

Territoire et qualité de l'eau : développement de modèles prédictifs pour les métaux



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. 2017. *Territoire et qualité de l'eau : développement de modèles prédictifs pour les métaux*. 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, 19 p. et 5 annexes.

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/flrivlac/Qualite-Territoire-Metaux.pdf>

Dépôt légal – 2017
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN (PDF) 978-2-550-79625-1

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec, 2017

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Rédaction :	Serge Hébert ¹
Soutien technique :	Daniel Blais ² Jean Bissonnette ² Suzanne Lavoie ¹ Danielle Leclerc ²
Révision scientifique :	François D'Auteuil-Potvin ¹ Sylvie Cloutier ¹
Graphisme :	Mona Frenette ¹
Secrétariat :	Claire Cournoyer 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, boul. 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, boul. René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7.

Mots clés : métaux, métaux extractibles, modèles prédictifs, qualité de l'eau, rivière, territoire, utilisation du territoire, bassin versant, géologie, pédologie

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Méthodologie et sources des données	1
Sélection des bassins versants	1
Compilation des données sur le territoire	3
Développement et validation des modèles prédictifs	5
Résultats et discussion	7
Arsenic et cadmium extractibles	7
Chrome extractible	8
Cuivre extractible	10
Nickel extractible	11
Plomb extractible	13
Zinc extractible	14
Dureté	16
Conclusion	18
Bibliographie	19
 Tableau 1 Variables territoriales prises en considération dans le développement des modèles prédictifs.....	 4

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Localisation des 51 bassins versants sélectionnés pour la modélisation	2
Figure 2	Superficie des 51 bassins versants sélectionnés pour la modélisation	2
Figure 3	Localisation des 15 bassins versants sélectionnés pour la validation	6
Figure 4	Superficie des 15 bassins versants utilisés pour la validation	6
Figure 5	Arsenic extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées	7
Figure 6	Cadmium extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées.....	8
Figure 7	Chrome extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées	9
Figure 8	Cuivre extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées.....	11
Figure 9	Nickel extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées	12
Figure 10	Plomb extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées.....	14
Figure 11	Zinc extractible, concentrations médianes prédites vs mesurées.....	15
Figure 12	Duretés médianes prédites vs mesurées.....	17

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Stations utilisées pour la modélisation et années de suivi.....	20
Annexe 2	Sources des données pour la cartographie de l'occupation du sol	21
Annexe 3	Stations utilisées pour la validation et années de suivi	22
Annexe 4	Formules pour le calcul du NSE et du PBIAS.....	23
Annexe 5	Domaine de développement et d'application des modèles.....	24

Introduction

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 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 cependant le moteur principal de mobilisation de la matière, qu'elle soit sous forme solide ou dissoute. Les principaux facteurs d'influence sont de nature anthropique, hydrologique, géologique et édaphique.

Le but de la présente étude est de développer des modèles empiriques permettant de déterminer les relations entre les caractéristiques du territoire, son utilisation et les concentrations médianes des métaux extractibles observées dans l'eau des rivières du sud du Québec (sud du 51^e parallèle). Ces modèles visent à prédire les concentrations des métaux dans les secteurs non influencés par les activités minières, là où aucun suivi n'a été réalisé. Ces modèles prédictifs permettraient éventuellement d'estimer les concentrations des métaux extractibles utilisées dans le calcul d'objectifs environnementaux de rejet lors de l'implantation de certaines industries.

Méthodologie et sources des données

Le développement de modèles pour estimer les concentrations de métaux dans l'eau des rivières du sud du Québec a été réalisé en trois étapes :

- sélection des bassins versants;
- compilation des variables territoriales;
- développement et validation des modèles empiriques.

Sélection des bassins versants

L'analyse des relations entre les concentrations de métaux et le territoire ainsi que le développement des modèles prédictifs ont été réalisés à partir de 51 bassins versants indépendants, c'est-à-dire non imbriqués les uns dans les autres (figure 1 et annexe 1). La sélection des bassins a été faite en fonction de leur localisation, de leur superficie et de la présence ou non d'activités minières ou industrielles pouvant être une source de métaux. Les bassins versants sélectionnés présentent des superficies variant de 66 à 42 652 km² (figure 2). Les différentes provinces naturelles¹ du Québec sont également bien représentées dans les bassins versants sélectionnés (figure 1).

Le bassin versant de chacune des stations de qualité de l'eau retenues 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 filaire d'écoulement orienté au sein de cette routine.

Il est important de noter que la plupart des rivières n'ont fait l'objet d'un suivi que pendant une seule année. La fenêtre temporelle n'étant pas la même pour chaque rivière (annexe 1) et les conditions

¹ Voir le Cadre écologique de référence du Québec (CER).

hydrologiques étant différentes d'une année à l'autre, un certain bruit a pu être engendré dans les modèles empiriques développés.

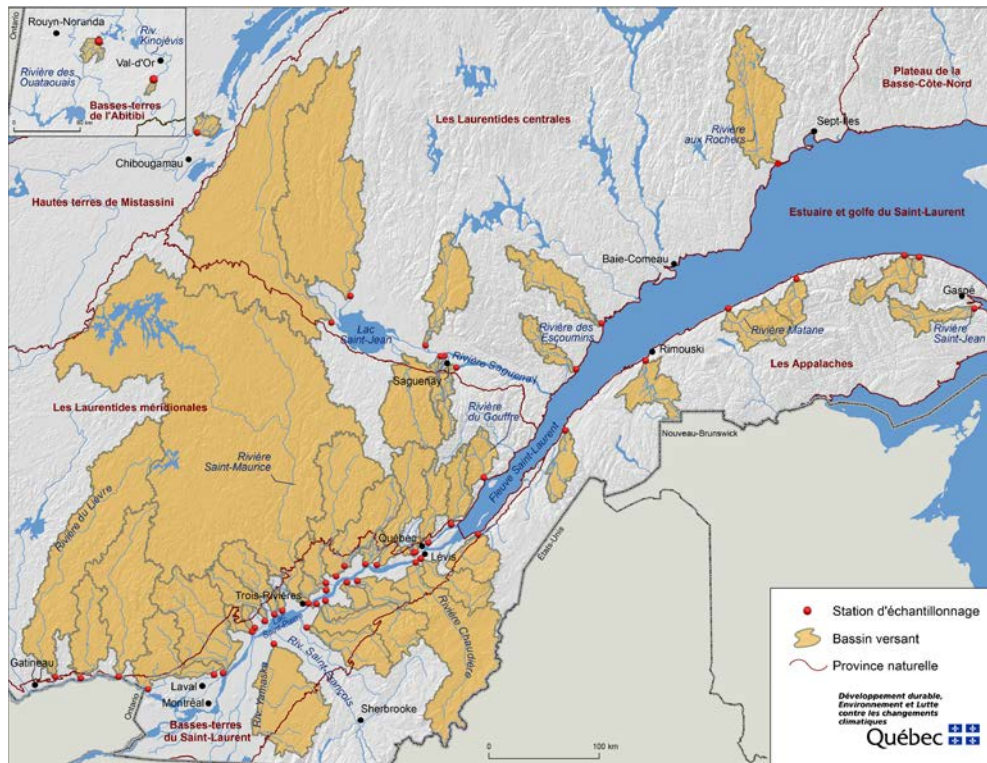


FIGURE 1 LOCALISATION DES 51 BASSINS VERSANTS SÉLECTIONNÉS POUR LA MODÉLISATION

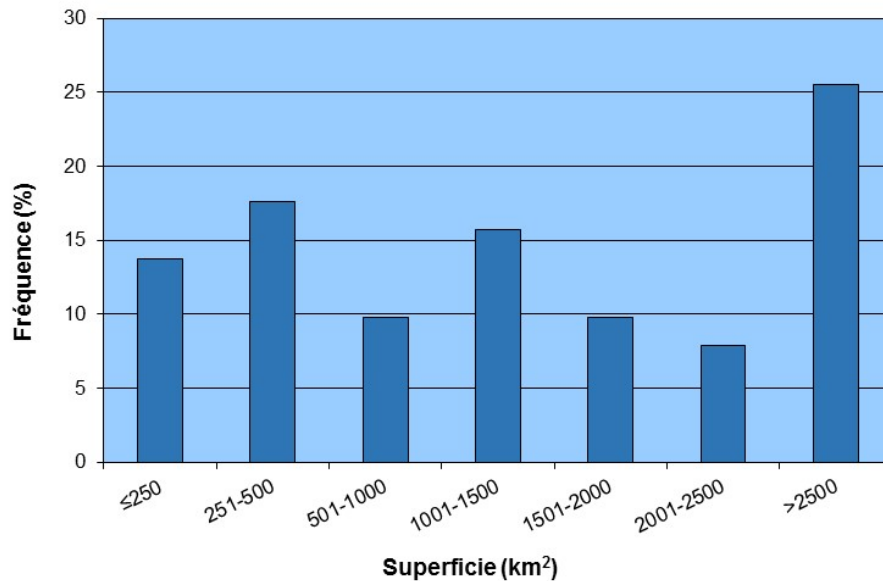


FIGURE 2 SUPERFICIE DES 51 BASSINS VERSANTS SÉLECTIONNÉS POUR LA MODÉLISATION

Compilation des données sur le territoire

Population et présence humaine

La densité du réseau routier pavé a été sélectionnée en lieu et place de la densité de population pour caractériser la présence humaine sur le territoire.

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 Ministère² 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 : milieux humides, milieux forestiers, cultures et 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 2.

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 géomineère 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.

Hydrologie

La densité du réseau hydrographique a été calculée à partir du filamenteux 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.

Caractéristiques édaphiques

Les dépôts de surface proviennent de sources de données spatialement complémentaires, soit la carte écoforestière (SIEF)³ et la compilation cartographique d'études pédologiques⁴. Les données provenant de la compilation d'études pédologiques ont été priorisées pour les secteurs agricoles, tandis que les données de la carte écoforestière ont été priorisées pour les portions forestières.

Au total, 45 variables décrivant le territoire ont été compilées pour les bassins versants des 51 stations (tableau 1).

² Pour une description complète de la méthodologie, se référer à MDDELCC (2016).

³ SIEF, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

⁴ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

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

Variable	Description
GEO0	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches non - classées (%)
GEO1	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches intrusives felsiques (%)
GEO2	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches intrusives intermédiaires (%)
GEO3	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches intrusives mafiques (%)
GEO4	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches intrusives ultramafiques (%)
GEO5	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches métamorphiques felsiques (%)
GEO6	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches métamorphiques intermédiaires (%)
GEO7	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches métamorphiques mafiques (%)
GEO8	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches métamorphiques carbonatées (%)
GEO9	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de schiste (%)
GEO10	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches sédimentaires siliceuses (%)
GEO11	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches sédimentaires argileuses (%)
GEO12	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches sédimentaires carbonatées (%)
GEO13	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué d'évaporites (%)
GEO14	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques felsiques (%)
GEO15	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques intermédiaires (%)
GEO16	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques mafiques (%)
GEO17	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques ultramafiques/ultrabasiques (%)
GEO18	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de formations de fer (%)
GEO19	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de tectonites (%)
GEO20	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches contenant des sulfures (%)
GEO21	Proportion du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches contenant des carbonates (%)
AFFROC	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts d'affleurements rocheux (%)
AFM	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts alluvionaires fluviomarins (%)
ALD	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts alluvionaires glacio-deltaïques (%)
ALF	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts alluvionaires fluviaux (%)
ALT	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations (%)
COV	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts de colluvions (%)
EOL	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts éoliens (%)
FGJ	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts fluvioglaciaires juxtaglaciaires (%)
FGP	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts fluvioglaciaires proglaciaires (%)
GLA	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts glacio-lacustres argileux (%)
GLS	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts glacio-lacustres sableux (%)
GMA	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts glacio-marins argileux (%)
GMS	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts glacio-marins sableux (%)
LIT	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts littoraux (%)
ORG	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts organiques (%)
TILL	Proportion du bassin versant couvert par des dépôts glaciaires - till (%)
TOURBIERES	Proportion du bassin versant occupé par des tourbières (%)
MARECAGES	Proportion du bassin versant occupé par des marécages (%)
MARAIS	Proportion du bassin versant occupé par des marais (%)
SOLNU	Proportion du bassin versant occupé par des sols dénudés, lichénisés ou landes à mousse (%)
DENRH	Densité (km/km ²) du réseau hydrographique
DENRRP	Densité (km/km ²) du réseau routier pavé
CULTURES	Proportion du bassin versant occupé par des cultures (%)
CARRIERES	Proportion du bassin versant occupé par des carrières et des sablières (%)

Développement et validation des modèles prédictifs

Les analyses ont été effectuées avec le logiciel SigmaPlot v. 12.0. Les relations entre les variables dépendantes (concentrations médianes des métaux extractibles et duretés médianes) et les variables indépendantes (caractéristiques du territoire et concentrations médianes de matières en suspension), de même que les relations entre les variables indépendantes elles-mêmes ont d'abord été examinées par l'analyse des coefficients de corrélation de Spearman. Les variables dépendantes et une variable indépendante (densité du réseau routier pavé) ont subi une transformation logarithmique (ln). 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. Tous les tests ont été réalisés à un niveau de probabilité de 5 %. Dans tous les modèles développés, les résidus ne présentaient pas d'autocorrélation et les coefficients de régression ont par conséquent 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 15 stations n'ayant pas servi à leur développement et présentant une superficie drainée variant de 142 à 23 728 km² (figures 3 et 4, annexe 3). Plusieurs modèles ayant été développés pour chaque variable dépendante, le modèle optimal a été sélectionné à la suite de l'examen du pourcentage de la variance expliquée (coefficient de détermination du modèle empirique), du pourcentage de biais entre les valeurs mesurées et prédites (PBIAS), de la statistique de Nash-Sutcliffe (NSE), qui évalue l'adéquation des valeurs prédites et mesurées (annexe 4), ainsi que du coefficient de détermination et de la pente de la droite de régression entre les valeurs prédites et mesurées (Moriasi et collab., 2007).

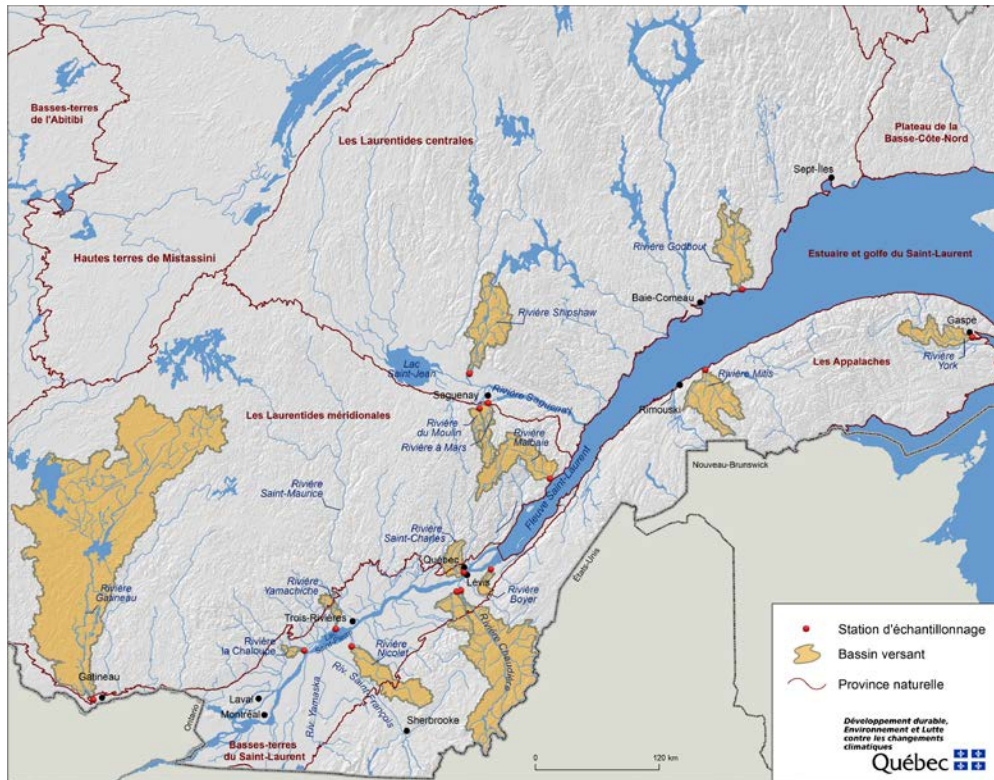


FIGURE 3 LOCALISATION DES 15 BASSINS VERSANTS SÉLECTIONNÉS POUR LA VALIDATION

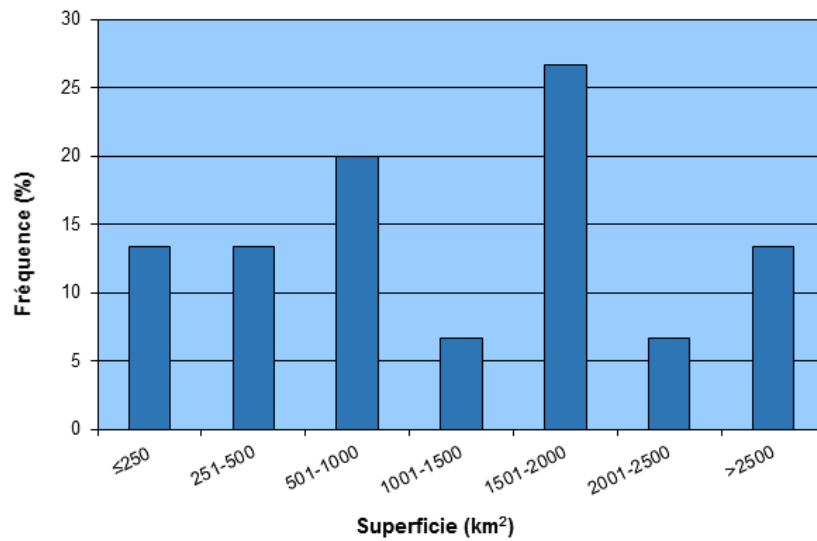


FIGURE 4 SUPERFICIE DES 15 BASSINS VERSANTS UTILISÉS POUR LA VALIDATION

Résultats et discussion

Arsenic et cadmium extractibles

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 Barlow (08070475) a été retirée de la procédure pour la modélisation de l'arsenic parce qu'elle présentait une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. 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, différents modèles ont été obtenus, mais aucun ne présentait un pouvoir prédictif acceptable (figures 5 et 6). En effet, les pentes des droites de régression et les coefficients de détermination entre les médianes prédites et mesurées sont faibles et les NSE sont sous le seuil souhaité de 0,60 (l'ajustement parfait des valeurs prédites et mesurées produisant un NSE = 1).

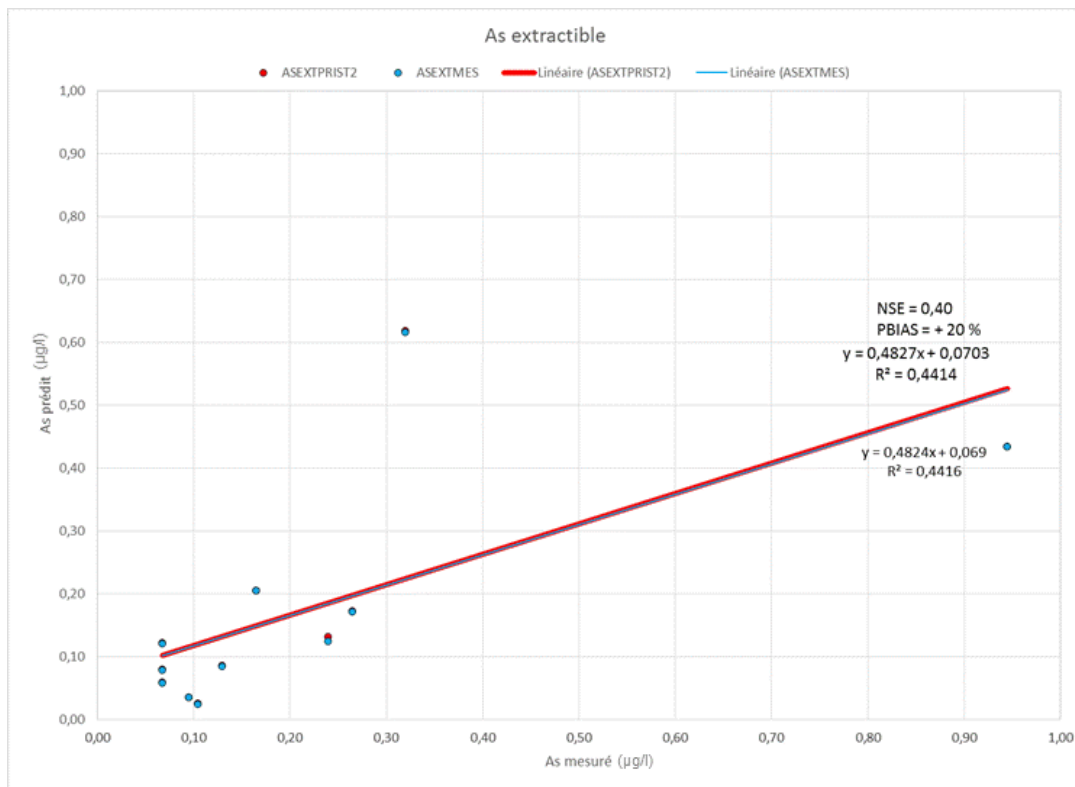


FIGURE 5 ARSENIC EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

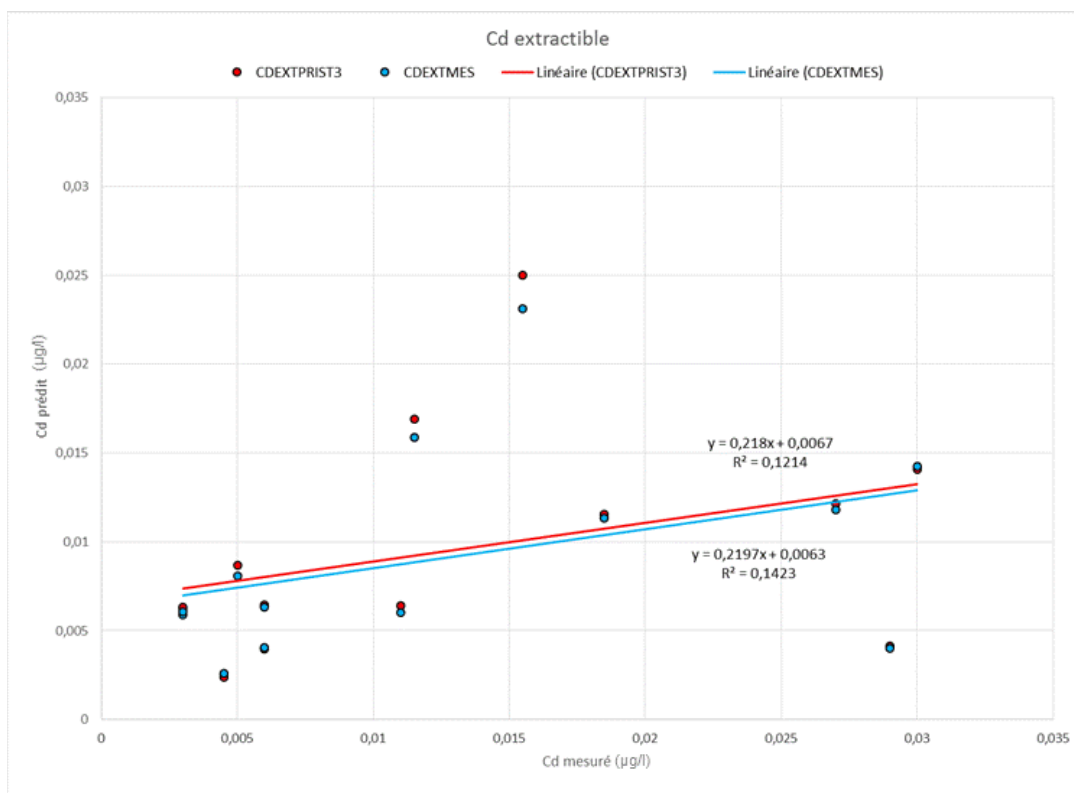


FIGURE 6 CADMIUM EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Chrome extractible

À la suite d'un diagnostic d'influence, la station située à la tête de la rivière Bourlamaque (08010126) et celle située sur la rivière Bousquet (04300452) ont été retirées de la procédure de régression multiple parce qu'elles présentaient une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. Les concentrations médianes observées aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,06 et 4,45 µg/l pour le chrome extractible et de 1 à 47 mg/l pour les MES (voir l'annexe 5 pour le domaine d'application du modèle pour les autres variables indépendantes). Après plusieurs essais, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN}(\text{CREXT}) = -0,520 + 0,0645(\text{MES}) - 0,0248(\text{ALT}) - 0,0143(\text{TILL})$$

$$R^2 = 0,90$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Concentration médiane en MES : 75 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations : +8 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts glaciaires : +7 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance est constante. Le modèle développé explique 90 % de la variance observée dans les concentrations médianes en chrome extractible (In). 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 la concentration médiane de matières en suspension (MES). Si l'on ne tenait compte que de cette variable, le pourcentage de la variance expliquée par le modèle serait de 75 %. En prenant aussi en considération le pourcentage du bassin versant couvert de dépôts d'altérations (ALT), le pourcentage de la variance expliquée atteint 83 %. L'ajout du pourcentage du bassin versant couvert de dépôts glaciaires (TILL) permet d'expliquer 7 % de plus de la variance.

Le modèle a été validé sur 14 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 7). La plage des concentrations médianes en chrome aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,095 et 2,70 µg/l et la plage des concentrations médianes en MES allait de 1 à 18 mg/l. La rivière Yamachiche (05300004) n'a pas été retenue pour la figure 7, la valeur prédite étant plus de trois fois supérieure à la valeur mesurée (9,1 µg/l par rapport à 2,75 µg/l). Le modèle ne semble donc pas bien performer lorsque les MES sont très élevées (51 mg/l dans le cas de la Yamachiche). En ne considérant pas la Yamachiche, les concentrations médianes prédites et mesurées présentent un très bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,93$), mais la pente de la droite de régression est de 0,60. Le NSE est de 0,79 et le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 19 % (PBIAS = +19 %) les concentrations médianes de chrome extractible.

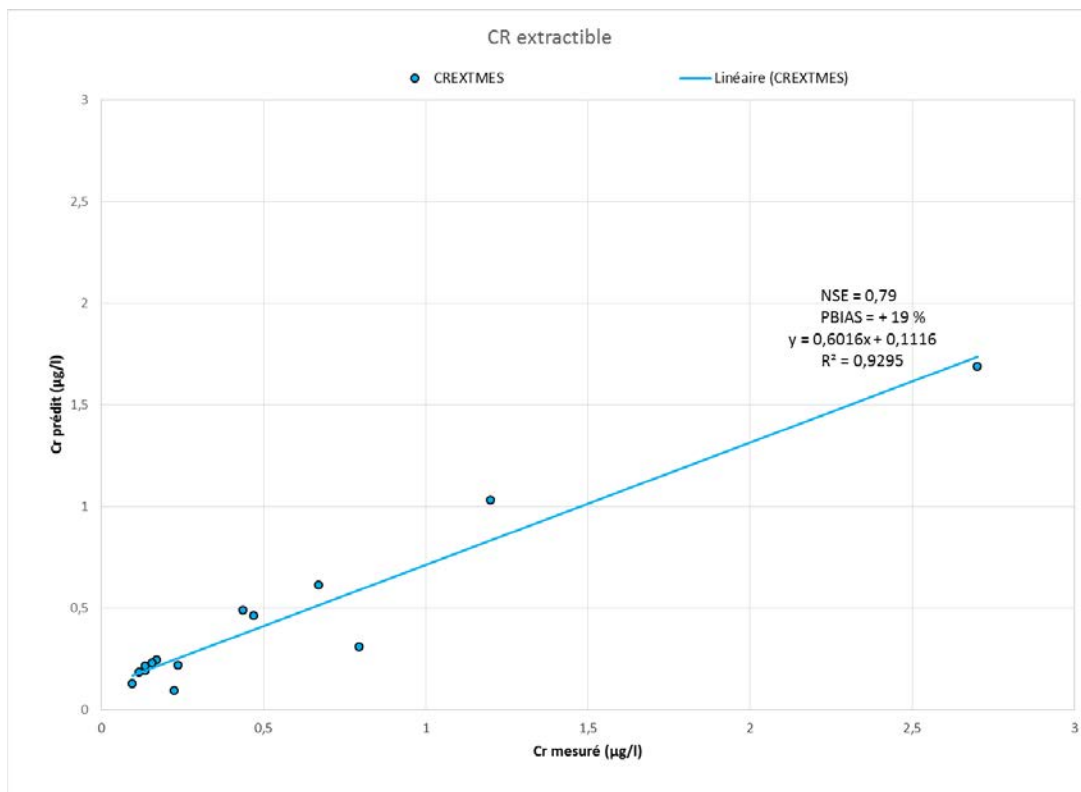


FIGURE 7 CHROME EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Cuivre extractible

Pour la modélisation du cuivre extractible, toutes les stations ont été utilisées (valeur absolue de DFFITS < 2,0). Les concentrations médianes utilisées pour la modélisation variaient entre 0,165 et 4,9 µg/l pour le cuivre extractible et de 1 à 47 mg/l pour les MES (voir l'annexe 5 pour le domaine d'application du modèle pour les autres variables indépendantes). 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 :

$$\text{LN}(\text{CUEXT}) = 0,989 + 0,0168(\text{CULTURES}) + 0,176\text{LN}(\text{DENRRP}) + 0,402(\text{GEO17}) + 0,0193(\text{MES})$$

$$R^2 = 0,86$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Pourcentage du bassin versant occupé par les cultures : 58 %
- Densité du réseau routier pavé : +14 %
- Pourcentage du bassin versant avec roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiqes : +12 %
- Concentration médiane en MES : +2 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance est constante. Le modèle développé explique 86 % de la variance observée dans les concentrations médianes en cuivre extractible (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage de la superficie du bassin versant consacrée aux cultures (CULTURES). Si l'on ne tenait compte que de cette variable, le pourcentage de la variance expliquée serait de 58 %. En prenant aussi en considération la densité du réseau routier pavé (DENRRP), le pourcentage de variance expliquée augmente de 14 %. Cette variable représente l'occupation humaine ainsi que les zones urbanisées et elle est fortement corrélée avec la densité de population en amont ($r_{\text{spearman}} = 0,90$). L'ajout de la variable liée aux caractéristiques du territoire, soit le pourcentage du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiqes (GEO17), permet d'expliquer 12 % de plus de la variance. Enfin, en considérant la concentration médiane en MES, le pourcentage de variance expliquée augmente de 2 %. L'ajout de cette dernière variable augmente peu le pourcentage de variance expliquée, mais le fait de l'inclure dans le modèle augmente de beaucoup l'ajustement des valeurs prédites et des valeurs mesurées.

Le modèle a été validé sur 15 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 8). La plage des concentrations médianes aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,235 et 3,5 µg/l pour le cuivre extractible et entre 1 et 51 mg/l pour les MES. Les concentrations médianes prédites et mesurées présentent un bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,82$), un NSE élevé (0,81) et la pente de la droite de régression est de 0,88. Le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 5 % en moyenne (PBIAS = +5 %) les concentrations médianes de cuivre extractible.

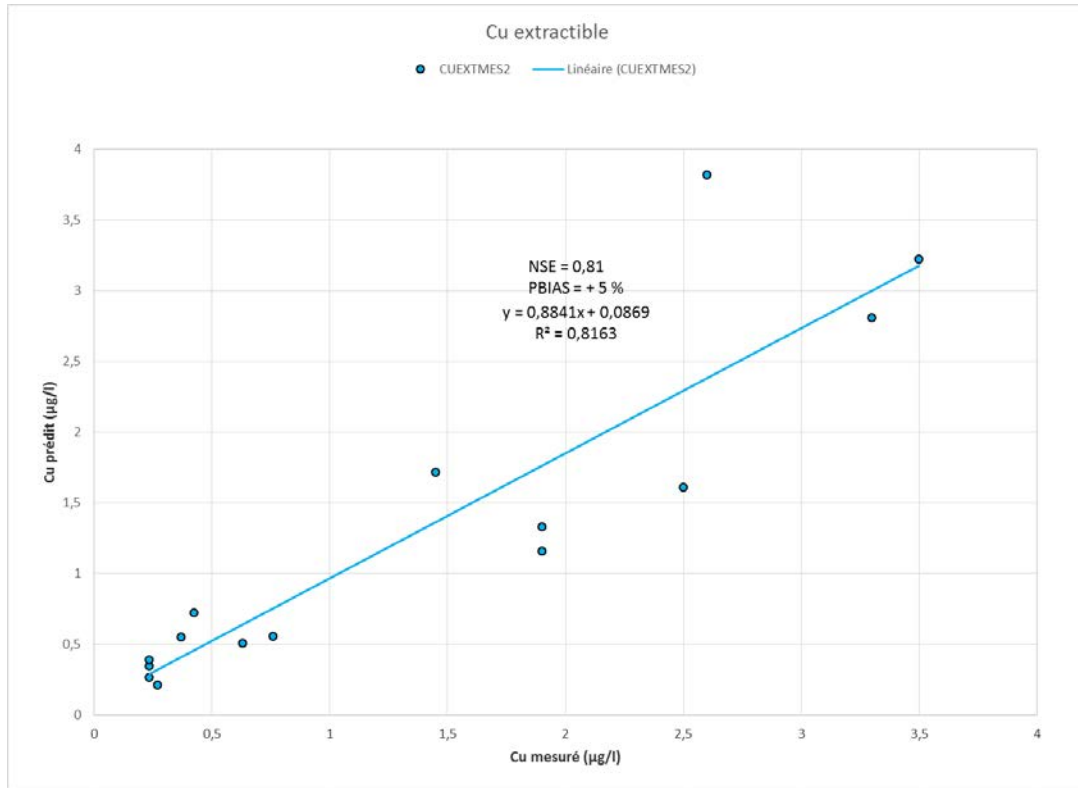


FIGURE 8 CUIVRE EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Nickel extractible

À la suite d'un diagnostic d'influence, les stations situées sur la rivière Bousquet (04300452) et à l'embouchure de la rivière Etchemin (02330001) ont été retirées de la procédure de régression multiple parce qu'elles présentaient une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. Les concentrations médianes de nickel extractible aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,175 et 4,4 µg/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 :

$$\text{LN}(\text{NIEXT}) = 0,550 + 0,028(\text{CULTURES}) + 0,173\text{LN}(\text{DENRRP}) + 0,620(\text{GEO17}) + 0,429(\text{EOL}) + 1,633(\text{GEO14})$$

$$R^2 = 0,84$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Pourcentage du bassin versant occupé par les cultures : 63 %
- Densité du réseau routier pavé : +11 %
- Pourcentage du bassin versant avec roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiques : +6 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts éoliens : +2 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des roches volcaniques felsiques : +2 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance constante. Le modèle explique 84 % de la variance observée dans les concentrations médianes de nickel extractible (In). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage du bassin versant consacré aux cultures (CULTURES). Un modèle ne tenant compte que de cette variable expliquerait 63 % de la variance. En ajoutant la densité du réseau routier pavé (DENRRP), le pourcentage de la variance expliquée atteint 74 %. L'ajout du pourcentage de bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiqes (GEO17) contribue à expliquer 3 % de plus de la variance. Enfin, l'ajout du pourcentage de la superficie amont recouverte de dépôts éoliens (EOL) et de roches volcaniques felsiques (GEO14) contribue à expliquer chacun 2 % de plus de la variance.

Le modèle a été validé sur 14 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 9). La plage des concentrations médianes en nickel extractible observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,170 et 3,35 µg/l. La rivière la Chaloupe (05230001) n'a pas été retenue pour la figure 9, la valeur prédite étant près de 10 fois supérieure à la valeur mesurée (32,4 µg/l par rapport à 3,55 µg/l). Le pourcentage de ce bassin versant occupé par les dépôts éoliens atteint 5 %, tandis que le domaine de développement du modèle se situe entre 0 et 2,27 %. De plus, les cultures occupent 69 % de sa superficie alors que tous les bassins versants ayant servi au développement du modèle présentent des superficies en culture variant entre 0 et 55 % (sauf le bassin de la Petite Yamachiche qui affiche un pourcentage de 81 %). En ne considérant pas la rivière la Chaloupe, les concentrations médianes prédites et mesurées présentent un assez bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,72$) et la pente de la droite de régression est de 0,65. Le NSE est assez élevé (0,66) et le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 23 % en moyenne (PBIAS = +23 %) les concentrations médianes de nickel extractible.

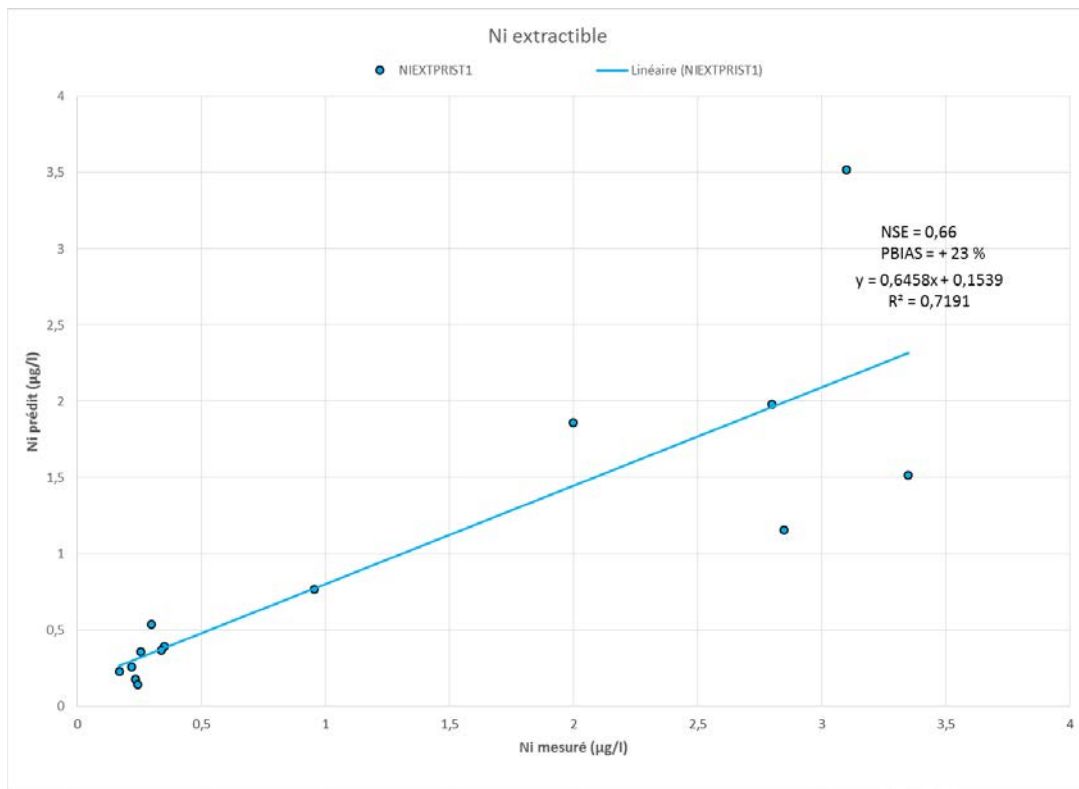


FIGURE 9 NICKEL EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Plomb extractible

Pour la modélisation du plomb extractible, toutes les stations ont été utilisées (valeur absolue de DFFITS < 2,0). Les concentrations médianes de plomb extractible aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,015 et 0,86 µg/l. Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN(PBEXT)} = 0,168 + 0,248\text{LN(DENRRP)} - 0,0256(\text{ALT}) + 0,0365(\text{MES}) + 0,0568(\text{ORG}) - 0,0648(\text{FGP})$$

$$R^2 = 0,90$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Densité du réseau routier pavé : 46 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations : +25 %
- Concentration médiane en MES : +9 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts organiques : +8 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts fluvioglaciaires proglaciaires : +2 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance constante. Le modèle développé explique 90 % de la variance observée dans les concentrations médianes de plomb extractible (ln). La première variable incluse dans le modèle est la densité du réseau routier pavé (DENRRP). Cette variable explique à elle seule 46 % de la variance. En ajoutant le pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations (ALT), le pourcentage de la variance expliquée augmente de 25 %. L'ajout de la concentration médiane en MES contribue à expliquer 9 % de plus de la variance. En ajoutant le pourcentage du bassin versant couvert de dépôts organiques (ORG) et de dépôts fluvioglaciaires proglaciaires (FGP), le pourcentage de variance expliquée augmente respectivement de 8 % et 2 %.

Le modèle a été validé sur 15 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 10). La plage des concentrations médianes en plomb extractible observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,040 et 0,655 µg/l. Les concentrations médianes mesurées et prédites présentent un bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,74$) et la pente de la droite de régression est de 0,66. Le NSE est assez élevé (0,69) et le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 18 % en moyenne (PBIAS = +18 %) les concentrations médianes de plomb extractible.

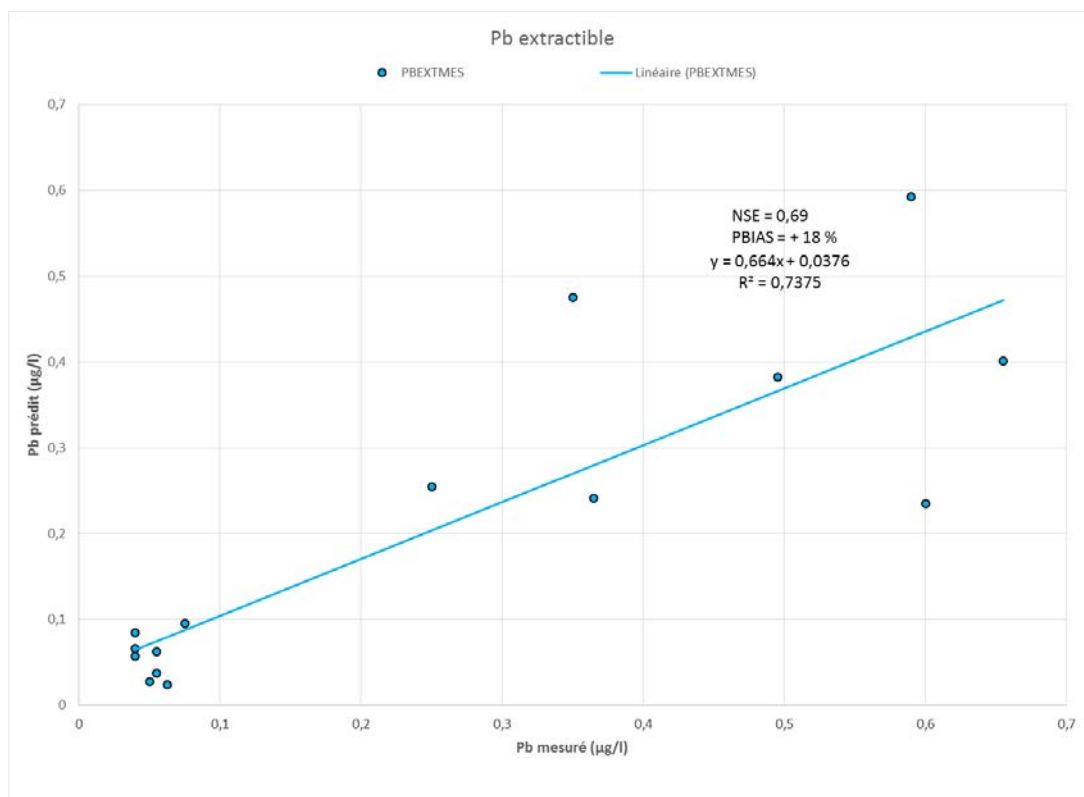


FIGURE 10 PLOMB EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Zinc extractible

À la suite d'un diagnostic d'influence, la station située à l'embouchure de la rivière de la Petite Nation (04040001) a été retirée de la procédure de régression multiple parce qu'elles présentaient une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. Les concentrations médianes de zinc extractible aux stations retenues pour la modélisation variaient entre 0,35 et 8,85 µg/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 :

$$\text{LN}(\text{ZNEXT}) = 1,563 - 0,0206(\text{ALT}) + 0,0377(\text{MES}) + 0,288(\text{GEO17}) + 0,116\text{LN}(\text{DENRRP}) - 0,146(\text{GEO8})$$

$$R^2 = 0,86$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations : 46 %
- Concentration médiane en MES : +27 %
- Pourcentage du bassin versant avec roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiques : +6 %
- Densité du réseau routier pavé : +5 %
- Pourcentage du bassin versant avec roches métamorphiques carbonatées : +2 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance constante. Le modèle développé explique 86 % de la variance observée dans les concentrations médianes de zinc extractible (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'altérations (ALT). Cette variable explique à elle seule 46 % de la variance des concentrations médianes de zinc extractible. L'ajout de la concentration médiane en MES augmente le pourcentage de variance expliquée de 27 %. En ajoutant le pourcentage du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches volcaniques ultramafiques et ultrabasiqes (GEO17), le pourcentage de variance expliquée augmente de 6 %. L'ajout de la densité du réseau routier pavé (DENRRP) et du pourcentage du bassin versant dont le socle rocheux est constitué de roches métamorphiques carbonatées (GEO8) permet d'augmenter le pourcentage de variance expliquée de 5 % et 2 % respectivement.

Le modèle a été validé sur 15 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 11). La plage des concentrations médianes en zinc extractible observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 0,35 et 11 µg/l. Les concentrations médianes mesurées et prédites présentent un très bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,85$) et la pente de la droite de régression est de 0,97. Le NSE est élevé (0,82) et le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 7 % en moyenne (PBIAS = +7 %) les concentrations médianes de zinc extractible.

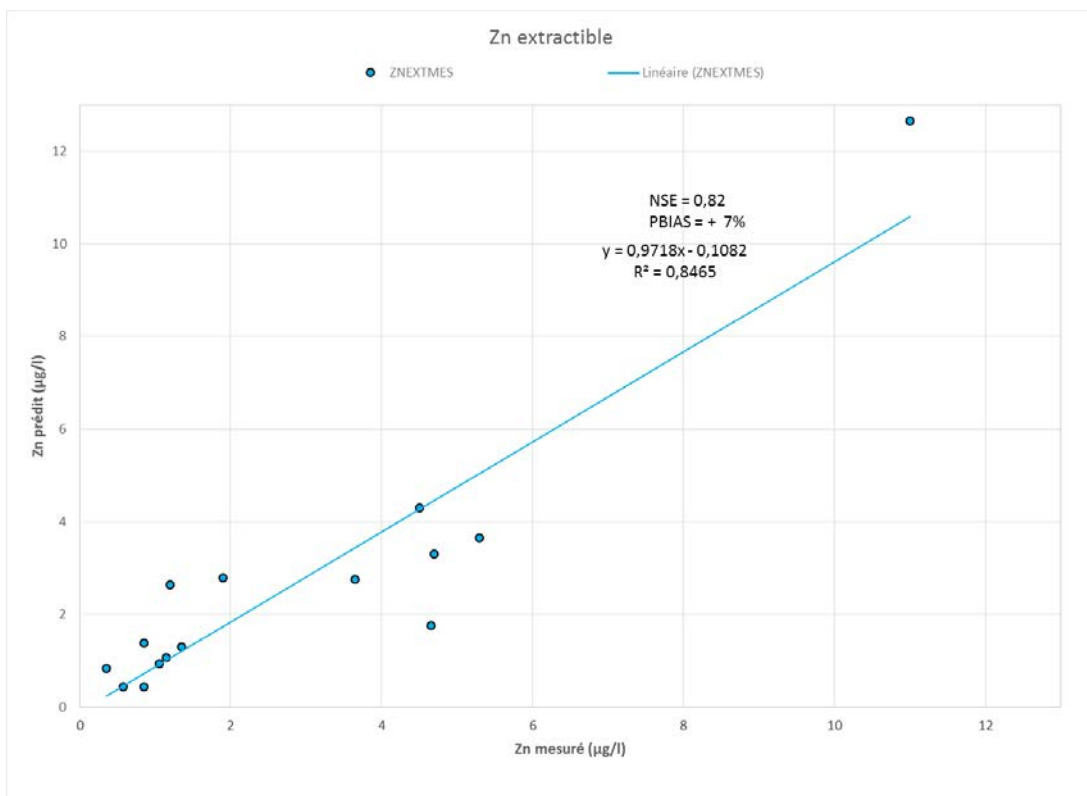


FIGURE 11 ZINC EXTRACTIBLE, CONCENTRATIONS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Dureté

À la suite d'un diagnostic d'influence, les stations situées sur les rivières Bourlamaque (08010126), Barlow (08070475) et Bousquet (04300052) ont été retirées de la procédure de régression multiple parce qu'elles présentaient une influence trop grande (valeur absolue de DFFITS > 2,0) sur les résultats de la régression. La dureté médiane aux stations retenues pour la modélisation variait entre 5,5 et 206,8 mg/l (CaCO₃). Après plusieurs essais avec la procédure de régression multiple pas à pas, le modèle suivant a été obtenu :

$$\text{LN(DURETE)} = 5,158 - 0,017(\text{TILL}) - 0,0124(\text{GEO5}) + 209,806(\text{DENRRP}) - 0,0443(\text{AFFROC}) - 0,0605(\text{TOURBIERES})$$

$$R^2 = 0,88$$

Pourcentage de variance expliquée par l'ajout de chaque variable :

- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts glaciaires : 52 %
- Pourcentage du bassin versant avec roches métamorphiques felsiques : +17 %
- Densité du réseau routier pavé : +10 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'affleurements rocheux : +6 %
- Pourcentage du bassin versant couvert par des tourbières : +3 %

Les résidus ne présentent pas d'autocorrélation, leur distribution est normale et leur variance constante. Le modèle développé explique 88 % de la variance observée dans les duretés (ln). La première variable incluse dans le modèle est le pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts glaciaires (TILL). Cette variable explique à elle seule 52 % de la variance observée dans les duretés médianes. L'ajout du pourcentage du bassin versant avec roches métamorphiques felsiques (GEO5) augmente le pourcentage de variance expliquée de 17 %. En ajoutant la densité du réseau routier pavé (DENRRP), le pourcentage de variance expliquée augmente de 10 %. L'ajout du pourcentage du bassin versant couvert par des dépôts d'affleurements rocheux (AFFROC) et par des tourbières (TOURBIERES) permet d'augmenter le pourcentage de variance expliquée de 6 % et 3 % respectivement.

Le modèle a été validé sur 15 bassins versants n'ayant pas servi à son développement (figure 12). La plage des duretés médianes observées aux stations ayant servi à la validation se situait entre 7,7 et 194,5 mg/l (CaCO₃). Les duretés médianes mesurées et prédites présentent un bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,78$) et la pente de la droite de régression est de 0,81. Le NSE est élevé (0,77) et le modèle retenu a tendance à sous-estimer de 8 % en moyenne (PBIAS = +8 %) les duretés médianes.

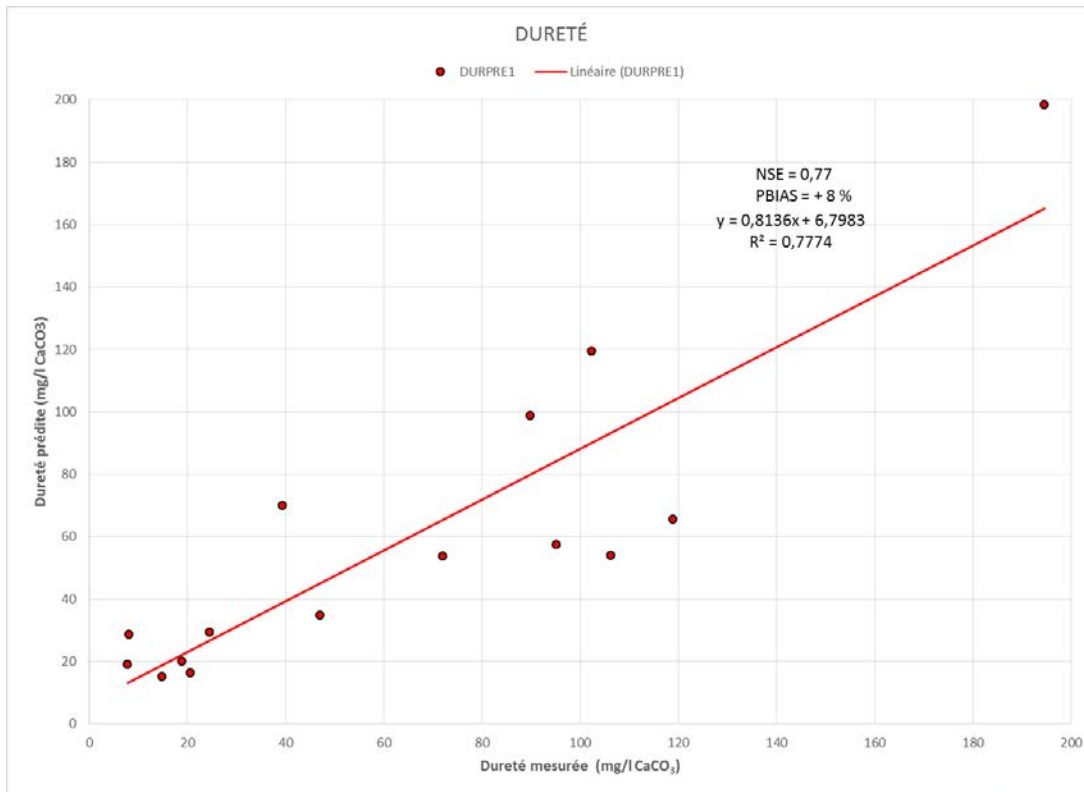


FIGURE 12 DURETÉS MÉDIANES PRÉDITES VS MESURÉES

Conclusion

Les modèles prédictifs développés pour la dureté et pour la forme extractible du chrome, du cuivre, du nickel, du plomb et du zinc pourraient être utilisés pour estimer les valeurs ou concentrations médianes dans des bassins ou sous-bassins versants où aucune donnée n'est disponible. Ces modèles pourraient être assez performants pour estimer les valeurs médianes amont nécessaires au calcul d'objectifs environnementaux de rejet lors de l'implantation de certaines industries. Les modèles ne sont cependant pas performants dans le cas de l'arsenic et du cadmium. Pour les autres métaux mentionnés, le domaine d'application des modèles est toutefois limité (annexe 5). Certains bassins versants ont été exclus lors du développement des modèles parce qu'ils avaient une influence trop grande sur les modèles de régression en raison de particularités géologiques ou édaphiques. Dans le cas où le domaine d'application d'un modèle n'est pas respecté, il faut utiliser celui-ci avec précaution. Les modèles ont été validés pour des bassins versants localisés au sud du 51^e parallèle dont la superficie varie de 142 à 23 728 km² et où il n'y avait pas d'activités minières ou industrielles susceptibles de constituer une source importante de métaux. Les modèles ne peuvent donc pas être utilisés au nord du 51^e parallèle ou dans des secteurs influencés par des activités minières.

Dans le sud du Québec, les variables territoriales ayant le plus d'influence sur les concentrations médianes en cuivre et en nickel extractibles sont la proportion du bassin versant consacré aux cultures et la densité du réseau routier pavé. Plus les superficies en culture sont importantes, plus il y a de sol à nu et plus il y a de ruissellement de surface et d'érosion éolienne augmentant les apports de métaux aux cours d'eau. La densité du réseau routier pavé est quant à elle liée à la présence humaine sur le territoire et ainsi à la présence d'activités pouvant être une source pour ces métaux. Dans le cas du plomb, la densité du réseau routier pavé est la variable la plus influente (46 % de la variance expliquée). Le transport routier comme tel n'est probablement pas l'unique source de plomb. Plus la densité du réseau routier pavé est élevée, plus la densité de résidences et de petites entreprises industrielles est élevée. En plus des activités humaines, la tuyauterie en plomb reliant plusieurs résidences aux réseaux d'approvisionnement en eau potable pourrait être une source non négligeable, le plomb se retrouvant finalement dans les eaux usées municipales et ultimement dans les rivières.

La fenêtre temporelle n'étant pas la même pour chaque rivière et les conditions hydrologiques étant différentes d'une année à l'autre, un certain bruit a pu être introduit dans les modèles. L'inclusion des MES (variable corrélée au débit et au ruissellement de surface) dans les modèles développés pour le chrome, le cuivre, le plomb et le zinc permet cependant de tenir compte en partie de cette variabilité.

Bibliographie

- BAKER, A. 2006. « Land Use and Water Quality ». Dans *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley & Sons, vol. 1, p. 16-188.
- 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.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). 2016. *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 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* (Gaëtan Morin, éditeur), Québec, 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° 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. 2015. *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. 2011. *Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) [Données numériques vectorielles]*. Québec, Direction de l'expertise en biodiversité, MDDELCC-DEB, 1/20 000.

ANNEXE 1 STATIONS UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION ET ANNÉES DE SUIVI

No Station	Rivière	Latitude	Longitude	Année du suivi	Superficie (km ²)
02030001	Saint-Jean	48,7717060	-64,4749290	2013	1 101
02070001	Grande Vallée	49,2165551	-65,1307100	2013	169
02080005	Madeleine	49,2350450	-65,3148790	2013	1 233
02150002	Cap-Chat	49,0716980	-66,6712750	2013	730
02160018	Matane	48,8436580	-67,5285080	2013	1 669
02200019	Rimouski	48,4187180	-68,5538930	2013	1 605
02250005	du Loup	47,8411540	-69,5319100	2014	1 044
02310004	du Sud	46,9750450	-70,5557140	2014	1 269
02330001	Etchemin	46,7598230	-71,2282740	2008	1 466
02340037	Chaudière (aval)	46,7286500	-71,2881400	2010 - 2014	6 629
02360014	du Chêne	46,5546620	-71,9688820	2009	793
02370002	Petite Rivière du Chêne	46,5409750	-72,0920830	2011	378
02390001	Gentilly	46,3825710	-72,3362320	2011	311
02400004	Bécancour	46,3526800	-72,4388060	2009	2 583
03010008	Nicolet	46,1542130	-72,5376590	2009	1 669
03030023	Yamaska	46,0048810	-72,9106910	2009 - 2014	4 460
04010002	du Nord	45,5625690	-74,3367890	2010	2 082
04020001	Rouge	45,6438540	-74,6909110	2010	5 547
04040001	de la Petite Nation	45,6051040	-75,1262840	2010	2 250
04060162	du Lièvre	45,5960480	-75,4204980	2010	9 456
04300452	Bousquet	48,2296860	-78,5533200	2012	317
04640003	Mascouche	45,7210450	-73,5822600	2011	395
05010532	Saint-Maurice	46,3521010	-72,5306680	2009 - 2014	42 652
05020006	Champlain	46,4677380	-72,3318950	2011	300
05030001	Batiscan	46,5274740	-72,3394090	2009	4 604
05040006	Blanche	46,6738070	-72,1317800	2008	219
05040196	Sainte-Anne (aval)	46,5838400	-72,2245900	2008	2 700
05070012	Portneuf	46,6947780	-71,8837430	2011	360
05080105	Jacques-Cartier	46,6938610	-71,7495650	2009	2 458
05090014	Lorette	46,8087390	-71,3186910	2008	71
05090015	du Berger	46,8119800	-71,2938930	2008	66
05100014	Montmorency	46,8924010	-71,1480220	2008	1 140
05120021	Sainte-Anne-du-Nord	47,0486870	-70,8831030	2014	1 077
05130016	du Gouffre	47,4416210	-70,5048680	2014	988
05220544	l'Assomption	45,7396360	-73,4791700	2009 - 2014	4 199
05240001	Bayonne	46,0945270	-73,1729020	2011	363
05250002	Chicot	46,1257220	-73,1451570	2011	165
05260038	Maskinongé	46,1867980	-73,0332940	2009	1 092
05280001	du Loup	46,2449160	-72,9251960	2009	1 501
05290001	Petite Rivière Yamachiche	46,2795410	-72,8363220	2011	107
06070006	à Mars (aval)	48,3352600	-70,8808710	2014	665
06090002	du Moulin aval	48,4298800	-71,0334790	2014	369
06100007	Chicoutimi	48,4243130	-71,0808470	2014	3 476
06190001	Ashuapmushuan	48,6587980	-72,4458690	2014	15 366
06210001	Mistassini	48,8856340	-72,2282200	2014	12 004
06250001	Shipshaw (aval)	48,5067430	-71,2726370	2014	2 220
07020002	des Escoumins	48,3446700	-69,4085700	2013	796
07050001	Sault-aux-Cochons	48,7239230	-69,1010740	2013	1 915
07190016	aux Rochers	50,0236210	-66,8666070	2013	4 102
08010126	Bourlamaque	47,9816950	-77,8233820	2012	75
08070475	Barlow	50,1379230	-74,2917170	2012	362

ANNEXE 2 SOURCES 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, MDDELCC (données issues des travaux de photo-interprétation)		1/20 000	Annuelle	Sud du Québec
Cadre de référence hydrologique du Québec : plans d'eau, Direction du patrimoine et des parcs, 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 m	Annuelle	Sud du Québec
Système d'information écoforestière, MRN	SIEF	1/20 000	Annuelle	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, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts et ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2010)	CCTQ	Résolution 30 m	Aucune	Le Québec
Carte préliminaire de végétation du Nord MRNF (2013)		Résolution 30 m	Aucune	Nord du Québec
Base de données topographique du Québec à l'échelle de 1/20 000, MRN pour les chemins de fer et les aires désignées (vergers, haldes, mines, dépotoirs, bancs d'emprunt, carrières, étangs d'épuration)	BDTQ	1/20 000	Aucune	Sud du Québec
Base de données topographiques à l'échelle de 1/50 000 du gouvernement fédéral, Ressources naturelles Canada	CANVEC	1/50 000	Irrégulière	Nord du Québec

ANNEXE 3 STATIONS UTILISÉES POUR LA VALIDATION ET ANNÉES DE SUIVI

No Station	Rivière	Latitude	Longitude	Superficie (km ²)	Année du suivi
02040001	York	48,8354750	-64,5915140	1 024	2013
02190014	Mitis	48,6224100	-68,1376740	1 806	2013
02300001	Boyer	46,8539630	-70,8779660	208	2008
02340034	Beaurivage	46,6512070	-71,3007570	695	2008
02340108	Chaudière	46,6628740	-71,2489970	5 862	2008
03010009	Nicolet Sud-Ouest	46,1296560	-72,5951940	1 580	2009
04080003	Gatineau	45,4873150	-75,7483770	23 728	2010
05090017	Saint-Charles	46,8192920	-71,2237190	528	2008 - 2014
05150001	Malbaie	47,6586290	-70,1540370	1 840	2014
05230001	la Chaloupe	46,0668290	-73,1816410	142	2011
05300004	Yamachiche	46,2733030	-72,8052990	264	2011
06070012	à Mars (amont)	48,3036830	-70,9873690	608	2014
06090013	du Moulin (amont)	48,2521130	-71,0976520	308	2014
06250034	Shipshaw (amont)	48,5534610	-71,2491080	2 194	2014
07140001	Godbout	49,3202070	-67,6383140	1 602	2013

ANNEXE 4 FORMULES POUR LE CALCUL DU NSE ET DU PBIAS

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

PBIAS (Percent Bias) :

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

Y_i^{obs} : i^{ème} valeur observée

Y_i^{sim} : i^{ème} valeur prédite

Y^{mean} : moyenne des valeurs observées

ANNEXE 5 DOMAINE DE DÉVELOPPEMENT ET D'APPLICATION DES MODÈLES

Variable	Description	Développement		Validation	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
CREXT	Chrome extractible (µg/l)	0,06	4,45	0,095	2,7
CUEXT	Cuivre extractible (µg/l)	0,165	4,90	0,235	3,5
NIEXT	Nickel extractible (µg/l)	0,175	4,40	0,170	3,35
PBEXT	Plomb extractible (µg/l)	0,015	0,86	0,040	0,655
ZNEXT	Zinc extractible (µg/l)	0,35	8,85	0,35	11
DURETE	Dureté (mg/l CaCO ₃)	5,5	207	7,7	194,5
MES	Matières en suspension (mg/l)	0,75	47	1	51
GEO5	Roches métamorphiques felsiques (% du bassin)	0	87,3	0	56,8
GEO8	Roches métamorphiques carbonatées (% du bassin)	0	10,1	0	8,9
GEO14	Roches volcaniques felsiques (% du bassin)	0	1,1	0	0,6
GEO17	Roches volcaniques ultramafiques/ultrabasiques (% du bassin)	0	4,5	0	0
AFFROC	Dépôts d'affleurements rocheux (% du bassin)	0	39,5	0	17,7
ALT	Dépôts d'altérations (% du bassin)	0	85,7	0	68,6
EOL	Dépôts éoliens (% du bassin)	0	2,3	0	4,9
FGP	Dépôts fluvioglaciaires proglaciaires (% du bassin)	0	11,4	0,3	12,7
ORG	Dépôts organiques (% du bassin)	0	22,6	1,3	12,3
TILL	Dépôts glaciaires - till (% du bassin)	1,2	88,3	5,9	88,6
CULTURES	Cultures (% du bassin)	0	81	0	69,8
TOURBIERES	Tourbières (% du bassin)	0	21,1	1	6,9
DENRRP	Densité du réseau routier pavé (km/km ²)	0	0,005	≈ 0	0,003
SUPERFICIE	Superficie du bassin (km ²)	66	42 652	142	23 728

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

Québec 