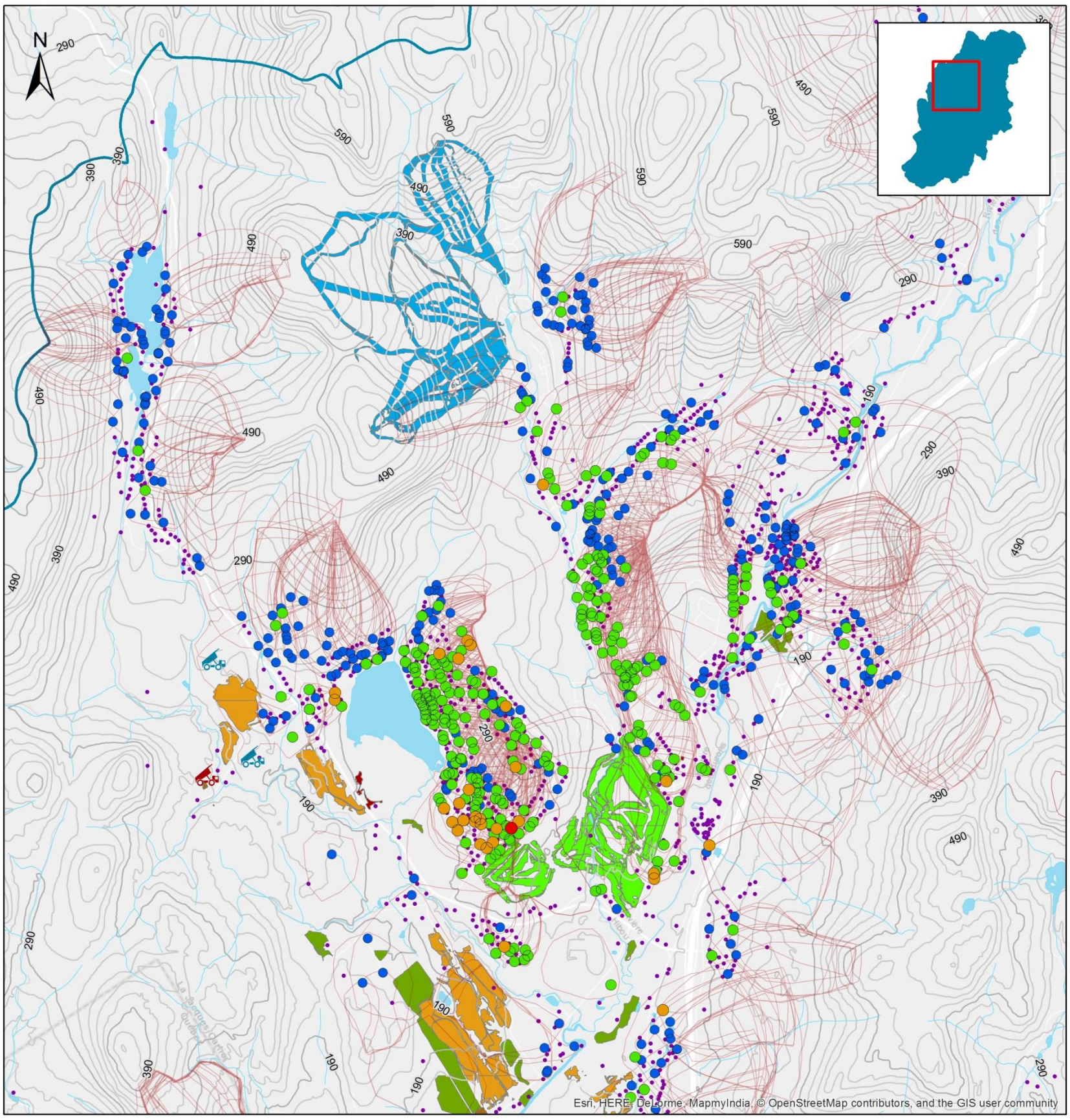


Figure 33 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 3

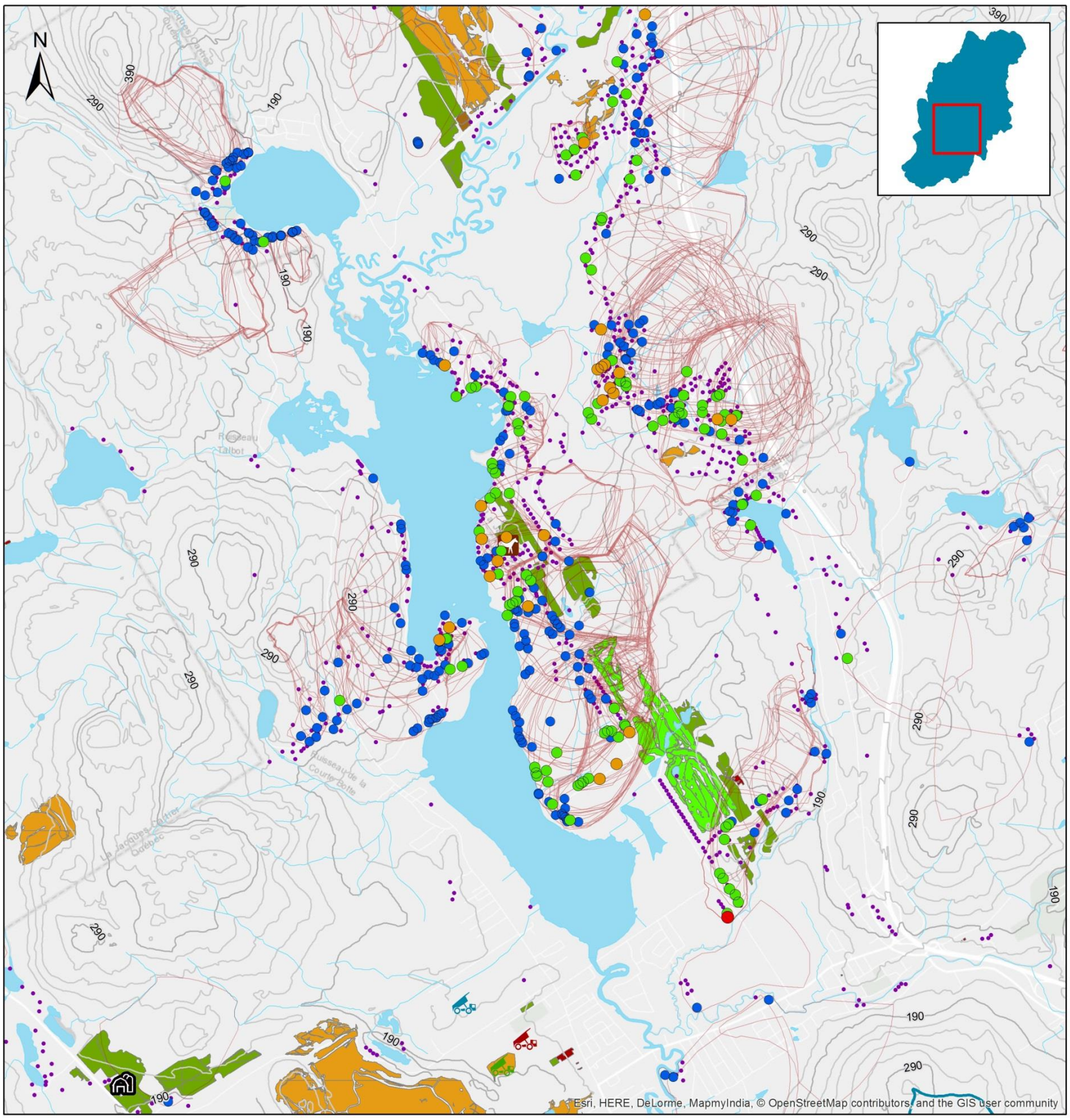


Figure 34 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 4

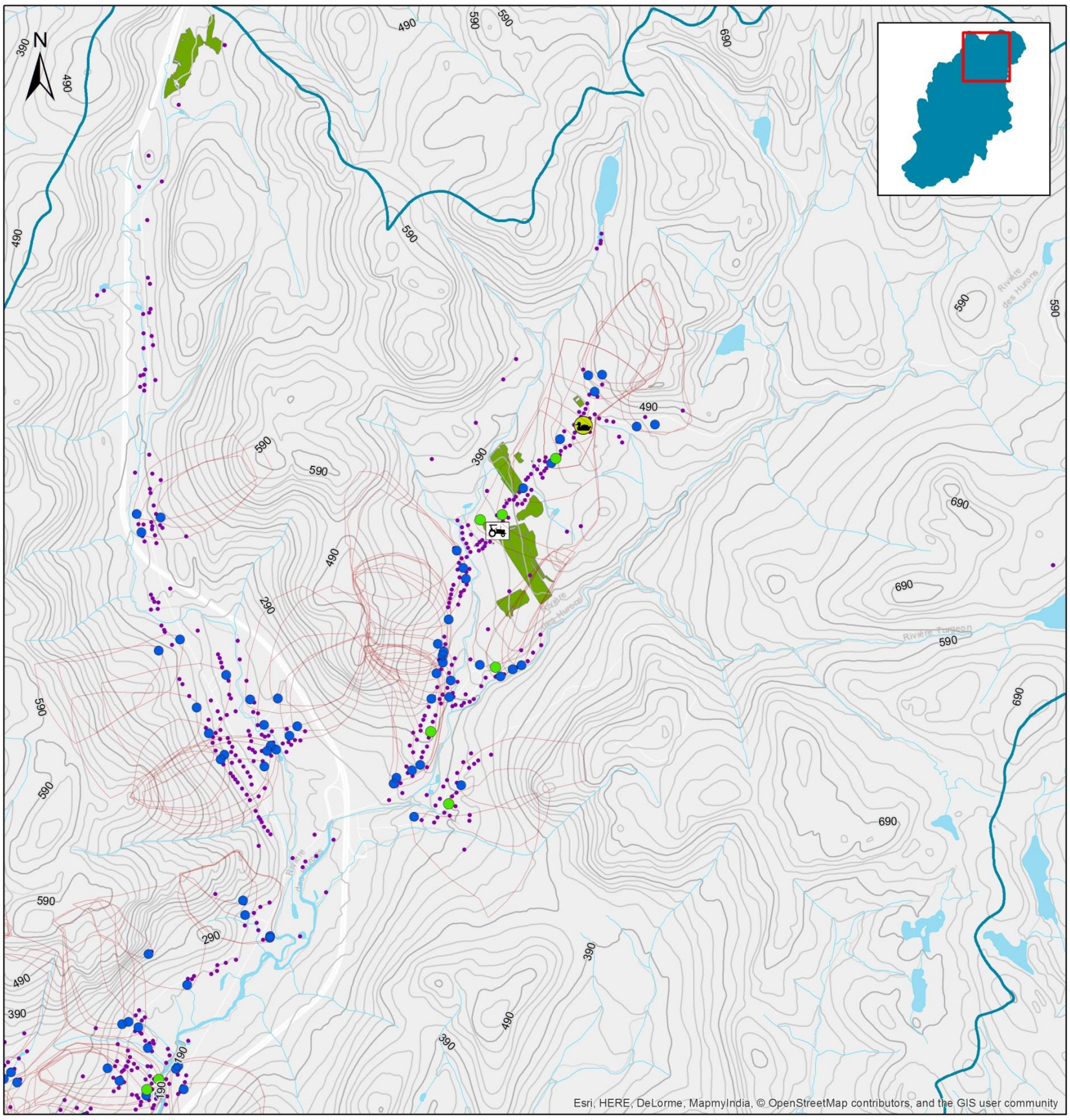


Figure 35 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 5

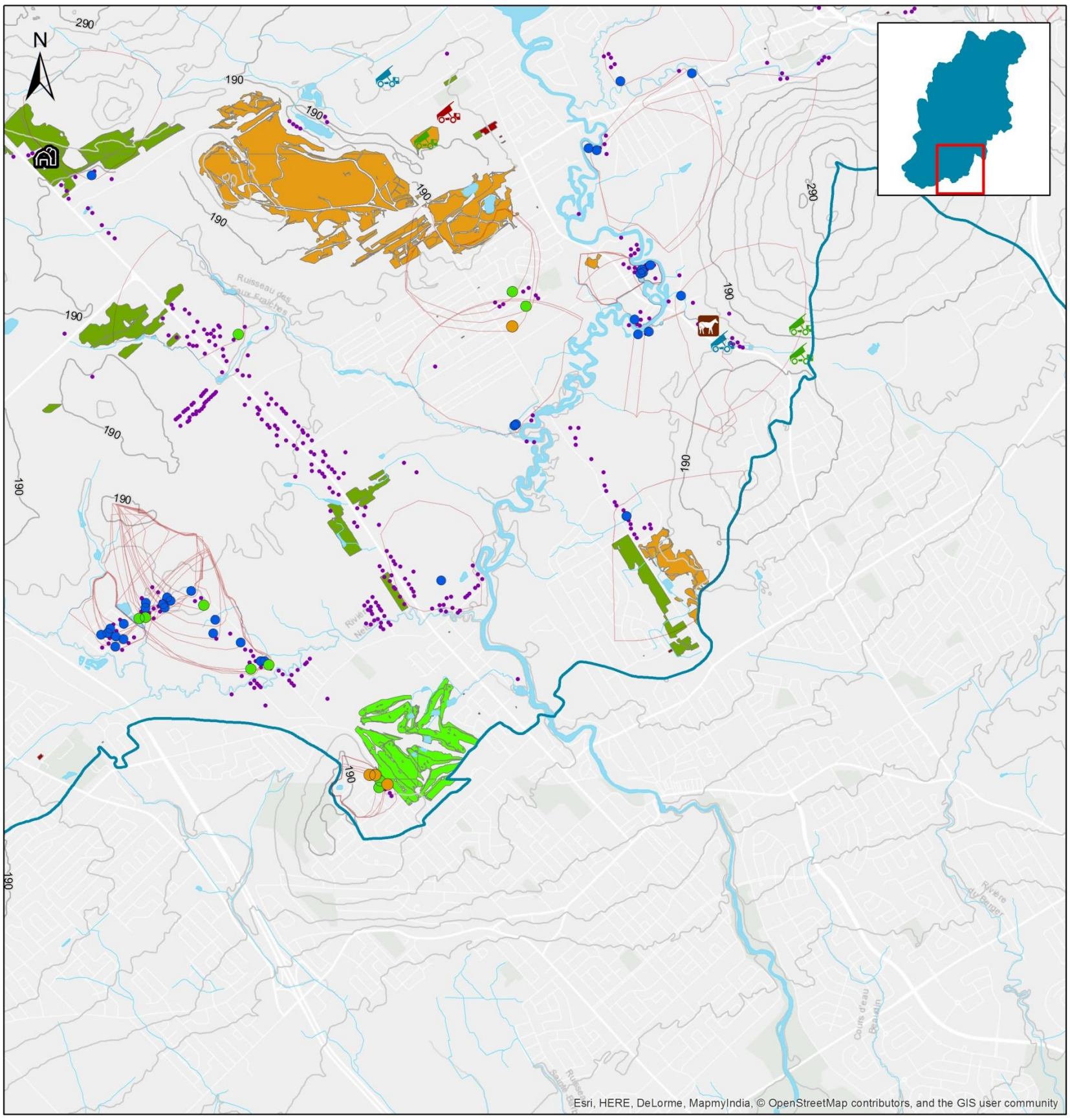


Figure 36 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 6

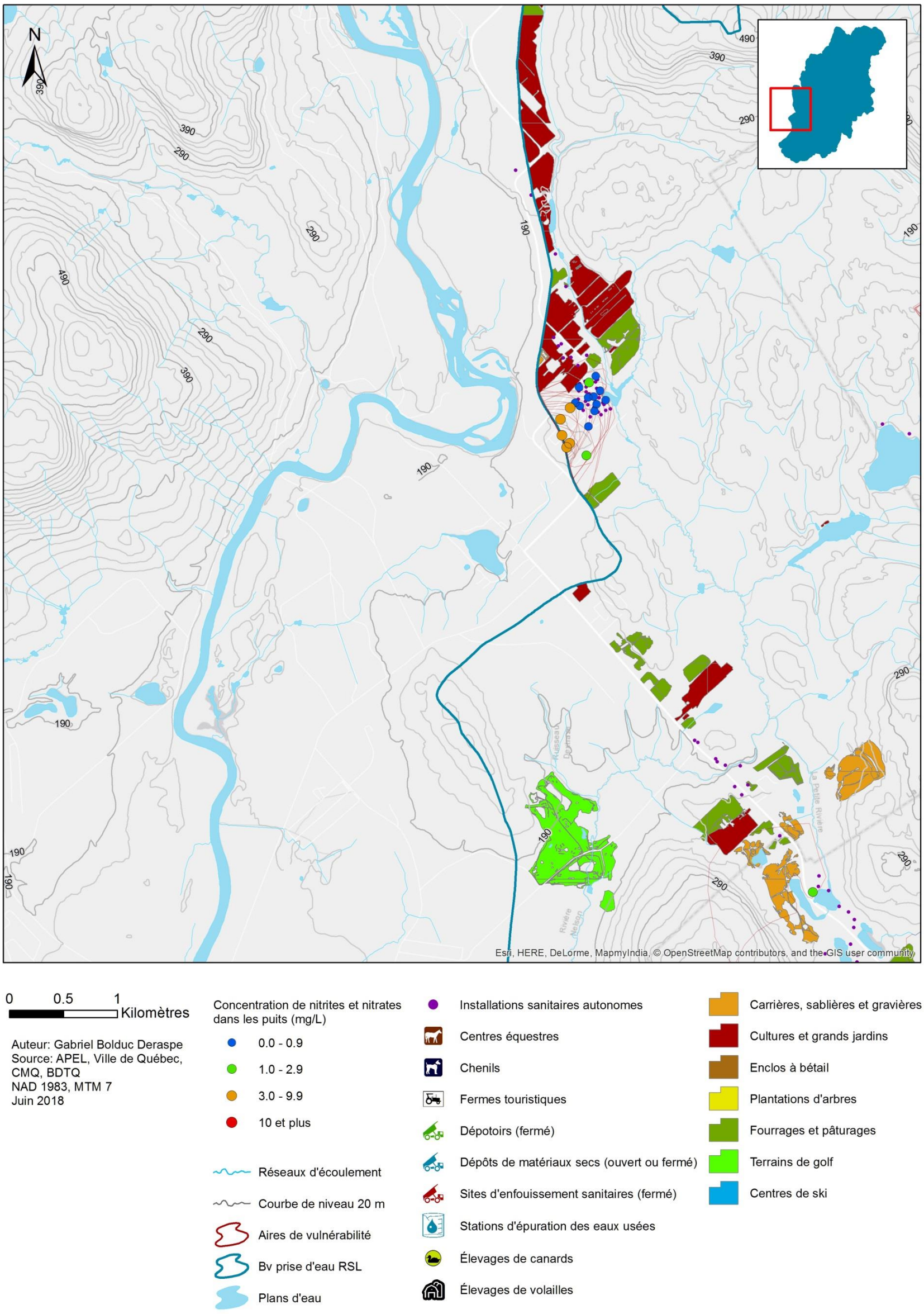


Figure 37 : Concentration de nitrites et nitrates dans les puits de la zone 7

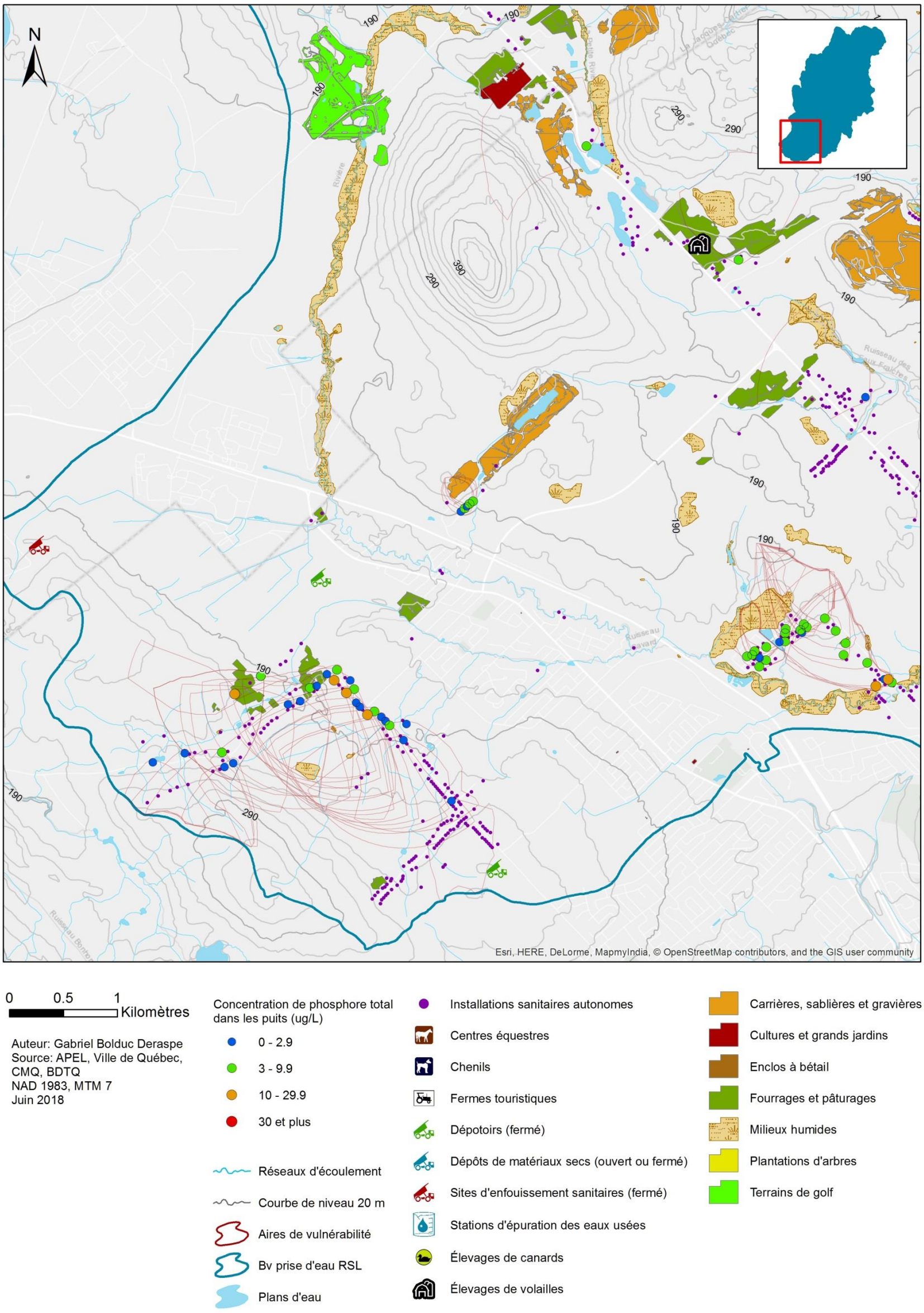


Figure 38 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 1

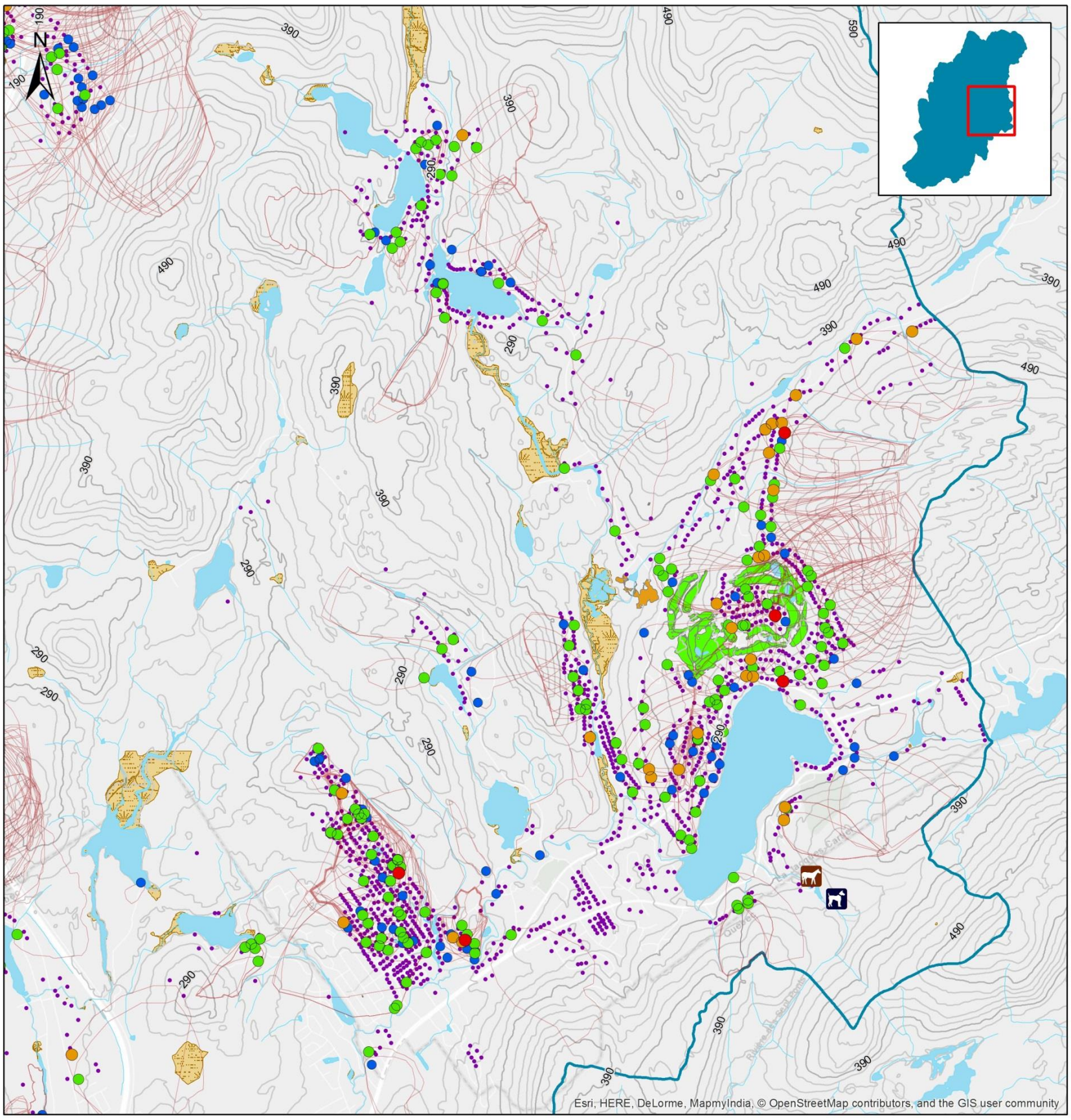


Figure 39 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 2

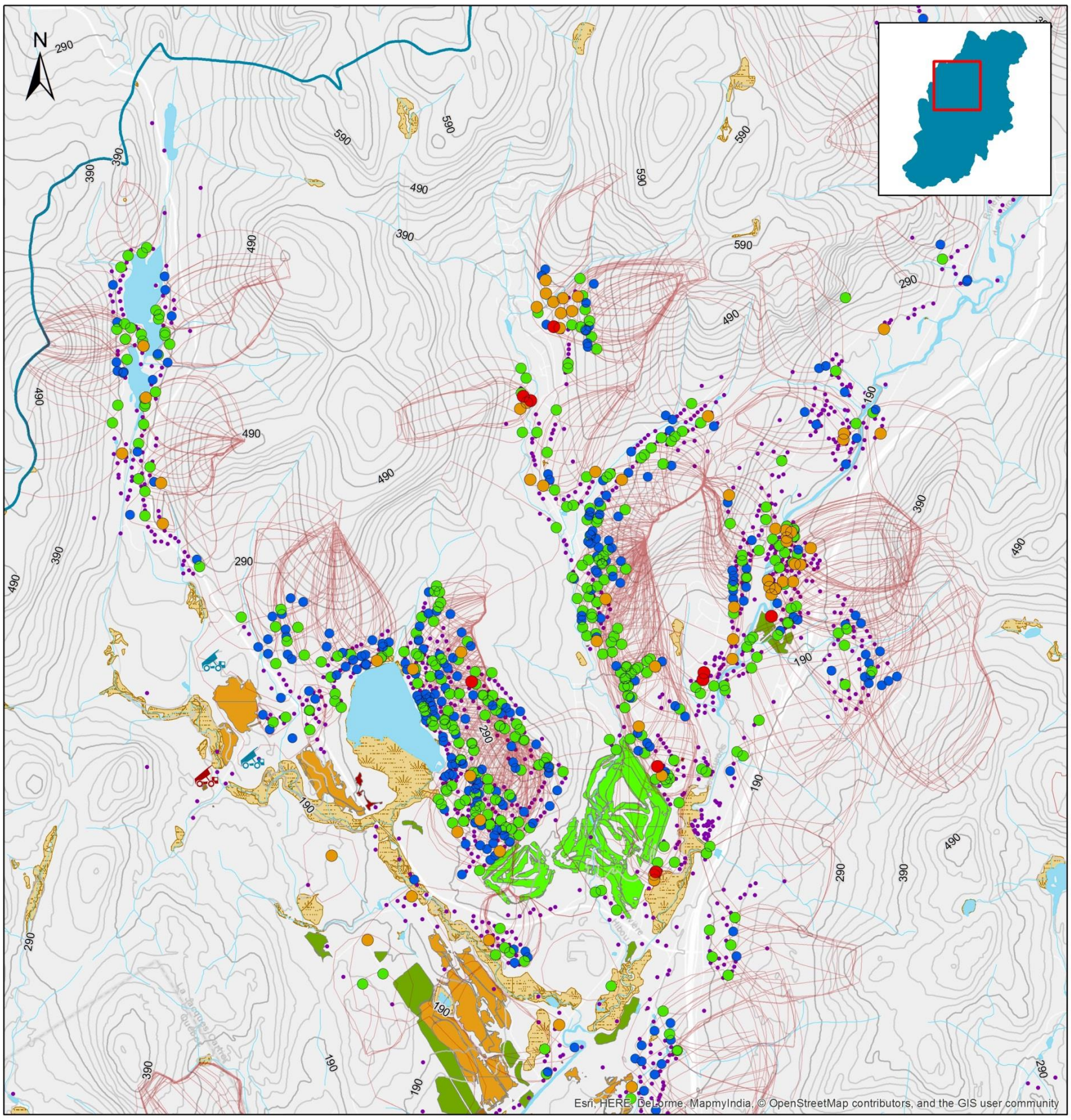


Figure 40 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 3

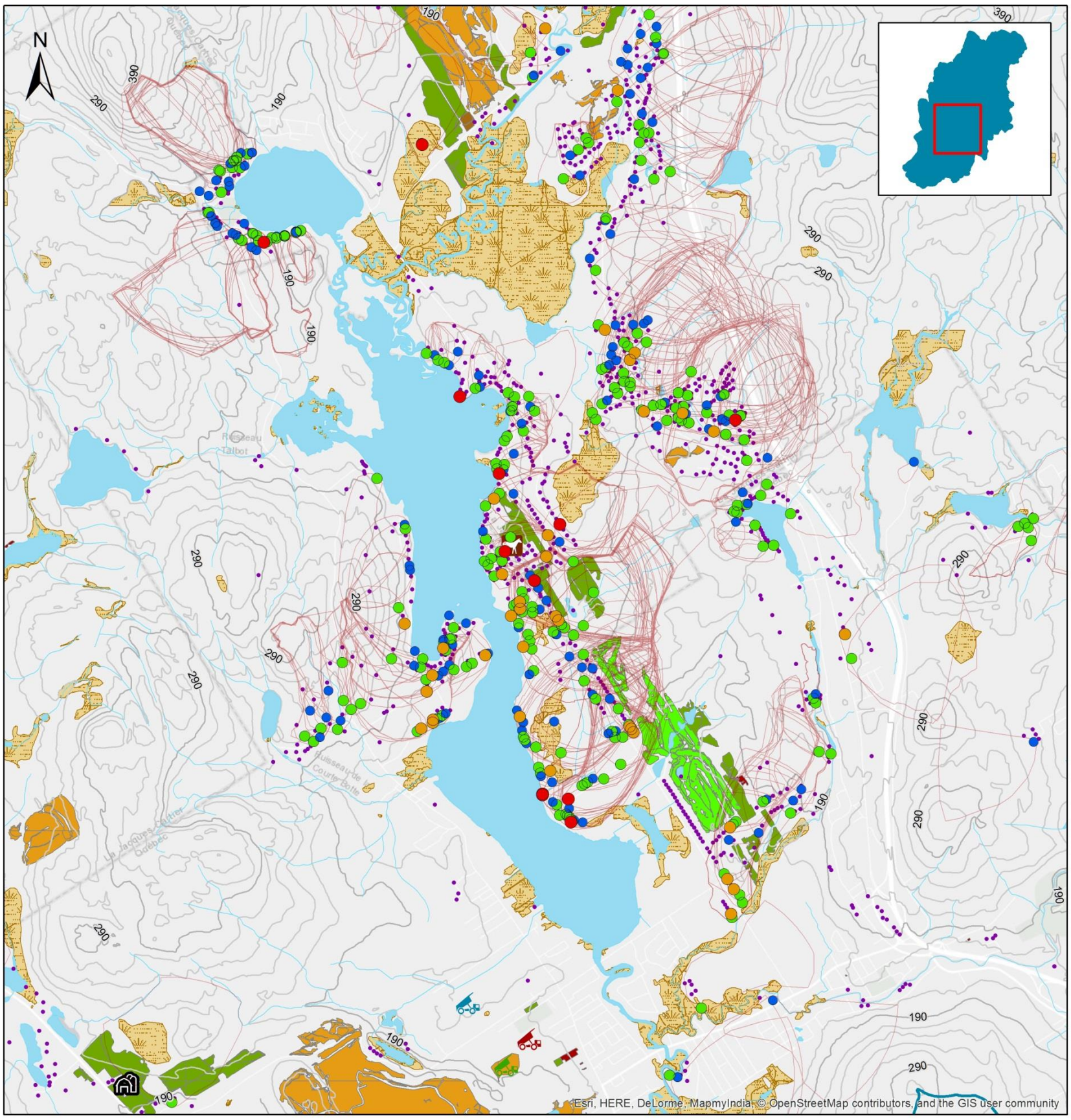


Figure 41 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 4

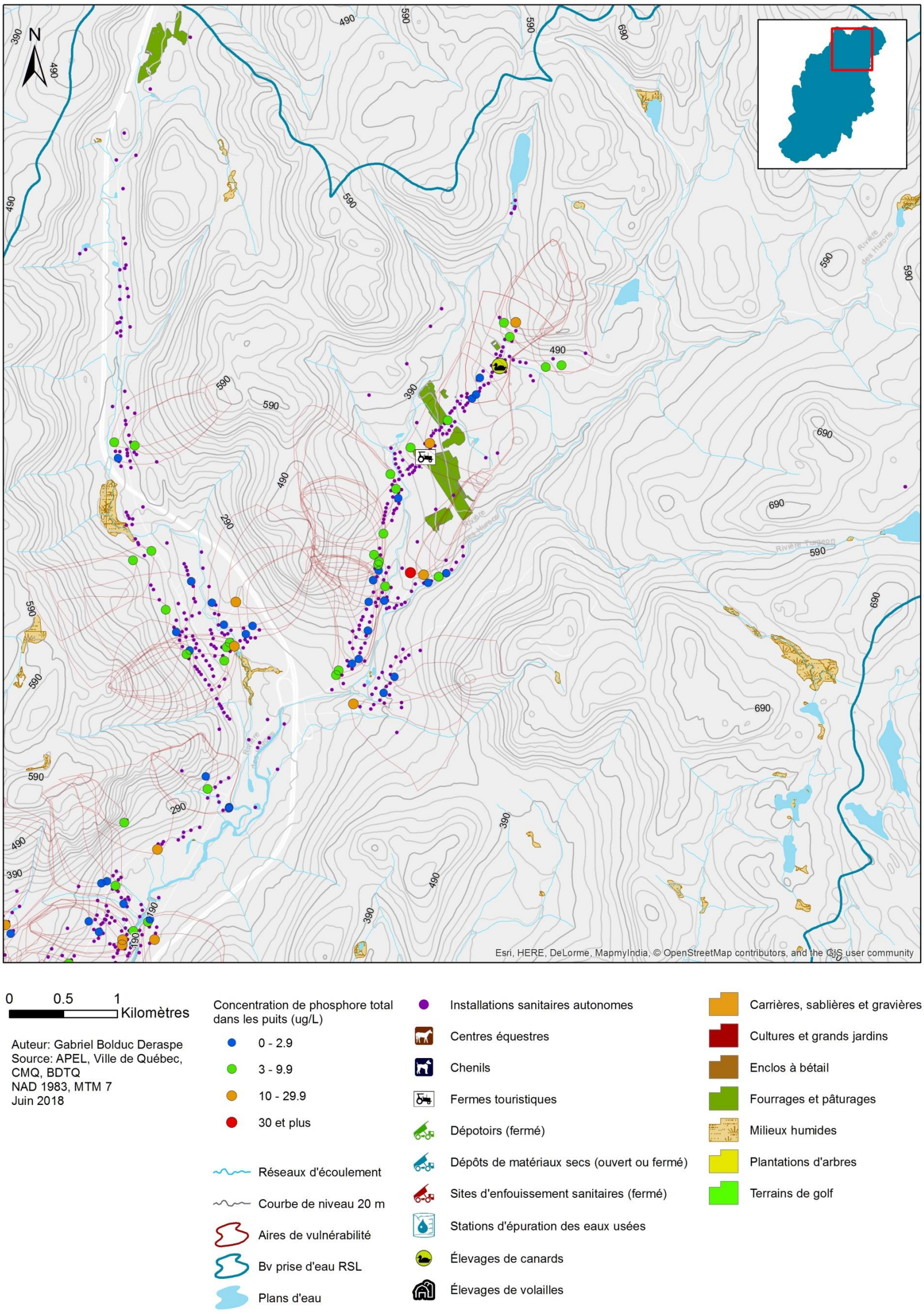


Figure 42 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 5

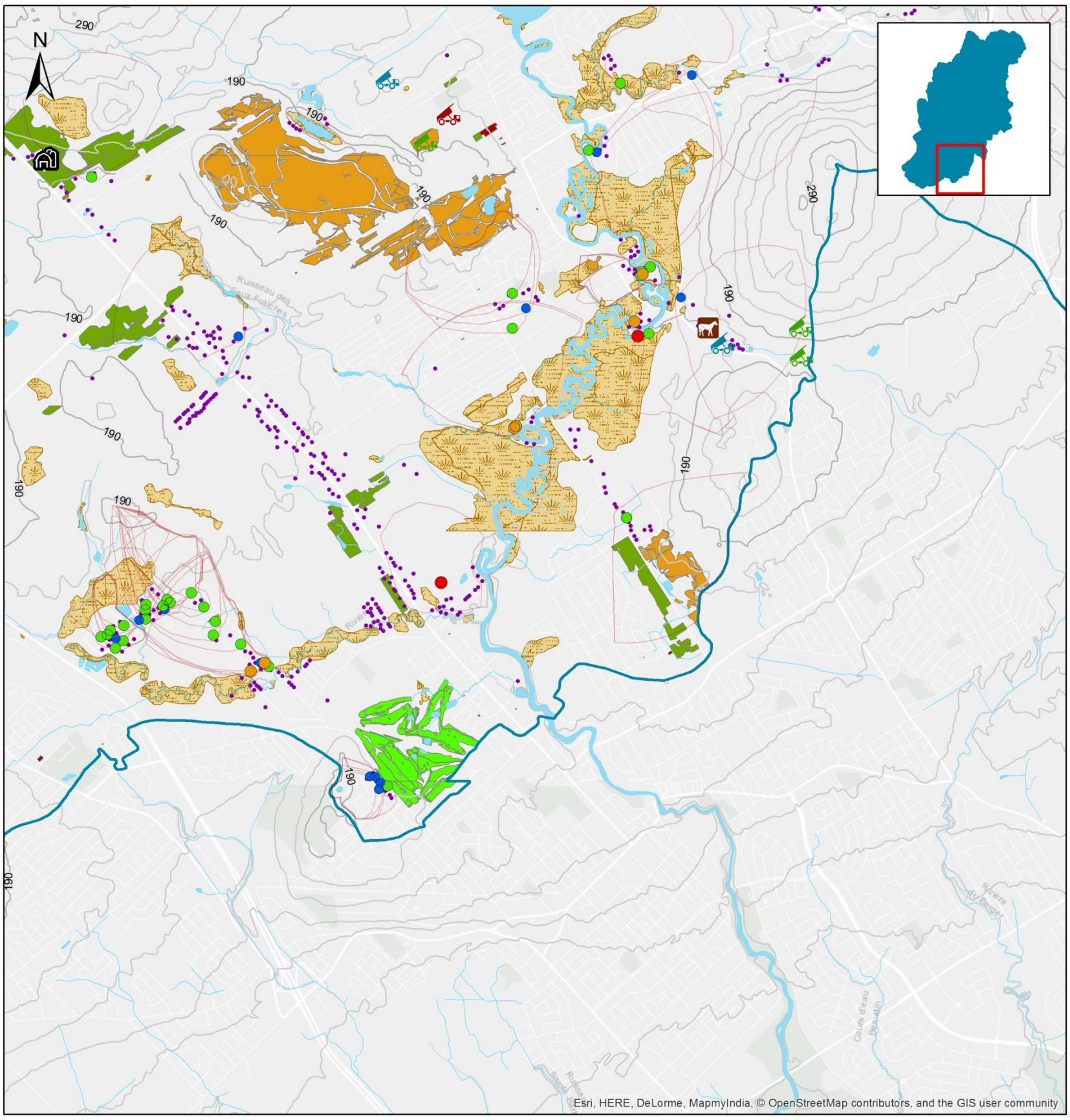


Figure 43 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 6

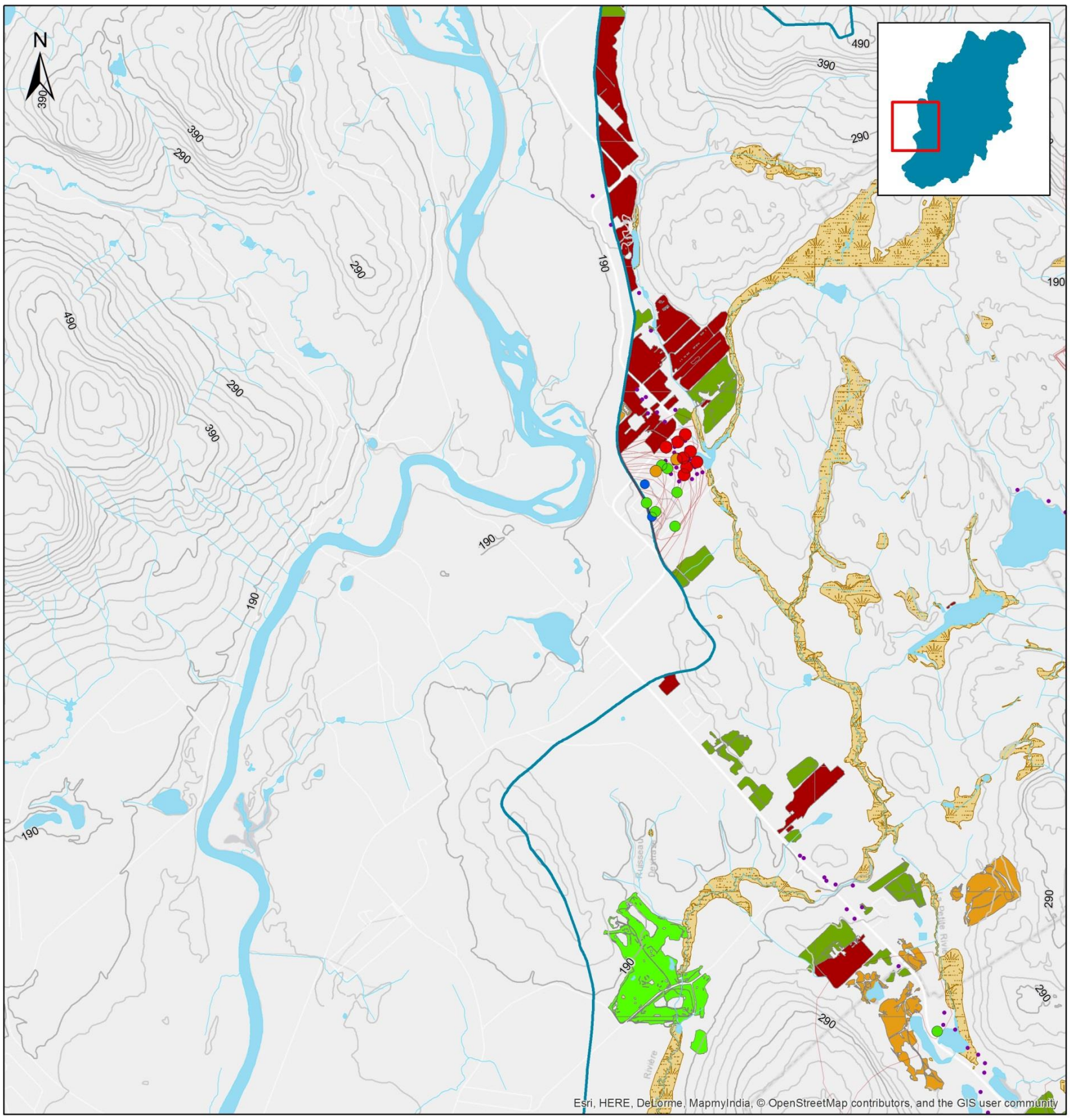


Figure 44 : Concentration de phosphore total dans les puits de la zone 7

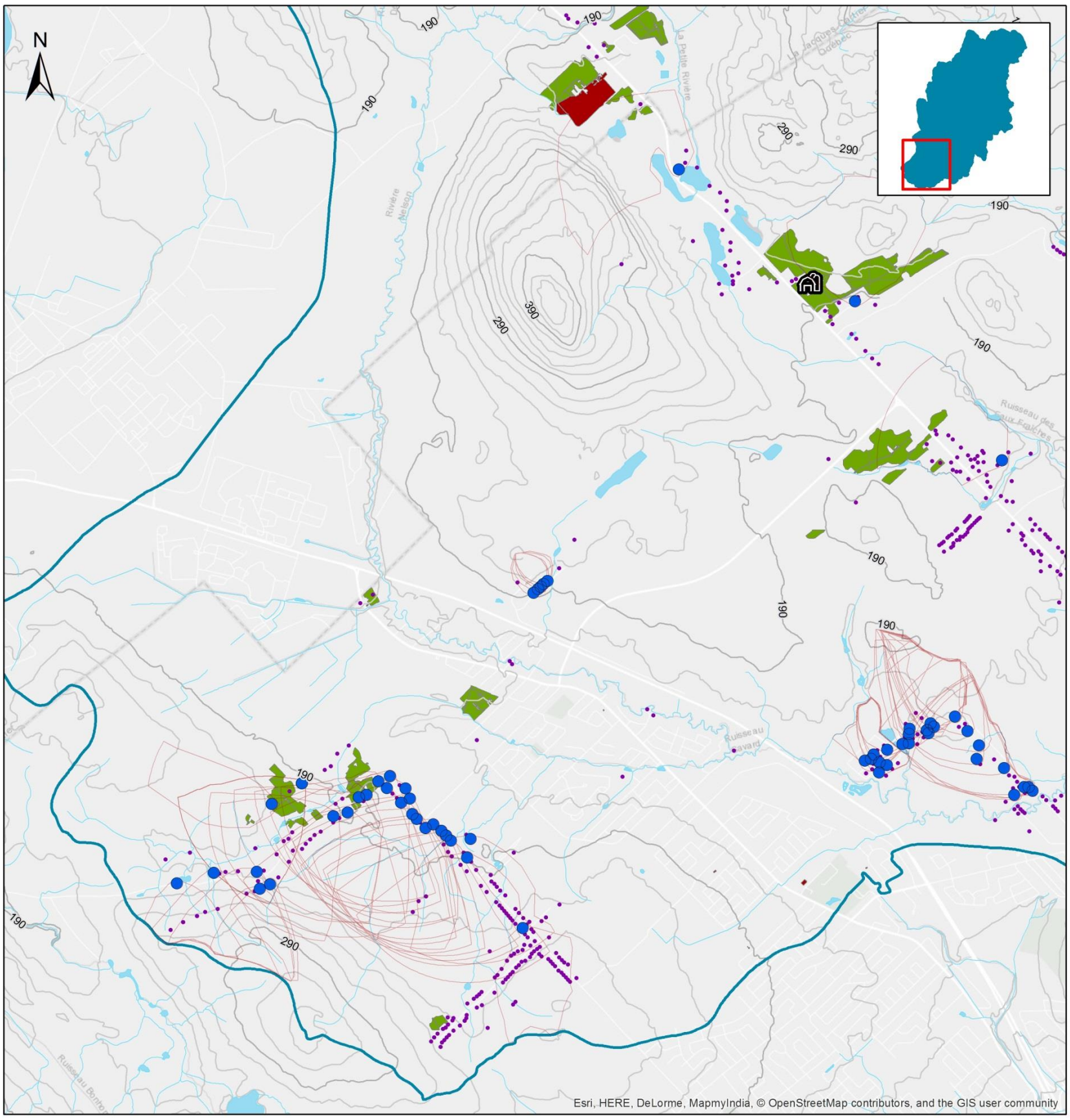


Figure 45 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 1

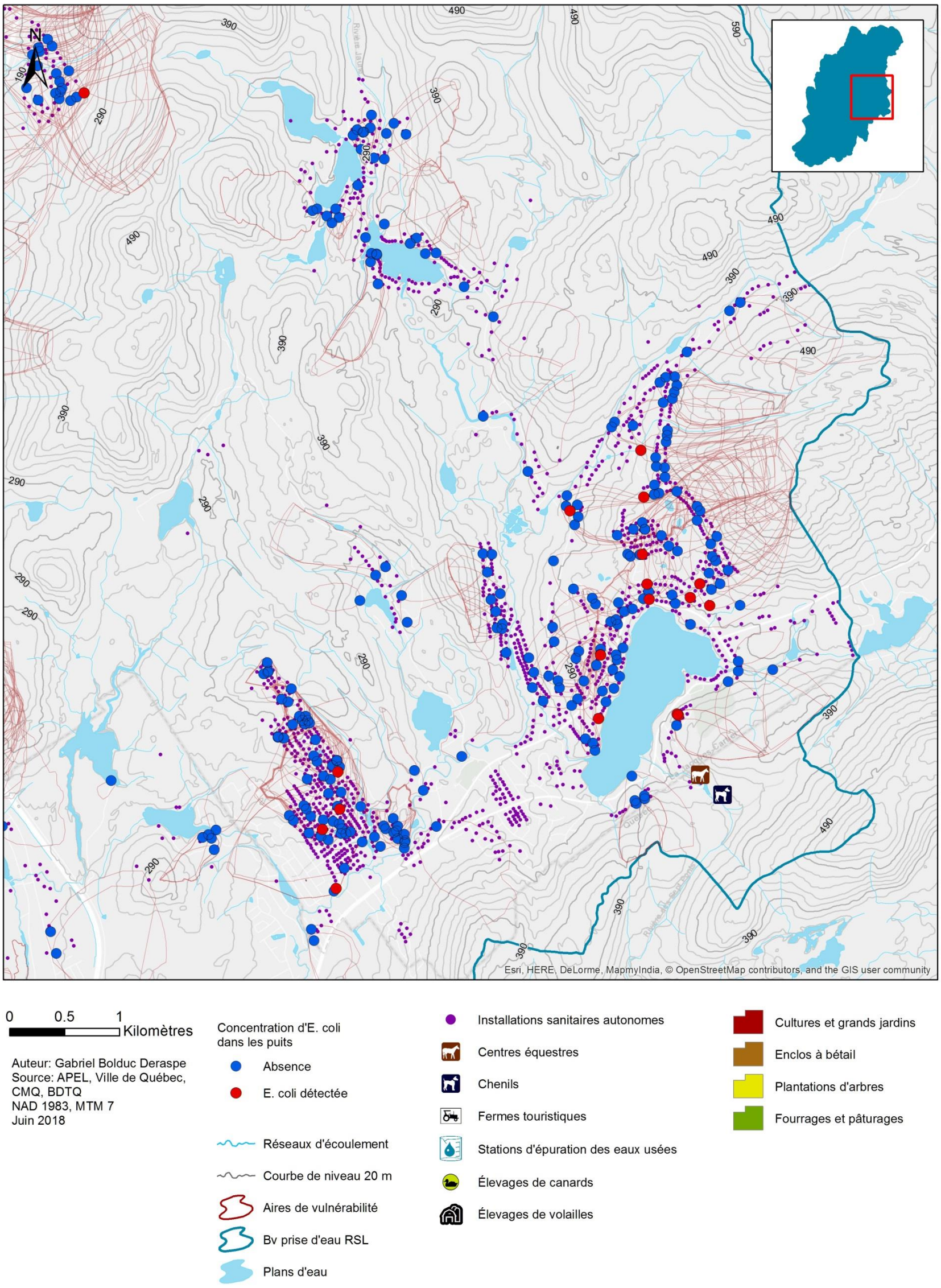


Figure 46 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 2

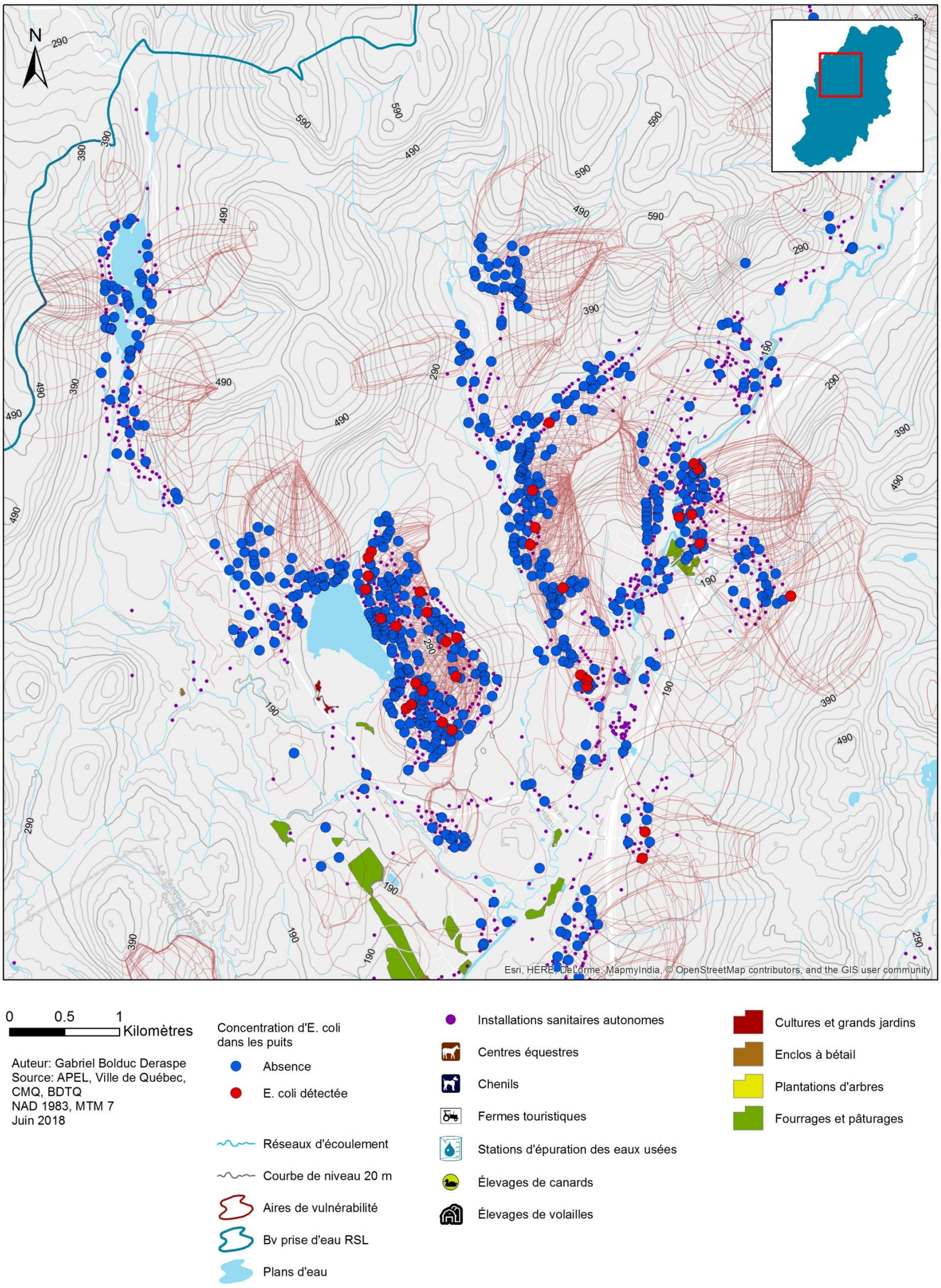


Figure 47 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 3

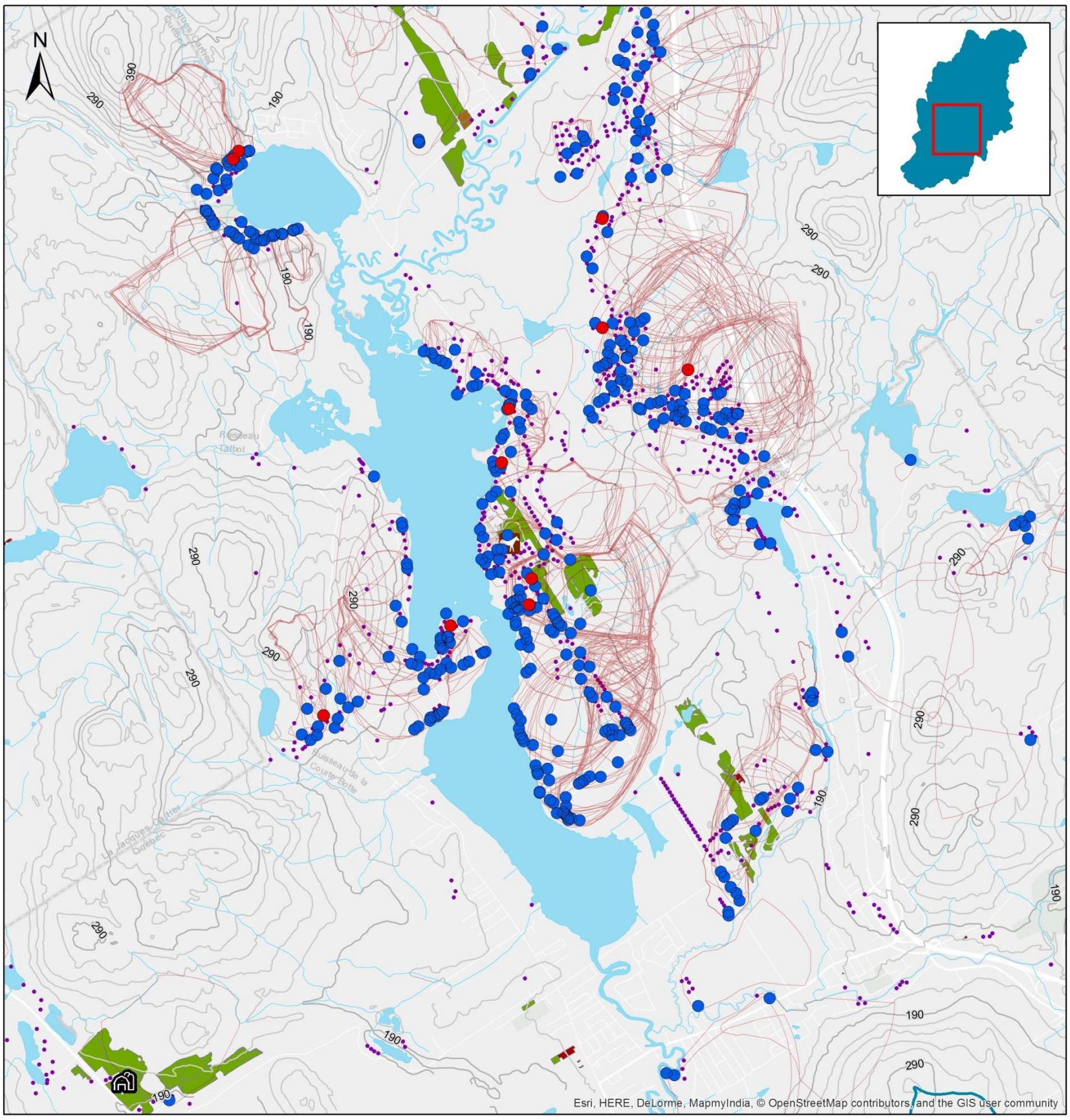


Figure 48 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 4

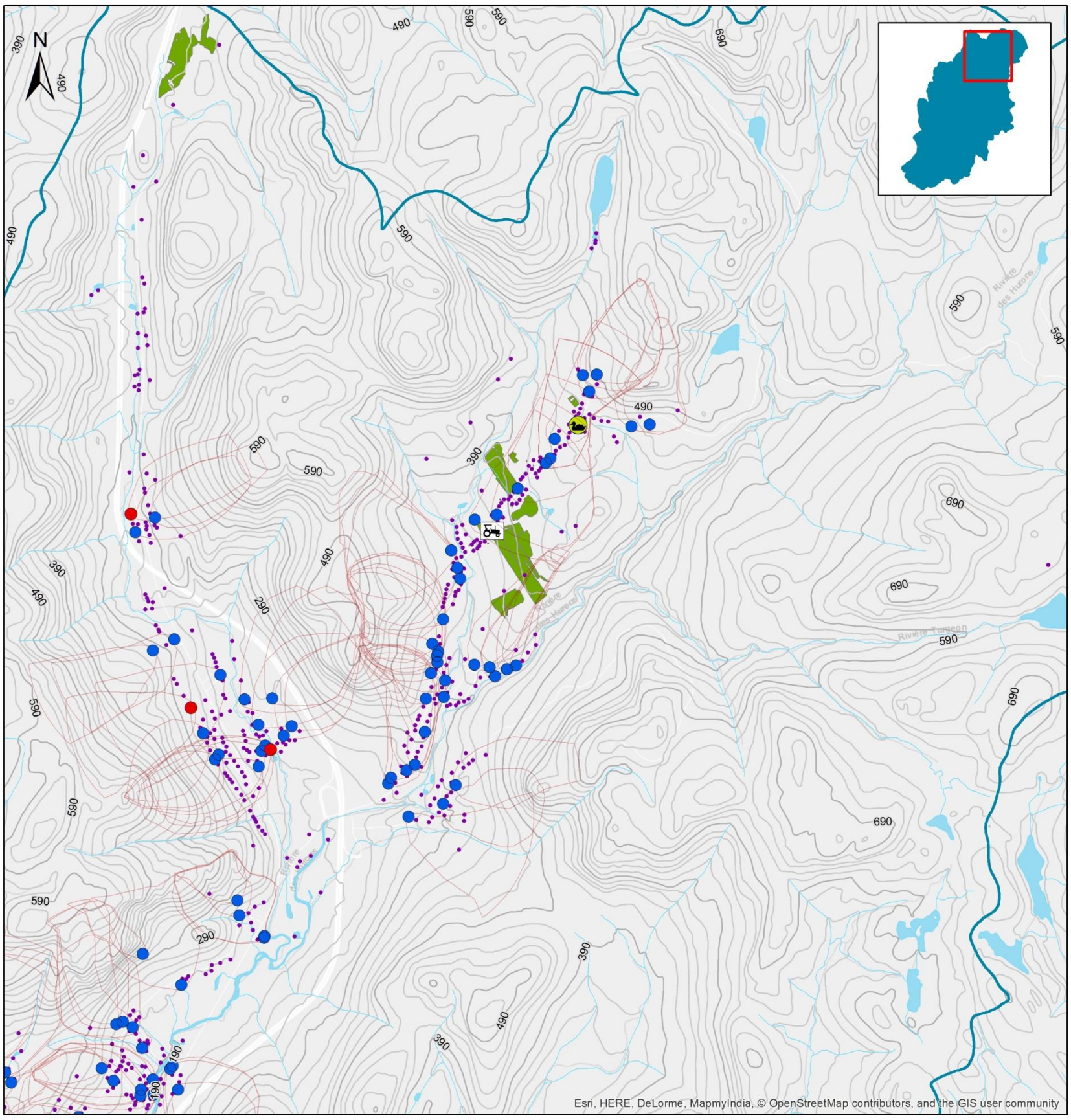


Figure 49 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 5

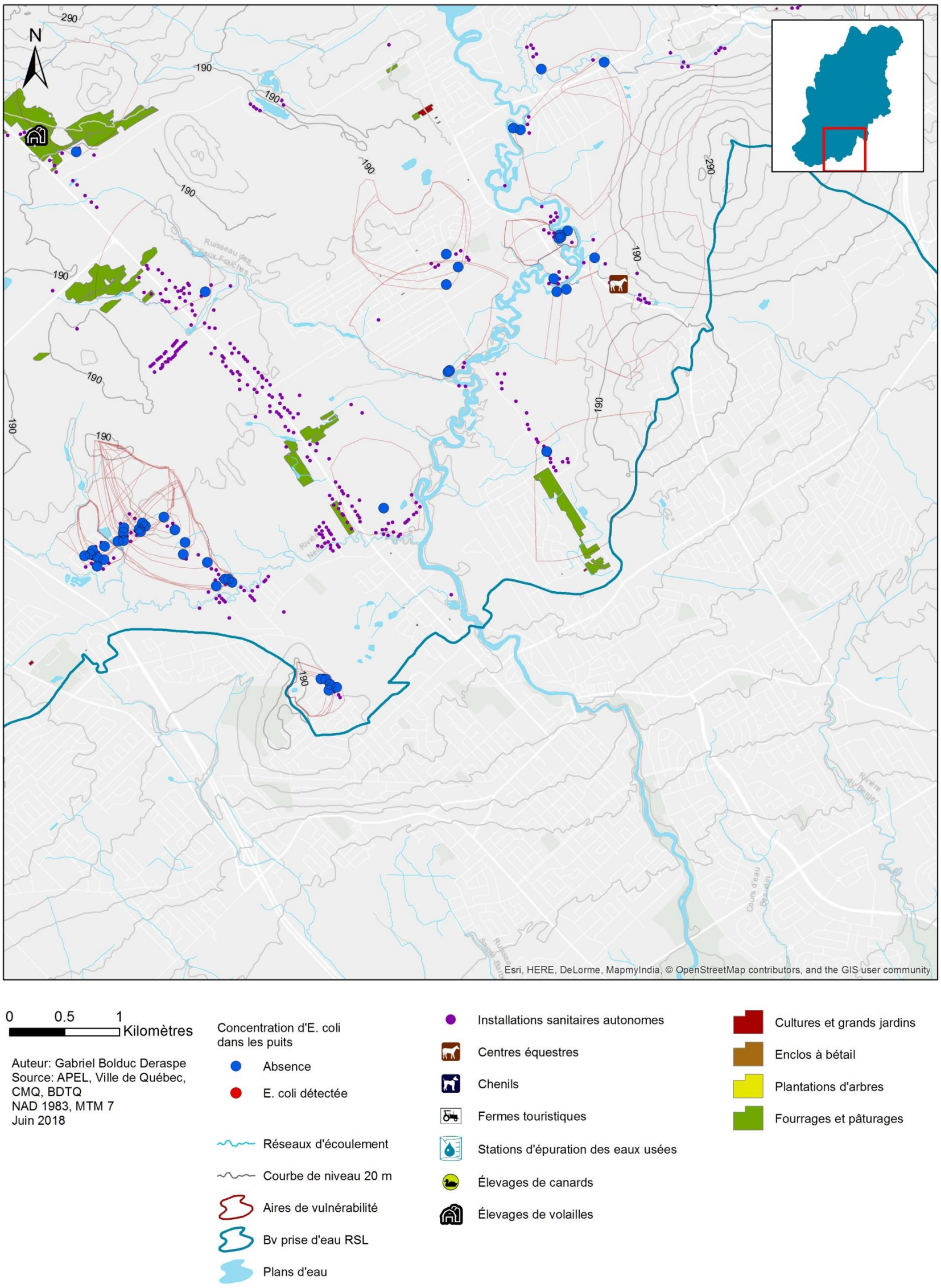


Figure 50 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 6

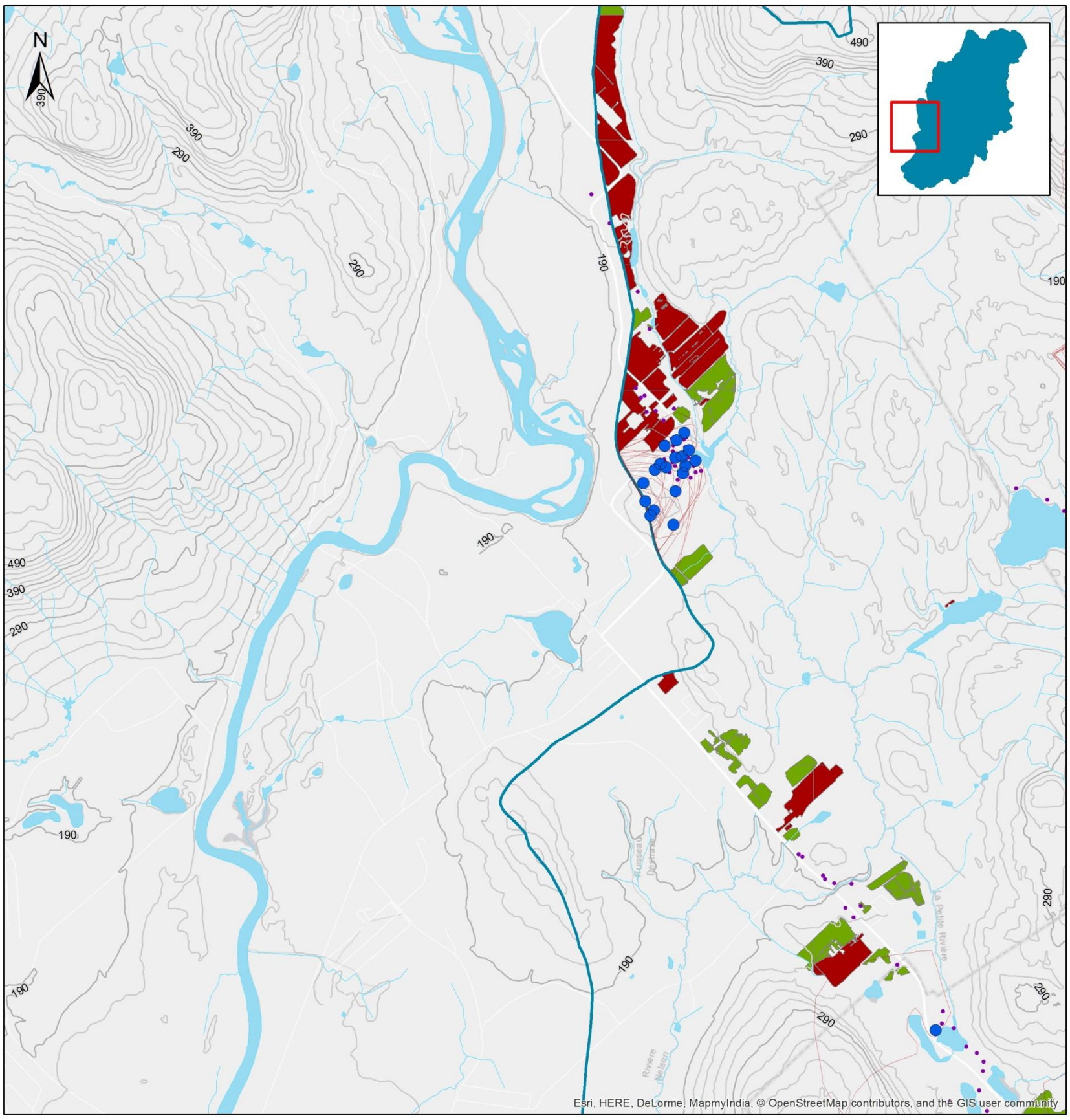


Figure 51 : Concentration d'*E. coli* dans les puits de la zone 7

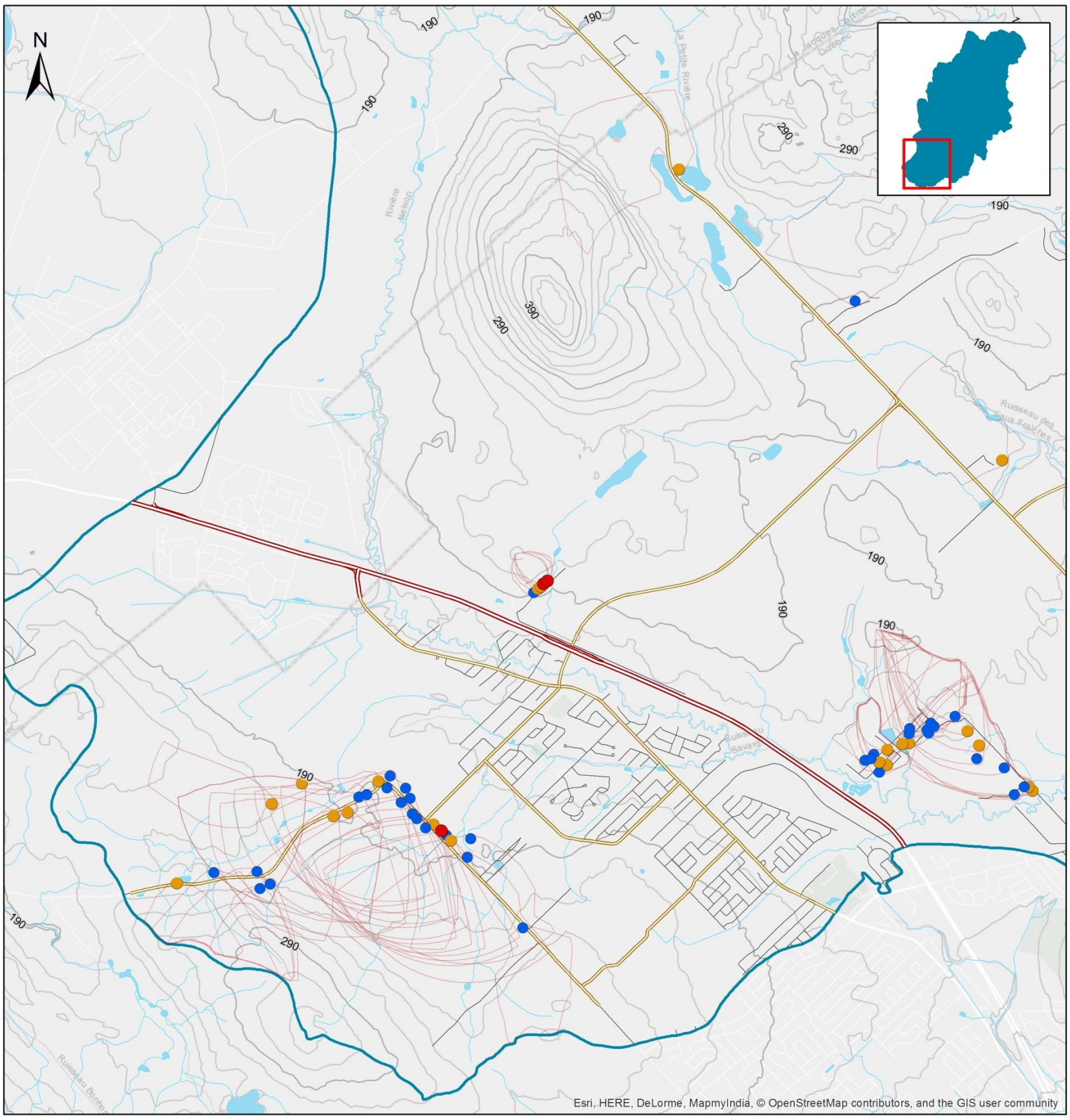


Figure 52 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 1

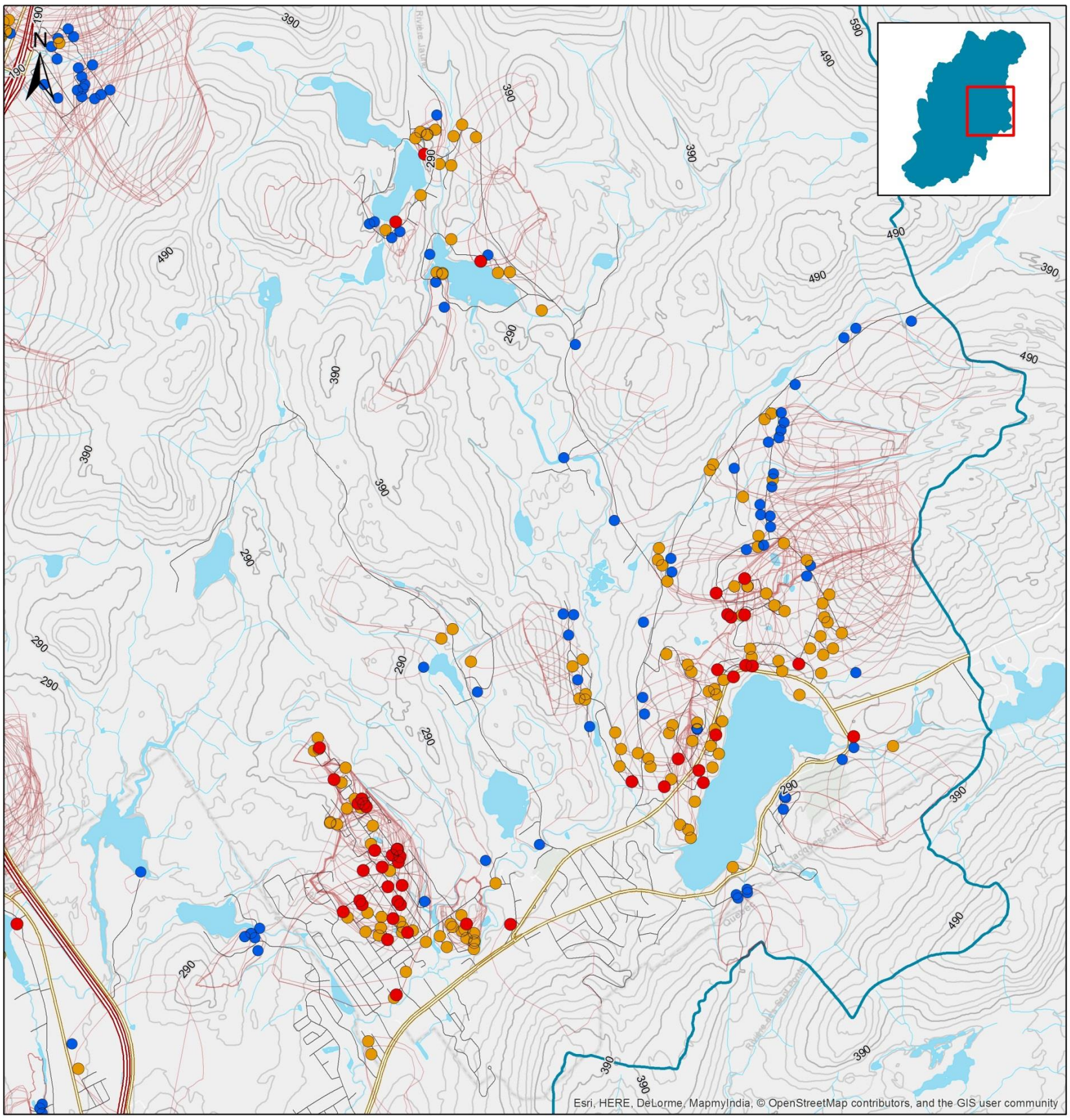


Figure 53 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 2

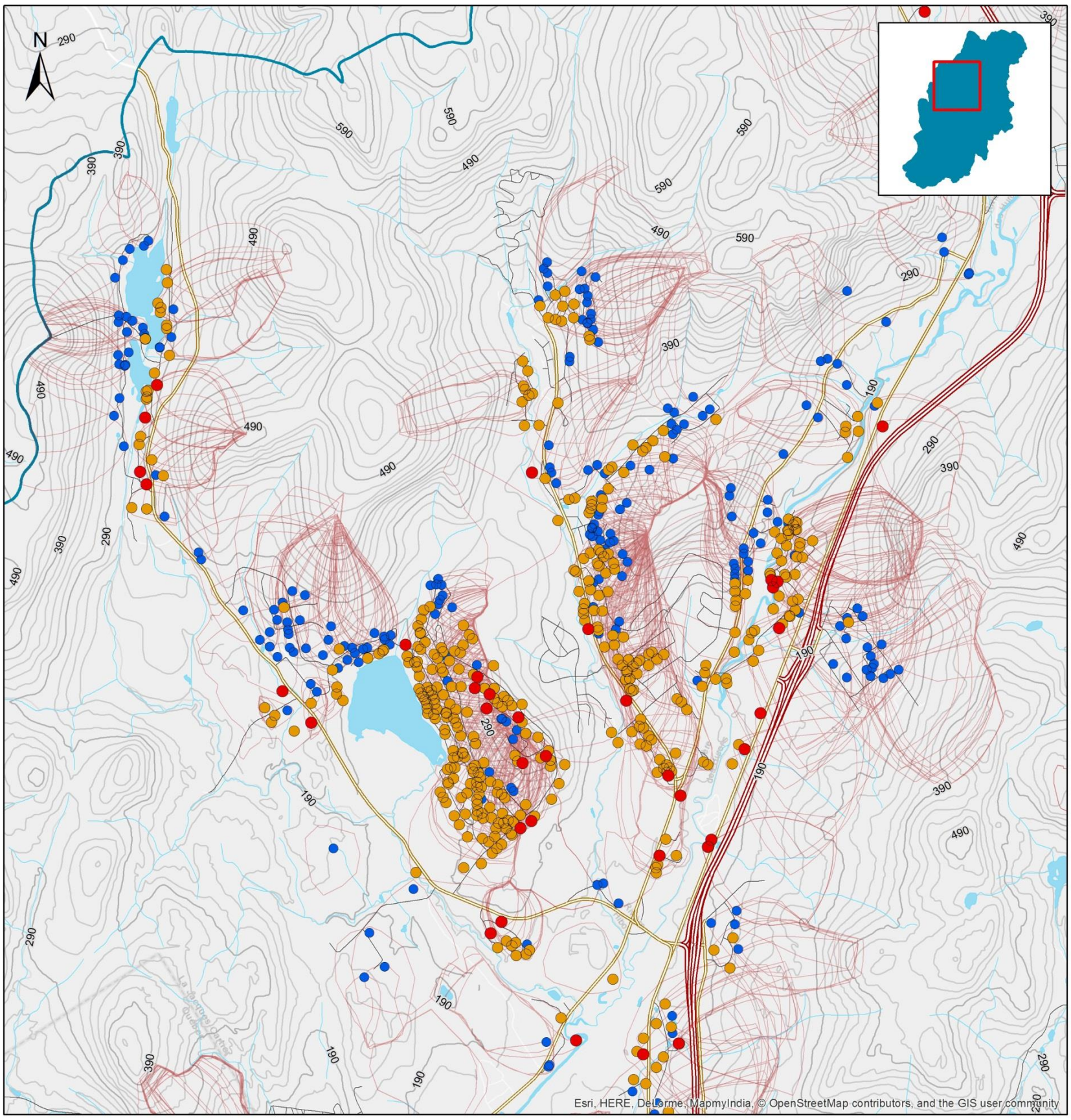


Figure 54 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 3

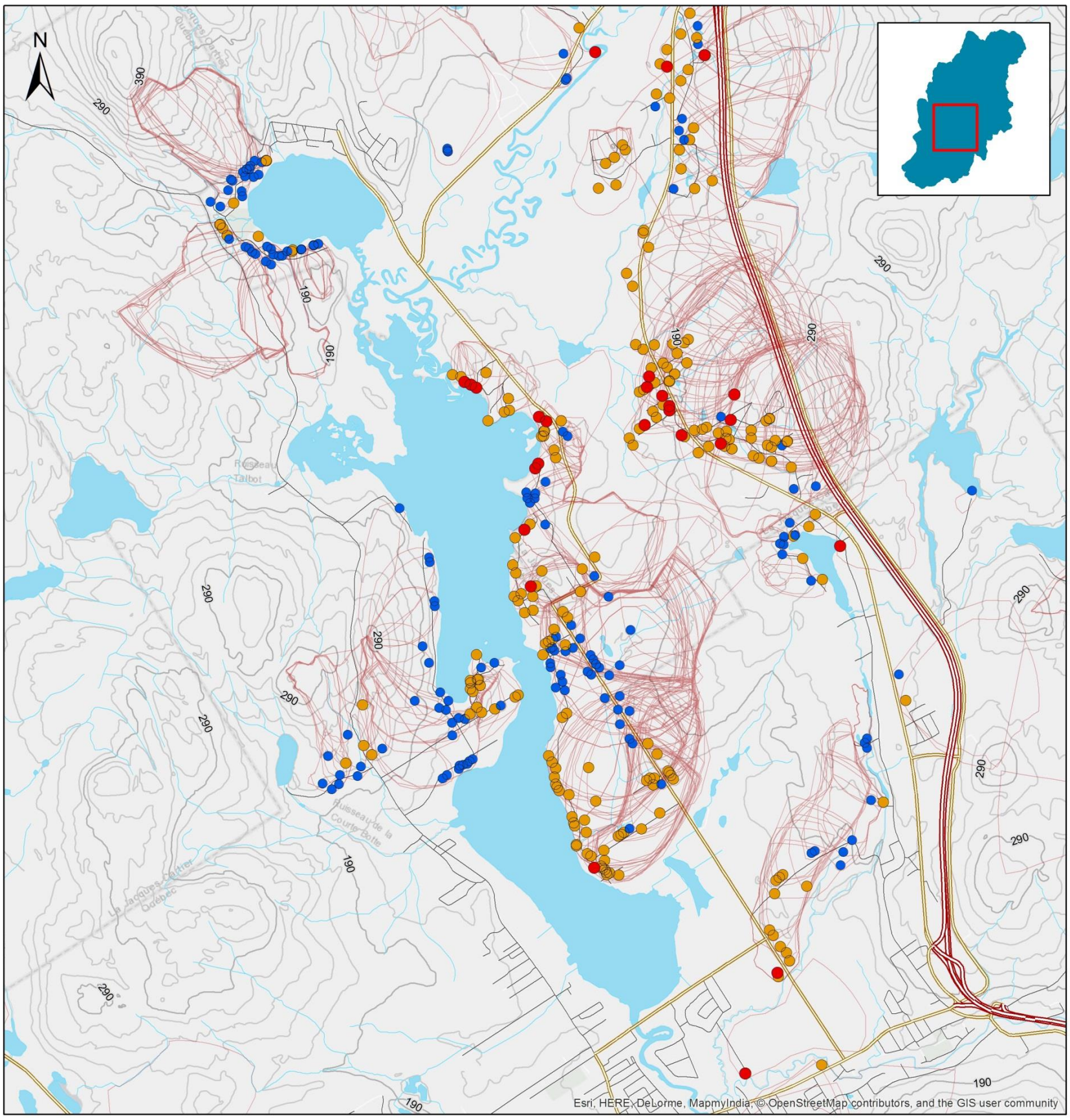


Figure 55 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 4

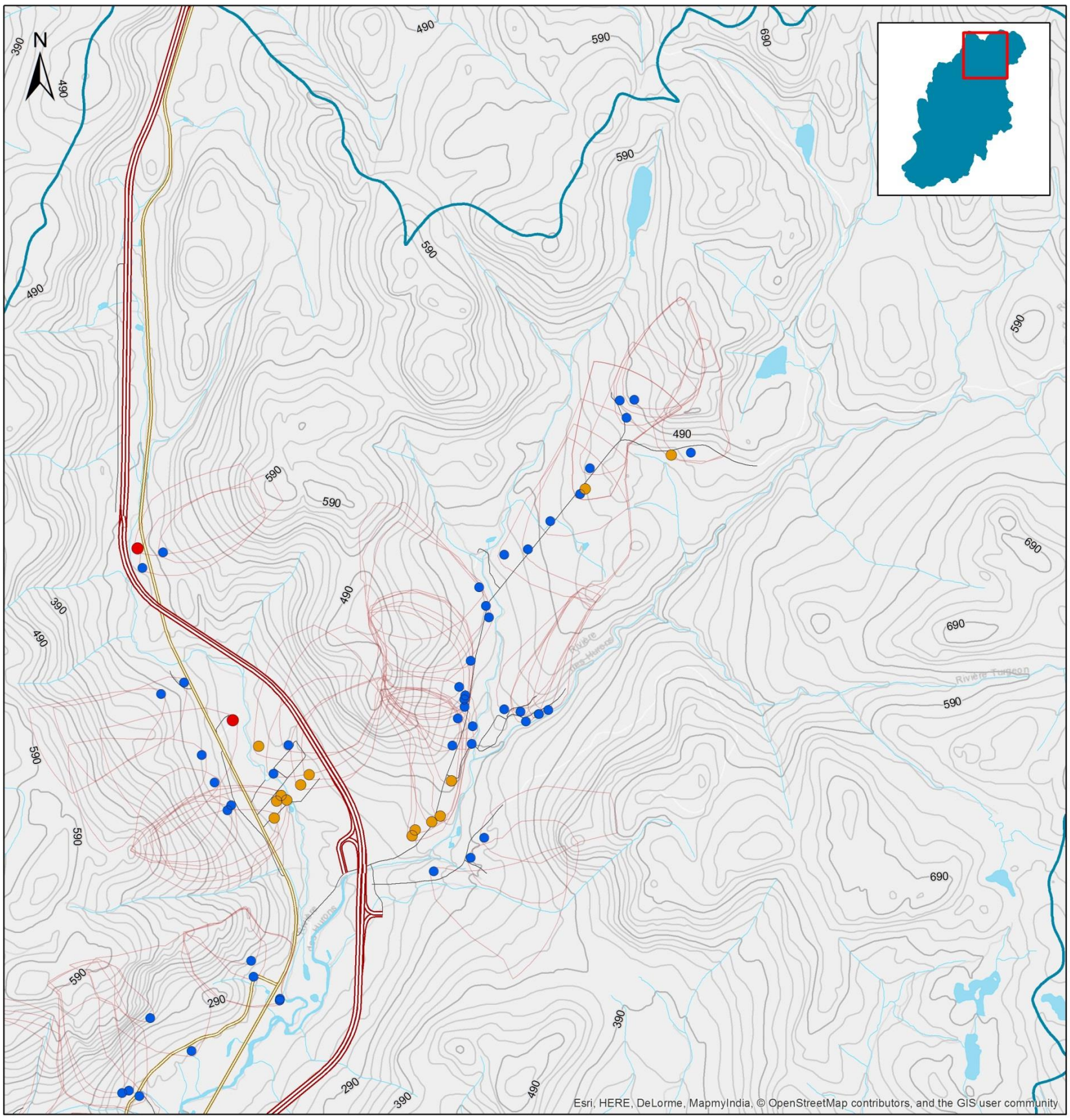


Figure 56 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 5

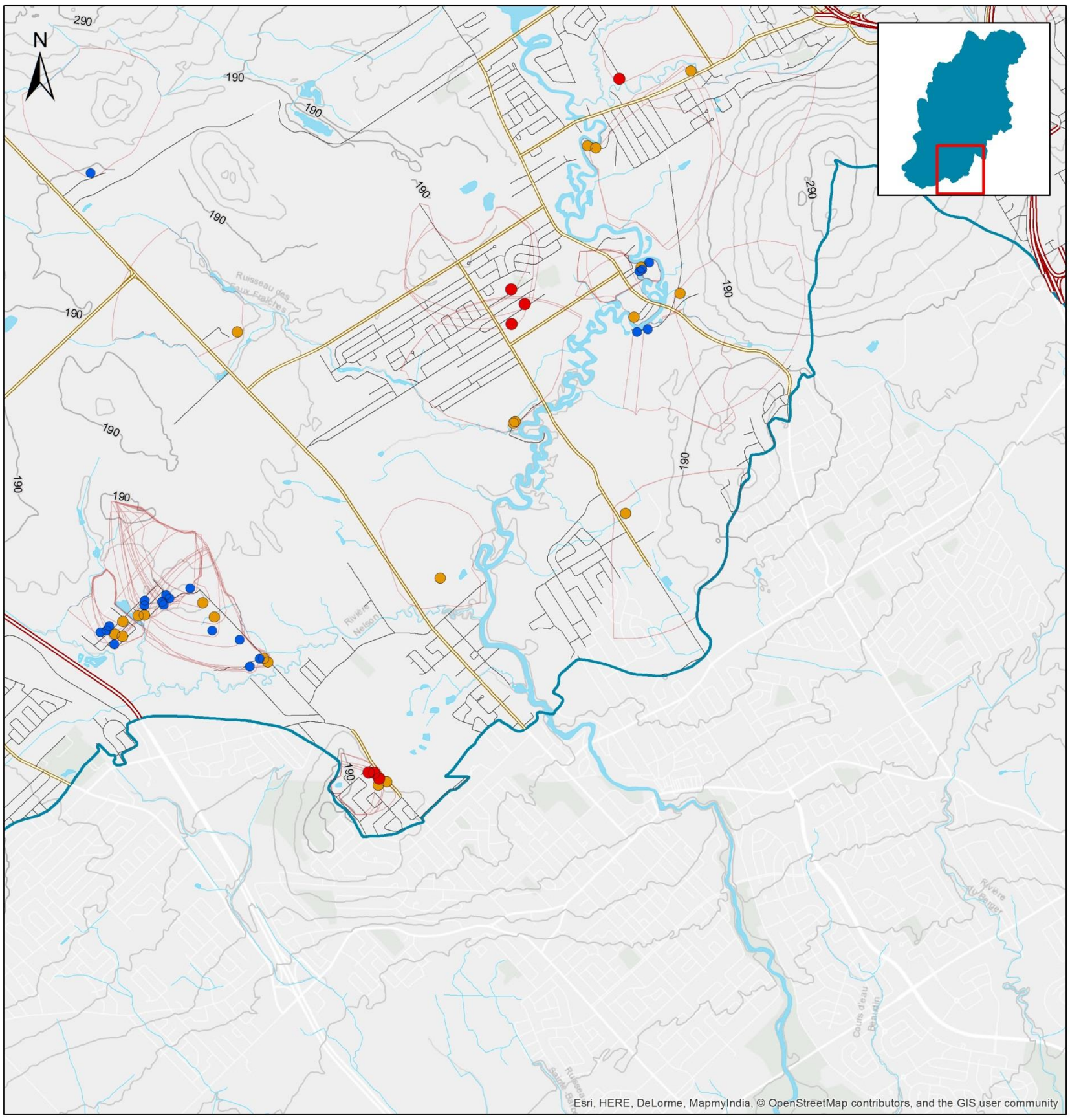


Figure 57 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 6

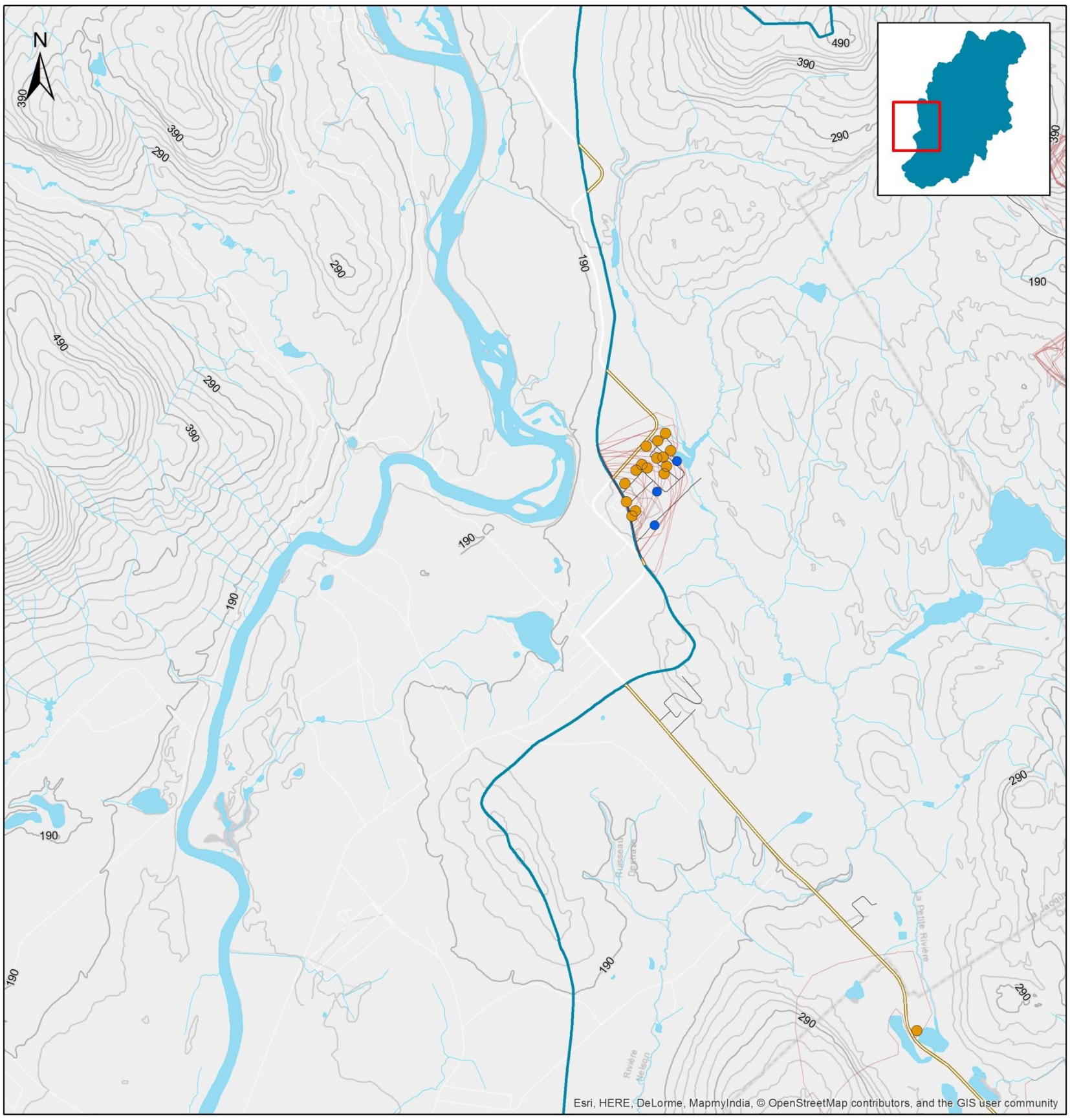


Figure 58 : Concentration en chlorures dans les puits de la zone 7

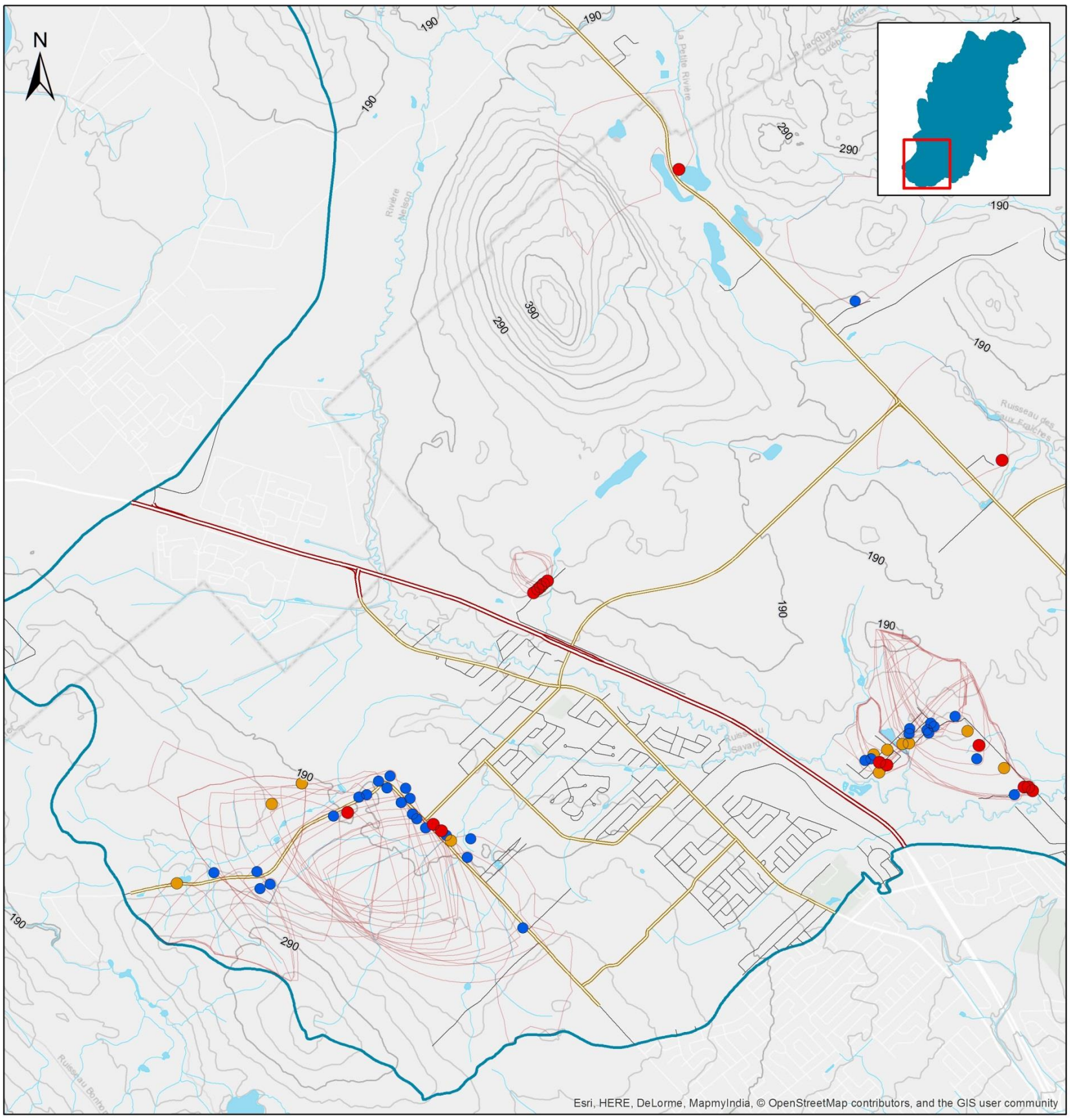


Figure 59 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 1

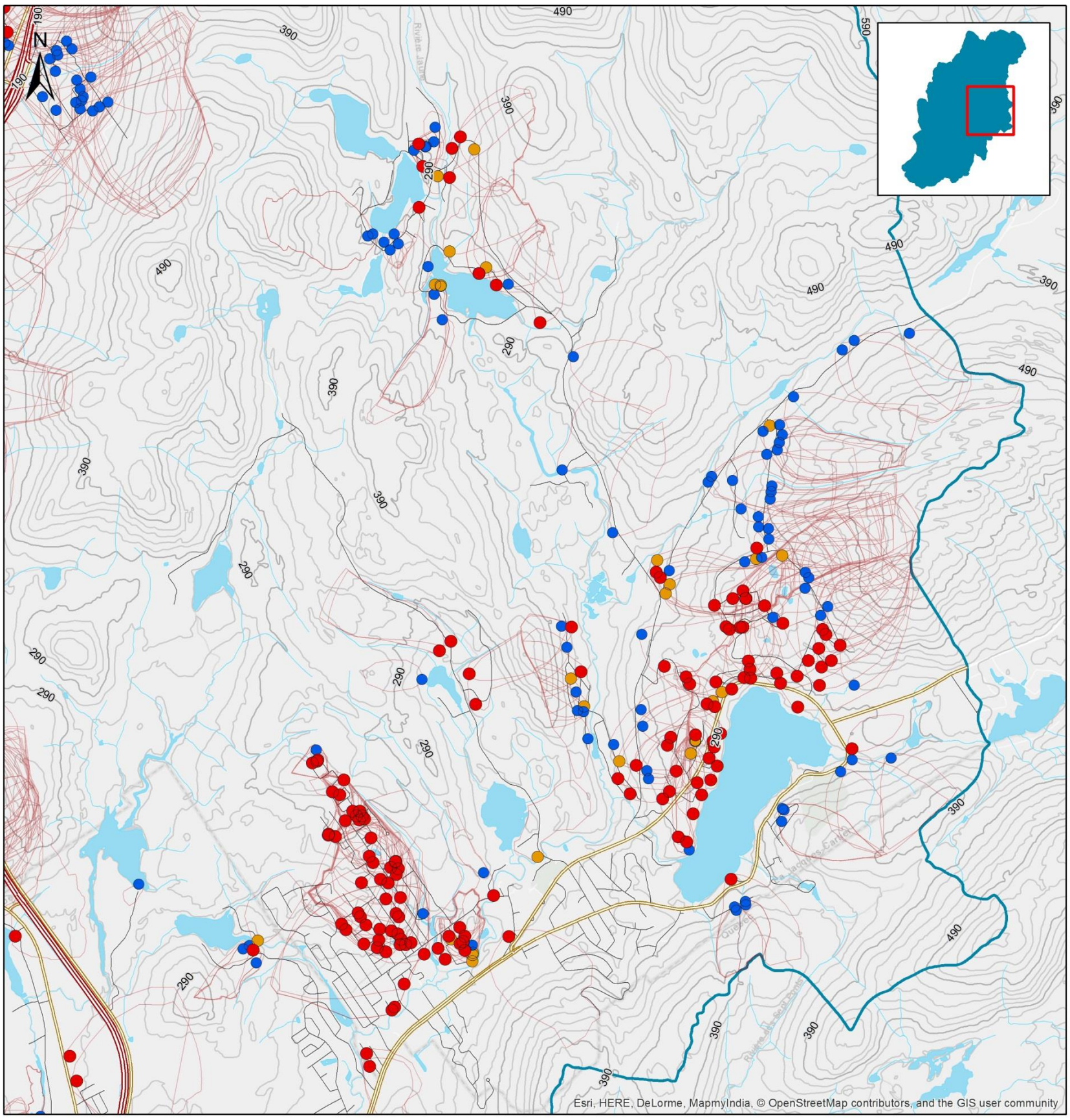


Figure 60 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 2

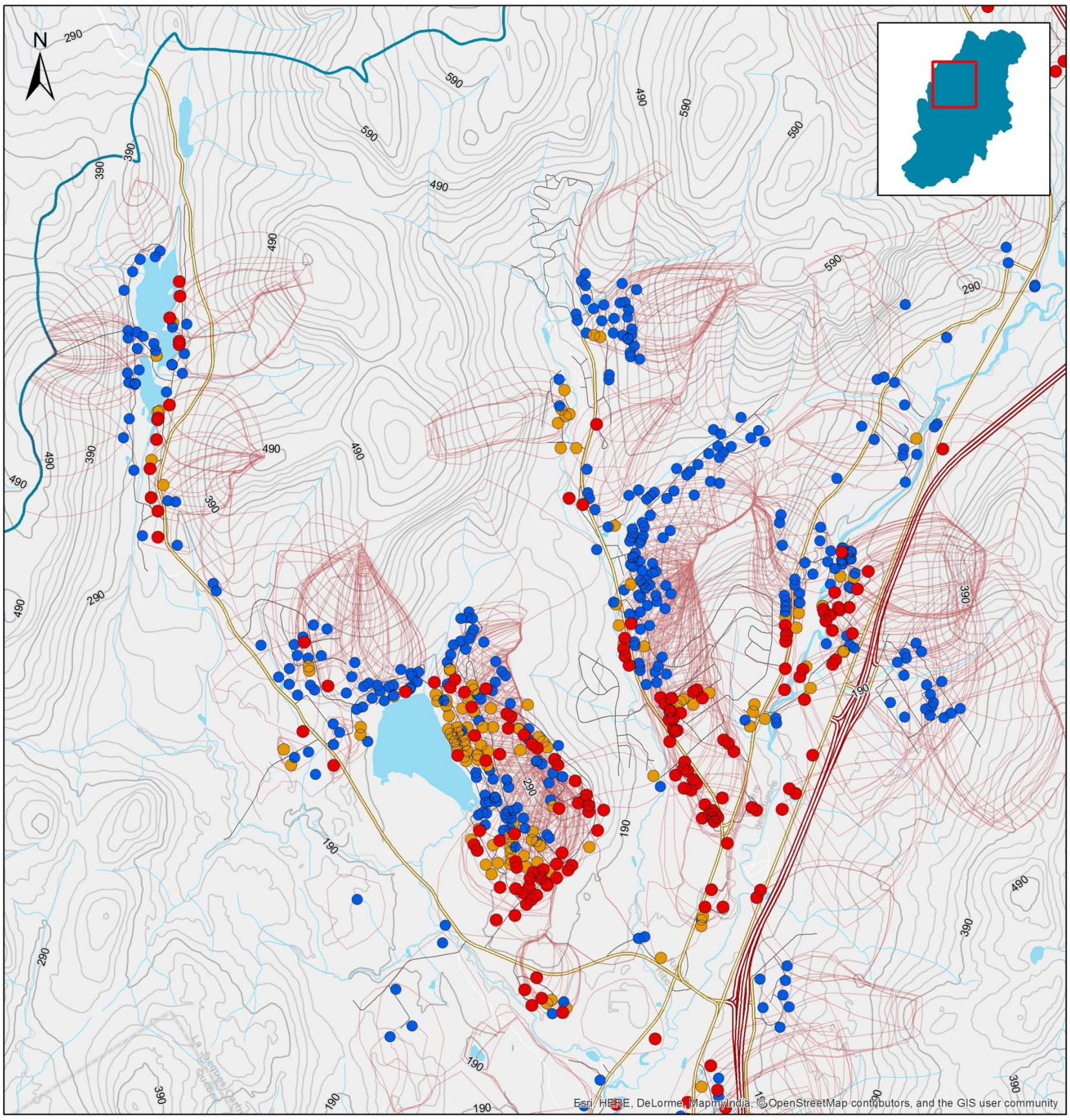


Figure 61 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 3

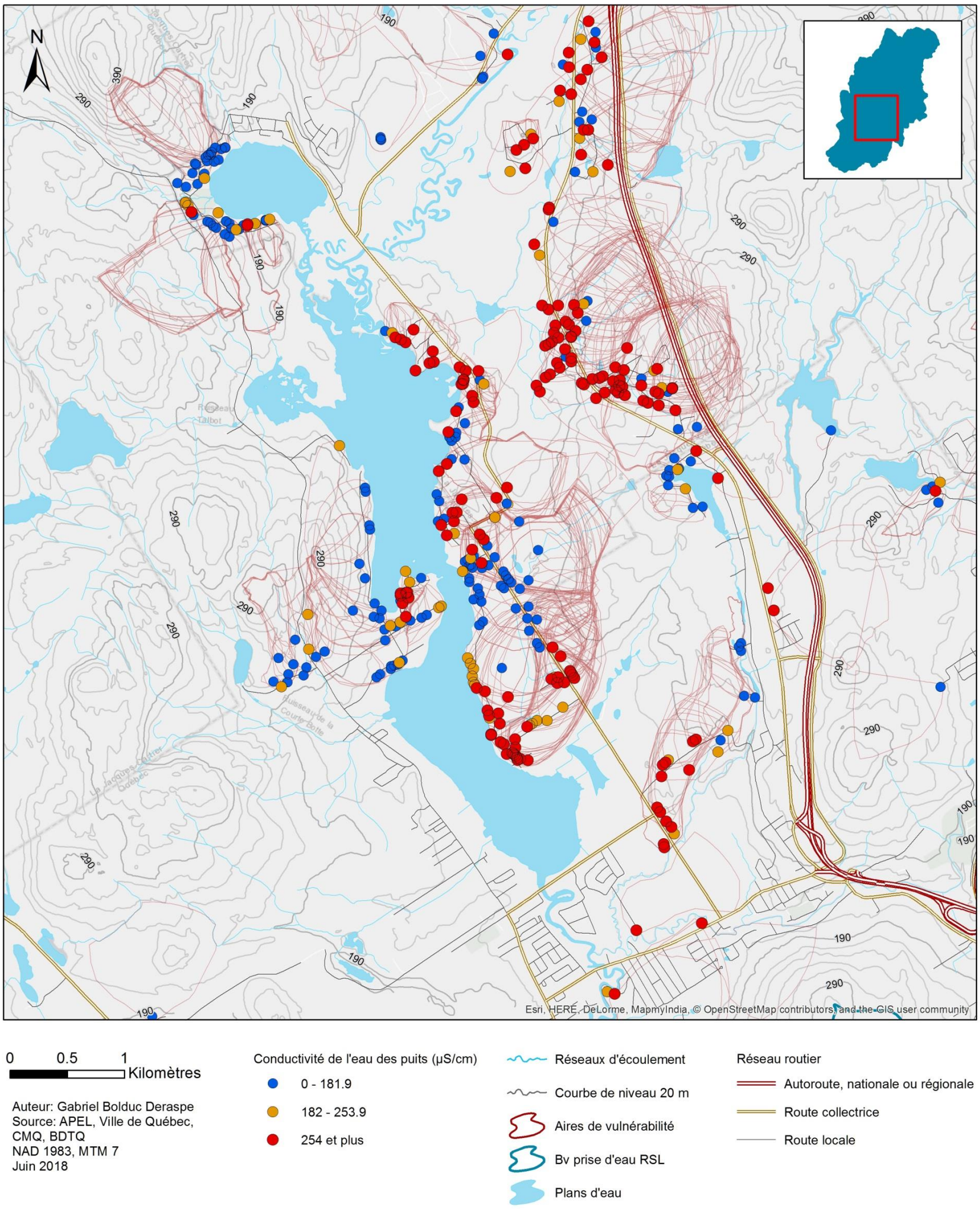


Figure 62 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 4

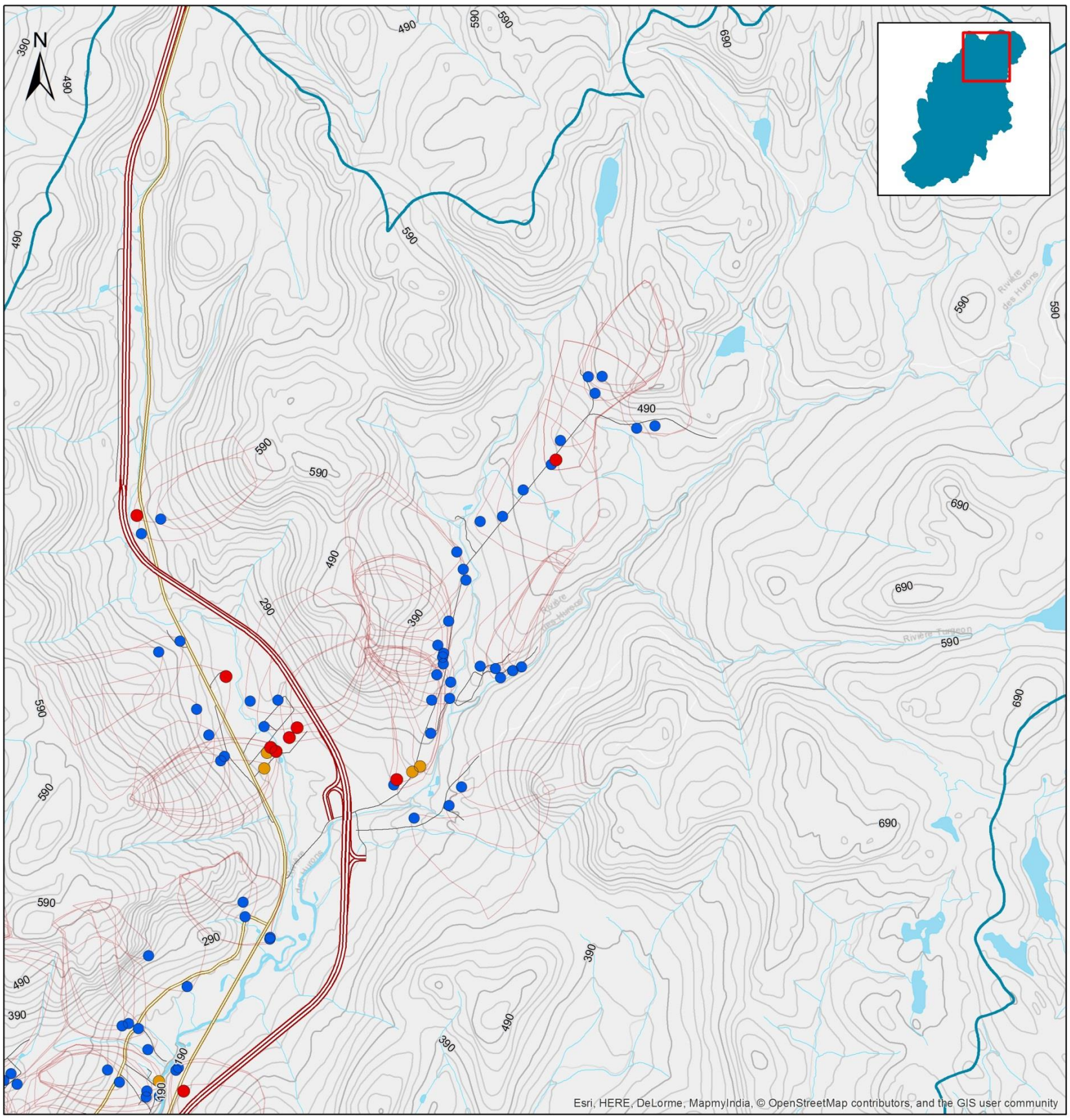


Figure 63 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 5

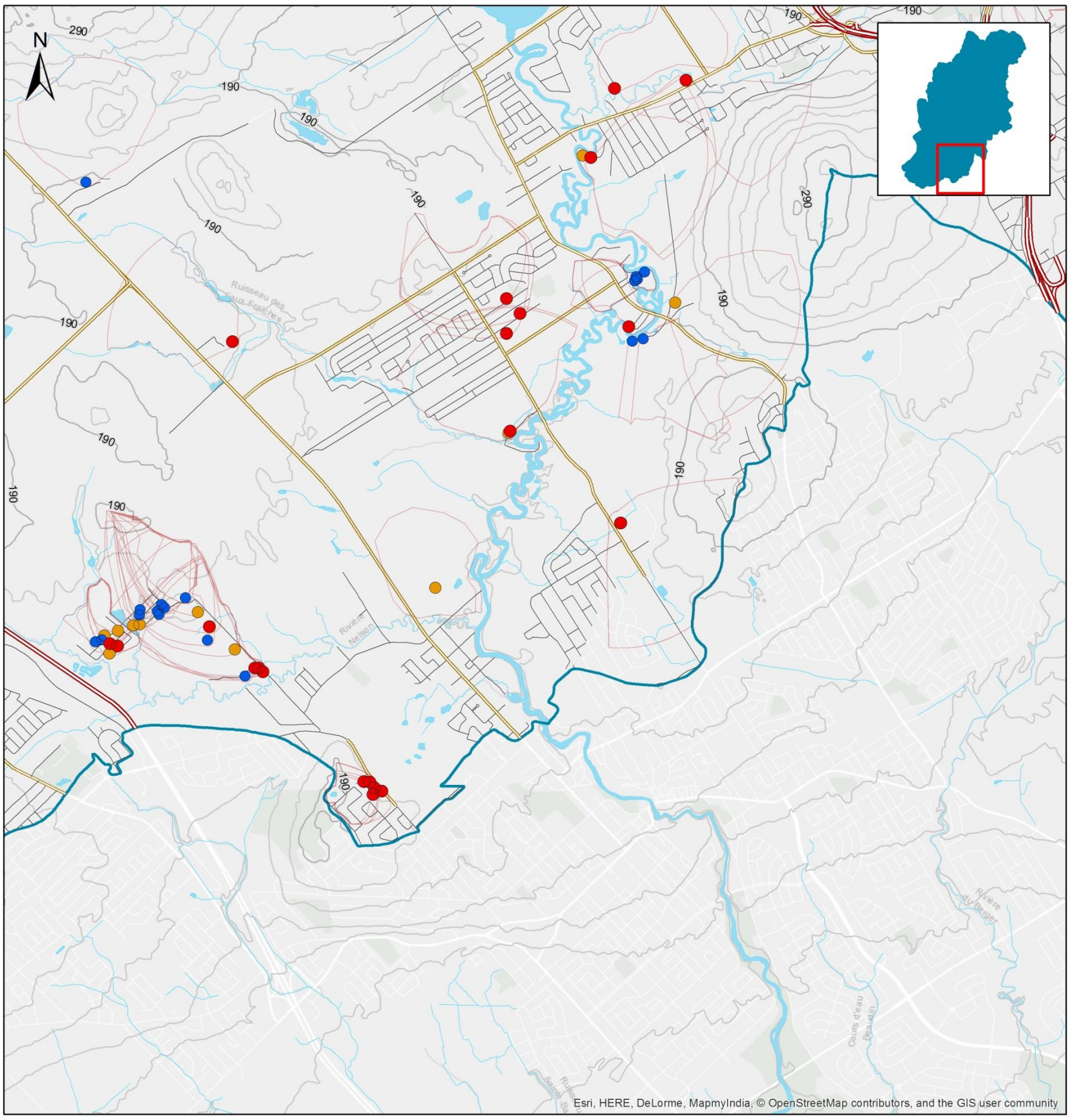
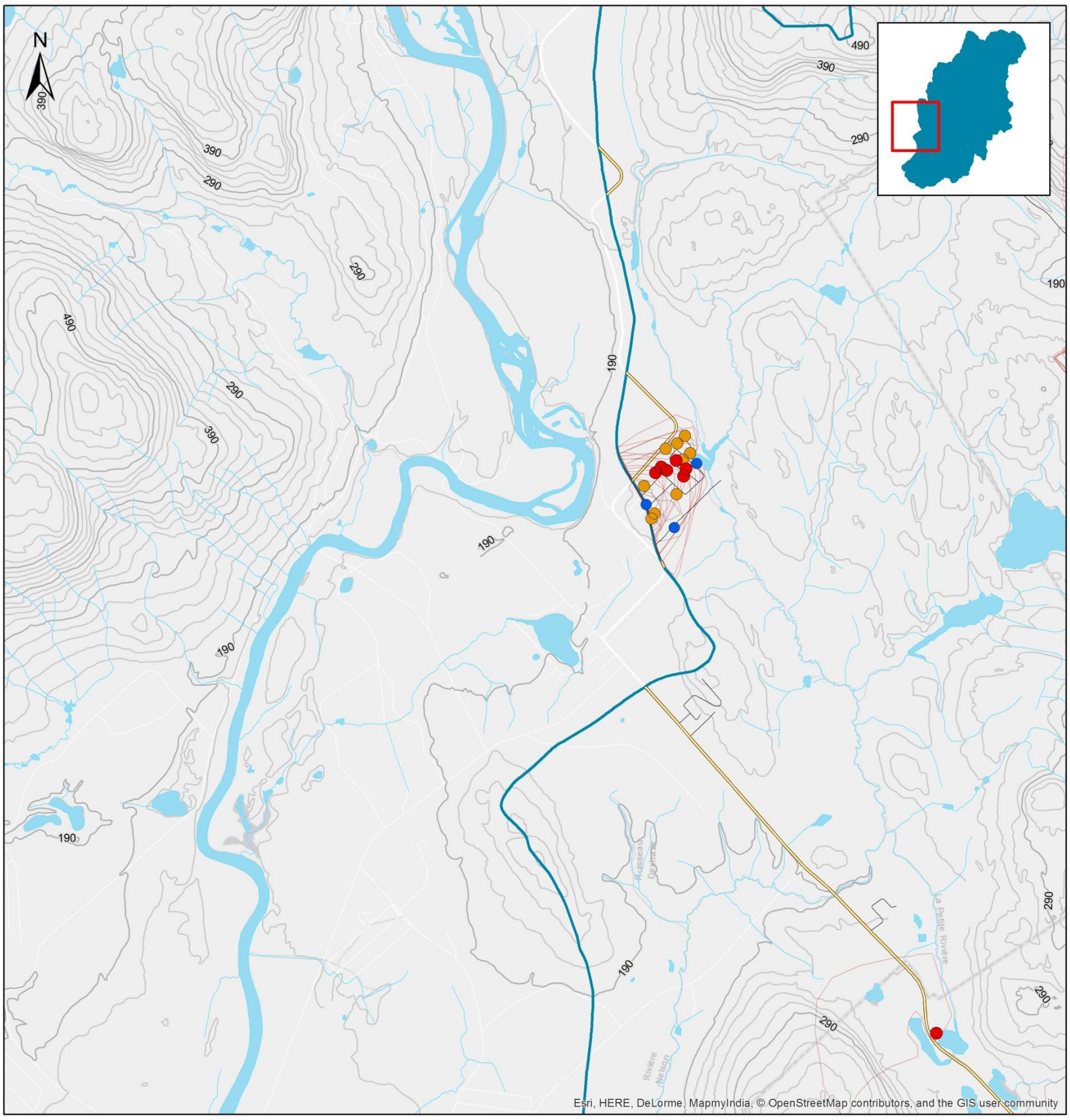


Figure 64 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 6



0 0.5 1 Kilomètres

Auteur: Gabriel Bolduc Deraspe
Source: APEL, Ville de Québec, CMQ, BDTQ
NAD 1983, MTM 7
Juin 2018

Conductivité de l'eau des puits (µS/cm)
- 0 - 181.9
- 182 - 253.9
- 254 et plus

Réseaux d'écoulement
- Courbe de niveau 20 m
- Aires de vulnérabilité
- Bv prise d'eau RSL
- Plans d'eau

Réseau routier
- Autoroute, nationale ou régionale
- Route collectrice
- Route locale

Figure 65 : Conductivité de l'eau des puits de la zone 7