

Territoire et qualité de l'eau : développement de modèles prédictifs



2017

Page couverture : Image©2016 DigitalGlobe, Google Earth

Coordination et rédaction

La présente publication a été réalisée sous la coordination de la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement et de la Direction de l'expertise en biodiversité du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez remplir le formulaire à l'adresse suivante :

www.mddelcc.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 656-5974

Le présent document peut être consulté sur le site du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques au www.mddelcc.gouv.qc.ca.

Référence à citer :

HÉBERT, S. et D. BLAIS (2017). *Territoire et qualité de l'eau : développement de modèles prédictifs*, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement et Direction de l'expertise en biodiversité, ISBN 978-2-550-77770-0 (PDF), 30 p.

Dépôt légal – 2017
Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN 978-2-550-77770-0 (PDF)
© Gouvernement du Québec, 2017

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Rédaction :	Serge Hébert ¹ Daniel Blais ²
Soutien technique :	Jean Bissonnette ² Suzanne Lavoie ¹ Danielle Leclerc ²
Révision scientifique :	François D'Auteuil-Potvin ¹ Jean-Thomas Denault ³ Georges Gangbazo ⁴
Graphisme :	Mona Frenette ¹

¹ Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, édifice Marie-Guyart, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7.

² Direction de l'expertise en biodiversité, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, édifice Marie-Guyart, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7.

³ Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, édifice Marie-Guyart, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7.

⁴ Direction générale de l'évaluation environnementale et stratégique, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, édifice Marie-Guyart, 675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7.

Mots clés : qualité de l'eau, rivière, territoire, utilisation du territoire, bassin versant, modèles prédictifs, phosphore, azote, nitrites et nitrates, carbone organique dissous.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	1
Méthodologie et source des données.....	2
Sélection des bassins versants et compilation des données sur la qualité de l'eau.....	2
Compilation des données sur le territoire	5
Développement et validation des modèles prédictifs.....	8
Résultats et discussion	10
Phosphore total.....	10
Azote total	12
Nitrites et nitrates.....	14
Carbone organique dissous	16
Autres variables	18
Conclusion	19
Bibliographie.....	20
Annexes.....	22
 Tableau 1 Variables prises en considération dans le développement des modèles prédictifs.....	6
Tableau 2 Types de roches attribués aux formations rocheuses.....	7

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Localisation des 69 bassins versants sélectionnés pour la modélisation.....	3
Figure 2 Superficie des 69 bassins versants sélectionnés pour la modélisation.....	3
Figure 3 Qualité de l'eau (IQBP ₆) des 69 bassins versants sélectionnés pour la modélisation, période 2009-2012.....	4
Figure 4 Superficie des 25 bassins versants utilisés pour la validation.....	9
Figure 5 Qualité de l'eau (IQBP ₆) des 25 bassins versants utilisés pour la validation, période 2009-2012 ..	9
Figure 6 Relation entre les concentrations médianes de phosphore prédites et les concentrations médianes de phosphore mesurées pour la période de 2009 à 2012	11
Figure 7 Relation entre les concentrations médianes d'azote prédites et les concentrations médianes d'azote mesurées pour la période de 2009 à 2012	13
Figure 8 Relation entre les concentrations médianes de nitrites et nitrates prédites et les concentrations médianes de nitrites et nitrates mesurées pour la période de 2009 à 2012	15
Figure 9 Relation entre les concentrations médianes de COD prédites et les concentrations médianes de COD mesurées pour la période de 2009 à 2012	17

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 Caractéristiques des stations utilisées pour la modélisation	23
Annexe 2 Méthode de calcul des charges annuelles de phosphore (P total) des stations d'épuration d'eaux usées municipales	25
Annexe 3 Source des données pour la cartographie de l'occupation du sol.....	26
Annexe 4 Calcul des variables liées aux pressions agricoles.....	27
Annexe 5 Caractéristiques des stations utilisées pour la validation.....	30

Introduction

Au cours des dernières décennies, différentes actions visant l'amélioration de l'état des écosystèmes aquatiques ont été posées. Elles concernaient principalement l'amélioration de la qualité de l'eau, un volet central de la santé des écosystèmes aquatiques. Depuis 1978, différents programmes d'assainissement des eaux usées municipales ont mené à la construction de nombreuses stations d'épuration des eaux. En 2014, alors que les eaux usées de près de 99 % de la population raccordée à un réseau d'égout étaient traitées (MDDELCC, 2015a), le [Règlement sur les ouvrages d'assainissement des eaux usées](#) a été adopté; il vise l'actualisation des exigences de rejet et la modernisation de certaines stations. Sur le plan industriel, des règlements sectoriels ont été adoptés pour encadrer les rejets provenant des papeteries et des raffineries de pétrole¹. Des directives et des lignes directrices ont également été formulées pour plusieurs secteurs industriels, soit le secteur minier, le secteur agroalimentaire hors réseau et l'industrie du sciage. Pour l'industrie lourde existante, le Programme de réduction des rejets industriels (PRRI) permet par l'attestation d'assainissement le resserrement graduel des exigences pour les secteurs ciblés. Dans le secteur agricole, plusieurs programmes ont été mis en place depuis 1988 pour améliorer la gestion des déjections animales. En 2002, le Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole (RRPOA), qui avait été adopté en 1997 et qui introduisait les Plans agroenvironnementaux de fertilisation et des normes d'épandage pour le phosphore, a été modernisé ([Règlement sur les exploitations agricoles](#) ou REA). Ce règlement édicte notamment des normes relatives aux installations d'élevage, au stockage, à l'élimination ou à la valorisation des déjections animales, au retrait des animaux des cours d'eau et des bandes riveraines ainsi qu'à l'augmentation des superficies cultivées dans les bassins versants dégradés.

Ces efforts semblent avoir porté fruit puisqu'une amélioration générale de la qualité de l'eau a été observée à la suite de la mise en place de ces programmes (MDDEP, 2012; MDDELCC, 2015a). Cependant, le portrait de la situation actuelle révèle que l'état de certains écosystèmes aquatiques demeure préoccupant (MDDEP, 2012; MDDELCC, 2015a), notamment dans les basses-terres du Saint-Laurent. Bien qu'il subsiste une pollution résiduelle liée aux sources ponctuelles de pollution, les sources diffuses constituent la pression la plus importante sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes aquatiques dans plusieurs bassins versants (Gangbazo et Babin, 2000; Gangbazo *et al.*, 2005). Devant ces constats, il apparaît essentiel de développer à l'intention des décideurs des outils permettant de bien prendre en compte l'impact de l'utilisation du territoire et de ses caractéristiques sur la qualité de l'eau.

Dans la foulée de la Politique nationale de l'eau lancée en 2002, des efforts en ce sens avaient été entrepris. Le Ministère avait alors présenté les résultats d'une étude visant à évaluer la capacité de support des rivières en ce qui a trait au phosphore (Gangbazo *et al.*, 2005). En établissant un lien de causalité entre la proportion du territoire occupée par les cultures annuelles (à grand interligne et à interligne étroit) dans un bassin versant et la concentration médiane en phosphore à l'embouchure des rivières, les auteurs proposaient d'utiliser le pourcentage du bassin versant occupé par les cultures annuelles pour estimer les concentrations médianes en phosphore à l'embouchure des cours d'eau où l'information était manquante.

Il est aujourd'hui bien connu que l'influence du territoire sur la qualité de l'eau est multifactorielle. Dans une revue de la littérature sur le sujet, Baker (2006) met en évidence la complexité des relations qui existent entre l'utilisation du territoire et la qualité de l'eau. L'influence de l'utilisation du territoire sur la

¹ Règlement sur les fabriques de pâtes et papiers et Règlement sur les effluents liquides des raffineries de pétrole (Loi sur la qualité de l'environnement).

qualité de l'eau est modulée par les caractéristiques du territoire à travers des processus chimiques et physiques complexes qui varient dans l'espace et dans le temps. Le ruissellement est le moteur principal de mobilisation de la matière, qu'elle soit sous forme solide ou dissoute. La température et les précipitations conditionnent les processus responsables de la mobilité des contaminants vers le réseau hydrographique. Les principaux facteurs d'influence sont de nature anthropique, hydrologique, géologique et édaphique. De surcroît, les liens entre la qualité de l'eau et les caractéristiques du territoire dépendent de facteurs liés à l'échelle d'analyse et à l'organisation spatiale (Johnson *et al.*, 1997 et 2001).

Le but de la présente étude est de fournir des outils d'aide à la décision permettant de prédire de manière systématique l'état physicochimique de l'eau des rivières du sud du Québec en ce qui a trait au phosphore, à l'azote, aux nitrites et nitrates et au carbone organique dissous. Ces modèles prédictifs devraient permettre de cibler et de prioriser les secteurs les plus touchés nécessitant une intervention.

Méthodologie et source des données

Le développement de modèles prédictifs de l'état physicochimique de l'eau des rivières du sud du Québec a été réalisé en trois étapes :

- sélection des bassins versants et compilation des données sur la qualité de l'eau;
- compilation des variables territoriales;
- développement et validation des modèles empiriques.

Sélection des bassins versants et compilation des données sur la qualité de l'eau

L'analyse des relations entre la qualité de l'eau et le territoire de même que le développement des modèles prédictifs ont été réalisés à partir de 69 bassins versants indépendants, c'est-à-dire non imbriqués les uns dans les autres (figure 1). La sélection des bassins a été faite en fonction de leur localisation, de leur superficie, de la disponibilité des données et de la qualité de l'eau calculée selon l'[IQBP₆](#) pour la période de 2009 à 2012. Les bassins versants sélectionnés présentent un fort gradient en ce qui concerne leur superficie (figure 2) et leur qualité d'eau (figure 3). Le choix a été restreint à des bassins dont la superficie est supérieure à 78 km² en raison de l'influence de la taille du bassin versant sur les liens entre les caractéristiques du territoire et la qualité de l'eau (Detenbeck *et al.*, 2004; Hunsaker et Levine, 1995). De plus, les bassins versants dont la station de qualité d'eau était située en aval d'un lac n'ont pas été retenus en raison notamment des processus de rétention du phosphore qui dépendent du temps de séjour de l'eau dans le lac, variable qui n'a pas été prise en compte dans la présente étude. Les bassins versants sélectionnés présentent des superficies variant de 79 à 5 736 km² (figure 2 et annexe 1a) et une qualité d'eau aux stations de mesure variant de bonne à très mauvaise (figure 3 et annexes 1a et 1b). Hormis les Laurentides centrales, les différentes provinces naturelles² sont également bien représentées dans les bassins versants sélectionnés (figure 1).

² Voir le Cadre écologique de référence du Québec (CER).

Superficie (km²)	Fréquence (%)
≤ 250	28
251-500	29
501-1000	13
1001-1500	7
1501-2000	9
2001-2500	6
> 2500	9

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

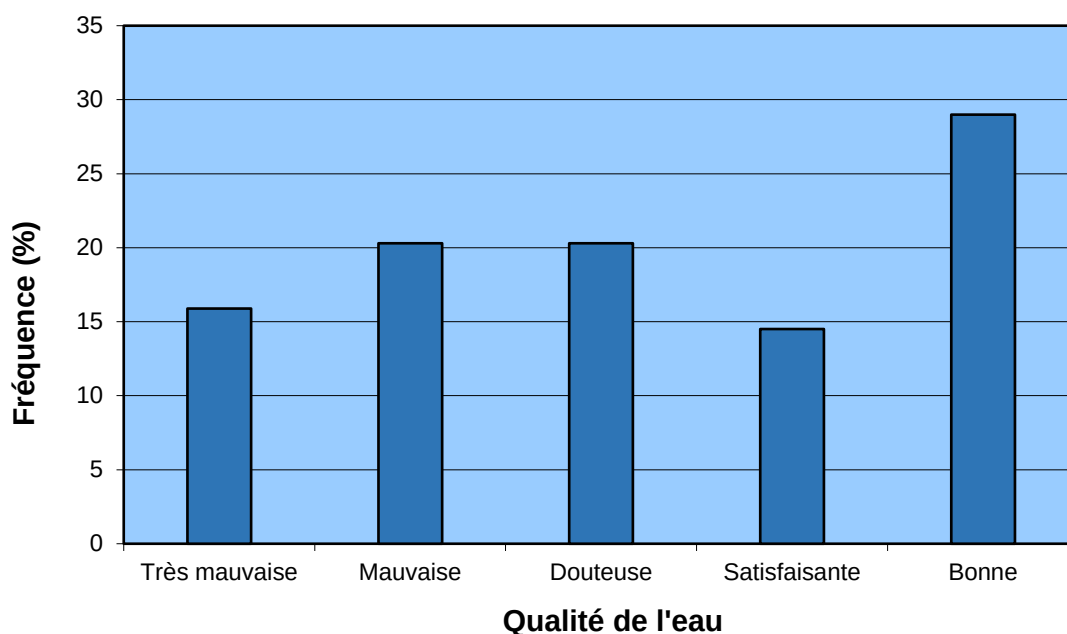


FIGURE 3 QUALITÉ DE L'EAU (IQBP₆) DES 69 BASSINS VERSANTS SÉLECTIONNÉS POUR LA MODÉLISATION, PÉRIODE 2009-2012

Le bassin versant de chacune des stations de qualité de l'eau a été délimité à l'aide des algorithmes proposés par Jenson et Domingue (1988) et implémentés dans le logiciel ArcGIS. Le modèle numérique d'élévation ayant servi de donnée de base à ces algorithmes a été produit par interpolation des données hypsométriques à l'échelle de 1/20 000 de la Base de données topographiques du Québec à l'aide de la fonction Topo to Raster d'ArcGIS. Le modèle a été hydrologiquement ajusté à un filamenteux d'écoulement orienté³ au sein de cette routine.

Les valeurs médianes des concentrations mesurées sur une période de huit mois, entre avril et novembre inclusivement, à l'aval de chaque bassin versant ont été calculées pour la période de 2009 à 2012 (annexe 1b) à partir des données recueillies dans le cadre du Réseau-rivières (MDDELCC, 2015b).

³ Voir le Cadre de référence hydrologique du Québec (MDDELCC, 2011).

Compilation des données sur le territoire

Au total, 58 variables décrivant le territoire ont été compilées pour les bassins versants des 69 stations de qualité de l'eau (tableau 1).

Bassin versant

Le bassin de chacune des stations de qualité de l'eau a été délimité à l'aide des modèles matriciels d'écoulement de surface (D8 et accumulation). L'aire totale et celle de la partie terrestre du bassin versant ont été calculées. La partie occupée par de l'eau a été déterminée à partir des données hydrographiques de la Base de données topographiques du Québec.

Relief et position

Le relief du bassin versant est représenté par sa pente moyenne. L'altitude moyenne du bassin versant a été considérée comme une variable exprimant la position géographique des bassins versants. Les données hypsographiques utilisées pour le calcul de ces valeurs sont celles de la Base de données topographiques du Québec.

Population

Les données sur la population ont été calculées à partir de la localisation des Immeubles 2012 produite par le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT). La population a été quantifiée par des mesures de densité, le nombre total d'habitants par km² dans le bassin versant ayant été estimé à l'aide d'un taux moyen d'occupation de 2,2 personnes/résidence. D'autres variables ont aussi servi à représenter l'influence de la population sur la qualité de l'eau. En plus des rejets urbains (voir section plus loin), la classe « ant » (milieux anthropiques) de la cartographie de l'occupation des sols (voir section plus loin) représente les milieux urbanisés. Finalement, la densité du réseau routier pavé constitue également une variable représentant la présence humaine sur le territoire.

Charges en provenance des stations d'épuration et des papetières

Quatre variables ont servi à représenter plus spécifiquement l'impact des rejets des stations d'épuration des eaux usées municipales. Les charges moyennes annuelles ainsi que les charges moyennes sur une période de huit mois (d'avril à novembre) de phosphore et de matières en suspension (MES) ont été calculées pour la période de 2009 à 2012 à l'aide des données du Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (MAMOT, 2013). Les méthodes de calcul pour le phosphore sont présentées à l'annexe 2. Les charges des réseaux d'égout sans traitement des eaux usées ont été calculées en considérant la population raccordée et un apport annuel de 0,73 kg de phosphore par personne (Bernier, 2001). Les charges en provenance des résidences isolées n'ont pas été prises en considération en raison de la non-disponibilité de ces données. Les charges moyennes annuelles et les charges moyennes sur une période de huit mois de phosphore et de MES en provenance des papetières ont été calculées pour la période de 2009 à 2012 à l'aide des données du PRRI, en tenant compte du nombre de jours de production de chaque papetière (Bégin, 2013).

TABLEAU 1 VARIABLES PRISES EN CONSIDÉRATION DANS LE DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES PRÉDICTIFS

Variable	Description
abv_km2	Aire du bassin versant (km ²)
catch_cum_aire	Aire drainée terrestre (km ²)
ratio_d	Ratio de drainage (aire terrestre/aire en eau)
penste	Pente moyenne de l'aire terrestre du bassin versant (%)
alt_moy	Altitude moyenne du bassin versant (m)
dep_AFFROC	Affleurements rocheux (%)
dep_AFM	Dépôts alluvionnaires fluviomarins (%)
dep_ALD	Dépôts alluvionnaires glaciodeltaïques (%)
dep_ALF	Dépôts alluvionnaires fluviaux (%)
dep_ALT	Dépôts d'altérations (%)
dep_COV	Dépôts de colluvions (%)
dep_EOL	Dépôts éoliens (%)
dep_FGJ	Dépôts fluvioglaciaires juxtaglaciaires (%)
dep_FGP	Dépôts fluvioglaciaires proglaciaires (%)
dep_GLA	Dépôts glaciolacustres argileux (%)
dep_GLS	Dépôts glaciolacustres sableux (%)
dep_GMA	Dépôts glaciomarins argileux (%)
dep_GMS	Dépôts glaciomarins sableux (%)
dep_LIT	Dépôts littoraux (%)
dep_ORG	Dépôts organiques (%)
dep_TILL	Dépôts glaciaires - till (%)
drn_0	Drainage excessif (%)
drn_1	Drainage rapide (%)
drn_2	Drainage bon (%)
drn_3	Drainage modéré (%)
drn_4	Drainage imparfait (%)
drn_5	Drainage mauvais (%)
drn_6	Drainage très mauvais (%)
DensiteRH	Densité (km/km ²) du réseau hydrographique
DensiteRL	Densité (km/km ²) des rives de lac
DensiteRR_P	Densité (km/km ²) du réseau routier pavé
ant	Anthropique (%)
eau	Eau (%)
foret	Forêt (%)
cpr	Coupes et régénérations (%)
mar	Marais et marécages (%)
tou	Tourbières (%)
Humide	Marais, marécages et tourbières (%)
cfo	Fourrage (%)
cgi	Cultures à grand interligne (%)
cin	Cultures indifférenciées (%)
cpi	Cultures à interligne étroit (%)
cau	Autres cultures (%)
Annuel	Cultures à grand interligne + cultures à interligne étroit (%)
Culturetotal	Total des cultures (%)
chargeAmas	Charge estimée de P (kg) des ouvrages de stockage de déjection non étanches/superficie en amont (km ²)
RPA	Ratio poids animal (équivalent au nombre d'unités animales de 500 kg)/superficie en amont (km ²)
Cheptel	Charge estimée de P (kg) des cheptels/superficie en amont (km ²)
chargeDispo	Charge de P (kg) disponible pour l'épandage par hectares déclarés
sat_sol_P	Saturation des sols (%) pondérée par les superficies déclarées (P/AI, méthode Mehlich-III)
Pop_tot_2012	Population en 2012/superficie en amont (km ²)
STEPSP12	Charge moyenne de P (kg/an) calculée sur 12 mois de 2009 à 2012 des émissaires municipaux en amont/superficie en amont (km ²)
STEPSP8	Charge moyenne de P (kg/an) calculée sur 8 mois de 2009 à 2012 des émissaires municipaux en amont/superficie en amont (km ²)
STEPSPMES12	Charge moyenne de MES (kg/an) calculée sur 12 mois de 2009 à 2012 des émissaires municipaux en amont/superficie en amont (km ²)
STEPSPMES8	Charge moyenne de MES (kg/an) calculée sur 8 mois de 2009 à 2012 des émissaires municipaux en amont/superficie en amont (km ²)
PAPP12	Charge moyenne de P (kg/an) calculée sur 12 mois de 2009 à 2012 des papetières en amont/superficie en amont (km ²)
PAPP8	Charge moyenne de P (kg/an) calculée sur 8 mois de 2009 à 2012 des papetières en amont/superficie en amont (km ²)
PAPMES12	Charge moyenne de MES (kg) calculée sur 12 mois de 2009 à 2012 des papetières en amont/superficie en amont (km ²)
PAPMES8	Charge moyenne de MES (kg) calculée sur 8 mois de 2009 à 2012 des papetières en amont/superficie en amont (km ²)

Occupation du sol

La cartographie des données sur l'occupation du sol intègre de multiples couches d'information provenant de sources diverses. Cette cartographie, produite par le Ministère⁴ sur une matrice de 30 m sur 30 m, utilise pour chaque classe d'occupation du sol (milieux agricoles, milieux forestiers et arbustives, milieux humides, milieux aquatiques, milieux anthropiques, coupes et régénérations, sols nus et landes) la source de données la plus pertinente. L'intégration des différentes couches ou thématiques a été réalisée selon l'ordre suivant : les milieux humides, les milieux forestiers, les cultures et les plans d'eau. Les dernières couches introduites dans le processus d'intégration avaient priorité sur les couches précédentes. Les sources des données de cette compilation sont présentées à l'annexe 3.

Pressions liées à la production animale

Cinq variables ont été utilisées pour décrire les pressions provenant des activités d'élevage : les unités animales, la charge de phosphore générée par les animaux d'élevage, la charge de phosphore entreposée à même le sol, la charge de phosphore disponible pour l'épandage et la saturation des sols en phosphore. Chacune des variables fait appel à des sources de données disponibles dans le Système d'aide à la gestion des opérations (SAGO) et du système de données associé aux indicateurs de suivi du secteur agricole (POA) du Ministère. Ces variables peuvent être présentées selon deux grandes catégories : les variables génériques associées à la présence des activités d'élevage et les variables associées à des activités agricoles spécifiques. Le détail du calcul des variables liées à la production animale est présenté à l'annexe 4.

Géologie

Les informations sur la nature du socle rocheux proviennent de l'édition 2012 de la carte géologique du Québec (MRN, 2012) du Système d'information géomineière du Québec (SIGÉOM). Cette cartographie présente les formations rocheuses à l'échelle de 1/2 000 000. Un regroupement des formations a été effectué sur la base du type de roche dominant de chacune des formations, à l'exception des roches carbonatées. Une formation était classée parmi les roches carbonatées dès que de telles roches étaient présentes dans cette formation. Les types de roches pris en considération sont présentés au tableau 2.

TABLEAU 2 TYPES DE ROCHES ATTRIBUÉS AUX FORMATIONS ROCHEUSES

Groupe	Description
1	Roches acides du type granitique ou gneissique
2	Paragneiss
3	Roches mafiques et ultramafiques
4	Roches clastiques siliceuses
5	Roches clastiques argileuses
6	Roches carbonatées
7	Autres roches (ex. : impactites, formations de fer)

⁴ Pour une description complète de la méthodologie, se référer à MDDELCC (2016a)

Hydrologie

Le ratio de drainage, qui correspond au rapport de la surface terrestre sur la surface mouillée du bassin versant, a été calculé. La densité du réseau hydrographique a été calculée à partir du filaire complet du Cadre de référence hydrologique du Québec en divisant la longueur totale du réseau hydrographique, y compris les lacs, par la superficie du bassin versant. La densité des rives de lac a été calculée de la même façon.

Caractéristiques édaphiques

Les dépôts de surface et le drainage des sols proviennent de deux sources de données spatialement complémentaires, soit la carte écoforestière (SIEF)⁵ et la compilation cartographique d'études pédologiques⁶. Les données provenant de la compilation d'études pédologiques ont été priorisées pour les secteurs agricoles, alors que pour les portions forestières, ce sont les données de la carte écoforestière qui l'ont été.

Développement et validation des modèles prédictifs

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel SigmaPlot v. 12.0. Les variables dépendantes et certaines variables indépendantes qui présentaient une plage de variation trop grande ont subi une transformation logarithmique (ln). Les relations entre les variables dépendantes (qualité de l'eau) et les variables indépendantes (utilisation et caractéristiques du territoire) de même que les relations entre les variables indépendantes ont été étudiées par l'analyse des coefficients de corrélation de Spearman. Pour chaque variable dépendante, la modélisation a été effectuée à l'aide de la régression multiple pas à pas (*Forward Stepwise Regression* selon SigmaPlot) avec un niveau de probabilité de 10 % pour l'entrée et de 5 % pour la sortie des variables du modèle. Pour chaque modèle développé, la normalité des résidus a été évaluée à l'aide du test de Wilk-Shapiro, l'autocorrélation à l'aide du test de Durbin-Watson et l'homogénéité de la variance par l'examen des résidus en fonction des valeurs prédites. Tous les tests ont été réalisés à un niveau de probabilité de 5 %. La multicolinéarité entre les variables indépendantes a été vérifiée à l'aide du facteur d'inflation de la variance (VIF). Dans tous les modèles développés, les résidus ne présentant pas d'autocorrélation, les coefficients de régression ont été estimés à l'aide de la méthode des moindres carrés.

Pour chaque variable dépendante, l'examen des résultats de l'analyse de corrélation a permis de sélectionner les variables indépendantes de départ pour la régression multiple pas à pas. Lorsque deux variables indépendantes trop fortement corrélées entre elles ($r_{\text{Spearman}} \geq 0,8$) étaient retenues dans le modèle, celle qui présentait la plus faible corrélation avec la variable dépendante était éliminée du traitement et la procédure était exécutée de nouveau (Scherrer, 1984). Une variable indépendante dont le coefficient dans l'équation ne présentait pas le même signe que le coefficient de corrélation de Spearman était également retirée du modèle.

Les modèles ont été validés à l'aide de 25 stations n'ayant pas servi à leur développement et présentant une superficie drainée variant de 132 à 6 607 km² et une qualité d'eau variant de bonne à mauvaise (figures 4 et 5 et annexes 5a et 5b). Plusieurs modèles ayant été développés pour chaque variable dépendante, la sélection du modèle optimal a été faite à la suite de l'examen du pourcentage de la variance expliquée, du pourcentage du biais entre les valeurs mesurées et prédites (PBIAS), de la

⁵ SIEF, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

⁶ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

statistique de Nash-Sutcliffe (NSE), ainsi que du coefficient de détermination, de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression entre les valeurs prédites et mesurées (Moriasi *et al.*, 2007).

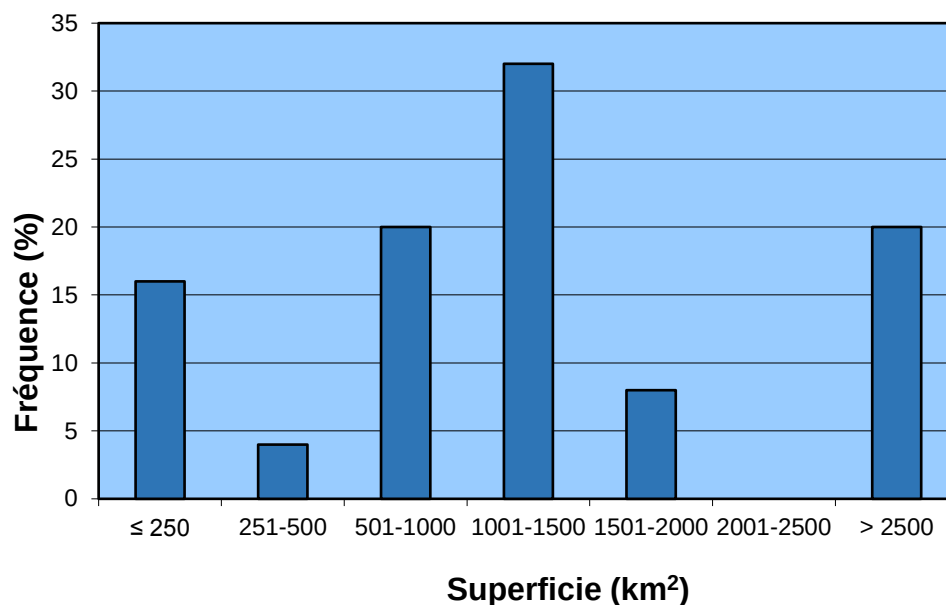


FIGURE 4 SUPERFICIE DES 25 BASSINS VERSANTS UTILISÉS POUR LA VALIDATION

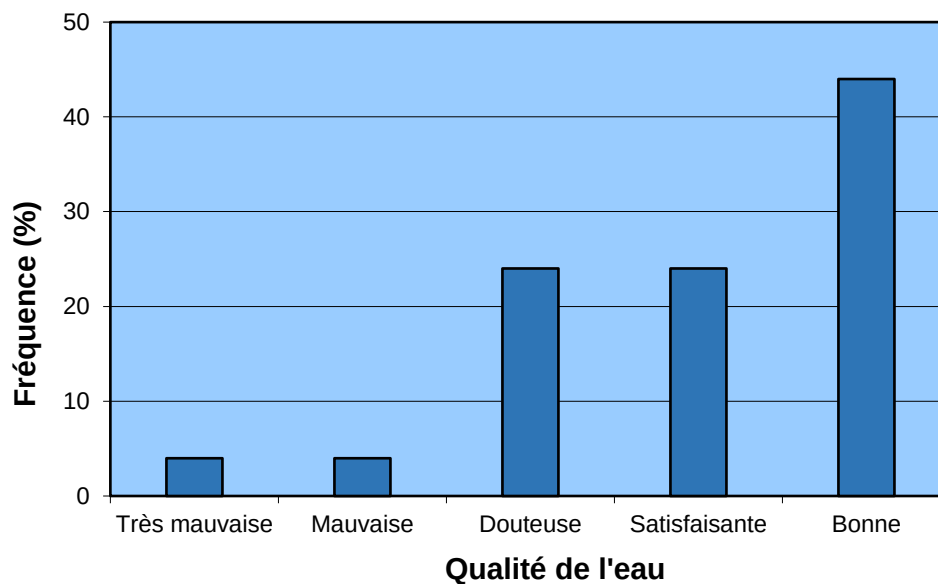


FIGURE 5 QUALITÉ DE L'EAU (IQBP₆) DES 25 BASSINS VERSANTS UTILISÉS POUR LA VALIDATION, PÉRIODE 2009-2012

Résultats et discussion

Phosphore total

À la suite d'un diagnostic d'influence (effet de chacune des stations sur le modèle de régression multiple), la station localisée à l'embouchure de la rivière Bonaventure (01080001) a été retirée de la procédure parce qu'elle présentait une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. Cette rivière est la seule située en Gaspésie et la seule ayant une concentration médiane en phosphore inférieure à 0,002 mg/l. Les concentrations médianes de phosphore total aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,005 et 0,160 mg/l. Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas et exclusion de variables pour cause de colinéarité ou en raison d'un coefficient dans l'équation présentant un signe contraire au coefficient de corrélation, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN}(\text{PTOT}) = -4,846 + 0,0203(\text{ANNUEL}) + 0,131 \text{ LN}(\text{CHEPTEL} + 1) + 0,236 \text{ LN}(\text{STEPSP8} + 1) \\ + 0,0124(\text{DEPGMA}) + 0,00837(\text{DEPGMS})$$

ANNUEL :	Cultures annuelles (cultures à grand interligne + cultures à interligne étroit (%))
CHEPTEL :	Charge de P (kg) du cheptel/superficie en amont (km ²)
STEPSP8 :	Charge moyenne de P (kg/an) calculée sur huit mois de 2009 à 2012 des émissaires municipaux en amont/superficie en amont (km ²)
DEPGMA :	Dépôts glaciomarins argileux (%)
DEPGMS :	Dépôts glaciomarins sableux (%)

$$R^2_{\text{ajus}} = 0,84$$

	Coefficient	Erreur Std.	t	P	VIF
Constante	-4,846	0,128	-37,813	< 0,001	
DEPGMA	0,0124	0,00417	2,966	0,004	1,739
DEPGMS	0,00837	0,00338	2,478	0,016	1,320
ANNUEL	0,0203	0,00337	6,021	< 0,001	2,328
LN(STEPSP8 + 1)	0,236	0,0630	3,741	< 0,001	1,278
LN(CHEPTEL + 1)	0,131	0,0353	3,710	< 0,001	2,561

Analyse de variance :

	DL	SS	MS	F	P
Régression	5	49,221	9,844	73,189	< 0,001
Résidus	62	8,339	0,135		
Total	67	57,560	0,859		

Statistique de Durbin-Watson :	1,633
Test de normalité (Shapiro-Wilk) :	P = 0,025
Test de constance de la variance :	P = 0,376

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur variance est constante et leur distribution s'éloigne légèrement de la normalité tout en demeurant acceptable. Les facteurs d'inflation de la variance indiquent que les variables ne présentent pas de colinéarité problématique (VIF < 4,0). Le modèle développé

explique 84 % de la variance observée dans les concentrations médianes en phosphore (ln). La procédure de régression multiple pas à pas a été reprise avec les seules variables retenues par le modèle. La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage de la superficie en amont consacré aux cultures annuelles (ANNUEL). Si l'on ne tenait compte que de cette variable, le pourcentage de la variance expliquée serait de 65 %. En prenant aussi en considération les charges de phosphore en provenance du cheptel en amont (ln CHEPTTEL), le pourcentage de la variance expliquée atteint 79 %. L'ajout de la charge de phosphore provenant des stations d'épuration localisées en amont (ln STEPSP8) permet d'expliquer un 2 % supplémentaire de la variance. Enfin, l'ajout du pourcentage de la superficie en amont recouvert de dépôts glaciomarins argileux (DEPGMA) et du pourcentage de la superficie en amont recouvert de dépôts glaciomarins sableux (DEPGMS), contribue à expliquer encore 3 % de plus de la variance.

Le modèle a été validé sur 25 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 6). La plage des concentrations médianes observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,005 et 0,088 mg/l. Les concentrations médianes prédites et mesurées présentent une très forte corrélation ($R^2 = 0,91$), la pente de la droite est voisine de 1 (1,065) et l'ordonnée à l'origine près de 0 (0,003). Le modèle présente un biais entre les valeurs observées et les valeurs prédites (PBIAS) de -17 %. Le modèle retenu a donc tendance à surestimer de 17 % en moyenne les concentrations médianes de phosphore total. Cette surestimation pourrait être liée au fait que la présence de lacs en amont n'a pu être prise en considération dans le développement du modèle, alors que l'on sait que les lacs peuvent constituer un piège à phosphore. Selon Moriasi *et al.* (2007), un modèle développé pour l'azote ou le phosphore dont le PBIAS est inférieur à 25 % présente une très bonne performance.

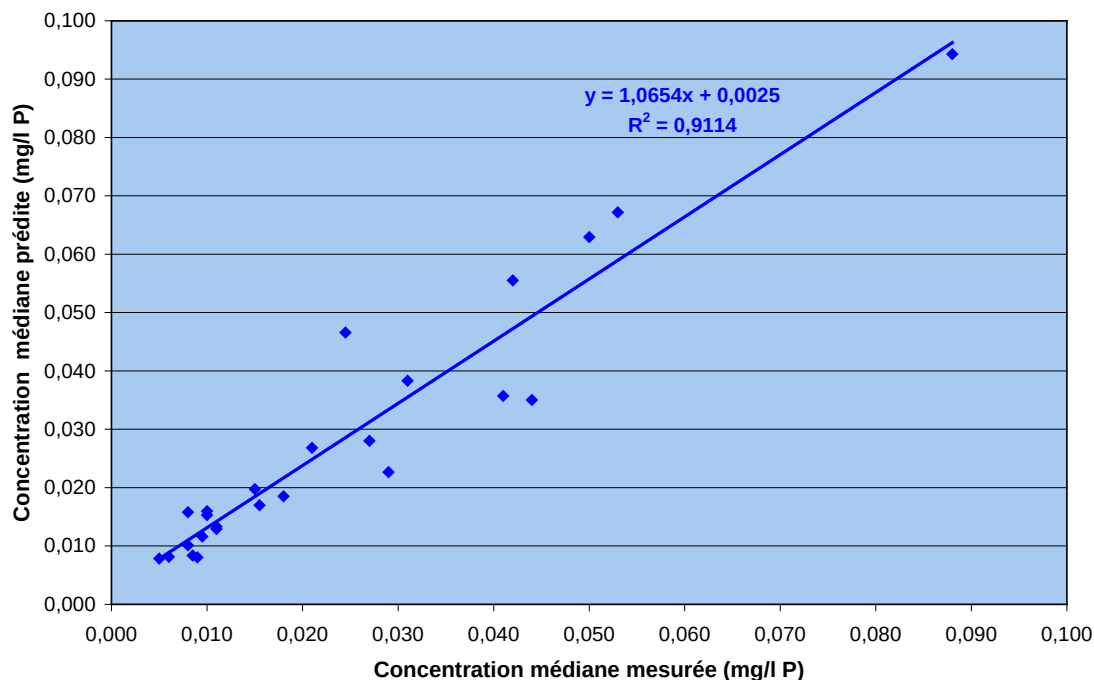


FIGURE 6 RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE PHOSPHORE PRÉDITES ET LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE PHOSPHORE MESURÉES POUR LA PÉRIODE DE 2009 À 2012

Azote total

Pour la modélisation de l'azote total, les stations à l'embouchure de la rivière la Chaloupe et de la Petite rivière Yamachiche (stations 05230001 et 05290001) n'ont pas été prises en considération en raison de la présence en amont de sources ponctuelles importantes d'azote non documentées. Les concentrations médianes d'azote total aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,17 et 4,00 mg/l. Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas et exclusion de variables pour cause de colinéarité ou en raison d'un coefficient dans l'équation présentant un signe contraire au coefficient de corrélation, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN}(\text{NTOT}) = -1,650 + 0,0221(\text{CULTURETOTAL}) + 0,104 \text{LN}(\text{CHEPTEL} + 1) + 0,265(\text{DENSITERRP}) + 0,0814(\text{DEPALD})$$

CULTURETOTAL :	Total des cultures (%)
CHEPTEL :	Charge de P (kg) du cheptel en amont/superficie en amont (km ²)
DENSITERRP :	Densité (km/km ²) du réseau routier pavé
DEPALD :	Dépôts alluvionnaires deltaïques marins (%)

$$R^2_{\text{ajus}} = 0,93$$

	Coefficient	Erreur Std.	t	P	VIF
Constante	-1,650	0,0822	-20,069	< 0,001	
DEPALD	0,0814	0,0253	3,224	0,002	1,058
CULTURETOTAL	0,0221	0,00186	11,872	< 0,001	2,793
DENSITERRP	0,265	0,0521	5,084	< 0,001	1,248
LN(CHEPTEL + 1)	0,104	0,0230	4,514	< 0,001	2,683

Analyse de variance :

	DL	SS	MS	F	P
Régression	4	49,152	12,288	212,064	<0,001
Résidus	62	3,593	0,0579		
Total	66	52,744	0,799		

Statistique de Durbin-Watson :	2,178
Test de normalité (Shapiro-Wilk) :	P = 0,382
Test de constance de la variance :	P = 0,937

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance est constante. Les variables ne présentent pas de colinéarité problématique (VIF < 4,0). Le modèle développé explique près de 93 % de la variance observée dans les concentrations médianes en azote total (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage de la superficie en amont consacré aux cultures (CULTURETOTAL). Si l'on ne tenait compte que de cette variable, le pourcentage de la variance expliquée serait de 85 %. En prenant aussi en considération le cheptel en amont (ln CHEPTEL), le pourcentage de la variance expliquée atteint 89 %. L'ajout de la densité du réseau routier pavé (DENSITERRP) permet d'expliquer encore 3 % de plus de la variance. Cette variable représente l'occupation humaine et les zones urbanisées et elle est fortement corrélée avec la densité de population en amont ($r_{\text{spearman}} = 0,90$). Enfin, l'ajout de la variable liée aux caractéristiques du territoire, soit le

pourcentage de la superficie en amont recouvert de dépôts alluvionnaires deltaïques marins (DEPALD), contribue à expliquer 1 % de plus de la variance.

Le modèle a été validé sur 25 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 7). La plage des concentrations médianes observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,17 et 2,2 mg/l. Les concentrations médianes prédites et mesurées présentent une très forte corrélation ($R^2 = 0,93$), la pente de la droite est voisine de 1 (0,88) et l'ordonnée à l'origine près de 0 (0,05). Le modèle présente un biais entre les valeurs observées et les valeurs prédites (PBIAS) de +2 %. Le modèle retenu a donc tendance à sous-estimer de 2 % en moyenne les concentrations médianes d'azote total, la sous-estimation étant toutefois plus marquée dans les fortes concentrations ($> 0,75$ mg/l). Selon Moriasi *et al.* (2007), un modèle développé pour l'azote ou le phosphore dont le PBIAS est inférieur à 25 % présente une très bonne performance. Le point indiqué par une flèche correspond à une station localisée sur la rivière du Nord, à environ 7 km en aval de la municipalité de Saint-Jérôme. Dans ce cas particulier, la concentration médiane prédite (0,40 mg/l) est grandement inférieure à la concentration médiane observée (0,92 mg/l), la densité du réseau routier pavé ne semblant pas être un bon estimateur de la pression liée à la présence humaine en amont.

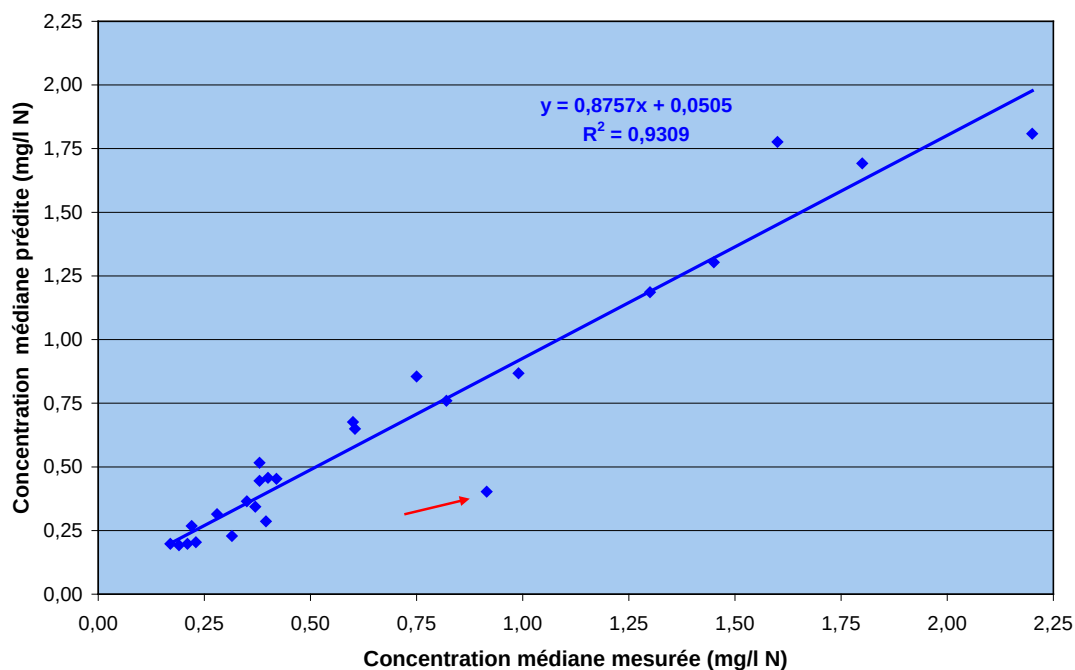


FIGURE 7 RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS MÉDIANES D'AZOTE PRÉDITES ET LES CONCENTRATIONS MÉDIANES D'AZOTE MESURÉES POUR LA PÉRIODE DE 2009 À 2012

Nitrites et nitrates

Pour la modélisation des nitrites et nitrates, les stations à l'embouchure de la rivière la Chaloupe et de la Petite rivière Yamachiche (stations 05230001 et 05290001) n'ont pas été prises en considération en raison de la présence en amont de sources ponctuelles importantes de nitrites et de nitrates non documentées. Les concentrations médianes de nitrites et nitrates aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,03 et 3,45 mg/l. Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas et l'exclusion de variables pour cause de colinéarité ou en raison d'un coefficient dans l'équation présentant un signe contraire au coefficient de corrélation, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN}(\text{NOX}) = -2,673 + 0,0198(\text{CULTURETOTAL}) + 0,224 \text{ LN}(\text{CHEPTEL} + 1) + 0,301(\text{DENSITERRP}) + 0,0158(\text{DEPGMS}) - 0,0649(\text{HUMIDE})$$

CULTURETOTAL :	Total des cultures (%)
CHEPTEL :	Charge de P (kg) du cheptel en amont/superficie en amont (km ²)
DENSITERRP :	Densité (km/km ²) du réseau routier pavé
DEPGMS :	Dépôts glaciomarins sableux (%)
HUMIDE :	Marais, marécages et tourbières (%)

$$R^2_{\text{ajus}} = 0,88$$

	Coefficient	Erreur Std.	t	P	VIF
Constante	-2,673	0,163	-16,366	< 0,001	
DEPGMS	0,0158	0,00495	3,186	0,002	2,064
CULTURETOTAL	0,0198	0,00332	5,969	< 0,001	2,761
HUMIDE	-0,0649	0,0159	-4,081	< 0,001	1,725
DENSITERRP	0,301	0,0945	3,180	0,002	1,283
LN(CHEPTEL + 1)	0,224	0,0424	5,270	< 0,001	2,846

Analyse de variance :

	DL	SS	MS	F	P
Régression	5	89,269	17,854	96,239	< 0,001
Résidus	61	11,317	0,186		
Total	66	100,586	1,524		

Statistique de Durbin-Watson :	2,230
Test de normalité (Shapiro-Wilk) :	P = 0,022
Test de constance de la variance :	P = 0,245

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur variance est constante et leur distribution s'éloigne légèrement de la normalité tout en demeurant acceptable. Les variables ne présentent pas de colinéarité problématique (VIF < 4,0). Le modèle développé explique 88 % de la variance observée dans les concentrations médianes en nitrites et nitrates (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage de la superficie en amont consacré aux cultures (CULTURETOTAL). À elle seule, cette variable explique 75 % de la variance. En ajoutant le cheptel en amont (ln CHEPTEL), le pourcentage de la variance expliquée atteint 82 %. La densité du réseau routier pavé (DENSITERRP) contribue quant à elle à expliquer 3 % de plus de la variance. L'ajout du pourcentage de la superficie en amont recouvert de dépôts glaciomarins sableux (DEPGMS) et du pourcentage de la superficie en amont occupé par les milieux

humides (HUMIDE) contribue à expliquer chacun 1 % de plus de la variance. Les nitrites et nitrates sont légèrement corrélés avec les superficies en milieux humides ($r_{\text{spearman}} = -0,20$; $P = 0,10$) et plus fortement corrélés avec les superficies en marais ($r_{\text{spearman}} = -0,38$; $P = 0,001$). Ces corrélations négatives indiquent que ces milieux tendent à piéger les nitrites et nitrates.

Le modèle a été validé sur 25 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 8). La plage des concentrations médianes observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,03 et 1,5 mg/l. Les concentrations médianes prédites et mesurées présentent une très forte corrélation ($R^2 = 0,95$), la pente de la droite est voisine de 1 (0,92) et l'ordonnée à l'origine près de 0 (0,01). Le modèle présente un biais entre les valeurs observées et les valeurs prédites (PBIAS) de +5,5 %. Le modèle retenu a donc tendance à sous-estimer de 5,5 % en moyenne les concentrations médianes de nitrites et nitrates. Selon Moriasi *et al.* (2007), un modèle développé pour l'azote ou le phosphore dont le PBIAS est inférieur à 25 % présente une très bonne performance.

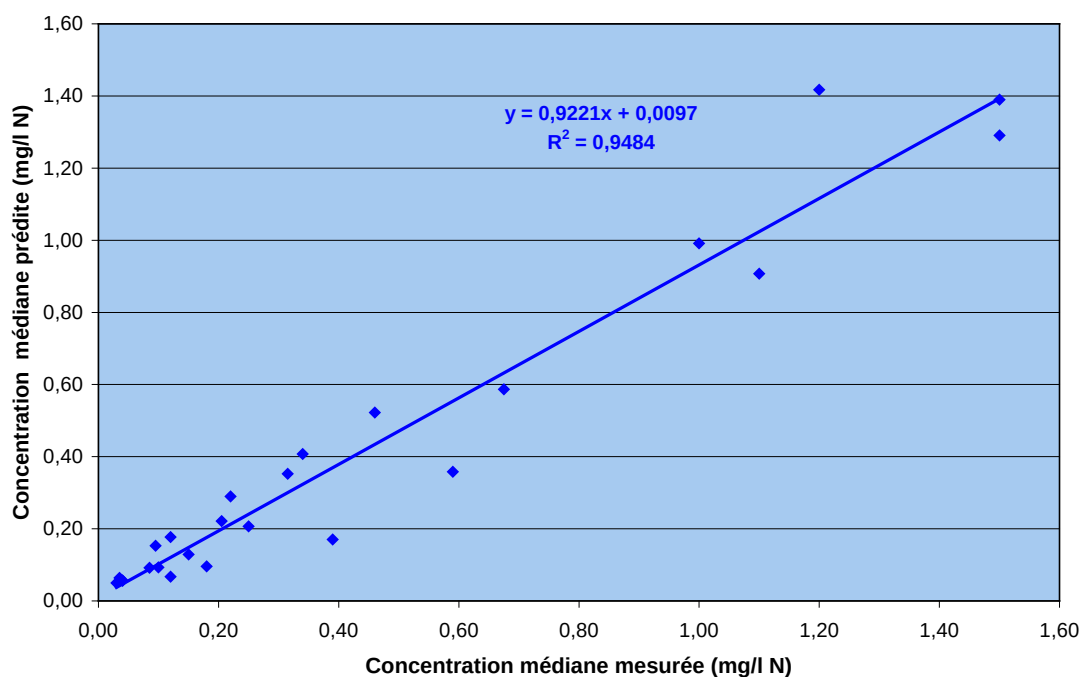


FIGURE 8 RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE NITRITES ET NITRATES PRÉDITES ET LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE NITRITES ET NITRATES MESURÉES POUR LA PÉRIODE DE 2009 À 2012

Carbone organique dissous

À la suite d'un diagnostic d'influence, la station localisée à l'embouchure de la rivière Bonaventure (01080001) a été retirée de la procédure parce qu'elle présentait une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. Cette rivière est la seule située en Gaspésie et la seule ayant une concentration médiane en carbone organique dissous de 1,1 mg/l, toutes les autres rivières présentant une concentration médiane supérieure à 2,7 mg/l. Les concentrations médianes de carbone organique dissous aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 2,7 et 15,0 mg/l. Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas et l'exclusion de variables pour cause de colinéarité ou en raison d'un coefficient dans l'équation présentant un signe contraire au coefficient de corrélation, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN}(\text{COD}) = 1,583 + 0,0211(\text{DEPORG}) - 0,0166(\text{PENTE}) + 0,0317(\text{HUMIDE}) + 0,00798(\text{RATIOD})$$

DEPORG:	Dépôts organiques (%)
PENTE :	Pente moyenne de l'aire terrestre du bassin versant (%)
HUMIDE :	Marais, marécages et tourbières (%)
RATIOD:	Ratio de drainage (aire terrestre/aire en eau)

$$R^2_{\text{ajus}} = 0,71$$

	Coefficient	Erreur Std.	t	P	VIF
Constante	1,583	0,101	15,620	< 0,001	
PENTE	-0,0166	0,00537	-3,091	0,003	1,977
DEPORG	0,0211	0,00886	2,377	0,021	2,232
HUMIDE	0,0317	0,00715	4,433	< 0,001	1,811
RATIOD	0,00798	0,00384	2,080	0,042	2,074

Analyse de variance :

	DL	SS	MS	F	P
Régression	4	6,212	1,553	42,584	< 0,001
Résidus	63	2,298	0,0365		
Total	67	8,509	0,127		

Statistique de Durbin-Watson :	1,676
Test de normalité (Shapiro-Wilk) :	P = 0,017
Test de constance de la Variance :	P = 0,492

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur variance est constante et leur distribution s'éloigne légèrement de la normalité tout en demeurant acceptable. Les variables ne présentent pas de colinéarité problématique (VIF < 4,0). Le modèle développé explique 71 % de la variance observée dans les concentrations médianes de carbone organique dissous (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage de la superficie en amont recouvert de dépôts organiques (DEPORG). Cette variable explique à elle seule 50 % de la variance. En ajoutant la pente moyenne du bassin versant en amont (PENTE) au modèle, la variance expliquée augmente de 2 %. L'ajout du pourcentage de la superficie en amont couvert de milieux humides (HUMIDE) contribue à expliquer 8 % de plus de la variance. En ajoutant

une dernière variable au modèle, soit le ratio de drainage (RATIOD), le pourcentage de la variance expliquée grimpe encore de 1,5 %.

Le modèle a été validé sur 25 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 9). La plage des concentrations médianes observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 3,2 et 12 mg/l. Les concentrations médianes mesurées et prédites présentent une bonne corrélation ($R^2 = 0,80$), la pente de la droite est de 0,78 et l'ordonnée à l'origine de 1,16. Le modèle présente un biais entre les valeurs observées et les valeurs prédites (PBIAS) de +2,3 %. Le modèle retenu a donc tendance à sous-estimer de 2,3 % en moyenne les concentrations médianes de COD. Cependant, la station du bras d'Henri (indiquée par une flèche dans la figure 9) exerce une forte influence sur la droite de régression : si on la retire de l'analyse, le R^2 n'est plus que de 0,56. Ce modèle doit donc être utilisé avec précaution.

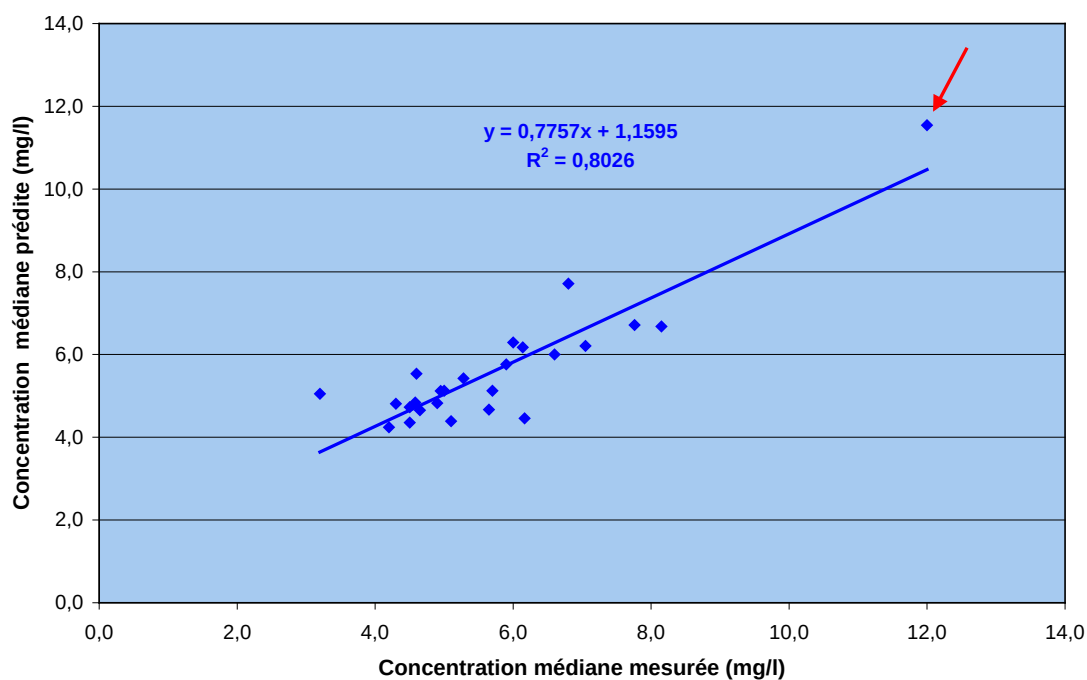


FIGURE 9 RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE COD PRÉDITES ET LES CONCENTRATIONS MÉDIANES DE COD MESURÉES POUR LA PÉRIODE DE 2009 À 2012

Autres variables

Nous avons tenté de développer des modèles prédictifs pour plusieurs autres paramètres de la qualité de l'eau, mais ils se sont avérés peu performants. Les coefficients de détermination (R^2) des modèles développés étaient relativement élevés (0,58 à 0,82), alors que les coefficients de détermination entre les concentrations médianes prédites et observées étaient très faibles (MES : $R^2 = 0,49$, turbidité : $R^2 = 0,46$, chlorophylle a : $R^2 = 0,63$, coliformes fécaux : $R^2 = 0,25$). Pour toutes ces variables, les modèles sous-estimaient les concentrations médianes observées d'un facteur variant de 45 à 66 % selon le paramètre. Les variables indépendantes retenues dans le modèle développé pour les coliformes fécaux ont été la densité du réseau routier pavé (proxy de la densité de population) et les charges de phosphore provenant du cheptel (proxy de la densité du cheptel). Dans le cas de la turbidité et des MES, les variables explicatives étaient les dépôts glaciolacustres argileux et sableux, les dépôts glaciomarins argileux, les superficies en cultures annuelles et les rejets annuels des stations d'épuration en MES. Pour la chlorophylle a , les variables retenues ont été les superficies totales en culture, les rejets en phosphore des stations d'épuration (d'avril à novembre), la densité du réseau routier pavé et les charges de phosphore provenant du cheptel. Le fait que certains de ces modèles présentent de bons R^2 lors de leur développement, mais qu'ils ne sont pas performants lors de leur validation indique que certaines variables ou certains processus importants n'ont pas été pris en considération. Dans le cas des coliformes fécaux, les résidences isolées de même que les rejets des stations d'épuration n'ont pu être comptabilisés, faute de données adéquates. Dans le cas de la turbidité et des MES, la vitesse d'écoulement des eaux, les caractéristiques de la bande riveraine et la stabilité des rives, variables particulièrement importantes liées aux processus d'érosion, n'ont pu être compilées. Dans le cas de la chlorophylle a , la transparence et la stabilité de la colonne d'eau, facteurs-clés de la production primaire en rivière, n'ont pas été prises en considération.

Conclusion

La méthode visant à identifier les bassins versants dégradés (c'est-à-dire les bassins versants présentant une concentration médiane en phosphore supérieure au critère de qualité pour protéger les plans d'eau contre l'eutrophisation) pourrait être bonifiée à la lumière des résultats obtenus. Les modèles prédictifs développés pourraient être utilisés pour estimer les concentrations médianes en phosphore dans les bassins ou sous-bassins versants ne faisant pas l'objet d'un suivi. Le domaine d'application des modèles est toutefois limité. Ces modèles peuvent être utilisés dans des bassins versants dont la superficie varie de 80 à 6 600 km². Le modèle développé pour le phosphore et le COD ne peut être utilisé dans les bassins versants de l'Abitibi et de la Gaspésie, car ces régions n'ont pu être prises en compte lors du développement des modèles. La présence de lacs immédiatement en amont ou de rejets qui n'ont pas été pris en considération lors du développement des modèles (industries autres que les papeteries, abattoirs, lieux d'enfouissement, etc.) pourrait également rendre hasardeuse l'application de certains modèles.

La prise en compte de facteurs modulants, telles la présence de lacs en amont, la distance hydrologique des différentes utilisations du territoire ainsi que la distance entre les différentes sources de pollution ponctuelles et l'exutoire du bassin versant où la qualité de l'eau est mesurée, pourrait améliorer le pouvoir prédictif de certains modèles. Les modèles développés pour le phosphore, l'azote et les nitrites et nitrates sont toutefois assez performants et robustes pour cibler les secteurs où des actions devraient être mises en place dans le but d'améliorer la qualité de l'eau de nos rivières. Un portrait de la qualité de l'eau d'une grande partie du réseau hydrographique du sud du Québec pourrait en effet être réalisé par le déploiement de ces modèles sur la plupart des cours d'eau du sud du Québec, dans le respect de leur domaine d'application. Dans un premier temps, cette cartographie permettrait de repérer les secteurs les plus problématiques et, dans un deuxième temps, elle servirait d'appui à la planification écologique des interventions à mener dans les bassins versants.

Bibliographie

BAKER, A. (2006). "Land Use and Water Quality", dans *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley & Sons, vol. 1, p. 16-188.

BÉGIN, C. (2013). Communication personnelle, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction des politiques en milieu terrestre, Division PRRI.

BERNIER, B. (2001). *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique*, Québec, Ministère de l'Environnement, Direction des politiques du secteur municipal, [En ligne]. [<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/index.htm>].

DETENBECK, N.E. C.M. ELONEN, D.L. TAYLOR, L. E. ANDERSON, T.M. JICHA et S.L. BATTERMAN (2004). "Region, Landscape, and Scale Effects on Lake Superior Tributary Water Quality", *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, vol. 40, n° 3, p. 705-720.

GANGBAZO, G. et F. BABIN (2000). « Pollution de l'eau des rivières dans les bassins agricoles », *Vecteur environnement*, vol. 33, n° 4, p. 47-57.

GANGBAZO, G., J. ROY et A. LE PAGE (2005). *Capacité de support des activités agricoles par les rivières : le cas du phosphore total*, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques en milieu terrestre, 28 p.

HUNSAKER, C.T. et D.A. LEVINE (1995). "Hierarchical Approaches to the Study of Water Quality in Rivers", *BioScience*, vol. 45, n° 3, p. 193-203.

JENSON, S. K. et J. O. DOMINGUE (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, n° 11, p. 1593-1600.

JOHNSON, G.D., W.L. MYERS et G.P. PATIL (2001). "Predictability of Surface Water Pollution Loading in Pennsylvania Using Watershed-based Landscape Measurements", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, p. 821-835.

JOHNSON, L. C. RICHARDS, G. HOST et J. ARTHUR (1997). "Landscape Influences on Water Chemistry in Midwestern Stream Ecosystems", *Freshwater Biology*, vol. 37, p. 193-208.

MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE (MAMOT) (2013). *Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux (SOMAE)*, Québec, Le Ministère, [En ligne]. [<http://www.mamrot.gouv.qc.ca/infrastructures/suivi-des-ouvrages-dassainissement/>].

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC) (2015a). *Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec*, Québec, Le Ministère, [En ligne]. [<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/index.htm>].

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC) (2016a). *Utilisation du territoire. Méthodologie et description de la couche d'information*

géographique, Québec, Direction de l'écologie et de la conservation et Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 36 p.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC) (2016b). [*Bilan de phosphore. Portrait des années 2011 à 2013*](#), Québec, Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique, 46 p.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (MDDEP) (2012). [*Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999-2008*](#), Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, 97 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (MRN) (2012). *Carte géologique du Québec – Édition 2012*, Québec, Direction de l'information géologique du Québec, DV 2012-06.

MORIASI, D.N. J.G. ARNOLD, M.W. VAN LIEW, R.L. BINGNER, R.D. HARMEL et T.L. VEITH, (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", *Transactions of the ASABE*, vol. 50, n° 3, p. 885-900.

SCHERRER, B. (1984). « La régression », dans *Biostatistique*, Québec, Gaëtan Morin, p. 623-726.

Bases de données

BDTQ – Base de données topographiques du Québec

Données topographiques numériques du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles couvrant la majorité du territoire québécois situé au sud du 52^e parallèle. Données vectorielles, 1/20 000.

BQMA – Banque de données sur la qualité du milieu aquatique

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC) (2015b). *Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA)*, Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement.

CRHQ – Cadre de référence hydrologique du Québec

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC) (2011). *Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) [Données numériques vectorielles]*, Québec, Direction de l'expertise en biodiversité, MDDELCC-DEB, 1/20 000.

Annexes

ANNEXE 1 CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION

ANNEXE 1A LOCALISATION DES STATIONS, SUPERFICIE DRAINÉE ET QUALITÉ DE L'EAU

NO STATION	DESCRIPTION	LATITUDE	LONGITUDE	SUPERFICIE (km ²)	IQBP ₆ (2009-2012)
1080001	BONAVENTURE AU PONT-ROUTE ROUTE-DE-LA-RIVIÈRE (8 KM EN AMONT DU PONT-ROUTE 132)	48,086762	-65,447414	2 130	96
1170022	CABANO AU PONT-ROUTE 232 À 4 KM AU NORD DE SAINT-EUSÈBE	47,578738	-68,921726	257	89
2200019	RIMOUSKI À 3,7 KM DE SON EMBOUCHURE À LA PASSERELLE PIÉTONNIÈRE (DYNAMO)	48,418718	-68,553893	1 597	92
2240005	VERTE 9,2 KM EN AMONT DE L'EMBOUCHURE, AU PONT DE LA ROUTE DU COTEAU-DES-ÉRABLES	47,961715	-69,321221	452	72
2250002	DU LOUP AU PONT DE LA ROUTE ENNIS AU SUD-OUEST DE SAINT-JOSEPH-DE-KAMOURASKA	47,582235	-69,669820	489	92
2260002	KAMOURASKA (AUX PERLES) AU PONT DE KAMOURASKA À 3,5 KM DE L'EMBOUCHURE	47,551593	-69,843413	291	63
2270002	OUELLE AU PONT DU CHEMIN DU SUD-DE-LA-RIVIÈRE, 1 KM EN AVAL DE L'AUT. 20	47,433426	-69,970858	810	81
2300001	BOYER AU PONT-ROUTE 281 AU SUD-EST DE SAINT-MICHEL	46,853963	-70,877966	204	9
2310004	DU SUD À LA PASSERELLE PIÉTONNIÈRE DU PONT DU C.N. À MONTMAGNY À 2 KM DE L'EMBOUCHURE	46,975045	-70,555714	1 270	81
2330010	ETCHEMIN AU PONT DU 8 ^e RANG AU SUD-EST DE SAINT-LUC	46,487764	-70,451672	99	89
2330049	LE BRAS AU PONT DU CHEMIN DU BORD DE L'EAU AU NORD-OUEST DE SAINT-HENRI	46,710170	-71,119263	226	15
2340014	CHAUDIÈRE AU PONT-ROUTE 171 À SCOTT, À L'OUEST DE LÎLE ATKINSON	46,503250	-71,072883	5 736	79
2340034	BEAURIVAGE AU PONT-ROUTE 171 À SAINT-ÉTIENNE-DE-LAUZON	46,651207	-71,300757	690	55
2360014	DU CHÊNE AU PONT DU CHEMIN DU VIEUX MOULIN À LECLERCVILLE	46,554662	-71,968882	794	39
2370002	PETITE DU CHÊNE AU PONT-ROUTE 265 À DESCHAILLONS	46,540975	-72,092083	383	70
2390001	GENTILLY AU PONT-ROUTE 132 À GENTILLY	46,382571	-72,336232	311	40
2400004	BÉCANCOUR AU PONT-ROUTE 132 À BÉCANCOUR	46,352680	-72,438806	2 580	81
3010008	NICOLET AU PONT-ROUTE 226 À SAINTE-MONIQUE	46,154213	-72,537659	1 668	60
3010009	NICOLET SUD-OUEST AU PONT-ROUTE 226 À LA VISITATION	46,129656	-72,595194	1 577	42
3010046	SAINT-ZÉPHIRIN AU PONT-ROUTE 226 À LA VISITATION-DE-YAMASKA	46,131070	-72,599049	79	13
3020040	SAINT-FRANÇOIS EN AMONT DE LA MASSAWIPPI AU PONT SAINT-FRANCIS À LENNOXVILLE	45,367781	-71,847025	4 251	83
3030003	NOIRE AU PONT-ROUTE 235 À SAINT-PIE	45,495667	-72,904091	1 499	17
3030031	YAMASKA SUD-EST À GUÉ LE LONG DU CHEMIN DU CURÉ-GODBOUT À L'EST DE FARNHAM, RIVE GAUCHE	45,270714	-72,922965	414	69
3030038	CHIBOUET AU PONT DU 2 ^e RANG À SAINT-HUGUES	45,789980	-72,853274	159	19
3030096	À LA BARBUE AU PONT DU RANG DE LA PRESQUÎLE PRÈS DE L'EMBOUCHURE AU SUD DE SAINT-DAMASE	45,481575	-72,980467	150	25
3030108	YAMASKA NORD AU PONT DE LA RUE PRINCIPALE À SAINT-ALPHONSE-DE-GRANBY	45,325078	-72,809809	263	24
3030199	YAMASKA AU PONT DU CHEMIN LANGEVIN EN AVAL D'ADAMSVILLE (BROMONT)	45,272729	-72,796218	437	54
3040007	DES HURONS AU PONT DU CHEMIN DE L'ARIVIÈRE-DES-HURONS OUEST À L'EST DE SAINT-MATHIAS	45,490770	-73,185790	313	0
3040071	RUISSEAU MORPIONS À GUÉ RIVE GAUCHE, 250 M EN AMONT DU PONT À NOTRE-DAME-DE-STANBRIDGE	45,175036	-73,036709	115	28
3040110	SUTTON AU PONT-ROUTE 139 À ABERCORN	45,032116	-72,663587	147	80
3040116	L'ACADIE AU PONT DU CHEMIN GRANDE-ALLÉE AU SUD-OUEST DE CARIGNAN	45,426693	-73,362706	396	16
3060001	SAINT-JACQUES AU PONT DU BOULEVARD TASCHEREAU (ROUTE 134) À LA PRAIRIE	45,430454	-73,479432	167	1
3070015	DE LA TORTUE À GUÉ AU PARC DE LA TORTUE À DELSON, RIVE GAUCHE	45,393169	-73,537198	153	12
3110003	SAINT-LOUIS AU PONT DE LA MONTÉE SAINT-JOSEPH AU SUD DE BEAUHARNOIS	45,270960	-73,895641	167	32
4010002	DU NORD AU PONT-ROUTE 344 À SAINT-ANDRÉ-EST	45,562569	-74,336789	2 078	65
4010127	ROUGE (ANC. SAINT-ANDRÉ) À GUÉ À 60 M EN AMONT DU PONT-ROUTE 344 À SAINT-ANDRÉ D'ARGENTEUIL, RIVE DROITE	45,553702	-74,334081	144	31
4020001	ROUGE AU PONT-ROUTE 148 À L'EMBOUCHURE À L'EST DE MONTEBELLO	45,643854	-74,690911	5 551	87
4040001	DE LA PETITE NATION AU PONT-ROUTE 148 À PLAISANCE	45,605104	-75,126284	2 250	76
4060001	DU LIÈVRE AU PONT DE LA RUE DU PONT À MONT-LAURIER (BARRAGE)	46,554664	-75,499305	5 011	92
4640003	MASCOUCHE À GUÉ, RIVE DROITE 550 M EN AMONT DU PONT-ROUTE 640 (FACE AU 200 RUE LOUIS-HÉBERT)	45,721045	-73,582260	403	36
5010035	SHAWINIGAN AU PONT-ROUTE 153 À 1 KM DE SON EMBOUCHURE	46,546028	-72,758722	491	60
5020006	CHAMPLAIN AU PONT DE LA ROUTE SAINTE-MARIE À CHAMPLAIN	46,467738	-72,331895	298	35
5030001	BATISCAN AU PONT-ROUTE À SAINTE-GENEVIÈVE-DE-BATISCAN	46,527474	-72,339409	4 604	89
5040006	BLANCHE AU PONT DU RANG DE LA RIVIÈRE BLANCHE EST AU NORD-EST DE SAINT-CASIMIR	46,673807	-72,131780	220	58
5040116	SAINTE-ANNE AU PONT DE LA ROUTE DES CASCADES AU NORD DE SAINTE-CHRISTINE	46,821919	-71,972371	1 572	94
5040138	NOIRE À GUÉ, RIVE DROITE À 0,4 KM DE L'EMBOUCHURE AU NORD DE SAINT-CASIMIR	46,675590	-72,126270	351	88
5070012	PORTNEUF AU PONT DE LA 1 ^{re} AVENUE À PORTNEUF	46,694778	-71,883743	359	58
5080105	JACQUES-CARTIER À LA PRISE D'EAU DE DONNAONA	46,693861	-71,749565	2 458	89
5090017	SAINT-CHARLES AU PONT DORCHESTER (RUE DU PONT) À QUÉBEC	46,819292	-71,223719	527	56
5100014	MONTMORENCY, AU PONT-ROUTE 360 (AVE. ROYALE) À BOISCHATEL	46,892401	-71,148022	1 140	92
5130016	DU GOUFFRE AU PONT-ROUTE 362 À BAIE-SAINT-PAUL	47,441621	-70,504868	989	82
5220004	L'ASSOMPTION AU PONT-ROUTE 343 À 0,6 KM EN AMONT DE LA OUAREAU À L'EST DE CRABTREE	45,944266	-73,402294	1 377	46
5220005	DE L'ACHIGAN AU PONT DU RANG DU BAS-DE-L'ACHIGAN (PONT LANGLOIS) À L'EST DE L'ÉPIPHANIE	45,848276	-73,448224	646	50
5220006	SAINT-ESPRIT AU PONT DU RANG SAINT-ESPRIT (PONT PRÉVOST) AU NORD-EST DE L'ÉPIPHANIE	45,860031	-73,461869	215	44
5220012	OUAREAU AU PONT DU CHEMIN GUILBAULT À 1,9 KM DE SON EMBOUCHURE À L'EST DE CRABTREE	45,952442	-73,414337	1 684	72
5230001	LA CHALOUPPE AU PONT DE LA RUE NOTRE-DAME (RTE138) À BERTHIÉVILLE	46,066829	-73,181641	142	10
5240001	BAYONNE AU PONT DE LA RUE NOTRE-DAME (RTE 138) À BERTHIÉVILLE	46,094527	-73,172902	362	33
5250002	CHICOT AU PONT-ROUTE 138 À SAINTE-GENEVIÈVE-DE-BERTHIER	46,125722	-73,145157	166	39
5260003	MASKINONGÉ AU PONT DU RANG RIVIÈRE SUD-OUEST AU SUD DE MASKINONGÉ	46,182125	-73,033465	1 091	69
5280001	DU LOUP, À GUÉ RIVE DROITE À 4 KM DE L'EMBOUCHURE	46,244916	-72,925196	1 502	59
5280064	PETITE RIVIÈRE DU LOUP AU PONT DE LA RUE MARCEL À LOUISEVILLE	46,254606	-72,949121	81	27
5290001	PETITE RIVIÈRE YAMACHICHE, AU PONT DE LA ROUTE DE LA BEZOTE AU SUD-OUEST DE YAMACHICHE	46,276444	-72,837861	105	1
5300004	YAMACHICHE, AU PONT DU CHEMIN CHARLES-LESIEUR AU SUD-EST DE YAMACHICHE	46,273303	-72,805299	268	25
6070006	À MARS AU PONT DU BOULEVARD DE LA GRANDE BAIE À LA BAIE	48,335260	-70,880871	665	87
6090002	DU MOULIN AU PONT DU BOULEVARD DU SAGUENAY À CHICOUTIMI	48,429880	-71,033479	370	54
6120001	BÉDARD AU PONT DU RANG SCOTT À ALMA	48,558377	-71,717201	128	23
6200001	TICOUAPÉ AU PONT-ROUTE 169 À SAINT-MÉTHODE	48,728139	-72,411314	618	43
7020002	DES ESCOUMINS EN AMONT DU BARRAGE À 375 M EN AMONT DU PONT-ROUTE 138 AUX ESCOUMINS, RIVE GAUCHE	48,344670	-69,408570	794	97
7120007	AUX ANGLAIS AU PONT DU CHEMIN DU MONT TI-BASSE AU NORD DE BAIE-COMEAU	49,290474	-68,165405	435	91

ANNEXE 1B VALEURS MÉDIANES DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX STATIONS SÉLECTIONNÉES POUR LA MODÉLISATION, D'AVRIL À NOVEMBRE, DE 2009 À 2012

NO STATION	PTOT mg/l P	NOX mg/l N	NTOT mg/l N	COD mg/l	MES mg/l	TURBIDITÉ UNT	CHLA µg/l	COLI UFC/100 ml
1080001	< 0,002	0,12	0,17	1,1	< 1	0,7	0,19	1
1170022	0,006	0,06	0,20	3,2	2	1,7	1,76	20
2200019	0,009	0,07	0,29	5,3	3	2,9	1,50	25
2240005	0,021	0,14	0,47	8,1	7	11,0	4,02	60
2250002	0,010	0,07	0,31	7,3	3	2,5	1,92	28
2260002	0,028	0,44	0,84	9,1	5	8,1	7,19	200
2270002	0,017	0,05	0,38	11,5	2	3,5	2,43	82
2300001	0,068	2,75	2,95	6,9	16	15,0	12,04	275
2310004	0,021	0,40	0,64	6,7	5	7,4	2,80	140
2330010	0,006	0,19	0,32	4,5	1	1,4	0,73	30
2330049	0,071	1,90	2,80	9,5	15	22,0	9,78	160
2340014	0,021	0,26	0,62	8,1	4	4,9	3,30	110
2340034	0,037	0,84	1,20	10,5	9	9,3	5,77	210
2360014	0,038	0,46	0,93	15,0	8	9,3	7,04	103
2370002	0,040	0,34	0,74	15,0	9	11,5	3,90	105
2390001	0,048	0,26	0,80	13,3	12	15,0	4,48	90
2400004	0,023	0,45	0,74	6,5	5	5,3	5,56	48
3010008	0,022	0,83	1,10	5,9	6	7,3	6,30	160
3010009	0,040	0,70	1,09	7,0	12	12,0	8,18	95
3010046	0,105	1,50	2,30	10,9	46	46,0	12,20	320
3020040	0,014	0,14	0,39	7,2	3	3,0	2,86	91
3030003	0,059	1,20	1,50	8,2	4	6,8	7,31	68
3030031	0,022	0,67	0,95	5,1	3	3,9	3,58	245
3030038	0,100	2,70	4,00	11,7	11	12,0	10,25	230
3030096	0,105	3,45	3,95	7,9	12	16,5	6,29	200
3030108	0,064	1,03	1,45	6,8	6	5,7	9,88	500
3030199	0,030	0,24	0,61	4,8	4	3,7	6,70	245
3040007	0,150	2,05	3,70	6,0	54	60,0	16,23	1400
3040071	0,140	1,60	2,50	11,0	6	11,0	5,82	330
3040110	0,014	0,25	0,42	2,7	3	4,0	2,27	160
3040116	0,160	2,00	3,00	10,1	14	21,5	11,05	540
3060001	0,083	1,25	2,50	6,3	24	24,5	18,48	310
3070015	0,160	1,85	3,25	6,7	16	14,5	8,65	110
3110003	0,087	0,79	1,30	4,8	30	33,0	8,82	120
4010002	0,031	0,71	0,98	5,0	5	5,4	3,87	115
4010127	0,099	1,95	2,55	5,1	35	47,0	9,24	270
4020001	0,011	0,09	0,27	4,9	2	2,5	2,61	13
4040001	0,017	0,16	0,34	4,4	5	7,3	2,26	40
4060001	0,009	0,05	0,23	5,9	2	2,3	2,37	24
4640003	0,092	1,60	2,40	8,6	19	26,0	8,90	475
5010035	0,045	0,10	0,48	4,8	3	4,3	3,05	110
5020006	0,100	0,80	1,10	8,7	30	46,0	5,49	370
5030001	0,018	0,13	0,31	5,1	4	5,2	2,37	30
5040006	0,041	0,51	0,67	5,4	12	17,0	3,95	73
5040116	0,010	0,11	0,26	4,3	2	1,8	2,21	8
5040138	0,019	0,12	0,27	4,9	6	5,9	2,85	37
5070012	0,045	0,78	0,99	4,9	8	8,1	4,39	81
5080105	0,014	0,25	0,41	5,4	2	2,3	3,21	27
5090017	0,022	0,37	0,65	4,6	9	9,1	4,68	475
5100014	0,012	0,09	0,23	4,4	2	2,0	2,11	22
5130016	0,018	0,10	0,25	4,2	5	5,4	2,66	84
5220004	0,050	0,45	0,72	4,8	14	9,9	4,97	230
5220005	0,055	1,15	1,40	6,4	12	16,5	10,44	300
5220006	0,069	1,20	1,40	5,2	14	17,0	10,30	74
5220012	0,026	0,21	0,39	4,3	6	6,4	2,90	80
5230001	0,086	6,20	6,70	6,6	11	17,0	7,65	150
5240001	0,095	1,60	1,90	5,5	19	33,0	5,48	240
5250002	0,072	0,85	1,25	8,3	18	27,0	4,03	385
5260003	0,033	0,21	0,42	5,0	8	11,5	2,77	190
5280001	0,029	0,17	0,36	4,7	11	14,0	2,51	600
5280064	0,100	1,30	1,75	4,8	33	52,0	6,18	1500
5290001	0,100	4,45	5,25	5,0	40	55,0	5,37	400
5300004	0,110	1,00	1,30	4,5	31	29,0	3,87	1200
6070006	0,011	0,06	0,22	5,9	2	2,4	1,33	85
6090002	0,018	0,20	0,39	6,3	8	5,4	2,29	190
6120001	0,089	0,93	1,40	8,1	15	19,0	8,25	120
6200001	0,052	0,55	0,89	10,3	15	22,5	4,13	56
7020002	0,005	0,03	0,17	4,7	1	1,3	0,87	5
7120007	0,006	0,04	0,20	6,9	1	1,4	3,21	1

ANNEXE 2 MÉTHODE DE CALCUL DES CHARGES ANNUELLES DE PHOSPHORE (P TOTAL) DES STATIONS D'ÉPURATION D'EAUX USÉES MUNICIPALES

Type de station d'épuration	Acronyme
Déphosphatation annuelle (du 1 ^{er} janvier au 31 décembre)	AN
Déphosphatation pendant 6 mois (du 15 mai au 14 novembre)	6M2
Déphosphatation pendant 5 mois (du 15 mai au 14 octobre)	5M1
Sans déphosphatation et avec suivi de P total à l'effluent	SPSD
Sans déphosphatation et sans suivi de P total à l'effluent	SPD
Effluent infiltré à la sortie de l'émissaire	EFFINF

Acronyme	Méthode de calcul
AN	Charge journalière moyenne à l'effluent (kg P/j) x 365 j
6M2	[Charge journalière moyenne à l'effluent pendant la période de déphosphatation (kg P/j) x 184 j] + [Charge journalière moyenne à l'affluent pendant la période sans déphosphatation (kg P/j) x 181 j]
5M1	[Charge journalière moyenne à l'effluent pendant la période de déphosphatation (kg P/j) x 153 j] + [Charge journalière moyenne à l'affluent pendant la période sans déphosphatation (kg P/j) x 212 j]
SPSD	Charge journalière moyenne à l'effluent (kg P/j) x 365 j
SPD ¹	[Charge journalière moyenne de DBO ₅ à l'affluent (kg/j)/0,05 kg/pers/j] x (0,002 kg P/pers/j) x 365 j
EFFINF	Charge annuelle calculée selon l'une des méthodes précédentes x 20 %

¹ Population estimée = charge journalière moyenne de DBO₅ à l'affluent de la station divisée par la charge théorique journalière de DBO₅ par personne. Dans les cas où une industrie était responsable d'un apport important de DBO₅ à la station d'épuration, la population de conception de la station d'épuration était utilisée pour le calcul.

ANNEXE 3 SOURCE DES DONNÉES POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL

Source de données	Acronyme	Échelle cartographique	Fréquence de mise à jour	Territoire couvert
Cultures assurées, Financière agricole du Québec	BDCA	1/50 000	Annuelle	Sud du Québec
Cultures de canneberges, Direction de l'écologie et de la conservation (DEC), MDDELCC (issue des travaux de photo-interprétation)		1/20 000	Annuelle	Sud du Québec
Cadre de référence hydrologique du Québec : plans d'eau, DPEP, MDDELCC	CRHQ	1/20 000	Irrégulière	Sud du Québec
Sites d'extraction minière, ministère des Ressources naturelles (MRN)			Hebdomadaire	Le Québec
Mines et projets miniers, MRN			Annuelle	Le Québec
Adresses Québec (Réseau routier), MRN	AQ	1/20 000	Mensuelle	Le Québec
Inventaire annuel des cultures au Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Agriculture et Agroalimentaire Canada	AgriCan	Résolution 30 mètres	Annuelle	Sud du Québec
Système d'information écoforestier, MRN	SIEF	1/20 000	Biannuelle	Sud du Québec
Zones urbaines : aucune donnée présentant les caractéristiques recherchées n'est disponible actuellement			Aucune	Le Québec
Cartographie intermédiaire en 52 classes de la couverture terrestre du Québec (CCTQ), RN Canada, Service canadien des forêts et ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) (2010)	CCTQ	Résolution 30 mètres	Aucune	Le Québec
Carte préliminaire de végétation du Nord MRN Forêt (2013)		Résolution 30 mètres	Aucune	Nord du Québec
Base de données topographique du Québec (BDTQ) à l'échelle de 1/20 000, MRN pour les chemins de fer et les aires désignées (vergers, halde, mine, dépotoir, banc d'emprunt, carrière, étang d'épuration)	BDTQ	1/20 000	Aucune	Sud du Québec
Base de données topographiques à l'échelle de 1/50 000 du gouvernement fédéral, RNCAN	CANVEC	1/50 000	Irrégulière	Nord du Québec

ANNEXE 4 CALCUL DES VARIABLES LIÉES AUX PRESSIONS AGRICOLES

Variables génériques associées à la présence des activités d'élevage

Présentement, le suivi des lieux d'élevage prévoit près de 83 catégories animales associées à l'application du Règlement sur les exploitations agricoles (REA, Q-2, r. 26). L'annexe VI de ce règlement précise la charge annuelle de phosphore de chacune de ces catégories et permet donc d'établir facilement la **charge de phosphore générée par les animaux d'élevage (kg P₂O₅)**.

Les données utilisées dans ce rapport correspondent aux informations présentes dans le système POA en date du 1^{er} décembre 2014. Celles-ci proviennent principalement (plus de 85 %) des informations transmises annuellement au moyen des bilans de phosphore. La base de données est complétée par les activités de suivi et de contrôle exercé par le Ministère (autorisations, avis de projet, inspections, etc.). La spatialisation des données est facilitée par la présence d'une référence spatiale (longitude, latitude) associée à la localisation des principaux bâtiments d'élevage sur près de 92 % des lieux. Les autres lieux ont été localisés, soit à partir d'une adresse (1 %), soit par le centroïde de la municipalité du lieu d'élevage (7 %).

De façon à prendre en compte la variabilité des charges de contaminants générés par les différentes catégories d'animaux, au-delà de la charge de phosphore générée, une application du concept d'unité animale a également été considérée. Dans le cas du présent exercice, une base de référence de 500 kg de poids vif moyen de la catégorie animale a été utilisée pour définir une unité animale ou **ratio poids animal (RPA)**.

Variables associées à des activités agricoles spécifiques

Les suivis effectués par le Ministère permettent de déterminer d'autres indicateurs de pression environnementale associés à des activités agricoles spécifiques.

Une estimation de la **charge de phosphore stockée sous la forme d'amas au champ** a été effectuée en considérant la proportion de fumier pouvant se retrouver à même le sol, estimée à partir du nombre de structures étanches et non étanches présentes sur un lieu. Une classification des sites de stockage de déjections a donc été effectuée à partir des données disponibles dans les systèmes d'information du Ministère (tableaux A et B). Celles-ci ont été assemblées de façon à privilégier les informations présentes dans POA. Elles ont toutefois été complétées par celles qui sont présentes dans SAGO. Cette approche a permis une classification de près de 94 % du phosphore généré par les animaux d'élevage.

TABLEAU A LISTE DES CATÉGORIES D'OUVRAGES DE STOCKAGE DISPONIBLES DANS POA

Type d'ouvrage	Catégorie
Q : Amas au champ	Non étanche
S : Amas contigu au bâtiment	Non étanche
R : Aménagement au même effet	Étanche
B : Autres types (fumier liquide)	Étanche
A : Autres types (fumier solide)	Autre
M : Ouvrage en acier ou en béton	Étanche
G : Ouvrage de stockage en sol ou membrane	Étanche
T : Traitement	Traitement

TABLEAU B LISTE DES MOTS-CLÉS UTILISÉS POUR CATÉGORISER LES OUVRAGES DE STOCKAGE DANS SAGO

Mot-clé (description de la composante)	Catégorie
Fosse, Réservoir, Dalle, Béton	Étanche
Amas, Contigu, Tas, Sol, Litière	Non étanche
Tout autre mot	Autre

Les données recueillies à l'aide des bilans de phosphore permettent de documenter la pression environnementale selon deux indicateurs, soit la charge de phosphore disponible à l'épandage et le niveau de richesse des sols en phosphore. Les données ont été compilées à l'échelle des municipalités régionales de comté (MRC), puisque l'utilisation à des échelles plus grandes est limitée par les définitions retenues dans la production des bilans de phosphore (MDDELCC, 2016b).

La **charge de phosphore disponible à l'épandage** est calculée en sommant l'ensemble des charges de phosphore produites ou importées (sous la forme de déjections animales, engrais de synthèse ou matière résiduelle fertilisante) et en y soustrayant les charges de phosphore disposées en dehors du système de production du lieu (ententes d'épandage avec un tiers, traitement et transformation en produits utiles ou destruction). Cette charge est rapportée sur les superficies agricoles pouvant la recevoir.

Les superficies sont également déclarées en fonction de leur appartenance à quatre grandes catégories d'indice de saturation en phosphore des sols $P/AI_{\text{mehlich-III}}$. Les catégories sont divisées en fonction des seuils environnementaux retenus dans la réglementation, soit $< 7,6 \%$ (seuil environnemental des sols contenant plus de 30 % d'argile), entre 7,6 et 13,1 % (seuil environnemental pour les sols plus grossiers), entre 13,1 et

20 % et supérieur à 20 %. Il est à noter que les superficies des sols ne possédant pas d'analyse de sols ou dont l'analyse de sols date de plus de cinq ans (REA, article 29) sont compilées dans la catégorie des sols excessivement riches (plus de 20 % P/AI_{mehlich-III}). Dans le présent rapport, certaines superficies déclarées dans cette catégorie ont été considérées comme étant « sans analyse » et retirées du calcul, et ce, pour dresser un portrait le plus fidèle possible de la réelle situation environnementale⁷. Un **indice de saturation pondérée** à l'échelle des MRC a été calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Indice de saturation pondérée} = \frac{\sum [\text{Saturation moyenne catégorie}] \times [\text{superficies déclarées catégorie}]}{\sum \text{Superficies déclarées}}$$

⁷ Les superficies sont considérées comme « sans analyse » lorsque 100 % des superficies d'un lieu se retrouvent dans la catégorie > 20 % P/AI.

ANNEXE 5 CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS UTILISÉES POUR LA VALIDATION

ANNEXE 5A LOCALISATION DES STATIONS, SUPERFICIE DRAINÉE ET QUALITÉ DE L'EAU

NO STATION	DESCRIPTION	LATITUDE	LONGITUDE	SUPERFICIE (km ²)	IQBP ₈ (2009-2012)
2330001	ETCHEMIN AU PONT-ROUTE 132 À SAINT-ROMUALD	46,7598230	-71,2282740	1 464	47
2340004	CHAUDIÈRE AU PONT COUVERT PERREAULT À NOTRE-DAME-DES-PINS	46,1824710	-70,7168790	4 088	75
2340006	CHAUDIÈRE AU PONT DU CHEMIN DU LAC DROLET AU SUD-OUEST DE SAINT-LUDGER	45,6912850	-70,7863790	1 175	85
2340033	CHAUDIÈRE À 5,6 KM DE L'EMBOUCHURE À LA PRISE D'EAU DE CHARNY	46,7021940	-71,2799410	6 607	69
2340051	BRAS D'HENRI AU PONT DU RANG SAINTE-ANNE AU NORD-EST DE SAINT-GILLES	46,5402480	-71,3401290	157	28
3010007	NICOLET AU PONT DE LA ROUTE DE WARWICK À SAINT-ALBERT	46,0007560	-72,0872660	741	47
3010036	NICOLET SUD-OUEST AU PONT GAGNON À L'EST DE SAINT-LUCIEN	45,8793610	-72,2346510	950	69
3010038	DES PINS AU PONT DU 5 ^E RANG AU NORD-OUEST DE WARWICK	45,9972589	-72,0332521	151	50
3020042	AU SAUMON AU PONT DU CHEMIN DE LA RIVIÈRE-AU-SAUMON À FONTAINEBLEAU (WEEDON)	45,6815830	-71,4037880	1 021	88
3030023	YAMASKA AU PONT-ROUTE 132 À YAMASKA	46,0048810	-72,9106910	4 460	0
3030026	YAMASKA AU PONT HENRI-BOURASSA À L'EST DE SAINT-DAMASE	45,5182360	-72,9768270	1 625	41
3030041	YAMASKA SUD-EST AU PONT-ROUTE 139 À BROME-OUEST	45,1773193	-72,6623572	166	89
4010008	DU NORD AU PONT DE LA RUE SAINT-SIMON (MONTÉE DE L'ÉGLISE) À SAINT-CANUT	45,7223700	-74,0854710	1 307	67
4010010	DU NORD AU PONT DU CHEMIN DE LA GARE (PONT GAGLIÉSIE) À PIEDMONT	45,9061030	-74,1360720	1 026	77
4020103	DU DIABLE AU PONT PRUD'HOMME À 5 KM EN AVAL DE SAINT-JOVITE	46,0728680	-74,6250800	1 183	85
5030114	DES ENVIES AU PONT ENTRE LES CHUTES GOULET ET À PRINCE À L'OUEST DE SAINT-STANISLAS	46,6196480	-72,4055250	465	59
5040007	SAINTE-ANNE AU PONT-ROUTE 138 À SAINTE-ANNE-DE-LA-PÉRADE	46,5715630	-72,2068660	2 696	80
5040113	BRAS DU NORD DE LA RIVIÈRE SAINTE-ANNE AU PONT-ROUTE 367 À L'OUEST DE SAINT-RAYMOND	46,8979220	-71,8488820	773	95
5040139	NOIRE AU PONT-ROUTE 367 AU SUD-EST DE RIVIÈRE-À-PIERRE	46,9335860	-72,1205870	132	94
5080004	JACQUES-CARTIER AU PONT À TEWKESBURY	47,0659530	-71,4248380	1 739	94
5220001	L'ASSOMPTION AU PONT DU BOULEVARD ANTONIO BARRETTE (PONT DU CHRRIST ROI) À JOLIETTE	46,0381620	-73,4403180	1 282	77
5220003	L'ASSOMPTION AU PONT RIVEST À REPENTIGNY ; DEPUIS 1999 À LA PRISE D'EAU DE REPENTIGNY	45,7492052	-73,4695006	4 197	48
5220017	L'ASSOMPTION AU PONT DU RANG DES VENNE À 4,2 KM AU NORD DE SAINT-CÔME	46,2904950	-73,7951170	503	94
5280019	DU LOUP AU BELVEDÈRE DES CHUTES À MAGNAN EN AMONT DU PONT-ROUTE 350 À SAINT-PAULIN	46,4245420	-72,9695930	1 356	94
5280020	DU LOUP AU PONT DU CHEMIN DES PINS ROUGES À 20 KM EN AMONT DE SAINT-ALEXIS-DES-MONTS	46,6004920	-73,1857180	759	95

ANNEXE 5B VALEURS MÉDIANES DES PARAMÈTRES DE LA QUALITÉ DE L'EAU AUX STATIONS AYANT SERVI À LA VALIDATION, D'AVRIL À NOVEMBRE, DE 2009 À 2012

NO STATION	PTOT mg/l P	NOX mg/l N	NTOT mg/l N	COD mg/l	MES mg/l	TURBIDITÉ UNT	CHLA µg/l	COLI UFC/100 ml
2330001	0,031	0,68	0,99	6,0	6	7,0	8,01	68
2340004	0,015	0,12	0,42	7,8	3	5,5	2,37	170
2340006	0,010	0,15	0,35	6,1	4	4,7	2,91	56
2340033	0,021	0,32	0,60	8,2	5	6,9	4,04	120
2340051	0,050	1,50	2,20	12,0	4	5,8	9,30	120
3010007	0,025	1,10	1,30	5,3	5	4,2	7,03	260
3010036	0,027	0,46	0,75	6,6	4	5,7	5,84	43
3010038	0,042	1,20	1,60	4,6	7	5,1	6,07	340
3020042	0,011	0,10	0,37	6,8	2	3,0	1,82	52
3030023	0,088	1,50	1,80	7,1	36	47,0	23,14	160
3030026	0,053	1,00	1,45	5,9	12	11,0	10,90	180
3030041	0,008	0,22	0,38	3,2	1	1,4	1,95	50
4010008	0,029	0,39	0,92	4,9	5	4,9	4,06	200
4010010	0,011	0,18	0,40	4,5	2	2,1	2,37	245
4020103	0,010	0,12	0,32	4,3	2	2,0	2,40	54
5030114	0,044	0,34	0,61	5,7	8	12,5	4,17	80
5040007	0,018	0,25	0,40	4,7	5	5,5	2,90	42
5040113	0,008	0,09	0,22	4,2	2	1,3	1,83	4
5040139	0,009	0,04	0,23	6,2	2	1,3	2,28	8
5080004	0,009	0,04	0,17	5,7	2	1,7	2,21	12
5220001	0,016	0,21	0,38	4,5	3	3,8	2,19	250
5220003	0,041	0,59	0,82	5,0	12	14,5	6,12	350
5220017	0,006	0,04	0,21	5,1	1	1,2	1,59	15
5280019	0,010	0,10	0,28	4,6	2	2,0	1,89	21
5280020	0,005	0,03	0,19	5,0	1	1,1	1,64	10

**Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques**

Québec 